

**Análise fiabilística de um sistema instrumentado
de variáveis complexas na refinaria de Matosinhos**

Pedro Pina Neves

Dissertação de Mestrado

Orientador na FEUP: Prof. Luís Andrade Ferreira

Orientador na Empresa: Eng. Carlos Fagundes



**Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica
Ramo Projeto e Construção Mecânica**

Junho 2018

À Irene Abreu

Resumo

Num período em que as dificuldades económicas são transversais a todos os setores, a indústria petroquímica não foge a esse domínio, tornando-se cada vez mais basilar a aposta na manutenção dos equipamentos já instalados. Assim, a definição de um conjunto de ações que objetivem assegurar o correto funcionamento de um determinado bem ao longo de um intervalo de tempo pré-definido é fundamental para a prosperidade da empresa.

A presente dissertação apresenta como objetivo primordial explicitar e avaliar o comportamento de um conjunto de trinta válvulas, através da análise do registo histórico de manutenção de cada um dos equipamentos e pela aplicação da metodologia *Reliability Centered Maintenance*. Com a finalidade de analisar a evolução da fiabilidade e o nível de desempenho dos equipamentos, recorreu-se a outras ferramentas, como o método de Weibull e Crow-AMSAA. Uma FTA foi ainda concebida com o intuito de se demonstrar as relações entre as potenciais falhas do sistema e as causas que tiveram na sua génese.

O projeto iniciou-se com o estudo e levantamento dos dados históricos de falhas das válvulas, tendo sido utilizadas ferramentas como o SAP e Microsoft Excel. No seguimento desta análise, aplicou-se a função de Weibull que comprovou o carácter duradouro dos equipamentos. Posteriormente, e procurando precisar acerca de futuras ocorrências, independentemente do modo de falha apresentado, empregou-se o método de Crow-AMSAA. A aplicação deste modelo permitiu detetar tendências nas avarias dos diferentes equipamentos e comprovar a adequação dos processos de renovação vigentes na empresa.

Na realização do projeto, contactou-se com uma das grandes limitações da área de Manutenção e Fiabilidade, a deficiência de dados. Os registos apresentavam algumas lacunas em termos de precisão e coerência, peculiarmente na definição dos modos de falha, dados do equipamento e tempos de reparação. Desta forma, foi possível compreender a importância de doutrinar todos os profissionais envolvidos a desenvolverem registos completos e objetivos, para mais tarde se realizarem ações de manutenção eficazes.

Reliability analysis of an instrumented system of complex variables in Matosinhos refinery

In a time where economic problems embrace all sectors, the petrochemical industry is no exception in that domain, becoming increasingly important to focus on maintenance of the installed equipment. Therefore, the definition of a set of measures that aim to ensure the proper functioning of a certain asset over a pre-set interval of time is fundamental to the company's prosperity.

The current thesis presents as the main goal clarify and measure a set of valves' behaviour, through the analysis of each equipment's maintenance history and by applying the methodology *Reliability Centered Maintenance*. With the purpose of analysing the evolution of reliability, other tools as Weibull and Crow-AMSAA methods were used. An FTA was still built in order to show the relationships between potential system's failures and its root causes.

The project began with the study and data collection of valves' failures, using tools as SAP and Microsoft Excel. Following this analysis, it was applied the Weibull distribution that proved the long-term nature of equipment. Afterwards, and seeking to state about future occurrences, regardless of its failure mode, Crow-AMSAA method was applied. The application of this model allowed to detect biases in failures of several equipment and proved the fitness of current revamping projects.

In this project, was established contact with one of the biggest issues in the area of maintenance and reliability, the lack of data. The records were inaccurate and incoherence, peculiarly in definition of failure modes, data of equipment and time involved during repair procedures. Thus, it was possible to understand the importance of indoctrinate all the involved professionals to develop complete and objectives records, in order to perform effective maintenance actions.

Agradecimentos

Em primeiro lugar, gostaria de manifestar o meu profundo agradecimento ao orientador na Faculdade, o Prof. Dr. Luís Andrade Ferreira, assim como aos orientadores na refinaria de Matosinhos, o Eng. Carlos Fagundes e Eng. Nuno Silva, pela disponibilidade, incentivo e colaboração demonstrada na orientação das diversas fases da presente dissertação. Agradeço não só pelo apoio infindável prestado a nível académico, mas também pelo contributo no meu desenvolvimento pessoal. Aos restantes profissionais da área da fiabilidade, obrigado pela hospitalidade e coadjuvação prestada sempre que solicitada. À refinaria de Matosinhos, a minha gratidão por todos os meios, financeiros e materiais, disponibilizados ao longo da realização deste projeto.

Aos meus pais, irmão, restante família e namorada, mais do que um agradecimento tributo-lhes permanente admiração, pelo constante acompanhamento e por tornarem, de uma ou outra forma, todo este percurso memorável.

Agradeço ainda a todos os meus amigos, por estarem presentes nesta etapa e em todas as que virão.

A todos, o meu muito obrigado.

Índice de Conteúdos

1	Introdução	1
1.1	Definição do problema	2
1.2	Objetivos.....	2
1.3	Metodologia adotada	2
1.4	Estrutura da dissertação	3
2	Projeto na Empresa.....	5
2.1	Refinaria de Matosinhos.....	5
2.2	Enquadramento na Empresa	7
3	Estado da Arte	11
3.1	Contextualização	11
3.1.1	Manutenção	11
3.1.2	Fiabilidade	13
3.1.3	Definição de função.....	14
3.1.4	Definição de falha.....	14
3.1.5	Modos de falha	15
3.1.6	Causas da falha	16
3.1.7	Itens Reparáveis e Não-Reparáveis	17
3.1.8	Análise dos modos de falha, seus efeitos e da sua criticidade (FMECA)	18
3.1.9	Árvore de falhas (FTA)	21
3.1.10	Manutenção Centrada na Fiabilidade (RCM).....	23
3.2	Métodos estatísticos.....	24
3.2.1	Teste de Laplace	26
3.2.2	Weibull	27
3.2.3	CROW-AMSAA	29
4	Unidade 1700.....	33
4.1	Enquadramento.....	33
4.2	PSA.....	33
4.2.1	Pressão nos adsorvedores	36
5	Válvulas de Controlo e de Bloqueio.....	39
5.1	Válvulas de Controlo.....	39
5.1.1	Válvulas de Controlo Globo	41
5.1.2	Válvula de Controlo Borboleta.....	45
5.2	Válvulas de Bloqueio	47
5.3	Caso de estudo	49
6	Análise da Fiabilidade	53
6.1	Modos de Falha	53

6.2 FMECA inicial	55
6.3 FMECA aplicada às válvulas em estudo	59
6.4 Árvore de Falhas (FTA)	66
6.5 Análise Estatística	66
6.5.1 Distribuição de Weibull.....	66
6.5.2 CROW-AMSAA	72
7 Conclusões e Perspetivas de Trabalhos Futuros.....	89
7.1 Conclusões.....	89
7.2 Perspetivas de Trabalhos Futuros	90
Referências	91
ANEXO 1 - Principais Problemas nas Válvulas Borboleta e Globo	93
ANEXO 2- FTA	96
ANEXO 3 – Tempos de funcionamento entre avarias	102
ANEXO 4 – Teste de Laplace e Análise de Weibull	105
ANEXO 5 – Teste de Laplace e método de Crow-AMSAA.....	111

Siglas

FCO - Fábrica de Combustíveis

FMEA - *Failure Modes and Effects Analysis*

FMECA - *Failure Modes and Effects and Critically Analysis*

FTA – *Fault Tree Analysis*

HPP – *Homogeneous Poisson Process*

IDD – *Independent and Identically Distributed*

MTBF – *Mean Time Between Failures*

MTTF – *Mean Time to Fail*

NHPP – *Non-Homogeneous Poisson Process*

PSA – *Pressure Swing Adsorption*

RCM – *Reliability Centered Maintenance*

ROCOF – *Rate of Occurrence of Failures*

RPN – *Risk Priority Number*

TQM – *Total Quality Maintenance*

TTF – *Time to Fail*

TTR – *Time to Repair*

Índice de Figuras

Figura 1-Configuração da refinaria de Matosinhos (Data Book de Segurança, Saúde e Ambiente 2013).....	5
Figura 2-Produtos do processo de refinação (Galp Energia 2010).....	6
Figura 3- Departamento de Gestão do Desempenho de Equipamentos e Renovação.....	7
Figura 4- Expectativas crescentes da manutenção (Moubay 1997)	12
Figura 5-Matriz de criticidade	20
Figura 6-Ranking qualitativo das forças de adsorção.....	34
Figura 7-Unidade PSA	35
Figura 8-Diferentes etapas da PSA.....	35
Figura 9-Diferentes componentes do posicionador	41
Figura 10-Válvula de Controlo Globo (Flowserve 2015)	42
Figura 11-Conjunto das sedes e obturador	42
Figura 12-Conjunto da gaiola, sede e obturador.....	43
Figura 13-Sede Resiliente.....	43
Figura 14-Empanques e guias ao longo do obturador	44
Figura 15-Válvula de Controlo Borboleta	45
Figura 16-Haste excêntrica.....	46
Figura 17-Válvula electropneumática	48
Figura 18-Conjunto das válvulas da unidade 1700	49
Figura 19-Fronteira definida para as válvulas segundo a norma ISO 14224	50
Figura 20-Matriz de criticidade das válvulas da unidade	62
Figura 21-Vena contracta (Skousen 1997)	93
Figura 22-Fenómeno de cavitação (Skousen 1997)	94
Figura 23-Pressão no fenómeno de "flashing" (Skousen 1997).....	94

Índice de Tabelas

Tabela 1-Escala da severidade.....	19
Tabela 2- Escala de probabilidade de ocorrência	19
Tabela 3-Escala de detetabilidade	20
Tabela 4-Simbologia frequente na elaboração de uma FTA	22
Tabela 5-Características de cada tipo de válvula estudada na unidade	49
Tabela 6-FMECA inicial	56
Tabela 7-FMECA aplicada.....	60
Tabela 8-Escala da probabilidade de ocorrência	62
Tabela 9-FMECA aplicada de acordo com as escalas numéricas das válvulas da unidade	64
Tabela 10-Parâmetros obtidos pela análise de Weibull para o modo de falha “Falha na Rotação do Disco”	67
Tabela 11- Parâmetros obtidos pela análise de Weibull para o modo de falha “Falha na Translação do Obturador”	68
Tabela 12- Parâmetros obtidos pela análise de Weibull para o modo de falha “Passagem na Válvula”.....	69
Tabela 13- Parâmetros obtidos pela análise de Weibull para o modo de falha “Execução Inadequada”	71
Tabela 14-Dados da XCV-1741 no modelo de Crow-AMSAA.....	72
Tabela 15-Dados da XCV-1753 no modelo de Crow-AMSAA.....	75
Tabela 16- Dados da XV-1712 no modelo de Crow-AMSAA	77
Tabela 17- Dados das válvulas de controlo borboleta no modelo de Crow-AMSAA	79
Tabela 18- Dados das válvulas de controlo globo no modelo de Crow-AMSAA	82
Tabela 19-Dados das válvulas de bloqueio no modelo de Crow-AMSAA.....	85
Tabela 20-Tempos de funcionamento entre avarias para a falha na rotação do disco	94
Tabela 21-Tempos de funcionamento entre avarias para a falha na translação do obturador..	94
Tabela 22-Tempos de funcionamento entre avarias para a execução inadequada	94
Tabela 23-Tempos de funcionamento para a passagem na Válvula.....	94
Tabela 24-Z de teste e respetivos limites para as válvulas de alimentação e repressurização .	94
Tabela 25-Z de teste e respetivos limites para as válvulas de envio ou receção de purga	94
Tabela 26- Z de teste e respetivos limites para as válvulas responsáveis pelo produto	94

Índice de Gráficos

Gráfico 1-Diferenças entre falha e avaria (Rausand e Hoyland 2004).....	15
Gráfico 2-Curva da banheira (Tobias e Trindade 2012).....	18
Gráfico 3-Relação entre a curva da banheira e o declive de Weibull β (O'Connor e Kleyner 2012).....	29
Gráfico 4-Número acumulado de falhas por tempo acumulado.....	29
Gráfico 5-Rejeição da hipótese nula e posterior correção do declive (Reliasoft 2009)	31
Gráfico 6- Distribuição de pressões nos diferentes adsorvedores	37
Gráfico 7-Curvas características inerentes às válvulas (Fisher 2005).....	40
Gráfico 8-Número de avarias consoante a função desempenhada pela válvula.....	50
Gráfico 9-Custos associados a cada válvula.....	51
Gráfico 10-Número de falhas consoante o modo de falha	53
Gráfico 11-Custo e número de avarias consoante o modo de falha	54
Gráfico 12-Situação vigente nas válvulas da unidade antes e após a intervenção	54
Gráfico 13-Representação de Weibull para a válvula XCV-1741- “Falha na Rotação do Disco”	68
Gráfico 14-Representação de Weibull para a válvula XCV-1733- “Falha na Translação do Obturador”	69
Gráfico 15-Representação de Weibull para a válvula XCV-1753- “Passagem na Válvula” ...	70
Gráfico 16-Representação de Weibull para a válvula XV-1712- “Execução Inadequada”	71
Gráfico 17-Distribuição das falhas na XCV-1741 ao longo do tempo.....	73
Gráfico 18-MTBF e função intensidade para a XCV-1741	74
Gráfico 19-Função de fiabilidade para a XCV-1741.....	74
Gráfico 20-Distribuição das falhas na XCV-1753 ao longo do tempo.....	75
Gráfico 21-MTBF e função intensidade para a XCV-1753	76
Gráfico 22-Função de fiabilidade para a XCV-1753.....	76
Gráfico 23-Distribuição das falhas na XV-1712 ao longo do tempo	77
Gráfico 24- Função de fiabilidade para a XV-1712	78
Gráfico 25- MTBF e função intensidade para a XV-1712	78
Gráfico 26- Distribuição das falhas nas válvulas de controlo borboleta ao longo do tempo ...	80
Gráfico 27- MTBF e função intensidade para as válvulas de controlo borboleta	81
Gráfico 28-Função de fiabilidade para as válvulas de controlo borboleta	82
Gráfico 29- Distribuição das falhas nas válvulas de controlo globo ao longo do tempo	83
Gráfico 30-MTBF e função intensidade para as válvulas de controlo globo	84
Gráfico 31-Função de fiabilidade para as válvulas de controlo globo	85
Gráfico 32- Distribuição das falhas nas válvulas de bloqueio ao longo do tempo.....	86

Gráfico 33-MTBF e função intensidade para as válvulas de bloqueio.....	87
Gráfico 34- Função de fiabilidade para as válvulas de bloqueio.....	88
Gráfico 35- Representação de Weibull para a válvula XCV-1761- “Falha na Rotação do Disco”	106
Gráfico 36- Representação de Weibull para a válvula XV-1722- “Falha na Rotação do Disco”	107
Gráfico 37-Representação de Weibull para a válvula XCV-1741- “Passagem na Válvula” .	107
Gráfico 38-Representação de Weibull para a válvula XCV-1751- “Passagem na Válvula” .	108
Gráfico 39-Representação de Weibull para a válvula XCV-1741- “Execução Inadequada”.	108
Gráfico 40- Representação de Weibull para a válvula XCV-1751- “Execução Inadequada”	109
Gráfico 41- Representação de Weibull para a válvula XCV-1761- “Execução Inadequada”	109
Gráfico 42- Representação de Weibull para a válvula XCV-1743- “Execução Inadequada”	110
Gráfico 43- Representação de Weibull para a válvula XCV-1753- “Execução Inadequada”	110
Gráfico 44-Z de teste e respetivos limites para as válvulas de controlo borboleta	111
Gráfico 45-Z de teste e respetivos limites para as válvulas de controlo globo	111
Gráfico 46- Z de teste e respetivos limites para as válvulas de bloqueio.....	111
Gráfico 47-Distribuição das falhas na XCV-1751 ao longo do tempo.....	112
Gráfico 48-MTBF e função intensidade para a XCV-1751	112
Gráfico 49-Função de fiabilidade para a XCV-1751.....	113
Gráfico 50-Distribuição das falhas na XCV-1761 ao longo do tempo.....	113
Gráfico 51-MTBF e função intensidade para a XCV-1761	114
Gráfico 52- Função de fiabilidade para a XCV-1761.....	114
Gráfico 53- Distribuição das falhas na XCV-1733 ao longo do tempo.....	115
Gráfico 54- MTBF e função intensidade para a XCV-1733	115
Gráfico 55-Função de fiabilidade para a XCV-1733.....	116
Gráfico 56-Distribuição das falhas na XCV-1743 ao longo do tempo.....	116
Gráfico 57-MTBF e função intensidade para a XCV-1743	117
Gráfico 58-Função de fiabilidade para a XCV-1743.....	117
Gráfico 59-Distribuição das falhas na XV-1722 ao longo do tempo	118
Gráfico 60-MTBF e função intensidade para a XV-1722	118
Gráfico 61-Função de fiabilidade para a XV-1722	119
Gráfico 62-Distribuição das falhas na XV-1742 ao longo do tempo	119
Gráfico 63-MTBF e função intensidade para a XV-1742	120
Gráfico 64- Função de fiabilidade para a XV-1742	120

1 Introdução

Engenharia é a ciência que procura soluções adequadas para problemas do quotidiano e visa aperfeiçoar todas aquelas que foram encontradas. Como tal, verifica-se um constante desenvolvimento que é traduzido num aumento da complexidade dos sistemas e custos associados, sendo assim impensável não abordar um parâmetro como a Fiabilidade.

Atualmente, a qualidade de um serviço ou produto é em parte definida pela “conformidade com as especificações”, ou seja, pelo cumprimento dos critérios estipulados pelo consumidor. No aglomerado desses critérios, consta inegavelmente o grau de confiança que o produto ou serviço oferece, isto é, a Fiabilidade. Nos dias de hoje, é esperada uma grande fiabilidade nos mais diversos produtos e serviços, tendo as empresas de se munir com um conjunto de ferramentas que permitam uma perspetiva de “melhoria contínua”. Esses utensílios passam não só por métodos de TQM (*Total Quality Management*) e seu aperfeiçoamento, como também por métodos estatísticos. Os métodos estatísticos representam um conjunto de procedimentos que, quando utilizados em conjunto, podem permitir a estabilização do processo e a redução de variabilidade. Sendo a fiabilidade expressa como uma probabilidade, esta redução de variabilidade conduz ao seu aprimoramento. Desta forma, a aplicação contextualizada destas ferramentas pode conduzir a grandes vantagens no aperfeiçoamento de produtos e processos.

A indústria de refinação envolve um mercado bastante competitivo, onde se geram avultados capitais, e se exige uma constante monitorização, estando por isso sujeita a constantes modificações, quer a nível de equipamentos e processos, quer a nível de normas e requisitos. Esta conjuntura legislativa, empregue maioritariamente pela UE, afeta significativamente a rivalidade entre os países europeus e as outras regiões do globo. Contudo, é do interesse da UE manter a atividade industrial na Europa, em vez de a deslocalizar para regiões ambientalmente menos rigorosas. Para tal, é exigido que a indústria da refinação petrolífera europeia ocupe um lugar de destaque no campo da inovação de processo e no âmbito da inovação de produto. Para auferir desse posto e para o perpetuar, é de extrema importância a aplicação sistemática da Engenharia de Fiabilidade. Desta forma, conciliando diariamente a manutenção e fiabilidade, é possível que os ativos atinjam e mantenham uma performance elevada. São então aplicados diferentes métodos qualitativos e quantitativos durante a vida dos ativos, tais como RBI (*Risk-Based Inspection*), RGA (*Reliability Growth Analysis*), FRACAS (*Failure Report Analysis and Correction Actions System*), FTA (*Fault Tree Analysis*), FMECA (*Failure Modes, Effects and Critically Analysis*), entre outros. O último método mencionado, FMECA, será objeto de estudo no presente trabalho.

1.1 Definição do problema

A presente dissertação é fruto dos resultados obtidos pela empresa aquando se procedeu à análise da unidade de purificação de hidrogénio. Ao constatar que certos equipamentos, como as válvulas, eram críticos, considerou-se essencial incidir o estudo nestes componentes. Desta forma, surge a presente dissertação na refinaria de Matosinhos.

As válvulas de controlo são equipamentos relativamente simples que permitem direccionar e regular o fluxo de fluido do compressor ou bomba para os diversos dispositivos de armazenamento. Apesar de serem dispositivos simples, uma falha no seu funcionamento pode comprometer o funcionamento de todo o sistema, o que envolve custos significativos. Assim, é importante implementar um conjunto de práticas e filosofias de engenharia de manutenção e inovação, de modo a assegurar a disponibilidade desses equipamentos e instalações, salvaguardando vidas humanas e simultaneamente, contribuindo para a otimização da produção.

1.2 Objetivos

A presente dissertação tem por objetivo analisar e avaliar o comportamento de certas válvulas alocadas na unidade de purificação de hidrogénio. Desta forma, é necessário:

- Analisar e compreender o funcionamento das válvulas em causa;
- Identificar os Modos de Falha e avaliar a sua criticidade;
- Selecionar os Modos de Falha mais críticos;
- Identificar as potenciais causas para os Modos de Falha;
- Criar uma FMECA;
- Estabelecer ações de Manutenção a implementar.

O conjunto supramencionado de objetivos é essencial para se diminuïrem os encargos com os equipamentos ao longo das suas vidas úteis, bem como para se aumentar a fiabilidade e disponibilidade no decorrer de todo o seu ciclo de vida. Deste modo, a implementação destas metodologias permite à empresa assegurar um certo estatuto a nível económico.

1.3 Metodologia adotada

Para a realização do presente projeto recorreu-se à consulta de literatura científica e técnica em livros, bem como a artigos de diferentes autores. É de salientar, o refúgio constante a manuais de operação da refinaria, que viabilizaram o desenvolvimento de conhecimentos não só a nível dos equipamentos estudados, mas também do funcionamento da unidade.

Para o efeito, numa primeira fase realizaram-se algumas visitas à refinaria a fim de se compreender o funcionamento dos processos produtivos, de manutenção e de certos equipamentos. Posteriormente, foi iniciada a análise das metodologias utilizadas na empresa para conhecimento dos modos de falha e sua criticidade. Nesta fase, foi de extrema relevância a presença em determinadas reuniões, que permitiu o contacto e familiarização com o RCM. Depois de se assimilar a metodologia, seguiu-se a sua aplicação, tendo-se assim selecionado os equipamentos críticos e executado diferentes análises com vista na melhoria dos seus desempenhos, aumento dos níveis de fiabilidade e disponibilidade, nunca esquecendo a segurança dos trabalhadores.

Evidencia-se as contínuas reuniões que decorreram com os orientadores ao longo de todo o projeto, porque permitiram não só a posterior consulta de documentação, como também a diretriz do percurso que devia ser adotado.

1.4 Estrutura da dissertação

A dissertação encontra-se dividida em sete capítulos.

Neste primeiro capítulo é realizada uma pequena introdução ao tema da dissertação, definindo-se o problema e objetivos propostos, bem como a metodologia adotada para os atingir.

No segundo capítulo, aborda-se a empresa onde se realizou o estágio, referindo-se o departamento responsável pelo acolhimento e explicitando-se todas as áreas intervenientes no projeto.

Por sua vez, no terceiro capítulo expõe-se os conceitos de manutenção e fiabilidade necessários para a posterior análise RCM dos equipamentos. Neste capítulo, denominado por estado de arte, são apresentadas definições quer de falha, funções, causas de falha e modos de falha, como também de métodos quantitativos e qualitativos de análise de vida dos ativos, como a FMECA (*Failure Modes Effects and Critically Analysis*) e FTA (*Fault Tree Analysis*). Para além disso, aduzem-se conceitos de alguns métodos estatísticos, de forma a posteriormente completar a análise RCM efetuada.

O capítulo quatro apresenta uma breve descrição da unidade onde estão inseridos os equipamentos. O seu processo é explicitado, bem como todas as etapas compreendidas e parâmetros associados.

No capítulo cinco são descritas as válvulas em geral e as válvulas de controlo borboleta, globo e de bloqueio em particular, através da explicitação do seu funcionamento, principais constituintes, distúrbios associados e soluções encontradas para minimizar a sua ocorrência. As válvulas em estudo são ainda abordadas, expondo as suas principais características e identificando quais as mais problemáticas.

No capítulo seis, analisam-se os dados de manutenção fornecidos pela refinaria, abordam-se os resultados obtidos pelas FMECA inicial e aplicadas e edificam-se árvores de falha para os diferentes tipos de válvulas. Posteriormente, apresentam-se os valores da aplicação dos métodos de Weibull e Crow-AMSAA, seguidos de uma reflexão crítica.

No último capítulo são apresentadas as conclusões globais do projeto e as propostas de trabalho futuro.

2 Projeto na Empresa

A presente dissertação ocorreu em ambiente empresarial no grupo Galp. A Galp é a empresa líder de mercado em Portugal, integrada no setor energético que prima pela inovação. Dedica-se à exploração e produção de petróleo e gás natural, à refinação e distribuição de produtos petrolíferos, à distribuição e venda de gás natural e também à geração e comercialização de eletricidade. Através de um conjunto de equipamentos e procedimentos inovadores e bem definidos a empresa consegue enfrentar as dinâmicas e os desafios do setor energético, desenvolvendo negócios rentáveis e sustentáveis.

2.1 Refinaria de Matosinhos

O aparelho refinador da Galp é composto pelas refinarias de Sines e de Matosinhos, que associadas representam atualmente uma capacidade de processamento de crude de 330 mil barris por dia, cerca de 20% da capacidade de refinação ibérica.

Localizada no concelho de Matosinhos, a refinaria possui uma área aproximada de 200 hectares. Esta refinaria é um complexo industrial composto por cerca de trinta unidades processuais divididas em quatro grandes negócios, energia elétrica, combustíveis, óleos (bases, lubrificantes, betumes e parafinas) e aromáticos e solventes. Possui facilidades logísticas únicas, tais como a interligação ao terminal petrolífero de Leixões (feita a partir de vários oleodutos com cerca de 2 quilómetros de extensão), complementada por uma monobóia ao largo, o pipeline para o aeroporto Francisco Sá Carneiro e a instalação de enchimento de veículos cisterna para combustíveis, betumes e produtos químicos a granel.

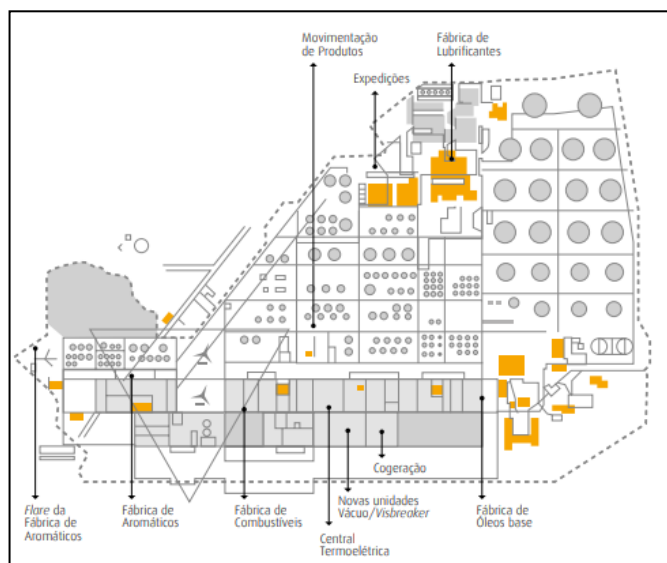


Figura 1-Configuração da refinaria de Matosinhos (Data Book de Segurança, Saúde e Ambiente 2013)

Na figura 1 é possível observar a constituição da refinaria de Matosinhos e fazer a distinção entre as fábricas que se destinam aos negócios supramencionados.

A complexidade de uma refinaria refere-se à respetiva capacidade de processar matéria-prima em produtos de valor acrescentado. Esta transformação ocorre através de um processo que se aproveita dos diferentes pesos, volatilidades e temperaturas de ebulição dos hidrocarbonetos presentes no petróleo bruto, designado por refinação. Este procedimento origina produtos intermédios e finais e encontra-se fragmentado em quatro etapas:

- Divisão física dos diversos tipos de hidrocarbonetos na coluna de destilação;
- Purificação de produtos intermédios em unidades de pré-tratamento;
- Processamento químico das frações de menor valor em produtos mais leves;
- Tratamento e mistura de produtos intermédios por supressão de elementos e compostos indesejáveis para integração em produtos finais.

As válvulas que são alvo de estudo no presente trabalho estão inseridas no grupo de purificação de produtos intermédios em unidades de pré-tratamento. Pertencem à unidade 1700, responsável pela purificação de hidrogénio e posterior fornecimento deste componente à unidade 3700, com a finalidade de permitir a dessulfuração do gasóleo.

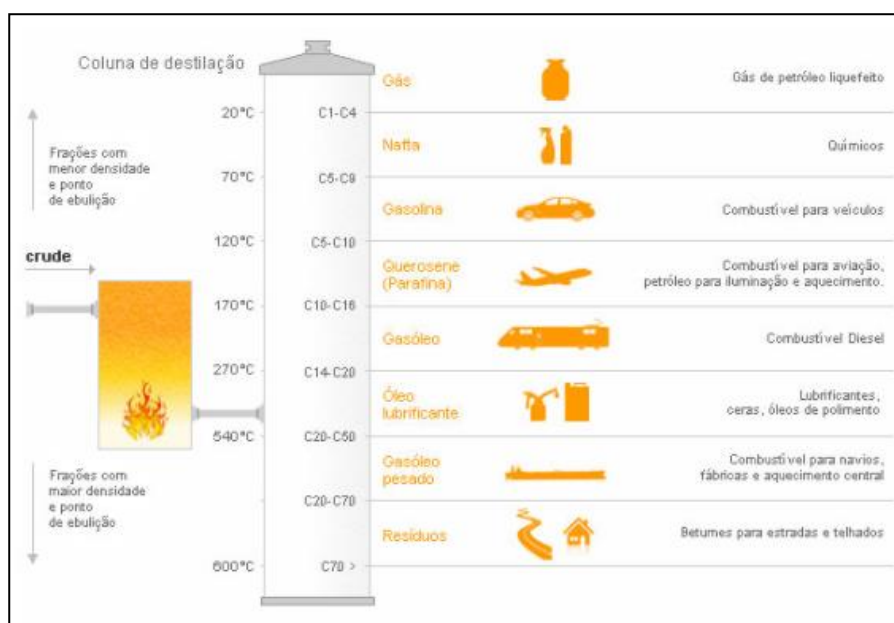


Figura 2-Produtos do processo de refinação (Galp Energia 2010)

Na figura 2 expõe-se de uma forma muito sucinta e simplificada o processo de refinação, sendo de realçar a diversidade de produtos que se obtém a partir do crude.

2.2 Enquadramento na Empresa

A dissertação perpassou-se na área de Gestão do Desempenho de Equipamentos, inserida no departamento de Gestão do Desempenho de Equipamentos e Renovação. O departamento supramencionado enquadra-se no setor de Fiabilidade e Engenharia, pertencente à secção de Integridade e Conservação de Ativos da Refinaria de Matosinhos, como é passível de ser visualizado na figura 3.

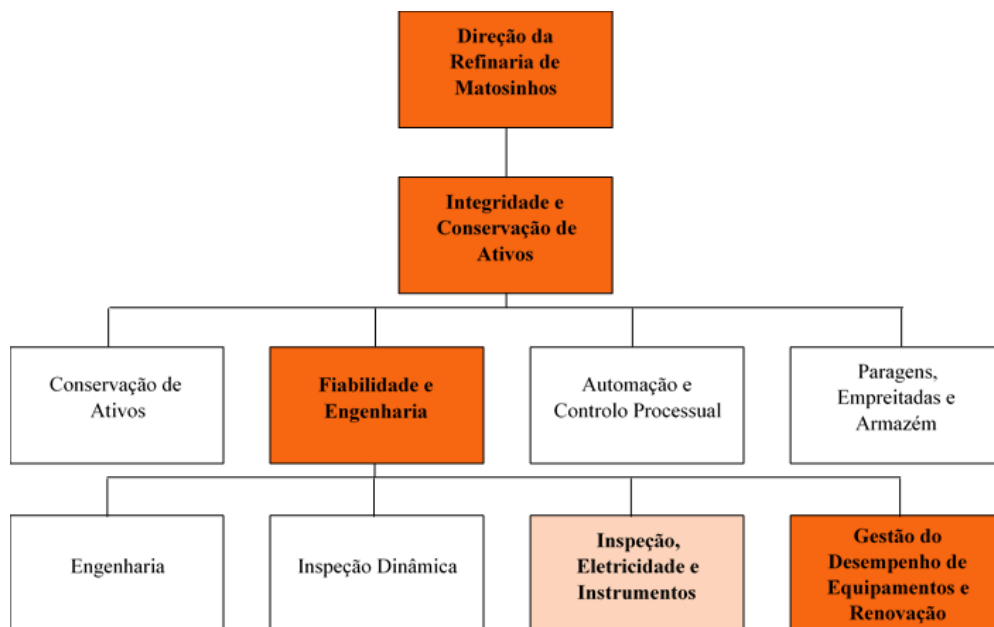


Figura 3- Departamento de Gestão do Desempenho de Equipamentos e Renovação

Seguidamente, são apresentadas as funções de cada uma das áreas envolvidas na realização da dissertação.

Integridade e Conservação de Ativos

A Direção de Integridade e Conservação de Ativos (DICA) tem por finalidade garantir a gestão dos ativos físicos e a sua disponibilidade mecânica e operacional nas áreas de Manutenção e Fiabilidade dos equipamentos, sem a infração de qualquer regra ou norma de Segurança, de Ambiente e de Energia. Compromete-se a adotar as melhores práticas de Qualidade e a promover um ambiente de confiança entre os seus colaboradores, de forma a atingir os objetivos delineados pela empresa.

Nesta direção a execução dos trabalhos é efetivada por empresas de prestação de serviços, ao passo que a prevenção é assegurada por colaboradores da empresa. De salientar que engloba quatro grandes áreas, a Conservação de Ativos, a Fiabilidade e Engenharia, as Paragens, Empreitadas e Armazém e a Automação e Controlo Processual.

Fiabilidade e Engenharia

A Fiabilidade e Engenharia são responsáveis por estabelecer e implementar processos de gestão da Fiabilidade e da gestão dos ativos físicos, visando propiciar elevados níveis de disponibilidade e segurança na operação. Atuam nos vetores da fiabilidade e manutenibilidade dos equipamentos, dos processos de fabrico, da operação do aparelho produtivo e da fiabilidade humana.

Nesta área são realizados investimentos com profissionalismo que, juntamente com a aplicação e desenvolvimento das melhores regras de arte, permitem aumentar a fiabilidade das instalações e a posterior criação de valor.

Gestão do Desempenho dos Equipamentos e Renovação

Esta área visa assegurar a disponibilidade do equipamento e instalações para o cumprimento dos planos de produção com um custo minimizado, respeitando as normas da qualidade, da segurança e do ambiente. Para tal, recorre a um conjunto de metodologias de engenharia de manutenção e fiabilidade, sendo auxiliada por um sistema informático integrado que gere o stock de matérias e peças de reserva, bem como toda a atividade da manutenção.

De entre as atividades desempenhadas pelo departamento, destacam-se:

- Produção de informação de gestão da fiabilidade;
- Implementação da metodologia RCM;
- Gestão da análise de falhas com impacto significativo na fiabilidade, disponibilidade, segurança e custos e perdas;
- Aplicação da metodologia RCA e outras técnicas reconhecidas;
- Edição do DataBook de Fiabilidade e Manutenção;
- Acompanhamento das auditorias dos Sistemas Certificados na vertente dos EMM's;
- Preparação e controlo de trabalhos de melhorias e renovação tecnológica de equipamentos elétricos e de instrumentos;
- Preparação e controlo de trabalhos de empreitadas de substituição de instrumentação e de equipamentos e instalações elétricas, no âmbito de trabalhos caracterizáveis e investimentos de substituição;
- Benchmarking dos principais indicadores de fiabilidade com as principais empresas do setor;
- Elaboração e revisão de cadernos de encargos de contratos de manutenção anuais, plurianuais e de paragem das especialidades de eletricidade e instrumentação, conduzindo todo o processo técnico desde o lançamento para consulta até à adjudicação.

Inspeção de Eletricidade e Instrumentos

No decorrer da presente dissertação foi necessária a consulta de profissionais da área de Inspeção, Eletricidade e Instrumentos. Esta secção é responsável pela análise de falhas, bem como pela interpretação dos mecanismos que lhes estão associados e que podem levar à deterioração do equipamento elétrico.

Na sua atividade, recorre a diversas técnicas de controlo não destrutivo, juntamente com a consulta e atualização de um vasto arquivo histórico, o que possibilita a definição adequada de medidas corretivas.

De entre as atividades executadas pela área de Inspeção de Eletricidade e Instrumentos destacam-se:

- Planear a inspeção, tendo em conta a criticidade dos equipamentos;
- Executar a inspeção planeada e não planeada e emitir os respetivos relatórios de inspeção;
- Colaborar na criação de procedimentos de manutenção e de ensaios;

- Auditorias técnicas à qualidade do trabalho de manutenção das empresas de prestação de serviços de manutenção;
- Estudo e aplicação da legislação, normas e códigos relevantes;
- Desenvolver propostas de normalização / modificação de peças de reserva dos equipamentos dinâmicos em articulação com o setor GDE;
- Contribuir com propostas de melhoria de fiabilidade e da manutibilidade dos equipamentos elétricos e de instrumentação;
- Participar em análises RCM

3 Estado da Arte

3.1 Contextualização

Ao longo da presente dissertação é efetuada uma análise fiabilística de um equipamento, pelo método RCM (*Reliability Centered Maintenance*). Para uma completa definição da metodologia é estritamente necessário recorrer numa fase inicial a diversos conceitos, como manutenção, fiabilidade, o próprio conceito de falha, entre outros. Tais conceitos serão objeto de estudo no decorrer da presente secção.

3.1.1 Manutenção

Manutenção é a designação atribuída ao conjunto de ações que visam assegurar o bom funcionamento dos equipamentos e sistemas. Essas ações devem ser executadas no momento e local correto, por forma a evitar reduções de rendimento ou possíveis avarias. Assim, este conceito é de extrema importância para a preservação dos ativos de uma empresa.

Por um lado, alguns autores defendem que a manutenção tem por objetivo primário assegurar que os equipamentos sob o seu encargo desempenham a função para o qual foram projetados, realçando a maximização da disponibilidade como objetivo essencial. Por outro lado, existe quem exclua esta possibilidade, depositando na manutenção um carácter mais orçamental, ou seja, defendendo que este conceito objetiva o custo mínimo.

Independentemente do objetivo considerado primordial, as ações de manutenção devem orientar-se pelos seguintes conceitos:

- Segurança: deve ser garantida a segurança de todos os elementos intervenientes no processo, desde os equipamentos às pessoas;
- Qualidade: o número de defeitos deve ser minimizado, visando-se a obtenção de um rendimento cada vez maior. Esta aquisição deve ser conseguida sempre respeitando as normas estabelecidas;
- Custo: devem ser objetivados custos globais mínimos. Esses valores dependem dos custos de produção, bem como das intervenções ou não de manutenção;
- Disponibilidade: visa garantir a maior operacionalidade dos equipamentos e sistemas, permitindo a regularização da produção e cumprimento de prazos.

A harmonização dos parâmetros supramencionados é muitas vezes de extrema dificuldade, uma vez que melhorias implementadas num dos parâmetros não conduzem invariavelmente a progressos de outro critério. Por exemplo, a redução do número de defeitos e posterior aumento de qualidade podem encaminhar a aumentos exponenciais de custos, o que pode não ser rentável para a empresa. Esta interdependência das variáveis constitui o desafio permanente a que os profissionais de manutenção estão sujeitos.

Evolução da Manutenção

A manutenção evoluiu drasticamente nas últimas décadas. Até à 1ª Guerra Mundial, este conceito advinha somente da necessidade de reparar regularmente os equipamentos. Tais intervenções eram deixadas a cargo dos próprios operadores e a manutenção possuía assim um carácter corretivo, designando-se por manutenção reativa.

Numa fase posterior, a indústria foi alvo de alterações, tendo sido registado um aumento significativo dos níveis de produção. Perante este progresso, a manutenção, ainda corretiva, passou a ser responsabilidade de equipas especializadas, dependentes da produção.

No início da 2ª Guerra Mundial em virtude da massificação da produção e necessidade de se atingirem elevados níveis de disponibilidade, verifica-se a transição do conceito de manutenção. Enquanto numa primeira geração, a manutenção se baseava apenas na resposta às avarias do equipamento, neste momento para além do carácter corretivo, a manutenção passa também a atuar na prevenção das anomalias por intermédio de substituições sistemáticas, denominando-se por manutenção planeada. Desta forma, é possível evitar o aparecimento de falhas comuns e repetitivas e consequente perda de produção e aumento de custos, tal como se verificava anteriormente.

A partir do fim da 2ª Guerra Mundial, com a expansão da indústria aeronáutica, assistiu-se a um desenvolvimento preponderante a nível tecnológico. Nas empresas, foram também criadas divisões destinadas somente à Manutenção, sem dependência direta da produção. O vínculo entre estas duas alterações permitiu a medição dos parâmetros de funcionamento, a avaliação da sua variação e a posterior extrapolação para o momento da falha, viabilizando a análise precoce de avarias. Iniciou-se assim um novo período de manutenção, onde se foca também a atenção nos equipamentos, desenvolvendo sistemas de deteção de falhas e promovendo a eliminação de defeitos críticos, designado por manutenção preditiva. Este comportamento altera o modo de substituição dos equipamentos, deixando de se realizar substituições sistemáticas e passando-se a exercer substituições condicionadas. De outro modo, os equipamentos ou componentes associados passaram a ser substituídos de acordo com o seu estado de condição, ao invés de serem permutados de acordo com um determinado intervalo de tempo. Por conseguinte, alcançaram-se custos de exploração inferiores e melhorias de desempenho. Para além disso, em muitos casos, a manutenção preventiva sistemática implicava a realização de ações intrusivas no equipamento, podendo ser a própria manutenção a origem de causa de falha nos equipamentos.

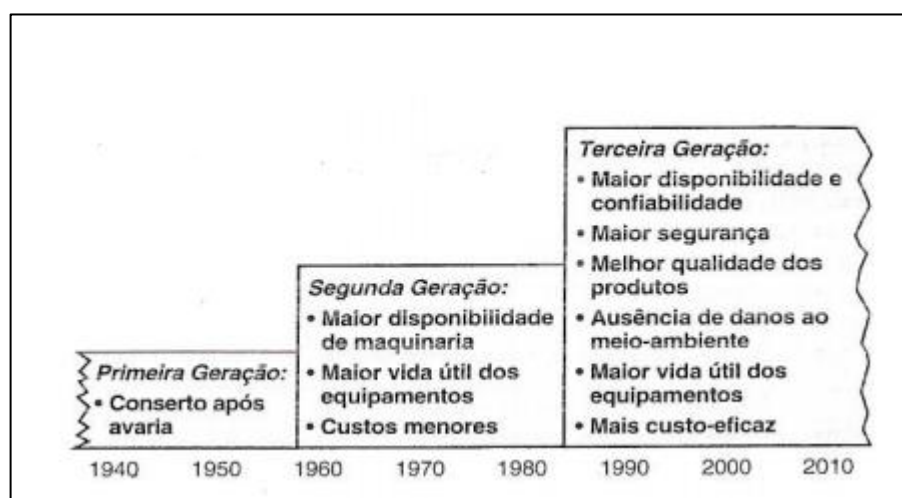


Figura 4- Expectativas crescentes da manutenção (Moubray 1997)

Atualmente, o mercado de trabalho é muito competitivo e as normas de qualidade tornam-se cada vez mais rigorosas. Assim, a área de Manutenção está em constante mutação, procurando

sempre uma abordagem mais estruturada e objetiva na atribuição de tarefas, sobretudo da manutenção preventiva. Corolário dessas transformações, surgem diferentes métodos e ferramentas, nomeadamente o *RCM*. Esta metodologia privilegia os recursos e atividades de manutenção nas áreas associadas a um maior risco, tendo sido aplicada numa grande variedade de indústrias, sendo de destacar a sua aplicação na indústria petroquímica. O *RCM* permite alocar as tarefas de manutenção para os equipamentos onde a sua aplicação é realmente necessária, desprezando todos aqueles cuja falha não tem consequências económicas importantes, nem repercussões para a segurança, para o ambiente ou para a operação. Ademais, esta metodologia permite a otimização de um sistema pela análise exaustiva e posterior eliminação ou controlo de falhas críticas.

Objetivos da Manutenção

A Manutenção é atualmente versada como uma escolha de certos meios para prevenir, corrigir ou renovar um bem material, seguindo um critério económico, afim de aprimorar o custo global de posse do equipamento (Ferreira 1998). Segundo Moubray (1997), a manutenção é responsável por assegurar que os ativos físicos continuem a executar aquilo que os utilizadores pretendem.

O papel da Manutenção, inicia-se assim com uma missão de juízo no momento da compra. Seguidamente, é responsável pelo acompanhamento da instalação e início de funcionamento da máquina ou equipamento. Numa fase posterior, está incumbida de implementar vigilância permanente ou periódica, ações paliativas e reparações e ações preventivas com o intuito de recolher e examinar os dados fornecidos pelas ações desenvolvidas. Desta forma, é possível compreender o comportamento exibido pelo material e posteriormente estabelecer correções e melhorias. Para além disso, compete ainda à Manutenção a determinação do momento económico de terminar as ações curativas, corretivas e preventivas no componente e participar na seleção de um novo (Ferreira 1998).

Deste modo, e como foi anteriormente referenciado, uma Organização de Manutenção assenta em três grandes objetivos:

- Segurança das pessoas, bens e preservação do meio ambiente;
- Assegurar os Níveis de Qualidade e Disponibilidade;
- Assegurar o Custo do “Produto”.

3.1.2 Fiabilidade

Segundo Rausand e Hoyland (2004), fiabilidade é a capacidade demonstrada por um item (termo denotado para representar qualquer componente, subsistema ou sistema que pode ser considerado como uma entidade) para assegurar uma determinada função, sob determinadas condições ambientais e operacionais durante um período de tempo.

A fiabilidade diz assim respeito à aptidão de um bem para efetivar uma determinada função sob determinadas condições, durante um dado intervalo de tempo (NP EN 13306:2007). Desta forma, este conceito associa-se a dois grandes parâmetros, o tempo e as condições de serviço.

Um determinado produto tem de ser conservado por um grande período de tempo e nesse intervalo é essencial que cumpra a sua função, apesar de todas as situações ameaçadoras a que possa eventualmente estar sujeito, como a temperatura excessiva, vibrações e até mesmo impactos. Numa gestão de qualidade, este princípio é aplicado não só a um produto, como também a unidades e processos, de forma a assegurar o cumprimento das funções durante o intervalo de tempo requerido e nas condições de serviço especificadas, sem qualquer avaria. A

fiabilidade assume assim uma posição de relevo na manutenção da qualidade, sendo obrigatório o seu controlo para a prosperidade de qualquer empresa (Kiran 2016).

Hodiernamente, o aumento da complexidade dos produtos conduziu a uma procura inegável por índices de fiabilidade superiores. A fiabilidade permite definir um regime de produção e aborda a capacidade de o produto efetuar as funções solicitadas sob um conjunto de parâmetros num dado intervalo de tempo. Deste modo, caracteriza, avalia e analisa as avarias e repara os sistemas com o intuito de melhorar o seu funcionamento, ampliando o seu tempo de vida, mitigando o risco de defeitos e reduzindo a probabilidade de falhas. Contudo, esta análise está associada a um certo grau de incerteza uma vez que a medição do momento em que ocorre a falha é raramente determinada com precisão. Assim, pode também definir-se fiabilidade como a probabilidade de um item realizar a sua função com êxito sob as condições para as quais foi idealizado e dentro de um intervalo de tempo bem definido (O'Connor e Kleyner 2012).

Objetivos da Fiabilidade

A fiabilidade, segundo O'Connor e Kleyner (2012), assenta no seguinte conjunto de objetivos:

- Aplicar conhecimentos de engenharia e uma diversidade de técnicas para prevenir ou reduzir a possibilidade ou frequência de falhas;
- Identificar e corrigir as causas das falhas que ocorrem, a despeito dos esforços para as prevenir;
- Determinar formas de conviver com as falhas que ocorrem, no caso da sua origem ainda não ter sido corrigida;
- Aplicar métodos estatísticos que permitam inferir acerca da fiabilidade.

3.1.3 Definição de função

É fundamental para a realização de uma análise correta e completa, compreender as aplicações dos componentes, equipamentos ou sistema. Dependendo do contexto operacional, podem possuir uma ou mais finalidades, sendo por isso divididas em:

- Funções primárias: aquelas que estão na essência do equipamento e dessa forma são indispensáveis na definição dos requisitos de manutenção;
- Funções secundárias: aquelas que advêm do equipamento, não tendo sido estas que levaram à sua eleição numa fase inicial. De salientar que a sua falha pode, por vezes, conduzir a consequências mais graves que uma função primária;
- Dispositivos de proteção: garantem a segurança de pessoas e bens.

As funções primárias podem ainda ser subdivididas em funções em linha e em standby consoante a sua utilização seja frequente ou não, respetivamente.

3.1.4 Definição de falha

Antes de mais, nesta secção optou por se diferenciar avarias de falhas. Enquanto avarias dizem respeito ao cessar da aptidão de um bem ou equipamento para cumprir uma função pré-determinada (NP EN 13306:2007), falha é entendido como um estado inapto para cumprir uma função requerida, excluindo a inaptidão devida à manutenção preventiva ou outras ações programadas, ou devida à falta de recursos externos. Deste modo, falha é um estado resultante de uma avaria.

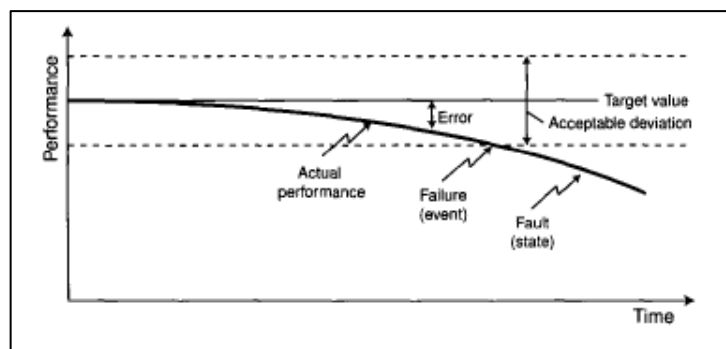


Gráfico 1-Diferenças entre falha e avaria (Rausand e Hoyland 2004)

Como é passível de ser observado no gráfico 1, o termo falha começa a ser empregue após o momento da avaria, abrangendo não apenas um momento pontual, mas sim um período de tempo.

Moubray (1997) define falha como a incapacidade de qualquer ativo realizar aquilo que é pretendido pelo utilizador. As falhas podem ser classificadas em falhas de natureza previsível e falhas de natureza imprevisível. O primeiro grupo está estritamente ligado a fenómenos de envelhecimento dos equipamentos, ocorrendo por isso de forma lenta e progressiva. Pode reduzir-se a probabilidade deste tipo de falhas instituindo uma tarefa de renovação programada ou substituição para o item em causa, isto é, através de manutenção preventiva. Por outro lado, as falhas imprevisíveis ou aleatórias resultam da variação súbita de uma ou mais características do item e tornam qualquer substituição preventiva programada ineficaz para prevenir a falha. Como não existe uma resposta efetiva quando se presenciam, pode ter de se considerar o reprojeto do item ou mesmo a aceitação da falha, caso a criticidade seja baixa.

Falha funcional é a designação atribuída à incapacidade de qualquer ativo cumprir uma determinada função para um padrão de desempenho aceitável pelo utilizador. Falha potencial, por outro lado, diz respeito à condição que possibilita identificar a adjacência de uma falha funcional. Após se detetar uma falha potencial é possível eliminar ou mitigar os efeitos desencadeados pela possível futura falha funcional. Desta forma, é essencial identificar as falhas potenciais, o que pode explicar o progresso substancial verificado nos últimos anos nos meios de monitorização.

É também comum a distinção entre falha oculta e falha evidente. A primeira falha, de forma singular, provoca a perda de uma função, sem que os operadores se apercebiam do seu desenvolvimento e existência. Assim, ocorre maioritariamente nos dispositivos de segurança e corte, apenas sendo detetável quando se dá a sua atuação. É então necessário realizar ensaios periódicos neste tipo de equipamentos de forma a simular tais condições e garantir o seu correto funcionamento. De outro modo, as falhas evidentes são facilmente identificadas pelos operadores, podendo existir ações corretivas posteriores, conforme a sua criticidade.

3.1.5 Modos de falha

Um modo de falha representa a forma como um determinado bem ou serviço se ausenta de cumprir a sua função. Pode também ser versado como o sintoma através do qual uma falha de um componente ou equipamento se pode manifestar, originando uma falha funcional no próprio equipamento ou sistema. Desta forma, o modo de falha é uma propriedade inerente a cada equipamento, dado que cada um tem as suas próprias características, como função, materiais, fabricação e qualidade.

Os modos de falha mais genéricos incluem a degradação do material provocada pelo funcionamento do equipamento. Segundo Tinga (2013), estes modos de falha são classificados da seguinte forma:

- Falha mecânica: carga excessiva, deformação, fadiga, fluência e desgaste;
- Falha térmica: degradação térmica;
- Falha elétrica: sobrecarga de corrente e avarias intrínsecas;
- Falha química: corrosão;
- Falhas radioativas;

Para além disso, o erro humano a nível da operação e manutenção e falhas de projeto, muitas vezes são responsáveis por induzirem fugas e fraturas nos componentes do equipamento ou sistema.

3.1.6 Causas da falha

As causas da falha simbolizam os motivos que conduziram ao modo de falha verificado no componente ou equipamento, podendo estas associar-se aos componentes da vizinhança, fatores ambientais, erros humanos, ou ao próprio componente.

É essencial compreender as causas que instigaram a falha de modo a poder preveni-las. Dificilmente se conseguem prever todas as causas da falha, sendo por isso comum esta análise se encontrar envolta de uma certa incerteza. De forma a contabilizar o maior número de causas de falha antecipadas e inesperadas e posteriormente prevenir e minimizar as falhas, deve existir uma constante preocupação e estudo durante o design, desenvolvimento, fabrico e operação (O'Connor e Kleyner 2012).

De acordo com O'Connor e Kleyner (2012), as principais causas para as falhas ocorrerem são:

- Projeto inadequado;
- Concentração excessiva de tensões no material;
- Sobreposição nas distribuições de carga e força;
- Degradação: termo que abrange qualquer mecanismo ou processo que provoque uma fragilização do equipamento com o decorrer do tempo. Os exemplos mais frequentes desses fenómenos são a fadiga do material, desgaste entre superfícies de componentes dinâmicos em contacto, corrosão, deterioração do isolamento, entre outros;
- Outros mecanismos dependentes do tempo: deformação devido à presença de elevadas temperaturas e tensões de tração e desvio progressivo nos valores dos parâmetros dos componentes eletrónicos;
- *Sneaks*: termo utilizado para expressar uma condição em que o sistema não atua corretamente, embora todas as partes constituintes funcionem. Por exemplo, um sistema elétrico pode ser projetado de tal forma que sob a influência de certos parâmetros funcione incorretamente;
- Erros: tais como especificações, projetos ou códigos de software inadequados, ações de manutenção incorretas e inadequadas, ou até pelo uso incorreto do equipamento;
- Outros: como por exemplo, engrenamento ruidoso, fugas de óleo pela vedação, instruções de operação incorretas ou ambíguas e interferências eletromagnéticas nos sistemas eletrónicos.

As falhas apresentam assim diversas causas e efeitos, sendo a sua perceção muito subjetiva, dado que depende inteiramente do que a pessoa encarregue pela avaliação do equipamento define ou não como falha.

3.1.7 Itens Reparáveis e Não-Reparáveis

A distinção entre itens reparáveis e não-reparáveis é crucial. Para Rausand e Hoyland (2004) no momento em que se deparam com uma falha os últimos são descartados, enquanto que os itens reparáveis são consertados. Assim, um sistema reparável é recolocado ao serviço depois de ser sujeito a operações de manutenção efetuadas com a finalidade de eliminar qualquer irregularidade detetada, ao passo que um sistema não-reparável é substituído por outro igual logo após a primeira falha, ou seja, a partir do momento que deixa de realizar de forma satisfatória a função que lhe é destinada (Ascher e Feingold 1984).

Quando se aborda um item não-reparável, seja individual (como um transistor) ou um conjunto de componentes (microprocessador), é então impreterível expor o conceito de tempo médio para a falha (*MTTF*). Este parâmetro representa o tempo médio de falha para todos os tempos de falha da população e pode ser estimado calculando a média dos tempos de falha numa amostra simples da população (Tobias e Trindade 2012). Desta forma, e como num item irreparável apenas ocorre uma única falha, este conceito permite avaliar a fiabilidade do equipamento. Para além disso, neste tipo de itens é também analisada a probabilidade instantânea de ocorrência da primeira e única falha, denominada por taxa de risco (*hazard rate*).

Por outro lado, para itens reparáveis, nos quais podem ocorrer mais do que uma falha, a fiabilidade representa a probabilidade da falha não suceder durante um determinado período de tempo, sendo expressa através de um parâmetro designado por taxa de falha ou taxa de ocorrência de falha- *Rate of Occurrence of Failures (ROCOF)*. Além disso, os presentes itens quando expostos a uma determinada falha são consertados, permitindo que o sistema seja consecutivamente restaurado e havendo assim necessidade de caracterizar o tempo médio entre falhas- *Mean Time Between Failures (MTBF)*.

A reparação dos itens consome tempo, e por esse motivo há também uma constante preocupação com a disponibilidade. A disponibilidade (*D*) diz respeito à capacidade de um bem executar uma função pré-definida, sob determinadas condições, num dado momento ou durante um certo intervalo de tempo, assumindo que é assegurado o fornecimento dos necessários recursos externos (NP EN 13306:2007). Pode ser definida por:

$$D = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

Onde:

MTBF, representa o tempo médio entre falhas

MTTR, representa o tempo médio de reparação

Os serviços de manutenção objetivam o aumento da disponibilidade. Desta forma, é necessário aumentar a fiabilidade dos equipamentos (MTBF) e diminuir os tempos de intervenção (MTTR).

Curva da banheira

No gráfico 2 é possível de ser visualizada a taxa de ocorrência de avarias em função do tempo. A taxa de ocorrência de avarias, parâmetro dos itens reparáveis, é definida pelo número de avarias ocorridas num determinado bem, num período de tempo, dividido por esse mesmo intervalo. (NP EN 13306:2007).

A curva da banheira apresenta uma configuração muito característica, destacando-se três partes ao longo da sua constituição. Na primeira parte da curva, designada por período inicial de falhas ou mortalidade infantil é observável que a taxa de avarias decresce, o que denota uma melhoria na fiabilidade. Essa evolução deve-se ao reparo e substituição progressiva dos componentes defeituosos que tendem a avariar relativamente cedo. É de salientar que muitas vezes os utilizadores não contactam com esta fase do equipamento uma vez que quando o adquirem, já foi estudado e testado de forma a eliminar esta etapa.

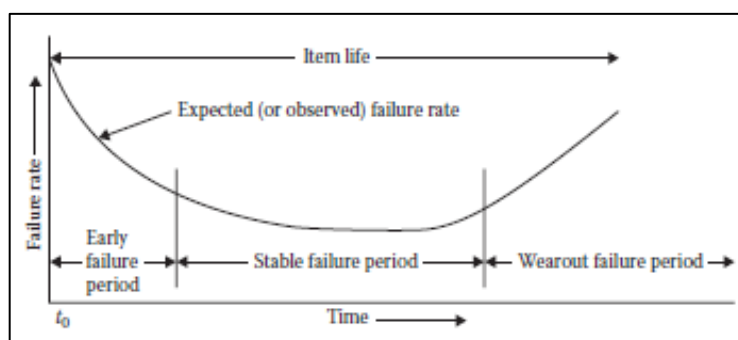


Gráfico 2-Curva da banheira (Tobias e Trindade 2012)

Posteriormente, pode ser identificada uma longa fase onde a taxa de ocorrência de falhas é constante, denominada por período estável de falha ou período de vida útil. Esta fase encontra-se geralmente associada a falhas induzidas externamente e um dos grandes objetivos da fiabilidade é estabelecer um valor para a taxa de ocorrência de falhas. É comum em sistemas complexos sujeitos a reparações e revisões, nos quais os diversos componentes exibem diferentes padrões de falha com o tempo e períodos de vida díspares, devido às reparações e substituições a que foram sujeitos (O'Connor e Kleyner 2012).

A parte final da curva, onde a taxa de ocorrência de falhas aumenta, é identificada pelo período de desgaste. Nesta fase, os modos de falha que englobam desgaste ocorrem a um ritmo exponencial. Sendo atribuída uma conotação pejorativa a esta fase, um dos principais propósitos do estudo da fiabilidade é garantir o seu retardamento, prolongando-se o tempo de vida útil do item. (Tobias e Trindade 2012).

É de salientar que embora a configuração da curva da banheira seja semelhante para os itens não-reparáveis, um dos parâmetros envolvido na sua génese é diferente. Como se tratam de itens irreparáveis, emprega-se a taxa de risco ao invés da taxa de ocorrência de falhas. Tal como nos itens reparáveis, a curva possui três fases, devendo-se a variação no seu comportamento exatamente aos mesmos fatores.

3.1.8 Análise dos modos de falha, seus efeitos e da sua criticidade (FMECA)

FMECA é a técnica utilizada para identificar, priorizar e eliminar potenciais falhas do sistema, projeto ou processo antes de se estabelecer contacto com o consumidor. (Omdahl 1988). Segundo Villacourt (1992) este método é utilizado para solucionar potenciais problemas num sistema antes deles sequer ocorrerem.

FMECA é muito provavelmente o método de análise de fiabilidade mais empregue e eficaz nos dias de hoje. Consiste na explicitação dos modos de falha e posterior enumeração e análise crítica dos efeitos no funcionamento do sistema. Inicialmente, era recorrente o recurso a um método bastante semelhante designado por FMEA (*Failure Mode and Effects Analysis*). Neste processo meramente qualitativo, não só todos os potenciais modos de falha são identificados, como também descritos os efeitos dessas falhas a nível económico, ambiental e de segurança. É considerado um método indutivo, cuja análise se inicia com a enumeração das possíveis falhas dos componentes e depois se deduz acerca das consequências (Tinga 2013).

Posteriormente, e com o intuito de quantificar a análise efetuada, surgiu a FMECA. Este método permite assim, além de explicitar os potenciais modos de falha e seus efeitos, avaliar a sua criticidade pelo cálculo do *Risk Priority Number* (RPN).

$$RPN = O \times S \times D$$

Onde:

O, é a probabilidade de ocorrência da falha

S, é a severidade da falha

D, é a detetabilidade da falha

O índice O é utilizado para avaliar a probabilidade de a falha ocorrer, ao passo que a severidade analisa o impacto dos efeitos da falha, isto é, a gravidade dos efeitos. Já o índice D é responsável por demonstrar a eficiência dos controlos de deteção de falha. Existe uma diversidade de formas para definir o valor destes parâmetros, sendo mais comum o recurso a escalas numéricas, como se pode observar na tabela 1,2 e 3.

Tabela 1-Escala da severidade

Nível	Significado	Segurança	Ambiente	Económico
1	Muito baixa ou nenhuma	Sem lesões	Sem impacto	Sem perturbações
2	Baixa	Acidente com 1º socorro	Impacto reduzido, limitado ao perímetro da instalação	Impacto reduzido, perdas inferiores a x €
3	Moderada	Acidente com tratamento médico	Impacto não confinado ao perímetro da instalação	Degradação gradual do desempenho, perdas superiores a y €
4	Alta	Lesão com baixa ou múltiplos acidentados	Impacto elevado sem possibilidade de remediação	Perda de função com perdas até z €
5	Muito alta ou catastrófica	Incapacidade permanente ou morte	Impacto elevado (coloca em causa a sustentabilidade de empresa)	Paragem da unidade e falhas catastróficas superiores a z €

Tabela 2- Escala de probabilidade de ocorrência

Nível	Significado	Quantificação
1	Muito Raro	Não aconteceu num ciclo de 4 anos
2	Raro	1 acontecimento a cada 4 anos
3	Possível	Mais que 1 acontecimento a cada 4 anos
4	Frequente	Mais que 1 acontecimento num ano
5	Muito Frequente	1 acontecimento a cada 3 meses

Tabela 3-Escala de detetabilidade

Nível	Significado	Quantificação
1	Quase certa	Sempre detetável
2	Média	Na maioria dos casos
3	Quase impossível	Não detetável

Apesar de não existir nenhum padrão definido para a escala dos três critérios, utilizou-se aquela que era considerada mais adequada pela empresa, a escala de 1 a 5.

Através do RPN é também definida uma matriz criticidade, que através de um mapa de cores permite identificar três grandes níveis, o mais crítico (a vermelho), o intermédio (amarelo) e o menos crítico (verde).

Ocorrência	Detetabilidade	Severidade				
		1	2	3	4	5
1	1	1	2	3	4	5
1	2	2	4	6	8	10
1	3	3	6	9	12	15
2	1	2	4	6	8	10
2	2	4	8	12	16	20
2	3	6	12	18	24	30
3	1	3	6	9	12	15
3	2	6	12	18	24	30
3	3	9	18	27	36	45
4	1	4	8	12	16	20
4	2	8	16	24	32	40
4	3	12	24	36	48	60
5	1	5	10	15	20	25
5	2	10	20	30	40	50
5	3	15	30	45	60	75

Figura 5-Matriz de criticidade

Desta forma, a grande vantagem da avaliação da criticidade evidencia-se, isto é, torna possível aos utilizadores o foco nos modos de falha que envolvem um maior risco.

O objetivo das ações na FMECA é normalmente o de baixar o RPN determinado inicialmente, permitindo que certos modos de falha deixem de apresentar a cor vermelha. De salientar, no entanto, que em certas condições de severidade elevada, por muito que se reduza o índice de ocorrência ou se melhore a detetabilidade, o RPN calculado localizar-se-á sempre no nível vermelho, uma vez que o evento a ocorrer terá sempre consequências demasiado graves.

Procedimento adequado na FMECA

Aglomerando os conceitos transmitidos por Souza e Marçal (2006) e Villacourt (1992) definiu-se a seguinte sequência para a execução da FMECA:

1. Definição do sistema e dos componentes: devem procurar-se equipamentos cuja falha possa comprometer o correto funcionamento do sistema;
2. Edificação de diagramas de blocos funcionais: permitem uma melhor compreensão do sistema em análise;
3. Identificação das funções dos componentes: são uma grande referência para os modos de falha;
4. Identificação dos modos de falha conhecidos e potenciais;
5. Enumeração dos efeitos de cada modo de falha;

6. Avaliação dos efeitos e análise dos modos de falha: são determinados os índices de ocorrência, severidade e detetabilidade;
7. Avaliação do potencial de risco de cada modo de falha e definição de possíveis ações corretivas ou preventivas.

Desta forma, a prática deste método exige a presença de uma equipa com conhecimento profundo do projeto e função do sistema, normalmente constituída por engenheiros. Para além destes membros, são frequentemente associados profissionais de outras áreas, como vendedores, técnicos de suporte e operadores a fim de se aglomerar a maior diversidade possível de destreza e sapiência.

Vantagens provenientes da FMECA

Segundo Rausand e Hoyland (2004), o recurso à FMECA pode contribuir para:

- Ajudar na seleção de alternativas de projeto com elevada fiabilidade e elevado potencial de segurança;
- Ajudar a determinar redundância;
- Auxiliar na definição da base para os procedimentos de diagnóstico em nível de sistema;
- Assegurar que todos os modos de falha e seus efeitos foram considerados para o funcionamento correto do sistema;
- Enumerar todas as potenciais falhas e identificar a severidade dos seus efeitos;
- Estabelecer prioridades nas ações de melhoria de projeto;
- Identificar as deficiências no processo e oferecer um plano de ações corretivas;
- Fornecer documentação histórica para referências futuras que visem a análise de modos de falha semelhantes ou alterações de projeto;
- Estabelecer prioridades nas ações corretivas;
- Auxiliar na análise dos processos de manufatura e montagem;
- Auxiliar nas análises dos fluxos de trabalho.

Contudo, a *FMECA* possui a grande desvantagem de não permitir que diferentes modos de falha se analisem em simultâneo, isto é, impossibilita a análise aquando existem interferências entre modos de falha.

É de salientar, que na presente dissertação se optou por realizar três *FMECAS*, a inicial de acordo com o explicitado pela literatura, e as aplicadas, com base na análise das ordens de manutenção reais da refinaria.

3.1.9 Árvore de falhas (FTA)

Uma árvore de falhas, *Fault Tree Analysis (FTA)* é um diagrama lógico que demonstra as relações entre as potenciais falhas do sistema e as causas que tiveram na sua génese (Rausand e Hoyland 2004). Ao contrário da *FMECA*, é um método dedutivo construído a partir do topo, isto é, inicia-se pelo evento principal e ramifica-se a partir desse mesmo evento. Desta forma, no topo da árvore encontra-se a falha do sistema, sendo prosseguida por todas as possíveis falhas nos componentes. Assim, no fim do diagrama localizam-se uma série de eventos que podem conduzir a um determinado acontecimento indesejável (Tinga 2013).

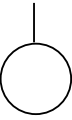
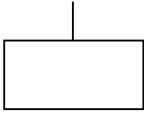
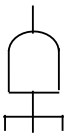
Dependendo do objetivo da análise, uma árvore de falha pode ser qualitativa, quantitativa ou ambas. Os resultados possíveis são respetivamente:

- Enumeração das possíveis causas que podem conduzir a uma falha funcional do sistema, isto é, a referência de fatores ambientais, erros humanos, falhas nos componentes, entre outros;
- Probabilidade de a falha do sistema ocorrer num determinado intervalo de tempo.

Desta forma, para além de explicitar as relações entre os diferentes modos de falha e a falha funcional do sistema, o *FTA* pode ser utilizado para quantificar a probabilidade do evento de topo. Contudo, na presente dissertação será apenas apresentado um *FTA* qualitativo, uma vez que é o mais explorado na indústria de refinação.

A análise das árvores de falha é frequentemente comparada com uma análise binária, uma vez que os eventos não possuem fase intermédia, isto é, ou ocorrem ou estão inativos. A junção de todos esses eventos segundo um determinado padrão e de acordo com determinados símbolos, apresentados na tabela 4, permite obter diferentes layouts do *FTA*.

Tabela 4-Simbologia frequente na elaboração de uma FTA

	Evento básico - não requer desenvolvimento. É independente dos outros eventos.
	Evento combinado - resulta da combinação de eventos básicos através de portas lógicas
	Porta Lógica "E" - evento de saída ocorre se todos os eventos de entrada ocorrerem. Para se obter a probabilidade de ocorrência do evento de saída multiplicam-se as probabilidades dos eventos de entrada.
	Porta Lógica "Ou" - evento de saída ocorre se pelo menos um dos eventos de entrada ocorrer. Para se obter a probabilidade de ocorrência do evento de saída somam-se as probabilidades dos eventos de entrada
	Evento de transferência para dentro - indica que a árvore em estudo possui mais níveis de desdobramento.
	Evento de transferência para fora - indica que a parte da árvore associada tem níveis antecedentes correspondentes.

Procedimento adequado no FTA

De acordo com Rausand e Hoyland (2004), a árvore de falhas de um sistema auxilia na formação de uma *FMECA* e a sua construção é sequenciada:

1. Definição do problema e condições-fronteira;
2. Construção da árvore de falhas;
3. Identificação do “caminho crítico”;
4. Análise qualitativa da árvore;
5. Análise quantitativa da árvore.

3.1.10 Manutenção Centrada na Fiabilidade (RCM)

O *Reliability Centered Maintenance* (RCM), em português, manutenção centrada na fiabilidade, é definido por Moubray (1997) como um processo empregue com o intuito de determinar o que deve ser feito para assegurar que qualquer ativo físico, no seu contexto operacional atual, continue a realizar aquilo que é objetivado pelos utilizadores.

Este método intende um aprimoramento do funcionamento do sistema, conservando uma visão económica ao identificar e delimitar políticas e estratégias de manutenção. Desta forma, todas as intervenções devem permitir a diminuição do risco de ocorrência de falhas funcionais no sistema, mas devem ser ou não adotadas consoante os custos que acarretam. (Ben-Daya e Duffuaa 2009).

O RCM distingue-se das demais estratégias de manutenção porque, para além de definir planos programados de manutenção baseados nos seus montantes, permite preservar as funções críticas do sistema. Encontra-se organizado segundo sete grandes etapas:

1. Funções e Padrões de Desempenho: determinar o que os utilizadores pretendem do ativo físico e qual a sua capacidade para o executar;
2. Falhas funcionais: identificar as circunstâncias que se traduzem num estado de falha e inferir acerca de quais os eventos que podem estar na sua génese;
3. Modos de Falha: enumerar todos os eventos que são razoavelmente prováveis de gerar cada estado de falha;
4. Efeitos da Falha: detalhar o que sucede caso o modo de falha ocorra;
5. Consequências da Falha: definir a importância de cada modo de falha;
6. Manutenção Pró-Ativa e Intervalos: determinar se a manutenção preditiva e preventiva é adequada e se a sua realização se adequa;
7. Estratégias Default: procurar a falha, reprojeter ou simplesmente deixar a falha ocorrer e só depois proceder à sua reparação.

Na verdade, as primeiras cinco etapas do processo RCM correspondem aos passos estabelecidos anteriormente para a realização de uma FMECA. Um dos aspetos fundamentais no RCM é o facto desta metodologia reconhecer que as consequências das falhas são muito mais importantes que as suas características técnicas. Deste modo, reconhece que o único motivo para se proceder a qualquer tipo de manutenção pró-ativa não é prevenir cada falha, mas prevenir, ou pelo menos diminuir, as consequências da falha. É afastada a ideia de todas as falhas serem reparadas, permitindo focalizar nas atividades de manutenção que têm mais efeito no desempenho da organização. (Moubray 1997)

Como resultados da análise RCM podem ser efetuados programas de manutenção pelo departamento de manutenção, revistos os procedimentos operacionais e até mesmo alterados projetos ou modos de operação dos ativos. Tal desfecho, aliado ao modo como se processa todo o método, permite atingir uma melhoria no desempenho operacional e uma maior efetividade do custo de manutenção. Além disso, consegue garantir uma maior segurança e proteção ambiental, uma vez que considera todas as implicações de cada modo de falha nestes parâmetros, antes de considerar qualquer efeito sobre as operações, e um período de vida útil mais longo, reflexo do recurso a certas ações de manutenção. Por último, com a aplicação do RCM finda-se com um registo compreensivo e totalmente documentado das exigências de manutenção de todos os ativos significativos utilizados pela organização.

3.2 Métodos estatísticos

Os métodos estatísticos são versados como um conjunto de artefactos que viabilizam a conversão de uma série de dados num conjunto de informações relevantes para análise. Os dados por si só, sem ser estabelecido qualquer tipo de comparação entre eles, são inevitavelmente incompreendidos e dispensáveis, havendo, pois, a necessidade de os modificar em algum tipo de informação vantajosa. Através do controlo do que está efetivamente a ocorrer, estes métodos possibilitam a extração de informações significativas dos dados recolhidos. Objetivam assim descrever e compreender totalmente a variabilidade existente em todas as medições experimentais.

Estes métodos começaram a ser aplicados em fiabilidade quando surgiu a necessidade de quantificar o número de avarias no tempo devido a diversos fatores, como técnicos, económicos e de segurança. Segundo Ferreira (1998), são três as principais leis contínuas utilizadas na fiabilidade:

- Lei Exponencial: aplicada quando a taxa de avarias é sensivelmente constante, isto é, λ é constante, num dado intervalo de tempo;
- Lei Normal: família de distribuições de probabilidade contínua, sendo definida pela média (m) e desvio-padrão (σ);
- Lei de Weibull: modelo bastante flexível, uma vez que sendo uma lei a três parâmetros permite ajustar corretamente todos os tipos de resultados experimentais e operacionais. Frequentemente aplicada na distribuição de falhas de componentes mecânicos e metalúrgicos.

De modo a analisar os dados corretamente e de forma eficaz, é necessário expor certos conceitos e equações:

Processo de Poisson

A distribuição de Poisson é um processo simples e frequentemente empregue nas aplicações de engenharia. É classificada como uma distribuição discreta e aparece comumente associada a situações onde a ocorrência de eventos se concede em certos instantes (aleatórios) de tempo. Trata-se assim de um processo estocástico, representando a evolução de um conjunto de experiências aleatórias ao longo do tempo.

Supondo que determinados eventos ocorram em instantes aleatórios de tempo e que $N(t)$ represente o número de eventos ocorridos no intervalo $[0, t]$, o conjunto de variáveis aleatórias $\{N(t), t > 0\}$ é denominado de processo de Poisson com taxa de ocorrência λ se e só se:

- $N(0) = 0$;
- Os incrementos $N(t)$ são independentes e estacionários;
- Em intervalos de tempo suficientemente pequenos, a probabilidade de ocorrência de um evento é aproximadamente igual a uma constante positiva, a taxa de ocorrência λ , multiplicada pelo comprimento do intervalo;
- Dois eventos não podem ocorrer em simultâneo.

Função acumulada de avarias

A função de repartição da variável T é definida por:

$$F(t) = Prob(T < t)$$

Onde:

T , é a variável aleatória até à avaria

Função de fiabilidade

$$R(t) = Prob(T \geq t)$$

Função densidade de probabilidade de avarias

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = -\frac{dR(t)}{dt}$$

Para um intervalo de tempo dt

$$Prob(t \leq T \leq t + dt) = f(t) dt$$

Onde:

$f(t)$, exprime a probabilidade de avaria no intervalo de tempo dt

Taxa de avarias instantânea $\lambda(t)$

$$\lambda(t) dt = \frac{F(t + dt) - F(t)}{R(t)}$$

Onde:

$\lambda(t)$, é a probabilidade da existência de avaria no instante t , na condição que não tenha havido qualquer avaria até esse instante

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

$$F(t=0) = 0$$

Então:

$$\lambda(t) dt = \frac{dF(t)}{1 - F(t)}$$

Integrando:

$$\int_0^t \lambda(t) dt = \int_0^t \frac{dF(t)}{1 - F(t)} \Rightarrow$$

$$-\int_0^t \lambda(t) dt = \int_0^t \frac{-dF(t)}{1 - F(t)} \Rightarrow$$

$$-\int_0^t \lambda(t) dt = [\ln(1 - F(t))]_0^t \Rightarrow$$

$$-e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} = 1 - F(t)$$

Função geral de fiabilidade

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

Função geral acumulada de avarias

$$F(t) = 1 - e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}$$

Função geral de densidade de probabilidade de avarias

$$f(t) = \lambda(t) e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}$$

Função geral da taxa instantânea de avarias

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

3.2.1 Teste de Laplace

Antes de se aplicar qualquer distribuição estatística aos dados retirados do histórico de falhas é necessário que estes sejam analisados do ponto de vista do processo estocástico (ordem cronológica das ocorrências) e verificada qual a sua tendência, crescente, decrescente ou constante.

A avaliação da tendência deve ser efetuada de acordo com a natureza do sistema, isto é, conforme se tratam de sistemas reparáveis ou não reparáveis. Quando a análise incide sobre os primeiros, pretende inferir-se qual o comportamento demonstrado pela taxa de falhas, isto é, se é crescente, decrescente ou constante. Por outro lado, nos sistemas não reparáveis, pretende-se verificar se as falhas ocorrem de forma independente e se encontram igualmente distribuídas ao longo do tempo, tratando-se de um processo Poisson homogéneo, com taxa de avarias constante. Na presente dissertação é abordada apenas a primeira forma de análise, uma vez que se contactam com equipamentos reparáveis.

De forma a avaliar o comportamento da taxa de falhas é assim necessário recorrer a um teste estatístico não paramétrico designado por teste de hipótese de Laplace. É definida uma hipótese nula H_0 (taxa de falhas é constante), a qual é aceite como verdadeira até evidência em contrário, e uma hipótese alternativa H_1 (taxa de falhas não é constante). Se a taxa de falhas for constante,

o processo em análise será um processo Poisson homogéneo e os tempos entre falhas serão descritos por uma distribuição exponencial negativa. Caso se verifique o contrário (taxa de falhas é função do tempo), então o processo diz-se Poisson não homogéneo.

De salientar que os métodos gráficos utilizados na determinação dos parâmetros TTF, *Time to Fail*, só são aplicáveis quando os dados são independentes e distribuídos de forma idêntica. No caso de sistemas não reparáveis, esta condição é geralmente verificada. Contudo, em sistemas reparáveis, como podem ser sujeitos a mais do que uma falha, as falhas geralmente dependem das anteriores.

3.2.2 Weibull

A função de Weibull é amplamente utilizada nas aplicações de engenharia, devido à versatilidade que apresenta, sobretudo na descrição de fenómenos de vida de componentes elementares de sistemas, ao longo de todo o seu ciclo de vida (Assis 2014).

A distribuição de Weibull proporciona o melhor ajuste dos dados históricos dos equipamentos, devido à ampla rede de distribuições que estão incluídas na sua família, nomeadamente a distribuição normal, exponencial, de Rayleigh, Poisson e Binomial. De realçar que, a distribuição log-normal não está integrada na família de Weibull, sendo hodiernamente o seu maior concorrente, em virtude de ser a melhor escolha para certas propriedades dos materiais, taxas de crescimento de fendas e incrementos de deterioração não lineares. Contudo, Weibull é a melhor solução sempre que se pretende analisar um número de falhas inferior a 20 (Abernethy 2006).

A grande vantagem da análise Weibull reside na capacidade de possibilitar análises de falha e previsões satisfatórias com amostras de reduzidas dimensões. Desta forma, permite encontrar soluções para problemas iniciais, sem a necessidade de abranger um maior número de amostras. Evidentemente que quanto maior for a amostra, maior será a relevância estatística associada, contudo este método permite a análise de amostras de pequenas dimensões com uma precisão razoável. Para além disso, a análise em estudo proporciona uma representação gráfica dos dados de falha simples e relevante. O eixo horizontal representa uma medida relativa ao tempo, como tempos de operação, número de ciclos, entre outros, e o eixo vertical apresenta o número acumulado de falhas (Abernethy 2006).

Os dois parâmetros que definem a distribuição de Weibull são o parâmetro de forma β e o parâmetro de escala η e dizem respeito ao declive da reta e vida característica, respetivamente. O declive da reta, β , é particularmente importante e pode conceder informações para a determinação da origem da falha, ao passo que a vida característica, η , encontra-se relacionada com o tempo médio até à falha. Na manutenção centrada na fiabilidade, o valor de β permite inferir sobre a necessidade ou não de inspeções e revisões programadas. Se $\beta \leq 1$, as revisões não serão rentáveis. Por outro lado, caso o valor de β seja superior à unidade, o intervalo de tempo das revisões e inspeções periódicas é obtido diretamente da análise do gráfico, a uma taxa de falhas adequada. Para modos de falha que abranjam desgaste, se o custo de uma falha não planeada for muito superior às despesas de uma substituição planeada, existe um intervalo ótimo de substituição que visa custos mínimos (Abernethy 2006).

A função densidade de probabilidade da distribuição de Weibull (função de Weibull de três parâmetros) é definida por:

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \times \left(\frac{t - \gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} \times \exp \left(-\left(\frac{t - \gamma}{\eta} \right)^{\beta} \right)$$

Onde:

β , é o parâmetro de forma

η , é o parâmetro de escala

γ , é o parâmetro de localização

Assim, a função de fiabilidade associada expressa-se por:

$$R(t) = \exp\left(-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta\right)$$

Por conseguinte:

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

Por sua vez, a taxa de risco é representada como:

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \times \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1}$$

O tempo médio de falhas MTTF é dado por:

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

No tratamento de modos de falha de um sistema constata-se frequentemente que a consideração do parâmetro de localização (menor valor assumido por t) $\gamma = 0$ constitui uma aproximação bastante razoável (Assis 2014). Desta forma, todas as expressões supramencionadas podem ser simplificadas pela eliminação deste parâmetro.

Com o intuito de avaliar corretamente os resultados obtidos e poder alcançar uma solução apropriada para o problema, apresentam-se as seguintes conotações do parâmetro de forma:

- Se $\beta < 1$: indica um decréscimo na taxa de falhas, característico dos equipamentos que se encontram no período de mortalidade infantil. Nesta fase regista-se um grande número de falhas, habitualmente relacionadas com a fabricação do produto e primeiros dias de operação e rodagem.
- Se $\beta \approx 1$: representa uma taxa de falhas constante e é normalmente associada ao período de vida útil. Corresponde ao período de vida médio do produto e é consequência de falhas aleatórias ou modos de falha misturados.
- Se $\beta > 1$: revela um aumento da taxa de falhas, sendo comumente associado à fase de desgaste dos equipamentos. Este período, corrente no fim de vida do produto, apresenta tempos até à falha mais curtos e demonstra a incapacidade do equipamento para cumprir os requisitos para os quais foi projetado. Caso se verifique esta condição quando um produto ainda se encontra no início da sua vida, presenciam-se problemas graves no projeto ou análise de dados.

- Se $\beta > 6$: valor deve ser analisado com alguma precaução. Reflete um crescimento pronunciado da taxa de falhas e rápido desgaste, sendo comum em equipamentos antigos e anormal em equipamentos elétricos. Pode também ser resultado de certos tipos de erosão.
- Se $\beta > 10$: valor excessivo que, apesar de poder relatar a realidade, é bastante incomum em aplicações de engenharia. Demonstra um desgaste extremamente elevado do produto e pode ser resultado de uma recolha censurada de dados com um número muito pequeno de falhas.

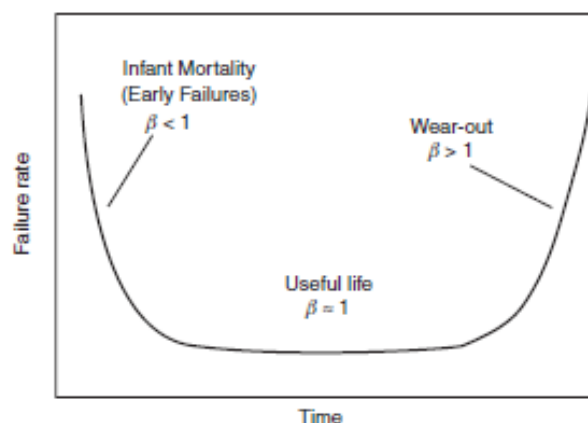


Gráfico 3-Relação entre a curva da banheira e o declive de Weibull β (O'Connor e Kleyner 2012)

3.2.3 CROW-AMSAA

A indústria petroquímica, tal como foi anteriormente mencionado, oferece especial atenção à manutenção, procurando prever qualquer tipo de falha antes da sua ocorrência, de forma a aumentar a disponibilidade dos seus equipamentos. O método Crow-AMSAA é frequentemente empregue nestes contextos uma vez que, para além de constituir um indicador do desempenho da fiabilidade dos equipamentos, funciona como um meio para prever o impacto das futuras iniciativas de melhoria da fiabilidade (Lifetime Reliability Solutions 2009).

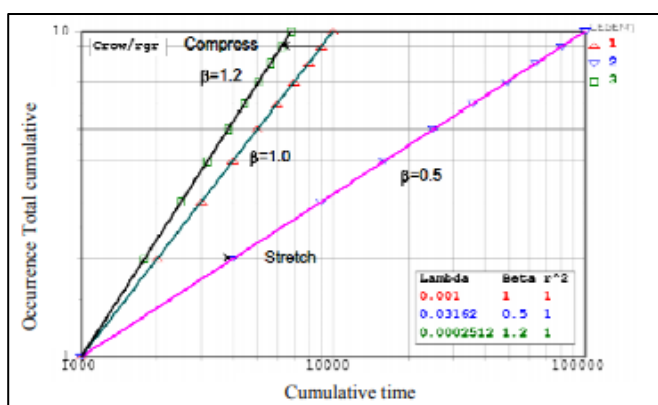


Gráfico 4-Número acumulado de falhas por tempo

O modelo AMSAA estruturalmente é semelhante a um processo de Poisson não-homogéneo com uma função de intensidade de Weibull. Esta configuração proporciona desde logo vantagens, visto que os parâmetros do método são determinados com uma forte base estatística

e podem posteriormente ser obtidos intervalos de confiança e aplicados testes de aderência aos dados (Denning 2012). Trata-se de um método puramente empírico, mas representa uma boa aproximação quando aplicado em equipamentos que sofrem múltiplos modos de falha. Ao permitir o estudo de modos de falha misturados, a aquisição de dados torna-se muito mais simples do que no método de Weibull e a falta de informação sobre a falha deixa de inviabilizar a análise. Deste modo, o método de Crow-AMSAA proporciona resultados satisfatórios quando os dados têm sérias lacunas e viabiliza a análise de modos de falha misturados.

Os gráficos do método de Crow-AMSAA consistem na representação, em escala logarítmica, do número acumulado de falhas (eixo y) de acordo com o tempo acumulado (eixo x). Após a representação dos dados, procura-se inferir acerca da sua tendência, sendo normalmente expressa através de retas, derivado da natureza dos eixos do gráfico (logarítmica). Subsequentemente, constata-se a tendência dos níveis de fiabilidade e direcionam-se os esforços da empresa a fim de os manter ou aumentar. Desta forma, o método em estudo assenta nos seguintes passos:

1. Enumeração das falhas e respetivo tempo acumulado;
2. Representação gráfica do número de ocorrências acumulado versus tempo acumulado, em escala logarítmica;
3. Determinação dos parâmetros β e λ , sendo β um forte indicador da melhoria, estagnação ou deterioração da fiabilidade, ao passo que λ representa um valor hipotético que facilita a previsão de futuras falhas. Os parâmetros β e λ podem ser obtidos ou a partir do gráfico, correspondendo o primeiro ao declive da reta e o último ao valor da ordenada para $t=1$, ou a partir do método da máxima verossimilhança- Maximum Likelihood Estimation (MLE). Segundo O'Connor e Kleyner (2012), este método apoia-se na determinação dos parâmetros que permitem maximizar a probabilidade de uma amostra de dados se ajustar a uma certa distribuição. Trata-se de uma tentativa para encontrar os valores mais prováveis dos parâmetros de distribuição para um conjunto de dados, através da maximização do valor da função de verossimilhança. De um ponto de vista estatístico, o método é considerado robusto e proporciona a obtenção de estimadores com boas propriedades estatísticas. Desta forma, o método MLE é versátil e aplicável a grande parte dos modelos e tipos de dados.

A avaliação estatística pode ser efetuada até ao tempo final de teste ou até à última falha presenciada. Na presente dissertação, aborda-se apenas a primeira forma de avaliação, que retrata o conjunto de procedimentos utilizados para analisar a informação dos dados compreendidos num intervalo de tempo pré-estabelecido. Assim, ao invés de se estudar a fiabilidade até a última falha ocorrer, define-se um intervalo de tempo e segue-se a sequência de passos supramencionada. Segundo esta avaliação, os parâmetros de distribuição e função intensidade podem ser definidos por:

$$\beta = \frac{N}{N \times \ln T - \sum_{i=1}^N \ln(t_i)}$$

$$\lambda = \frac{N}{T^\beta}$$

$$\rho = \lambda \times \beta \times t_i^{\beta-1}$$

Onde:

N , é o número acumulado de falhas

T , é o tempo total de teste

t_i , é o tempo acumulado até a falha i

O parâmetro β no método Crow-AMSAA é um indicador de fiabilidade, no entanto não deve ser identificado como o parâmetro de escala da função de Weibull. Assim, para:

- $\beta < 1$: ocorre uma melhoria na fiabilidade;
- $\beta = 1$: a fiabilidade encontra-se estagnada, é constante;
- $\beta > 1$: ocorre uma deterioração da fiabilidade.

Determinada a função de intensidade, surge a necessidade de verificar se esta realmente descreve o comportamento da fiabilidade do equipamento, pelo teste de Crámer-von Mises. A título de exemplo apresenta-se, no gráfico 5, um caso particular de um equipamento no qual se alteraram os parâmetros de distribuição uma vez que se verifica a rejeição da hipótese nula, isto é, a função intensidade encontrada não descrevia corretamente a distribuição dos dados. É de salientar que a posterior separação dos dados em dois segmentos permitiu visualizar uma melhoria na fiabilidade a partir de $t=400$, o que antes da segmentação não era explícito. Estes testes de ajustes são de extrema importância porque conferem ao método uma espécie de ação corretiva que o permite alcançar parâmetros de distribuição que descrevam corretamente a situação presenciada.

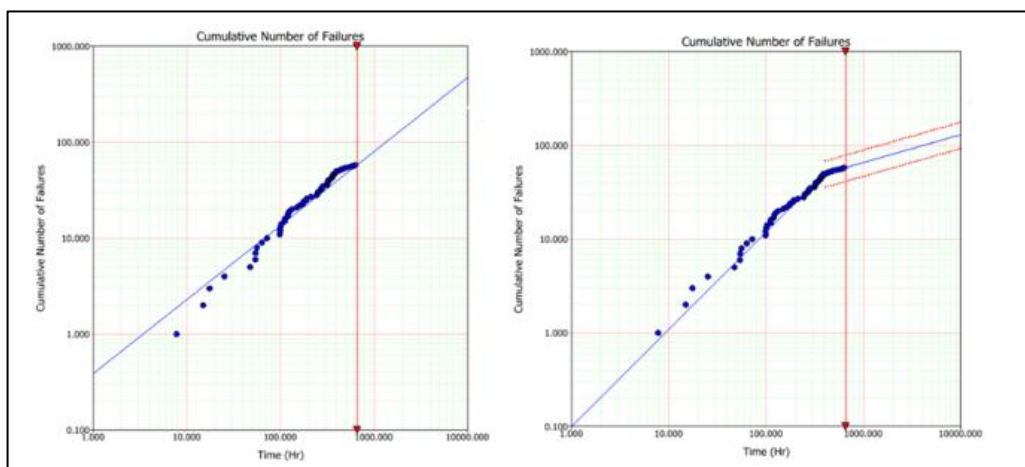


Gráfico 5-Rejeição da hipótese nula e posterior correção do declive (Reliasoft 2009)

Posteriormente, é relativamente simples e preciso prever a ocorrência de futuras falhas pela extrapolação da linha de tendência para o futuro.

$$t_i = \left(\frac{N}{\lambda} \right)^{1/\beta}$$

$$TTF = t_i - T$$

Onde:

TTF, é o tempo total até ocorrer a falha (futura)

4 Unidade 1700

4.1 Enquadramento

Ao longo da presente dissertação serão abordadas válvulas de controlo e de bloqueio. Este conjunto está alocado na unidade 1700-PSA (*Pressure Swing Adsorption*) que é responsável pela purificação de hidrogénio e pelo seu fornecimento a determinada pressão e pureza à unidade 3700, encarregue pela dessulfuração de gasóleo.

A dessulfuração de gasóleo é um processo de extrema importância uma vez que a presença de enxofre nos combustíveis provoca a formação de dióxido de enxofre no decorrer da combustão. Este elemento, dependendo da concentração e do tempo de exposição, pode fomentar problemas respiratórios e exacerbar problemas cardiovasculares. Ademais, o elemento pode transformar-se em trióxido de enxofre que, por sua vez, ao reagir com a humidade, pode dar origem a ácido sulfúrico. Este ácido é responsável pela geração de chuvas ácidas, fenómeno muito prejudicial quer para edifícios e construções, quer para o meio ambiente. Desta forma, as legislações ambientais obrigam a que os gasóleos possuam cada vez menos enxofre, tendo assim o hidrogénio alcançado um relevo considerável na indústria de refinação.

O hidrogénio é então a principal matéria-prima no processo de dessulfuração de diversos combustíveis. Na unidade PSA, alvo de estudo no ponto 4.2, recorre-se a um processo de adsorção com o intuito de purificar uma corrente de hidrogénio com impurezas, de modo a produzir uma corrente com elevado teor de hidrogénio, fornecida à unidade 3700, e um gás residual (*tail gas*) contendo essas impurezas.

4.2 PSA

A unidade PSA está inserida na fábrica dos combustíveis. O processo é baseado no princípio que os adsorventes são capazes de adsorver seletivamente as impurezas. Numa fase inicial, as impurezas são adsorvidas num acumulador (adsorvedor) a alta pressão e posteriormente são desadsorvidas quer devido à alteração da pressão no seu interior, que varia desde a pressão do gás de alimentação à pressão de gás residual, quer pelo recurso a uma purga de elevada pureza. Tal procedimento é então dividido em duas grandes fases, a adsorção e regeneração. O hidrogénio, componente desejado, não é adsorvido e a sua recuperação é elevada.

O processo de adsorção é baseado nas diferentes forças de ligação dos elementos do gás de alimentação ao material adsorvente. Por um lado, componentes extremamente voláteis e com baixa polaridade, como o hidrogénio e oxigénio não são praticamente adsorvidos. Já moléculas como o azoto, monóxido de carbono, dióxido de carbono e vapor de água são totalmente adsorvidas, possibilitando a formação de um produto sem a presença destas impurezas. A figura 6 quantifica as diferentes forças de ligação dos elementos ao material adsorvente.

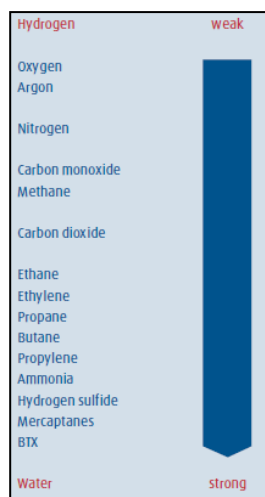


Figura 6-Ranking qualitativo das forças de adsorção

As percentagens de regeneração variam consoante o número de adsorvedores, obtendo-se valores entre 80-90% quando se utilizam mais de quatro adsorvedores. Para além de uma maior regeneração, um número superior de adsorvedores permite um aprovisionamento com menores distúrbios enquanto se realizam manutenções nos adsorvedores isolados ou aquando a permuta da composição do gás de alimentação.

O processo PSA é realizado a temperatura constante e é corolário de uma variação entre pressões nos adsorvedores. Como no processo não ocorre nenhum tipo de aquecimento ou arrefecimento, conseguem atingir-se ciclos num intervalo de tempo muito reduzido, cerca de 11 minutos.

A unidade PSA separa assim gases provenientes das operações efetuadas nas unidades da refinaria, em hidrogénio puro e gás residual, sendo este enviado para o coletor de gás combustível. O sistema PSA é uma tecnologia versátil, com custo reduzido e eficiente energeticamente.

A unidade é constituída, como é passível de ser observado na figura 7, pelos seguintes equipamentos:

- Válvulas;
- Sistema de Controlo;
- Componentes elétricos e tubagens;
- Acumuladores;
- Instrumentação.

Esta unidade é também caracterizada pelo funcionamento em ciclos desfasados, isto é, num determinado momento, enquanto um adsorvedor está na fase de adsorção, os restantes localizam-se nos diversos passos de regeneração, o que permite um fluxo ininterrupto de carga.



Figura 7-Unidade PSA

Posteriormente são apresentadas cada uma das etapas do processo, independentemente do número de adsorvedores utilizados na unidade. A área a vermelho da figura 8 representa as impurezas, ao passo que a área azul diz respeito ao produto.

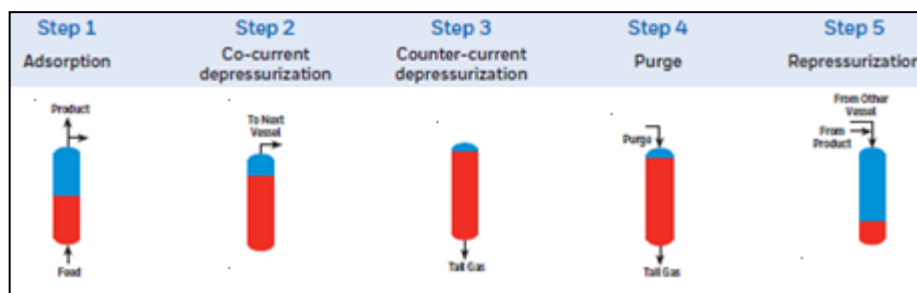


Figura 8-Diferentes etapas da PSA

Adsorção

O gás de alimentação entra no adsorvedor a uma pressão elevada e flui verticalmente, sendo as impurezas seletivamente adsorvidas e produzindo-se um hidrogénio de elevada pureza. Quando o adsorvedor atinge a sua máxima capacidade de adsorção, o gás de alimentação passa a ser direcionado para um novo adsorvedor.

Após esta fase de adsorção existe um ajuste na pressão do acumulador, feita a partir de fases secundárias denominadas etapas de equilíbrio de pressão.

Despressurização para purga

De forma a recuperar o hidrogénio que fica retido nos espaços vazios do adsorvente, o adsorvedor é despressurizado no sentido do gás de alimentação (ascendente). Esta despressurização até ao nível de baixa pressão, permite remover o produto requerido pelo topo do adsorvedor, utilizando-o para purgar e pressurizar outros adsorvedores.

Despressurização para gás residual

Após a despressurização para purga, o adsorvente é parcialmente regenerado pela nova despressurização que ocorre no adsorvedor. Este processo desenrola-se no sentido inverso ao do fluxo de adsorção, permitindo rejeitar parte das impurezas pelo gás residual.

Purga

O adsorvente é purgado com elevado grau de pureza (advém da despressurização para purga de outro adsorvedor) e a baixa pressão, de modo a remover as impurezas remanescentes e regenerar o adsorvedor.

Repressurização

O gás de repressurização é fornecido pela etapa de despressurização no sentido ascendente e pelo produto ou gás de alimentação. O adsorvedor é repressurizado até à pressão de adsorção, de modo a estar novamente capaz de purificar o gás de alimentação.

O PSA pode ser assim versado como um mapa de sequência de pressões, no qual a recuperação de hidrogénio será tanto maior quanto maior for o número de adsorvedores. Considera-se que o número para o qual ocorre uma estabilização da recuperação se dá com seis adsorvedores, sendo esta a situação corrente na unidade em análise. Além disso, o funcionamento da unidade pode variar consoante o modo de pressão do gás residual. Na presente dissertação foi maioritariamente explorado o modo de funcionamento com gás residual de baixa pressão, uma vez que para além de apresentar percentagens de recuperação significativamente superiores, o consumo de energia do processo é menor (um dos compressores encontra-se desligado).

4.2.1 Pressão nos adsorvedores

O gráfico da pressão aplicada nos adsorvedores ao longo do tempo encontra-se no gráfico 6.

Primeiramente, pode realçar-se a igualdade na configuração das curvas. Tal ocorre, uma vez que os diferentes adsorvedores lidam exatamente com as mesmas sequências de pressões. Contudo, verifica-se um certo desfasamento entre essas curvas, sendo esse intervalo denominado por subciclo. Um subciclo é então definido pelo período entre o fim da adsorção em dois adsorvedores consecutivos.

Focalizando o estudo apenas no adsorvedor D-1701-U, segue-se a análise das diferentes etapas a que foi sujeito. Inicialmente, o gás de alimentação à pressão de 19 bar g entra no adsorvedor e flui no sentido ascendente. As impurezas são seletivamente adsorvidas e um hidrogénio de elevada pureza entra na linha de produto.

Acabada a fase de adsorção, o adsorvedor encontra-se parcialmente carregado com impurezas, estando a maior concentração no seu fundo. Com o intuito de se recuperar H_2 contido no adsorvedor são efetuadas várias despressurizações do fundo para o topo. Essas despressurizações permitem que o hidrogénio retido no adsorvedor ascenda e repressurize parcialmente ou purgue outros adsorvedores. Caso o hidrogénio seja utilizado para repressurizar outros adsorvedores, como nas situações representadas pelas setas a vermelho, diz-se que o adsorvedor está na fase de equilíbrio da pressão (E1, E2 e E3, respetivamente), uma vez que a pressão no equipamento em questão iguala aquela que é atingida naqueles que repressuriza (13,5, 8,1 e 3,3, respetivamente). Por outro lado, o efluente de despressurização (H_2) ao deslocar-se no sentido ascendente também purga (PP1 e PP2) outros adsorvedores, como o D-1701-Y e D-1701-Z, situações representadas pelas setas a laranja.

Devido às diversas despressurizações do fundo para o topo e consequente movimentação de hidrogénio implicada, a concentração de impurezas na secção superior do leito é cada vez maior. Existe assim necessidade do fluxo dentro do adsorvedor ser invertido, de modo a que perante uma nova despressurização, agora na direção descendente, as impurezas sejam eliminadas do acumulador. Desta forma, ocorre uma despressurização em sentido inverso ao do fluxo de adsorção para o gás residual, denominada por despressurização para gás residual (BD). Esta fase é importante pois impede o vazamento de impurezas pelo topo do acumulador.

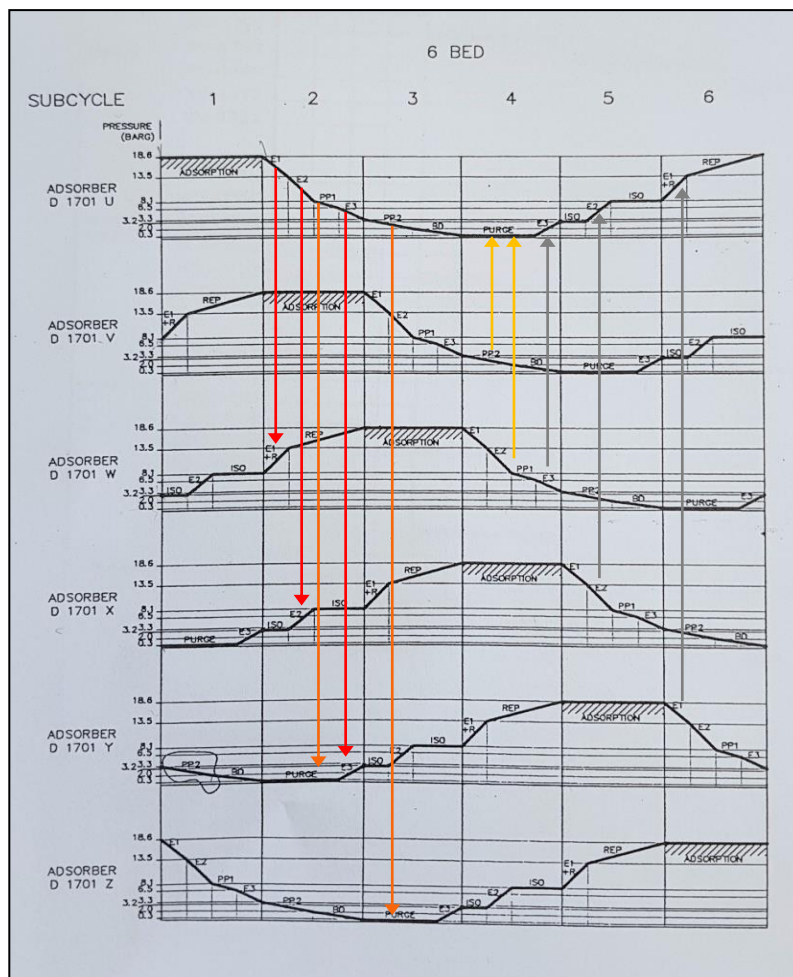


Gráfico 6- Distribuição de pressões nos diferentes adsorvedores

Posteriormente, inicia-se a fase de regeneração do acumulador. As impurezas remanescentes são removidas e enviadas para o gás residual através de um processo denominado purga (PURGE). O equipamento em estudo que antes tinha sofrido uma despressurização para purgar outro adsorvedor, recebe agora hidrogénio de dois outros acumuladores para retirar as impurezas remanescentes, do D-1701-V e D-1701-W, respetivamente. As setas a amarelo representam a despressurização que ocorreu nos outros adsorvedores para se limpar o acumulador em questão.

Por fim, ocorre a repressurização com gás de alimentação e hidrogénio proveniente de fases de equilíbrio de pressão até à pressão de adsorção. Esta última etapa, denominada também no gráfico por E1, E2 e E3, está representada pelas setas a cinzento. No gráfico é ainda passível de ser observado uma fase denominada REP, que diz respeito à entrada de uma corrente contínua de gás de alimentação no adsorvedor.

É bastante perceptível que as últimas fases são responsáveis pela preparação do adsorvedor, na medida em que é “renovado” de forma a purificar novamente o gás de alimentação. Este procedimento permite não só atingir taxas de regeneração elevadas, como também conservá-las. De salientar a presença de uma fase de isolamento, responsável pela verificação da estanquicidade das válvulas. Nesta fase fecham-se todas as válvulas, prevendo-se um valor de pressão constante. Caso essa premissa não seja verificada, algum dos equipamentos da unidade está avariado. Desta forma, e excluindo qualquer falha nas tubagens, é possível inferir acerca da válvula que se encontra avariada. Esta etapa é de extrema relevância porque a presença de pequenas oscilações pode levar a uma ação de manutenção prévia, impedindo a falha funcional do equipamento.

Todo o procedimento adotado só é possível de ser executado e controlado com tamanha precisão, uma vez que existe um conjunto de válvulas inseridas na unidade que atuam consoante o pretendido. Tais equipamentos serão alvo de estudo no capítulo seguinte.

5 Válvulas de Controlo e de Bloqueio

Segundo Skousen (1998), as válvulas são dispositivos mecânicos especialmente projetados para dirigir, iniciar, parar, misturar ou regular o fluxo, pressão ou temperatura do fluido (líquido ou gás) do processo. De acordo com a índole do seu projeto e função podem ser classificadas em:

- Válvulas de Bloqueio: permitem a passagem e bloqueio do fluido;
- Válvulas de Retenção: permitem a circulação do fluido em apenas um sentido;
- Válvulas de Estrangulamento: possibilitam a regulação do fluxo através da abertura/fecho parcial ou total.

As válvulas presentes na unidade estão inseridas quer no grupo de bloqueio, quer nas válvulas de estrangulamento. O último conjunto mencionado aglomera as válvulas automáticas de controlo, frequentemente denominadas apenas por válvulas de controlo, responsáveis por alterar as condições do fluxo de forma a cumprir os limites estipulados para os parâmetros em causa. Para abranger o controlo automático, estas válvulas necessitam de estar equipadas com atuadores e posicionadores, questão abordada na secção posterior.

É de salientar que ao realizar a categorização de válvulas pela sua função, certos designs do corpo da válvula, como globo, borboleta, gaveta, entre outros, podem estar associados às três classificações possíveis. Desta forma, é comum encontrarem-se válvulas borboletas com uma função de bloqueio e controlo.

5.1 Válvulas de Controlo

As plantas de processos são constituídas por diversos ciclos de controlo, de modo a conservar-se um determinado parâmetro do processo, como a pressão, o caudal, a temperatura, entre os limites inicialmente estabelecidos e assim assegurar a qualidade final do produto. Contudo, cada um destes ciclos recebe ou cria internamente certos distúrbios que prejudicam o bom funcionamento do sistema. Para reduzir o efeito das cargas provenientes desses distúrbios recorre-se a sensores e transmissores com a finalidade de recolher informação sobre a variável do processo e a sua relação com os limites requeridos. Posteriormente, o controlador processa toda essa informação e determina qual o procedimento adequado para a variável em questão voltar a enquadrar-se nos valores ambicionados. Quando toda a medição, comparação e cálculo são finalizados, um elemento final é responsável pela implementação da estratégia selecionada pelo controlador (Fisher 2005).

As válvulas de controlo, elemento final do ciclo, são um dispositivo mecânico destinado à regulação de caudais de fluidos. Tratam-se de um orifício de área variável, através do qual o fluido se escoia, e cuja secção é feita variar de acordo com o caudal pretendido. A área do orifício da válvula é modificada com o auxílio de um atuador, normalmente pneumático. Este equipamento de alto desempenho está encarregue de fornecer a potência e precisão necessárias para controlar a passagem de fluxo, conforme as condições de serviço pretendidas.

Vulgarmente, as válvulas de controlo são divididas em quatro grupos, as de esfera, de obturador excêntrico, de globo e de borboleta. Será dada especial atenção aos dois últimos conjuntos, visto serem aqueles nos quais as válvulas de controlo da unidade se enquadram. Independentemente do tipo de válvula de controlo que representam são normalmente constituídas pelo corpo, atuador e dispositivo de controlo.

Corpo da Válvula

Este componente é o principal fragmento de retenção de pressão nas válvulas e é através deste componente que a válvula contacta com as tubagens. As vias por onde circula fluido são constituídas por paredes suaves e arredondadas, sem a presença de cantos vivos, o que se traduz numa passagem do fluido sem a criação de qualquer tipo de ruído ou turbulência. Estas vias são também de área constante, evitando perdas de pressão adicionais e aumentos de velocidade.

Consoante o tipo de corpo da válvula e a forma do obturador ou disco podem obter-se diferentes curvas características inerentes da válvula, apresentadas no gráfico 7.

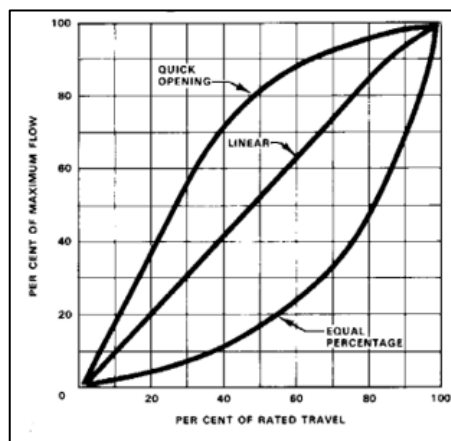


Gráfico 7-Curvas características inerentes às válvulas (Fisher 2005)

A curva característica de igual percentagem é a mais comum, na qual ocorre um aumento da percentagem de passagem de fluido no instante final do movimento de abertura da válvula. Já a situação de fluxo linear ocorre maioritariamente nos sistemas onde a queda de pressão na válvula representa a maior parte do decréscimo de pressão total do sistema, circunstância esta verificada em alguns dos equipamentos em estudo. Por último, a curva característica de abertura rápida é comum quando se presencia um serviço on-off e os equipamentos associados são projetados para se atingirem grandes quantidades de fluxo rapidamente.

Atuador Pneumático

O atuador pneumático permite o controlo e paragem de serviço, se assim for necessário. Por ação deste componente é possível a conversão de pressão num movimento linear ou rotativo. Este componente é então um órgão que instalado num processo trabalha de forma a modificar as suas variáveis características e normalmente encontra-se integrado no elemento final de uma cadeia de controlo. Existem diferentes tipos de atuadores, sendo o cilindro pneumático o mais comum para as aplicações pretendidas.

Perante uma determinada força no pistão resultante da entrada ou saída de ar do equipamento, induz-se um movimento na haste do atuador, que por sua vez transmite o movimento ao obturador ou disco e possibilita a abertura ou fecho da válvula.

É incorporada uma mola no seu conjunto com o intuito de se garantir uma função de segurança, isto é, na condição de cessar o fornecimento de ar ao atuador a válvula abre ou fecha totalmente. De referir que a presença da mola obriga ainda a que, caso se pretenda inverter o movimento da válvula, o fluxo de ar para o atuador seja suficiente para se produzir um momento superior àquele que é produzido pela mola.

Posicionador

O posicionador, passível de ser visualizado na figura 9, é o instrumento que assegura uma relação pré-estabelecida entre a posição da haste da válvula e o sinal de controlo. O sinal elétrico enviado pelo controlador é comparado com o curso da válvula, e mediante a relação é fornecido um sinal pneumático (variável manipulada) ao atuador.

Este equipamento pode conter uma unidade conversora pneumática ou electropneumática (I/P), sendo na presente dissertação abordada apenas a última. O posicionador atua de acordo com o princípio do balanço das forças. Inicialmente, com o modelo I/P, o sinal de corrente é convertido num sinal de pressão (3-15 psi/20684-103421 Pa). O sinal de pressão atua nos diafragmas do instrumento de medida, criando uma força descendente. Por outro lado, o movimento da haste do atuador é transmitido ao topo da mola de medida através do braço e comes. Como resultado, a tensão na mola de medida varia consoante as posições ocupadas pela haste do atuador. Quando as duas forças se igualam, o sistema diz-se em equilíbrio e a haste está na posição pretendida pelo instrumento de medida. Caso as forças sejam díspares, a viga balanceada move-se e arrasta a válvula de gaveta associada, alterando os valores de pressão e taxa de ar no atuador. Esta alteração provoca um determinado movimento no pistão, que se prolongará até a tensão na mola de medida igualar a pressão no instrumento de medida.

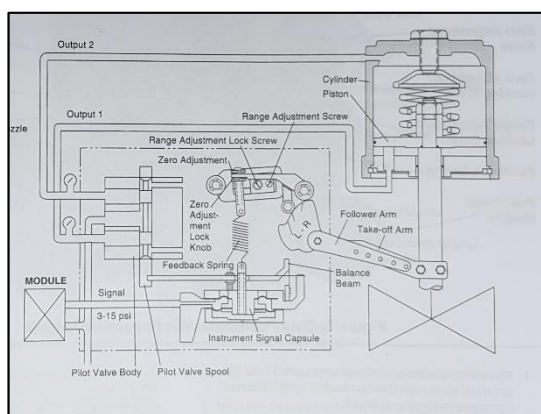


Figura 9-Diferentes componentes do posicionador

5.1.1 Válvulas de Controlo Globo

As válvulas de globo são o tipo mais comum de válvulas de controlo devido à simplicidade do seu projeto, versatilidade de aplicações, facilidade de manutenção e ampla gama de pressões e temperaturas. Este tipo de válvulas apresenta um movimento linear (obturador translada) que possibilita que a força gerada pelo atuador pneumático seja diretamente transmitida para o obturador, ocorrendo perdas mínimas de energia. Na figura 10 apresenta-se a configuração destas válvulas na unidade 1700. Posteriormente abordou-se cada uma das suas partes, realçando-se os elementos principais de cada uma. É de salientar que, como em todas as

válvulas da unidade o atuador era apenas responsável pela abertura das válvulas, apenas se aborda a situação de a válvula se encontrar normalmente fechada, situação que provém da força exercida pela mola.



Figura 10-Válvula de Controlo Globo
(Flowserve 2015)

Funcionamento

Quando uma situação de queda de pressão ocorre (pressão a jusante é inferior à pressão a montante) o fluido desloca-se da via de entrada para a via de saída. Quando o fluido cruza a sede, o nível de pressão diminui e a velocidade aumenta. Esta queda de pressão é uma das principais responsáveis pelas falhas nas válvulas (Anexo 1). Posteriormente, já na parte inferior do corpo da válvula, a área expande, recuperando-se os níveis de pressão e atenuando-se os valores da velocidade. Para fechar a válvula, o controlador interpretando os sinais do posicionador adapta os níveis de fornecimento de ar e a mola do atuador é assim responsável por deslocar o pistão, transferindo-se o seu movimento linear para um movimento linear do obturador. Aquando o obturador contacta com a sede, presenciam-se fenómenos de deformação e pouco ou nenhum fluido passam para a parte inferior do corpo da válvula.

Por outro lado, quando se pretende abrir a válvula, o sinal proveniente do controlador permite a entrada de ar no atuador, que exerce uma determinada força no pistão e conseqüente ascensão do obturador. De salientar que o atuador, para movimentar em sentido ascendente o obturador, tem de exercer uma força que seja suficiente para vencer aquela que é exercida pelo fluido no obturador e pela mola.

Soluções para componentes críticos

É no corpo da válvula que se localizam alguns dos vedantes, nomeadamente as sedes. Estes vedantes, juntamente com o obturador, formam um conjunto de equipamentos, que consoante a sua forma, podem influenciar o caudal que é liberado pela válvula. Como é passível de ser observado na figura 11, o padrão denominado por área máxima permite à válvula libertar uma maior quantidade de fluido (maior C_v). Por outro lado, quando são pretendidos baixos coeficientes opta-se pelo conjunto reduzido. Em algumas situações opta-se pelo conjunto integral, sendo utilizada uma sede especial e um obturador sobredimensionado de forma a aumentar o C_v atingido com o padrão de área máxima.

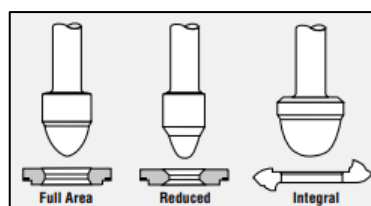


Figura 11-Conjunto das sedes e obturador

Este conjunto é habitualmente apresentado nas válvulas de duas formas, a forma padrão e aquela que permite um equilíbrio da pressão. Na presente dissertação é abordada apenas a última, uma vez que se presenciam quedas de pressão acentuadas e existe a necessidade de reduzir a pressão necessária para o movimento do obturador pela redução da área do conjunto que não se encontra equilibrada. Com essa finalidade, ao conjunto do obturador e sede, associa-se a gaiola, passível de ser observada na figura 12.

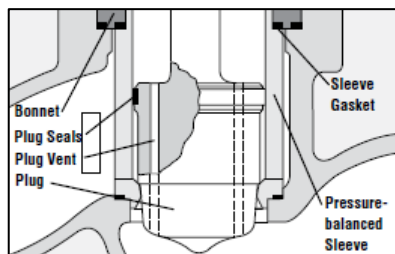


Figura 12-Conjunto da gaiola, sede e obturador

Por sua vez, as sedes podem também possuir diferentes configurações e materiais, proporcionando diferentes atributos às válvulas. Nas válvulas da unidade, mesmo não existindo o fenómeno de cavitação (Anexo 1), opta-se pelas sedes “soft”, denominadas em português por sedes resilientes. Na figura 13 encontra-se uma sede deste género, sendo de salientar o seu design, que comporta uma sandwich de elastómeros entre duas peças de metal. Determinados tipos de sedes, quando falham são substituídos e o componente não é reparado. No entanto, este tipo de sedes apresenta a vantagem de ser reparável. Desta forma, este tipo de sedes é frequentemente reparado e entra como um componente novo no stock de peças sobresselentes.

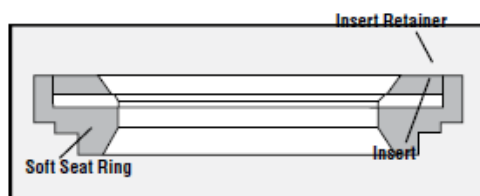


Figura 13-Sede Resiliente

Por último, há que salientar a presença dos empanques e guias ao longo do obturador que são responsáveis pela sua notável vedação e guiamento. O empanque inferior é projetado de forma a minimizar a quantidade de fluido na haste do obturador, ao passo que o empanque superior impede a passagem de fluido para o atuador. Os dois empanques encontram-se distanciados, de forma a evitar a contaminação do empanque superior quando esporadicamente se dá a passagem de fluido pelo empanque inferior. Por outro lado, as guias permitem assegurar um movimento linear de qualidade, sendo a guia superior também responsável pelo auxílio na vedação. A guia inferior permite um alinhamento muito minucioso entre a cabeça do obturador e a sede.

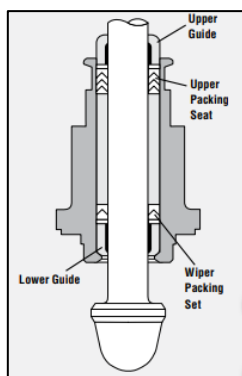


Figura 14-Empanques e guias ao longo do obturador

Principais Problemas

Os problemas associados a válvulas globo de controlo resumem-se geralmente a privações do movimento da haste, fugas excessivas pelos vedantes, passagem inadequada de fluido e impactos do obturador.

O entrave do movimento da haste conduz à estagnação do obturador e posterior perda de função da válvula. Esta adversidade pode estar associada, entre outras coisas, a:

- Aperto excessivo dos empanques;
- Temperatura de serviço não se enquadra nos limites estabelecidos no projeto;
- Fornecimento inadequado de ar;
- Erro do posicionador;

As fugas excessivas pelos vedantes também são frequentes problemas associados a este tipo de válvulas, podendo ter a sua génese na:

- Aperto inadequado do castelo;
- Desgaste ou dano da junta do castelo;
- Pressão indevida no atuador;
- Posicionamento incorreto do obturador;
- Movimento impróprio do fluido;

A passagem inadequada de fluido é um problema muito comum nas válvulas de controlo e está habitualmente associada a:

- Ajuste incorreto do obturador, limitando a abertura ou fecho da válvula;
- Desgaste ou dano da sede;
- Desgaste ou dano dos anéis balanceados;
- Posicionamento incorreto do obturador;
- Condições de serviço excedem a capacidade dos equipamentos interiores;
- Movimento impreciso do atuador;
- Fornecimento inadequado de ar;

Por último, sendo a falha menos comum neste tipo de válvulas, o impacto do obturador pode danificar certos elementos e em situações extremas comprometer o funcionamento do equipamento. Este problema encontra-se relacionado com:

- Posicionamento incorreto do obturador, conduzindo a um amortecimento do ar inadequado;
- Fornecimento de ar excessivo;
- Sobredimensionamento do obturador e sede para as condições de fluxo apresentadas.

5.1.2 Válvula de Controlo Borboleta

Primitivamente, as válvulas de controlo borboleta eram projetadas apenas como válvulas on-off, contudo com a recente implementação de melhorias nas válvulas rotativas é agora possível recorrer a este tipo de válvula para regular o fluxo do fluido.

Existem dois grandes tipos de válvulas borboleta, as concêntricas e excêntricas. O último grupo é aquele sobre o qual a presente dissertação incide. As válvulas borboleta excêntricas são projetadas especialmente para aplicações que requerem um controlo preciso, utilizando uma haste deslocada do centro do corpo da válvula. Na situação estudada, as válvulas são também equipadas com posicionadores e atuadores, permitindo um controlo bem mais preciso e apresentando uma configuração semelhante à figura 15.

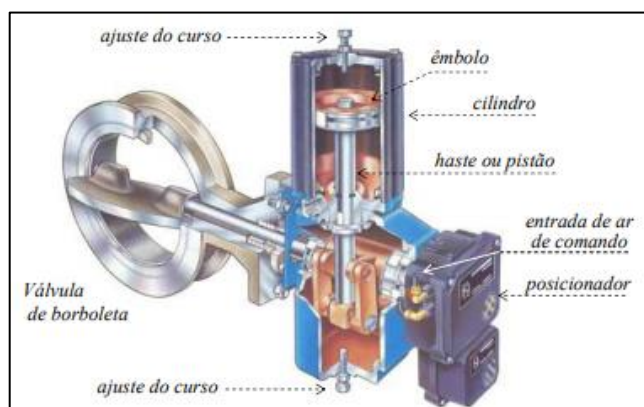


Figura 15-Válvula de Controlo Borboleta

As válvulas em estudo são amplamente utilizadas devido à economia que oferecem, não só em relação ao espaço de instalação, como também ao investimento associado. Comparativamente com as válvulas globo, as válvulas borboleta são bastante mais utilizadas em situações que o peso é um fator decisivo. Apresentam dimensões e peso reduzido, representando 40 a 80% do peso das válvulas globo. Para além disso, a dimensão dos atuadores nestas válvulas é bastante inferior àquela que é exigida pelos atuadores nas válvulas de globo e apresentam coeficientes de vazão superiores para iguais dimensões. Porém, a utilização de válvulas borboleta está limitada a situações em que ocorram quedas de pressão pequenas e é associada a um aumento de histerese e zona morta devido à transferência mecânica do movimento linear do atuador para o movimento rotativo do disco da válvula.

De referir que, tal como nas válvulas de globo, todas as válvulas borboleta da unidade se encontram normalmente fechadas, graças à atuação da mola do atuador.

Funcionamento

O fluido entra no corpo das válvulas e move-se ao longo das suas vias, encontrando um objeto que obstrói a sua passagem, o disco. Este componente apresenta faces arredondadas e ângulos suaves que possibilitam a passagem de fluido, quando a válvula se encontra aberta, sem a geração de grande turbulência. Para fechar a válvula, a mola é responsável por deslocar o pistão, transferindo-se o seu movimento linear para um movimento rotativo da haste da válvula, entre 0° (totalmente fechada) e 90° (totalmente aberta). Neste movimento de fecho, a face da retaguarda do disco contacta com a pressão e velocidade do fluido, estando associada uma certa instabilidade a este processo. Aquando se dá o fecho da válvula, é estabelecido um contacto total entre o disco e a sede, ocorrendo fenómenos de deformação.

Por outro lado, quando se pretende abrir a válvula, o sinal proveniente do controlador permite a entrada de ar no atuador, que exerce uma determinada força no pistão, traduzindo-se no movimento rotativo de afastamento do disco relativamente às superfícies das sedes, existindo, no entanto, sempre dois pontos de contacto entre os componentes. É de salientar que devido às forças mecânicas e pressão atuantes no disco quando este se encontra totalmente fechado, o atuador tem de gerar um determinado momento que permita a sua rotação, denominado momento de abertura.

Soluções para componentes críticos

No corpo da válvula encontram-se parte dos componentes mais problemáticos das válvulas de controlo borboleta. As sedes, devido ao constante contacto com o fluido são frequentemente desgastadas. Para além disso, quando ocorre o fecho ou abertura da válvula, o disco contacta com a sede, promovendo a sua deterioração. Deste modo, as válvulas da unidade comportam uma haste excêntrica, que altera a forma como se estabelece o contacto entre os dois componentes, minimizando o mecanismo de desgaste a que as sedes são normalmente sujeitas.

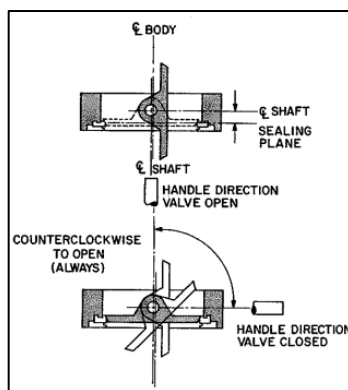


Figura 16-Haste excêntrica

De modo a impedir um movimento de fecho demasiado extenso, isto é, menor do que 0°, este tipo de válvulas possui um dispositivo de paragem. Assim, para além de possibilitar a paragem nos limite pretendidos, diminui-se o desgaste nas sedes e disco.

As sedes, tal como nas das válvulas de controlo globo, são resilientes e podem ser reparadas na maioria das falhas que apresentam.

Principais Problemas

Os problemas associados a válvulas borboleta de controlo resumem-se a entraves no movimento rotativo da haste do corpo da válvula, fugas excessivas pelos vedantes, passagem inadequada de fluido e embate abrupto do disco.

O entrave do movimento da haste conduz à estagnação do disco e posterior perda de função da válvula. Esta adversidade pode estar associada, entre outras coisas, a:

- Aperto excessivo dos empanques;
- Parede do cilindro não lubrificada;
- Desgaste do anel O' ring do pistão, gripando o pistão na parede do cilindro;
- Desgaste do anel O' ring do atuador, gripando a haste do atuador no castelo;
- Fornecimento inadequado de ar;

- Erro do posicionador;
- Ausência ou fratura dos pinos cónicos;
- Fratura da haste.

As fugas excessivas pelos vedantes também são frequentes neste tipo de válvulas e devem-se maioritariamente a:

- Desgaste ou dano da junta;
- Desalinhamento dos flanges;
- Desgaste ou dano do empanque;
- Sujidade ou corrosão do empanque.

Um problema muito comum nas válvulas de controlo borboleta é a passagem inadequada de fluido e está habitualmente associada a:

- Ajuste incorreto do disco, limitando a abertura ou fecho da válvula;
- Desgaste ou dano da sede;
- Desgaste ou dano do corpo da válvula, precisamente no local onde o disco embate;
- Posicionamento incorreto do disco;
- Movimento impreciso do atuador;
- Fornecimento inadequado de ar;

O embate do disco no corpo da válvula, sendo o problema menos comum, pode estar relacionado com:

- Posicionamento incorreto do disco, instalado de cabeça para baixo;
- Fornecimento de ar excessivo;
- Desgaste dos rolamentos da haste.

5.2 Válvulas de Bloqueio

As válvulas de bloqueio de fluxo só operam em duas posições (aberta ou fechada) e são utilizadas quando se pretende trabalhar em regime de tudo ou nada, isto é, em operações onde se pretenda isolar certos equipamentos alvos de manutenção ou naqueles processos onde a ocorrência de uma fuga seria nefasta para o operador. Ademais, o recurso a este tipo de válvulas é frequente em situações que ocorre mistura de fluidos de acordo com um período de tempo pré-definido (Skousen 1998).

À semelhança das válvulas de controlo estes equipamentos são compostos pelo corpo, atuador e um dispositivo de controlo. Esse dispositivo de controlo trata-se regularmente de uma válvula, atuada apenas eletricamente ou com o auxílio pneumático. O corpo pode ser das mais diversas formas, sendo habitualmente priorizado o de borboleta, possuindo exatamente a mesma função daquela que é desempenhada nas válvulas de controlo. O atuador é frequentemente um cilindro pneumático, mas, neste tipo de equipamentos, atua conforme a diretriz da electroválvula ou válvula electropneumática. Por outro lado, este último componente é atuado por um solenoide.

Válvula Solenoide

A válvula solenoide atua como um dispositivo de controlo, direcionando o ar fornecido para o atuador, consoante o sinal de entrada recebido, normalmente de 4 a 20 mA. Existem diferentes tipos de solenoides, sendo o mais comum aquele que está associado a válvulas de quatro portas. Este tipo de solenoide é utilizado ao invés do posicionador, permitindo uma ação do atuador em duas direções, conforme se pretenda o fecho ou abertura total da válvula. Com válvulas de grande porte, a força de serviço necessária para mover o atuador pode ser demasiado elevada

para o solenoide. Desta forma, surge um processo de duas etapas que se encontra esquematizado na figura 17, denominado por operação pilotada.

Neste processo energiza-se o solenoide, deslocando-se a válvula piloto e consequentemente induz-se uma determinada pressão na válvula principal, responsável pela alteração de posição e consequente movimento de avanço do atuador. Este conjunto de válvulas forma a válvula electropneumática.

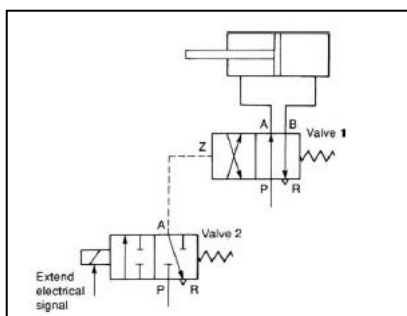


Figura 17-Válvula electropneumática

Funcionamento

Para abrir a válvula energiza-se o solenoide da válvula piloto, sendo este componente responsável pela alteração do posicionamento da válvula principal e posterior movimento ascendente do pistão. Esse movimento ascendente do pistão, provoca uma rotação dos 0° (totalmente fechada) para os 90° (totalmente aberta). O disco, tal como nas válvulas borboleta de controlo, contacta com as sedes em dois pontos e para a sua abertura ser possível é necessário que a pressão induzida no atuador gere um determinado momento superior ao da mola.

Para o movimento de fecho, o solenoide deixa de ser energizado, cessando a entrada de ar para o atuador e permitindo que a mola arraste a haste do atuador, de modo a induzir um movimento rotativo de aproximação do disco às sedes do corpo da válvula. Neste movimento de fecho, a face da retaguarda do disco contacta com a pressão e velocidade do fluido, estando associada uma certa instabilidade a este processo. Aquando se dá o fecho da válvula, é estabelecido um contacto total entre o disco e a sede, ocorrendo fenómenos de deformação.

Principais Problemas

Os problemas associados a válvulas borboleta de bloqueio são muito semelhantes aos descritos na secção 5.1, contudo ao invés de serem resultantes do erro do posicionador, estão diretamente relacionados com falhas na electroválvula.

As falhas na válvula solenoide podem derivar de:

- Erro no circuito de controlo;
- Falha na Bobina;
- Baixa tensão;
- Pressão incorreta da válvula piloto;
- Fuga excessiva.

5.3 Caso de estudo

A unidade 1700, responsável pela purificação do hidrogénio, encontra-se na Fábrica de Combustíveis (FCO) da refinaria de Matosinhos. Na presente dissertação serão alvo de análise detalhada o conjunto das trinta válvulas de bloqueio (XV) e controlo (XCV) presente na unidade, visto terem sido consideradas como equipamentos críticos quando outrora se estudou a unidade.

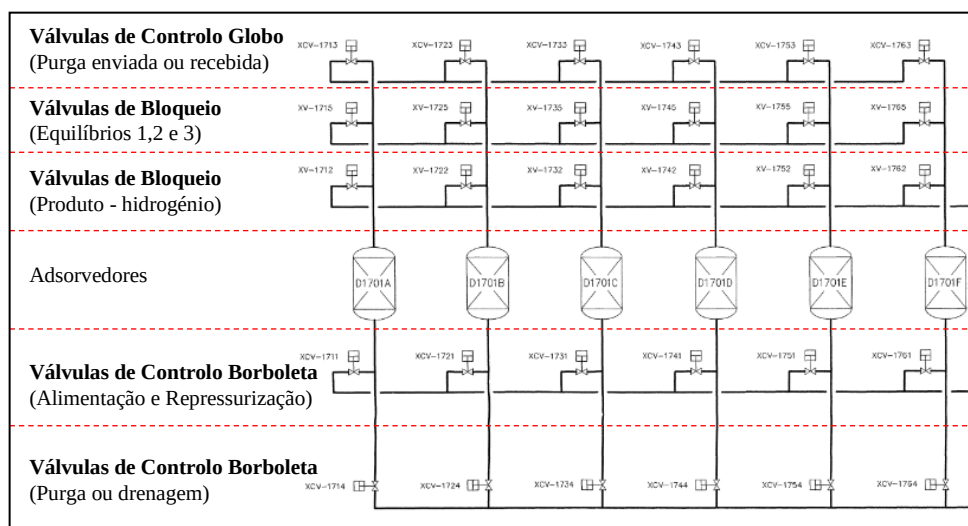


Figura 18-Conjunto das válvulas da unidade 1700

As válvulas foram agrupadas segundo a sua estrutura e função na unidade. Este último parâmetro depende, tal como se observa na figura 18, da localização dos equipamentos. As válvulas estruturalmente são muito semelhantes ao descrito na secção anterior e apresentam algumas das características enumeradas, como se pode verificar na tabela 5.

Tabela 5-Características de cada tipo de válvula estudada na unidade

	Alimentação e Repressurização	Produto (hidrogénio)	Purga enviada ou recebida	Purga ou drenagem	Equilíbrios 1,2 e 3
Corpo da Válvula	Borboleta	Borboleta	Globo	Borboleta	Borboleta
Máximo diferencial de pressão na abertura (barg / Pa)	11,3 / 1208725	0,06 / 107205	2,06 / 303205	2 / 297325	0,19 / 119945
Diferencial de pressão na posição fechada (barg / Pa)	19 / 1963325	19 / 1963325	10 / 1081325	10 / 1081325	19 / 1963325
Curva Característica	Igual percentagem	Abertura Rápida	Linear	Igual percentagem	Abertura Rápida
Cv	1050	400	115	3300	400
Posição de Falha	Fechada	Fechada	Fechada	Fechada	Fechada
Ação do Atuador	Para abrir	Para abrir	Para abrir	Para abrir	Para abrir
Tipo de Sede	Resiliente	Resiliente	Resiliente	Resiliente	Resiliente

As válvulas em questão encontram-se em funcionamento desde o ano 2000 e desde aí têm sido alvo de reparações e substituições. Desta forma, surge a necessidade de avaliar a fiabilidade dos equipamentos e tentar implementar ações de manutenção que levem à redução deste tipo de intervenções. Com essa finalidade recorreu-se à norma utilizada pela refinaria, a ISO 14224:2016, denominada *Petroleum, petrochemical and natural gas industries- Collection and Exchange of reliability and maintenance for equipment*, definindo-se as fronteiras das válvulas, ou seja, o domínio de equipamentos aglomerado pelas válvulas.

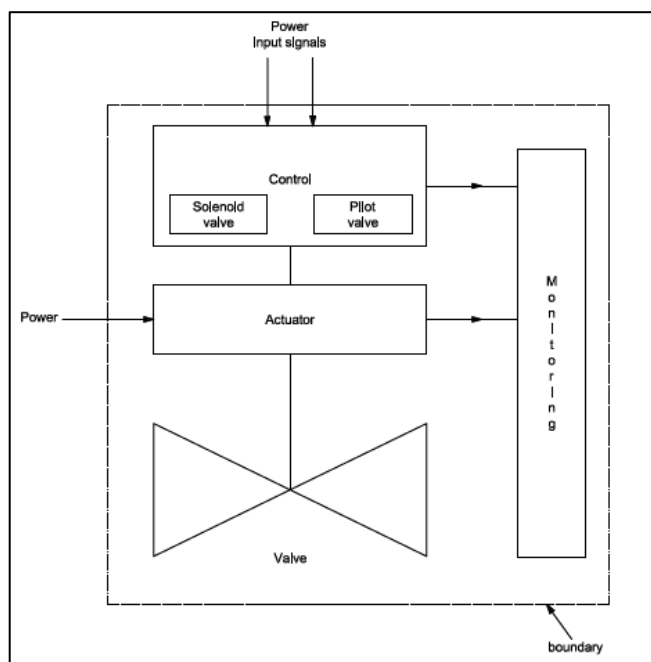


Figura 19-Fronteira definida para as válvulas segundo a norma ISO 14224

Assim, aquando se procede à análise de uma válvula deve considerar-se o seu corpo, atuador e instrumentação de controlo e monitorização.

De modo a analisar todas as avarias registadas nas válvulas da unidade e a detetar alguma propensão recorreu-se ao software da SAP. Esta ferramenta permite a gestão das operações, através da recolha de informação de diferentes variáveis do processo, como os tempos de reparação, os modos de falha e custos associados. Desta forma, foram analisados todos os registos das válvulas de bloqueio e controlo, com base nas notas e respetivas ordens de trabalho, desde o início de 2002 até dezembro de 2017. É de salientar que todas as informações abrangidas no software dizem respeito não só ao corpo da válvula, mas a todos os componentes abrangidos pela fronteira previamente estabelecida pela norma ISSO 14224:2016.

Analisaram-se as diferentes válvulas e constatou-se que a distribuição de avarias não era constante, como se pode observar no gráfico 8, sendo a maior taxa de avarias registada nas válvulas responsáveis pela alimentação e repressurização.

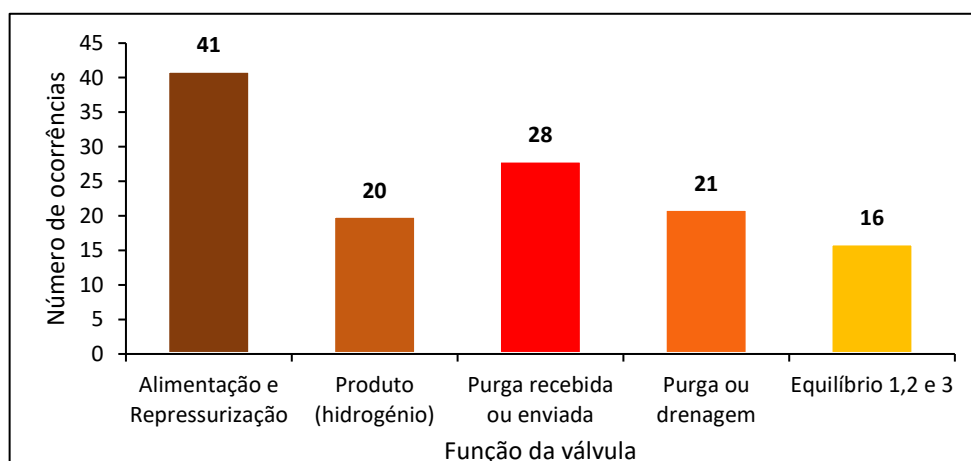


Gráfico 8-Número de avarias consoante a função desempenhada pela válvula

As válvulas de alimentação e repressurização constituem 32% das avarias totais, devido maioritariamente ao diferencial de pressão a que estão sujeitas na abertura (11,3 bar g) e ao tipo de gás com que trabalham. Um elevado diferencial de pressão, tal como se encontra explicitado no Anexo 1, induz desgaste excessivo nos componentes. Para além disso, o gás de alimentação tem muitas vezes impurezas que, com o aumento de velocidade, agravam o desgaste sofrido. Desta forma, nestas válvulas as substituições mais comuns dão-se ao nível das sedes e do próprio disco.

As válvulas de controlo abrangem cerca de 71% das avarias das válvulas da unidade. Por oposição, as válvulas de bloqueio apresentam o menor número de avarias, muito devido ao seu regime de tudo ou nada (on-off). Ao possuírem este regime, as vias das válvulas são projetadas de forma a permitirem ou não a passagem de fluido, sem que ocorram grandes quedas de pressão. Sendo os diferenciais de pressão bastante inferiores àqueles que podem ser registados nas válvulas de controlo, o desgaste induzido também é francamente menor. Decidiu então proceder-se ao estudo dos valores despendidos nas válvulas da unidade, que permitiu corroborar a análise anteriormente efetuada.

Como é passível de ser verificado no gráfico 9, os custos envolvidos nas válvulas de bloqueio representam apenas 21% dos custos de manutenção totais. Este número é reduzido, contudo seria ainda menor se não tivessem ocorrido reparações consecutivas e posterior substituição da electroválvula no ano de 2006. As baixas quedas de pressão provenientes do seu projeto fazem das válvulas de bloqueio um equipamento seguro, isto é, menos problemático do que as válvulas de controlo.

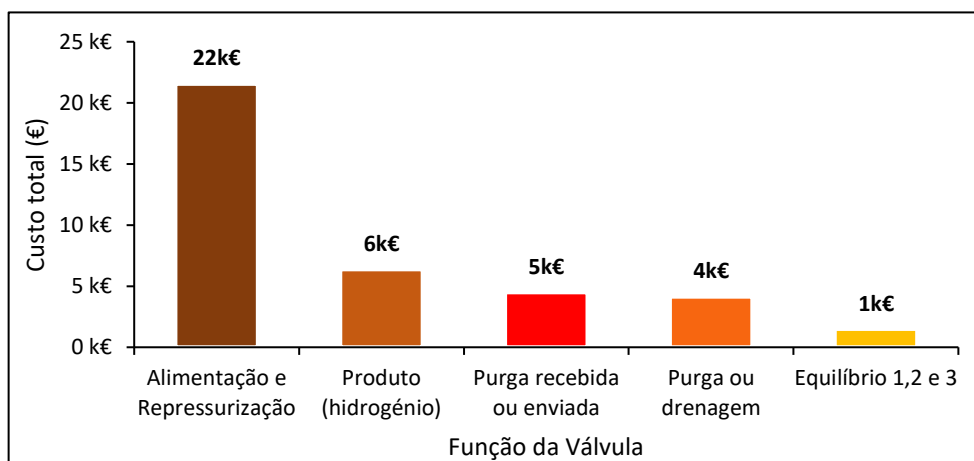


Gráfico 9-Custos associados a cada válvula

6 Análise da Fiabilidade

6.1 Modos de Falha

De modo a enumerar e analisar todos os modos de falha registados nas válvulas da unidade, recorreu-se novamente ao *software* da SAP.

Primeiramente, é necessário explicitar os modos de falha identificados no *software*:

- Falha na Rotação do Disco: modo de falha associado a uma ausência de rotação do disco;
- Falha na Translação do Obturador: refere-se à inexistência de movimento do obturador;
- Execução Inadequada: modo de falha relacionado com um movimento impróprio do disco ou obturador devido a avarias de fins de curso, fornecimento inadequado de ar e possíveis erros do posicionador;
- Passagem na Válvula: corresponde a um fecho/abertura totais da válvula inadequados devido ao desgaste de componentes, movimentando fluido que não era desejado;
- Fuga pela vedação da haste: representa fugas pela haste das válvulas borboleta;
- Fuga pela vedação do obturador: representa fugas de pelo obturador das válvulas globo;

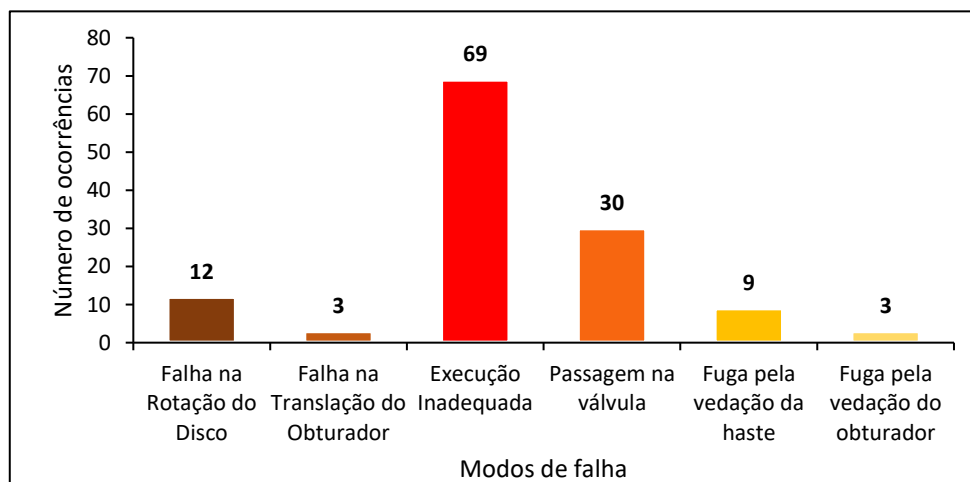


Gráfico 10-Número de falhas consoante o modo de falha

Posteriormente, e de acordo com modos de falha muito abrangentes, fez-se a contagem do número de avarias. No gráfico 10 denota-se a presença de 126 avarias desde 2002, das quais cerca de 80% representam execuções inadequadas e passagens nas válvulas. Desde logo, é possível identificar os modos de falha com mais ocorrências, contudo é necessário também avaliar o custo envolvido por cada um. Desta forma, surge o gráfico 11 que permite uma análise pormenorizada entre as três variáveis.

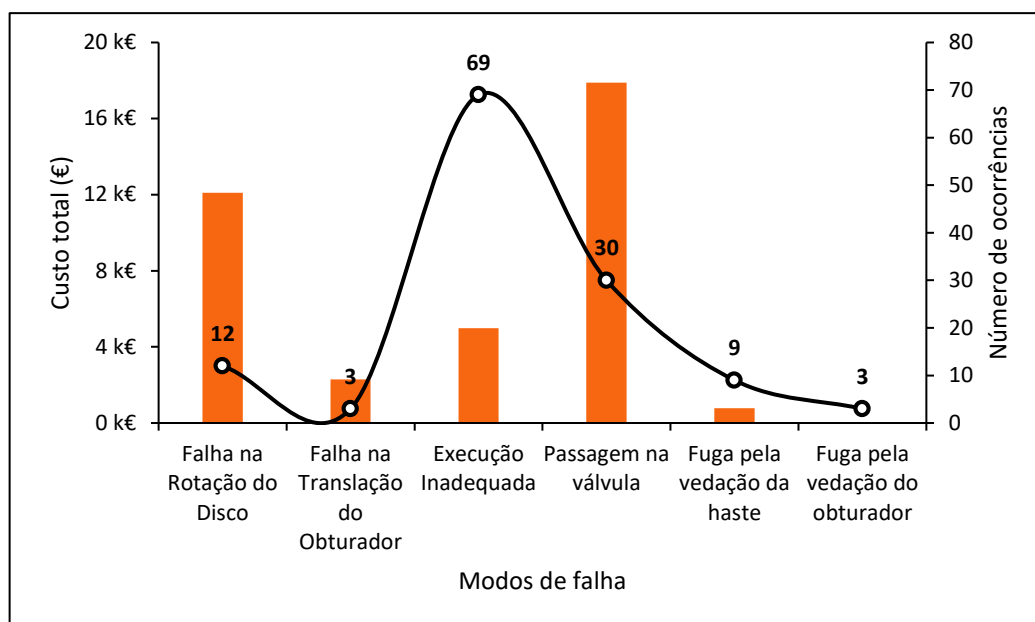


Gráfico 11-Custo e número de avarias consoante o modo de falha

Analisando o gráfico, sempre com a finalidade de procurar modos de falha críticos, devem destacar-se a falha da rotação do disco, a execução inadequada e a passagem na válvula. Por um lado, o primeiro modo de falha apresenta custos avultados para o número de ocorrências verificado, sendo despendidos cerca de 1000 euros por avaria, o que para o equipamento em questão é significativo. Por outro lado, a execução inadequada não envolve custos tão significativos, sendo inclusivamente o segundo modo de falha com o valor de custo/avaría mais baixo, contudo possui um número de ocorrências maior, em grande parte devido à reparação de que os fins-de-curso são alvo. Por fim, devem realçar-se as perdas de capital associadas às passagens nas válvulas, sendo também de salientar o seu elevado número de ocorrências. Este modo de falha, por sua vez, encontra-se normalmente associado às sedes e disco.

A refinaria realizou em 2009 uma intervenção nas válvulas da unidade, ao abrigo de um investimento. Considerou-se interessante analisar a situação verificada antes e após a ação (gráfico 12), de modo a comparar não só o número de ocorrências de cada modo de falha, como também o custo acarretado.

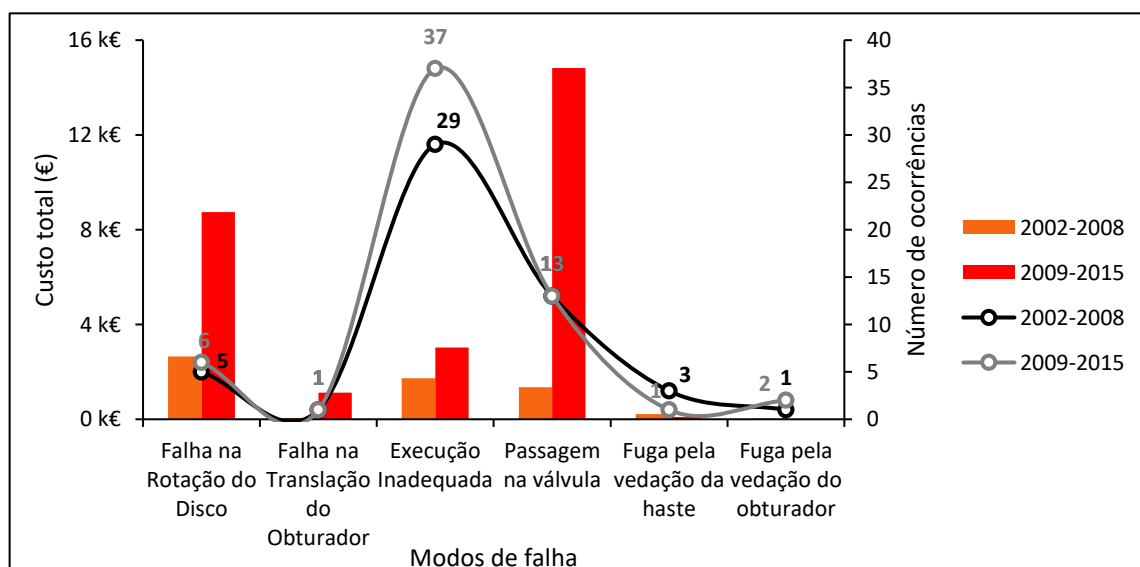


Gráfico 12-Situação vigente nas válvulas da unidade antes e após a intervenção

O número de ocorrências dos modos de falha aumentou pós-intervenção, tendo também sido verificado um aumento do custo total. Tal situação deve-se em grande parte ao facto da maior parte do valor despendido na intervenção ter sido dirigido para peças de reserva e não para a substituição total ou renovação dos equipamentos. Uma vez que os gastos tiveram esta finalidade, seria interessante analisar o tempo médio de reparação antes e após intervenção, para comprovar o seu decréscimo, contudo tal procedimento foi impossibilitado pela ausência de dados.

Apesar de nos resultados atingidos não ser detetada qualquer melhoria, é perceptível a semelhança no comportamento dos modos de falha, tendo-se verificado exatamente os mesmos modos de falha críticos para as duas situações, falha na rotação do disco, execução inadequada e passagem na válvula.

6.2 FMECA inicial

Com o intuito de se desenvolver a FMECA inicial, recorreu-se aos tópicos da seção 3.1.8 do Estado de Arte:

1. Definição do Sistema e dos seus componentes;
2. Edificação de diagramas de blocos funcionais;
3. Identificação dos modos de falha conhecidos e potenciais;
4. Enumeração das possíveis causas de cada modo de falha;
5. Enumeração dos efeitos de cada modo de falha;
6. Definição da severidade de cada falha;
7. Definição de possíveis ações corretivas ou preventivas.

Para além disso, utilizou-se a ISO14224 para uma definição mais completa e eficaz dos modos de falha das válvulas. Segundo esta referência, para a aplicação em causa, as válvulas possuem os seguintes modos de falha primários:

- Falha na Abertura: modo de falha associado à ausência do movimento de abertura do membro da válvula;
- Falha no Fecho: relacionado com a ausência do movimento de fecho do membro da válvula;
- Leitura incorreta da instrumentação: representa a incorreta interpretação do sinal;
- Operação atrasada: modo de falha relacionado com o consumo excessivo de tempo numa determinada operação de fecho ou abertura da válvula;
- Fuga: apresenta as fugas que ocorreram na válvula;
- Passagem na posição fechada: corresponde a um fecho total do membro inadequado graças ao seu desgaste ou ao desgaste das sedes, movimentando fluido indesejado;
- Obstrução das vias: modo de falha associado à excessiva concentração de resíduos nas vias da válvula;
- Execução Inadequada: representa o movimento de fecho ou abertura inadequado do disco ou obturador;
- Deficiência Estrutural: relacionado com a seleção incorreta do material para a aplicação em questão;

Tabela 6-FMECA inicial

Descrição da Unidade		Modo de Falha	Causa da Falha	Efeito da Falha			Grau de Severidade	Medidas de diminuição de risco
Nome	Função			No subsistema	Afeta seriamente	No sistema		
Válvula de Controlo Globo	Regular o fluxo de gás que tem por finalidade enviar ou receber purgas dos adsorvedores	Falha na Abertura do Obturador	Falha do Controlador, erro do posicionador, corrosão, desgaste excessivo do cilindro pneumático, desgaste dos rolamentos, adesão da sede ao obturador	Não ocorre translação do obturador	Paragem da Válvula	Paragem da válvula e posterior isolamento de um dos troços	M	Substituição
		Falha no Fecho do Obturador	Falha do Controlador, erro do posicionador, corrosão, desgaste excessivo do cilindro pneumático, desgaste dos rolamentos, adesão da sede ao obturador	Não ocorre translação do obturador	Paragem da Válvula	Paragem da válvula e posterior isolamento de um dos troços	M	Substituição
		Passagem na posição fechada	Falha no alinhamento dos componentes, desgaste do obturador, desgaste da sede	Passagem	Níveis de Regeneração	Níveis de Regeneração e posterior isolamento de um dos troços	M	Substituição
		Obstrução das vias	Falha por fadiga e dano devido à fricção	Não ocorre translação do obturador	Paragem da Válvula	Paragem da válvula e posterior isolamento de um dos troços	M	Lavagem e substituição
		Fugas	Fugas, desapertos na flange, desgaste dos empanques, desgaste da vedação da haste e danificação das juntas	Translação do obturador não cumpre os requisitos	Tempo de fecho/abertura	Tempo do processo	B	Substituição
		Deficiência Estrutural	Rotura, corrosão, deformação	Translação do obturador não cumpre os requisitos	Paragem da Válvula	Paragem da válvula e posterior isolamento de um dos troços	M	Substituição
		Operação Atrasada	Falha no alinhamento dos componentes, adesão da sede ao obturador, falha do atuador	Translação do obturador não cumpre os requisitos	Tempo de fecho/abertura	Tempo do processo	B	Reparação ou Substituição
		Execução Inadequada	Falha do posicionador, desgaste dos fins de curso	Translação do obturador não cumpre os requisitos	Posição de fecho/abertura	Paragem da válvula e posterior isolamento de um dos troços	M	Substituição
		Leitura incorreta da instrumentação	Falha elétrica, erro no controlador	Translação do obturador não cumpre os requisitos	Paragem da Válvula	Paragem da válvula e posterior isolamento de um dos troços	M	Reparação ou Substituição

Descrição da Unidade		Modo de Falha	Causa da Falha	Efeito da Falha			Grau de Severidade	Medidas de diminuição de risco
Nome	Função			No subsistema	Afeta seriamente	No sistema		
Válvula de Controlo Borboleta	Regular o fluxo de gás que tem por finalidade efetuar a alimentação e repressurização ou purga e drenagem do adsorvedor	Falha na Abertura do Disco	Falha do Controlador, erro do posicionador, corrosão, desgaste excessivo do cilindro pneumático, desgaste dos rolamentos, adesão da sede ao disco	Não ocorre rotação do disco	Paragem da Válvula	Paragem da válvula e posterior isolamento de um dos troços	M	Substituição
		Falha no Fecho do Disco	Falha do Controlador, erro do posicionador, corrosão, desgaste excessivo do cilindro pneumático, desgaste dos rolamentos, adesão da sede ao disco	Não ocorre rotação do disco	Paragem da Válvula	Paragem da válvula e posterior isolamento de um dos troços	M	Substituição
		Passagem na posição fechada	Falha no alinhamento dos componentes, desgaste do disco, desgaste da sede	Passagem	Níveis de Regeneração	Níveis de Regeneração e posterior isolamento de um dos troços	M	Substituição
		Obstrução das vias	Falha por fadiga e dano devido à fricção	Não ocorre rotação do disco	Paragem da Válvula	Paragem da válvula e posterior isolamento de um dos troços	M	Lavagem e substituição
		Fugas	Fugas, desapertos nas porcas do bucim, desgaste dos empanques, desgaste da vedação da haste e danificação das juntas	Rotação do disco não cumpre os requisitos	Tempo de fecho/abertura	Tempo do processo	B	Substituição
		Deficiência Estrutural	Rotura, corrosão, deformação	Rotação do disco não cumpre os requisitos	Paragem da Válvula	Paragem da válvula e posterior isolamento de um dos troços	M	Substituição
		Operação Atrasada	Falha no alinhamento dos componentes, adesão da sede ao disco, falha do atuador	Rotação do disco não cumpre os requisitos	Tempo de fecho/abertura	Tempo do processo	B	Reparação ou Substituição
		Execução Inadequada	Falha do posicionador, desgaste dos fins de curso	Rotação do disco não cumpre os requisitos	Posição de fecho/abertura	Paragem da válvula e posterior isolamento de um dos troços	M	Substituição
		Leitura incorreta da instrumentação	Falha elétrica, erro no controlador	Rotação do disco não cumpre os requisitos	Paragem da Válvula	Paragem da válvula e posterior isolamento de um dos troços	M	Reparação ou Substituição

Descrição da Unidade		Modo de Falha	Causa da Falha	Efeito da Falha			Grau de Severidade	Medidas de diminuição de risco
Nome	Função			No subsistema	Afeta seriamente	No sistema		
Válvula de Bloqueio Borboleta	Bloquear ou permitir a circulação do produto (hidrogénio) e possibilitar o equilíbrio de pressões nos diferentes adsorvedores	Falha na Abertura do Disco	Falha do Controlador, erro da eletroválvula, corrosão, desgaste excessivo do cilindro pneumático, desgaste dos rolamentos, adesão da sede ao disco	Não ocorre rotação do disco	Paragem da Válvula	Paragem da válvula e posterior isolamento de um dos troços	M	Substituição
		Falha no Fecho do Disco	Falha do Controlador, erro da eletroválvula, corrosão, desgaste excessivo do cilindro pneumático, desgaste dos rolamentos, adesão da sede ao disco	Não ocorre rotação do disco	Paragem da Válvula	Paragem da válvula e posterior isolamento de um dos troços	M	Substituição
		Passagem na posição fechada	Falha no alinhamento dos componentes, desgaste do disco, desgaste da sede	Passagem	Níveis de Regeneração	Níveis de Regeneração e posterior isolamento de um dos troços	M	Substituição
		Obstrução das vias	Falha por fadiga e dano devido à fricção	Não ocorre rotação do disco	Paragem da Válvula	Paragem da válvula e posterior isolamento de um	M	Lavagem e substituição
		Fugas	Fugas, desapertos nas porcas do bucim, desgaste dos empanques, desgaste da vedação da haste e danificação das juntas	Rotação do disco não cumpre os requisitos	Tempo de fecho/abertura	Tempo do processo	B	Substituição
		Deficiência Estrutural	Rotura, corrosão, deformação	Rotação do disco não cumpre os requisitos	Paragem da Válvula	Paragem da válvula e posterior isolamento de um	M	Substituição
		Operação Atrasada	Falha no alinhamento dos componentes, adesão da sede ao disco, falha do atuador	Rotação do disco não cumpre os requisitos	Tempo de fecho/abertura	Tempo do processo	B	Reparação ou Substituição
		Execução Inadequada	Falha da eletroválvula, desgaste dos fins de curso	Rotação do disco não cumpre os requisitos	Posição de fecho/abertura	Paragem da válvula e posterior isolamento de um dos troços	M	Substituição
		Leitura incorreta da instrumentação	Falha elétrica, erro no controlador	Rotação do disco não cumpre os requisitos	Paragem da Válvula	Paragem da válvula e posterior isolamento de um dos troços	M	Reparação ou Substituição

Legenda: B: grau de severidade baixo

M: grau de severidade médio

6.3 FMECA aplicada às válvulas em estudo

De acordo com as ordens de manutenção da refinaria e respetivos modos de falha, definidos na secção 6.1, edificou-se a tabela 7. Na tabela presenciam-se, para além dos modos de falha de cada um dos tipos de válvula, as causas que tiveram na sua génese e os seus efeitos no componente e sistema. Calculou-se ainda a taxa de avarias e o RPN para cada modo de falha.

Numa primeira análise, pode constatar-se que a maioria dos modos de falha conduzem a uma alteração indesejada no caudal de gás a jusante da válvula. Tal mudança desencadeia o isolamento do adsorvedor onde a válvula avariada se insere e posterior redução dos níveis de recuperação de hidrogénio. Como o decréscimo verificado é mínimo (89-86%), a dessulfuração do gasóleo não é comprometida e os custos relacionados são reduzidos. Por outro lado, certos modos de falha podem mesmo levar à indisponibilidade do equipamento, contudo nunca são prosseguidos pela indisponibilidade do sistema, devido à possibilidade de se isolar um dos adsorvedores do sistema pelo fecho automático das suas válvulas.

Para se determinar o RPN recorreu-se às escalas numéricas da secção 3.1.8 e estabeleceram-se os valores de probabilidade de ocorrência (O), severidade (S) e detetabilidade (D). O parâmetro de ocorrência apresenta níveis mínimos uma vez que a taxa de avarias para os equipamentos em análise é bastante reduzida. Por sua vez, os índices de severidade e detetabilidade são também reduzidos pois a presença da fase de isolamento no processo, descrita na secção 4.2.1, permite não só o isolamento do troço da válvula onde se verifica a avaria, restringido a fronteira e diminuindo a sua severidade (a nível económico, ambiental e de segurança), bem como a rápida e eficaz deteção da avaria.

As taxas de avarias obtidas para modos de falha idênticos nas diferentes válvulas de controlo comprovam o que foi demonstrado na secção 5.3, isto é, um maior número de ocorrências nas válvulas do tipo borboleta. Este valor ligeiramente mais elevado é consequência do maior diferencial de pressão a que estão sujeitas. Esse diferencial induz um grande desgaste das suas sedes, traduzindo-se num maior número de taxa de avarias nos modos de falha que desta causa advêm, nomeadamente o movimento do membro de fecho e abertura e passagem na válvula. Por outro lado, nas válvulas de bloqueio da unidade as taxas de avarias são bastante inferiores, devido em grande parte ao baixo diferencial que registam. No entanto, é de ressaltar o baixo decréscimo registado nos valores do modo de falha de execução inadequada, visto estarem maioritariamente associados não ao desgaste das sedes (diretamente relacionado com diferencial de pressão), mas sim ao desgaste dos fins-de-curso.

Tabela 7-FMECA aplicada

Descrição da Unidade		Modo de Falha	Causa da Falha	Efeito da Falha		Taxa de avarias (1*10 ⁶ horas)	RPN (O*S*D)			
Nome	Função			No subsistema	No sistema		O	S	D	O*S*D
Válvula de Controlo Borboleta	Regular o fluxo de gás que tem por finalidade efetuar a alimentação e repressurização ou purga e drenagem do adsorvedor	Falha na Rotação do Disco	Falha do Controlador, erro do posicionador, falha do atuador, adesão da sede ao disco	Indisponibilidade de produção	Isolamento do troço e consequente diminuição nos níveis de regeneração	5,35	1	1	1	1
		Passagem na Válvula	Desgaste do disco e das sedes	Caudal inadequado	Isolamento do troço e consequente diminuição nos níveis de regeneração	9,51	1	1	1	1
		Execução Inadequada	Dano nos fins-de-curso	Caudal inadequado	Isolamento do troço e consequente diminuição nos níveis de regeneração	17,84	1	1	1	1
		Fuga pela vedação da haste	Desgaste dos empanques e desapertos nas porcas da flange do bucin	Menor caudal de ar	Aumento dos custos energéticos e do tempo de atuação	4,16	1	1	1	1
Válvula de Controlo Globo	Regular o fluxo de gás que tem por finalidade enviar ou receber purgas dos adsorvedores	Falha na Translação do Obturador	Falha do Controlador, erro do posicionador, falha do atuador, adesão da sede ao obturador	Indisponibilidade de produção	Isolamento do troço e consequente diminuição nos níveis de regeneração	3,57	1	1	1	1
		Passagem na Válvula	Desgaste do obturador e das sedes	Caudal inadequado	Isolamento do troço e consequente diminuição nos níveis de regeneração	8,32	1	1	1	1
		Execução Inadequada	Dano nos fins-de-curso	Caudal inadequado	Isolamento do troço e consequente diminuição nos níveis de regeneração	17,84	1	1	1	1
		Fuga pela vedação do obturador	Desgaste dos empanques e desapertos nas porcas da flange	Menor caudal de ar	Aumento dos custos energéticos e do tempo de atuação	3,57	1	1	1	1

Válvula de Bloqueio	Bloquear ou deixar circular o produto (hidrogénio) e permitir o equilíbrio de pressões nos diferentes adsorvedores	Falha na Rotação do Disco	Adesão da sede ao disco, lubrificação inadequada, falha no atuador, erro na eletroválvula	Indisponibilidade de produção	Isolamento da válvula e diminuição nos níveis de regeneração	1,78	1	1	1	1
		Passagem na Válvula	Desgaste do disco e das sedes	Caudal inadequado	Isolamento da válvula e diminuição nos níveis de regeneração	4,16	1	1	1	1
		Execução Inadequada	Dano nos fins-de-curso	Caudal inadequado	Isolamento da válvula e diminuição nos níveis de regeneração	14,27	1	1	1	1
		Fuga pela vedação da haste	Desgaste dos empanques e desapertos nas porcas da flange do bucim	Menor caudal de ar	Aumento dos custos energéticos e do tempo de atuação	1,19	1	1	1	1

Os pequenos valores registados na coluna do RPN para todo o tipo de válvulas, independentemente do modo de falha, devem-se também ao facto de terem sido utilizadas as mesmas escalas numéricas que se empregam na análise de equipamentos dinâmicos como compressores e bombas, que envolvem níveis de criticidade bastante superiores. Com o intuito de inferir acerca de modos de falha críticos nos equipamentos em estudo e posteriormente implementar ações RCM que visem a sua correção ou atenuação, alteraram-se os níveis e matriz de criticidade das escalas numéricas definidas na secção 3.1.8.

Tabela 8-Escala de severidade

Nível	Significado	Segurança	Ambiente	Económico
1	Muito baixa ou nenhuma	Sem lesões	Sem impacto	Sem perturbações
2	Baixa	Acidente com 1º socorro	Impacto reduzido, limitado ao perímetro da instalação	Impacto reduzido, perdas inferiores a 50€
3	Moderada	Acidente com tratamento médico	Impacto não confinado ao perímetro da instalação	Degradação gradual do desempenho, perdas de 50 a 500€
4	Alta	Lesão com baixa ou múltiplos acidentados	Impacto elevado sem possibilidade de remediação	Isolamento do adsorvedor com perdas de 500 a 750€
5	Muito alta ou catastrófica	Incapacidade permanente ou morte	Impacto elevado (coloca em causa a sustentabilidade de empresa)	Isolamento do adsorvedor e perdas superiores a 750€

Tabela 8-Escala da probabilidade de ocorrência

Nível	Significado	Quantificação
1	Muito Raro	Não ocorreu num ciclo de 16 anos
2	Raro	1 acontecimento a cada 16 anos
3	Possível	1 acontecimento a cada 12 anos
4	Frequente	1 acontecimento a cada 8 anos
5	Muito Frequente	1 acontecimento a cada 4 anos

Tabela 10-Escala da detetabilidade

Nível	Significado	Quantificação
1	Quase certa	Sempre detetável
2	Média	Na maioria dos casos
3	Quase impossível	Não detetável

		Severidade				
Ocorrência	Detetabilidade	1	2	3	4	5
1	1	1	2	3	4	5
1	2	2	4	6	8	10
1	3	3	6	9	12	15
2	1	2	4	6	8	10
2	2	4	8	12	16	20
2	3	6	12	18	24	30
3	1	3	6	9	12	15
3	2	6	12	18	24	30
3	3	9	18	27	36	45
4	1	4	8	12	16	20
4	2	8	16	24	32	40
4	3	12	24	36	48	60
5	1	5	10	15	20	25
5	2	10	20	30	40	50
5	3	15	30	45	60	75

Figura 20-Matriz de criticidade das válvulas da unidade

A FMECA obtida com base nas ordens da refinaria e novos níveis e matriz de criticidade é apresentada na tabela 11. Através da sua consulta é possível destacar quatro modos de falha (a falha na rotação do disco, a falha na translação do obturador, a execução inadequada e a passagem nas válvulas) pelo valor de RPN que apresentam.

Por um lado, as ocorrências do modo de falha “Falha na Rotação do disco” pertencentes às Válvulas de Controlo Borboleta e de Bloqueio apresentam um maior RPN devido aos custos que habitualmente implicam. De modo semelhante, o modo de falha “Falha na Translação do Obturador” presente nas Válvulas de Controlo Globo implica a substituição de determinados componentes e conduz a custos de manutenção elevados para o frequente neste tipo de equipamentos.

Por outro lado, o modo de falha “Execução Inadequada”, embora não apresente uma severidade tão elevada, possui uma taxa de ocorrência considerável, sendo muito superior aos valores registados nos diversos modos de falha. No que respeita ao modo de falha “Passagem na Válvula”, as suas ocorrências apresentam um RPN considerável pois, para além de serem demasiado frequentes, geralmente envolvem custos elevados. De ressaltar que neste modo de falha, as despesas associadas podem ser tanto maiores quanto mais notória for a passagem, podendo o nível de severidade, em certas situações, ser igual a 5 (RPN ainda mais elevado).

Os modos de falha explicitados despoletam sempre o isolamento do adsorvedor e uma consequente diminuição na eficiência do processo. Como existem 6 adsorvedores, o isolamento de um deles não tem grande influência na posterior dessulfuração do gasóleo (quer a nível monetário, quer a nível processual), contudo deve procurar diminuir-se ao máximo o número de avarias e os tempos envolvidos nas suas reparações.

É ainda de salientar a homogeneidade no nível de detetabilidade, consequência da fase de isolamento.

Tabela 9-FMECA aplicada de acordo com as escalas numéricas das válvulas da unidade

Descrição da Unidade		Modo de Falha	Causa da Falha	Efeito da Falha		Taxa de avarias (1*10 ⁶ horas)	RPN (O*S*D)			
Nome	Função			No subsistema	No sistema		O	S	D	O*S*D
Válvula de Controlo Borboleta	Regular o fluxo de gás que tem por finalidade efetuar a alimentação e repressurização ou purga e drenagem do adsorvedor	Falha na Rotação do Disco	Falha do Controlador, erro do posicionador, falha do atuador, adesão da sede ao disco	Indisponibilidade de produção	Isolamento do adsorvedor e consequente diminuição na eficiência do processo	5,35	1	5	1	5
		Passagem na Válvula	Desgaste do disco e das sedes	Caudal inadequado	Isolamento do adsorvedor e consequente diminuição na eficiência do processo	9,51	3	4	1	12
		Execução Inadequada	Dano nos fins-de-curso	Caudal inadequado	Isolamento do adsorvedor e consequente diminuição na eficiência do processo	17,84	4	4	1	16
		Fuga pela vedação da haste	Desgaste dos empanques e porcas da flange do bucin desapertadas	Menor caudal de ar	Aumento dos custos energéticos e do tempo de atuação	4,16	1	3	1	3
Válvula de Controlo Globo	Regular o fluxo de gás que tem por finalidade enviar ou receber purgas dos adsorvedores	Falha na Translação do Obturador	Falha do Controlador, erro do posicionador, falha do atuador, adesão da sede ao obturador	Indisponibilidade de produção	Isolamento do adsorvedor e consequente diminuição na eficiência do processo	3,57	1	5	1	5
		Passagem na Válvula	Desgaste do obturador e das sedes	Caudal inadequado	Isolamento do adsorvedor e consequente diminuição na eficiência do processo	8,32	2	4	1	8
		Execução Inadequada	Dano nos fins-de-curso	Caudal inadequado	Isolamento do adsorvedor e consequente diminuição na eficiência do processo	17,84	4	4	1	16
		Fuga pela vedação do obturador	Desgaste dos empanques e porcas da flange desapertadas	Menor caudal de ar	Aumento dos custos energéticos e do tempo de atuação	3,57	1	2	1	2

Válvula de Bloqueio	Bloquear ou deixar circular o produto (hidrogénio) e permitir o equilíbrio de pressões nos diferentes adsorvedores	Falha na Rotação do Disco	Falha do Controlador, erro da eletroválvula, falha do atuador, adesão da sede ao disco	Indisponibilidade de produção	Isolamento do adsorvedor e consequente diminuição na eficiência do processo	1,78	1	5	1	5
		Passagem na Válvula	Desgaste do disco e das sedes	Caudal inadequado	Isolamento do adsorvedor e consequente diminuição na eficiência do processo	4,16	1	4	1	4
		Execução Inadequada	Dano nos fins-de-curso	Caudal inadequado	Isolamento do adsorvedor e consequente diminuição na eficiência do processo	14,27	4	4	1	16
		Fuga pela vedação da haste	Desgaste dos empanques e porcas da flange do bucim soltas	Menor caudal de ar	Aumento dos custos energéticos e do tempo de atuação	1,19	1	3	1	3

6.4 Árvore de Falhas (FTA)

Na presente dissertação optou por se realizar e apresentar no Anexo 2 a árvore de falhas de cada um dos tipos de válvulas da unidade, segundo os tópicos anteriormente definidos na secção 3.1.9.

6.5 Análise Estatística

De forma a quantificar a fiabilidade e analisar os seus dados, são frequentemente empregues métodos matemáticos e estatísticos. Tais métodos não permitem precisar o período de tempo despendido até à falha, contudo possibilitam inferir acerca da sua probabilidade. Recorrendo a estes procedimentos é ainda possível definir-se limites estatísticos de confiança, entre os quais se encontra a probabilidade em causa. Como o método envolve probabilidades, é perceptível que uma determinada incerteza o caracterize.

Os elevados níveis de incerteza compreendidos por estes métodos inviabilizam a singular precisão e credibilidade que as aplicações de engenharia exigem. Deste modo, é de extrema importância compreender as limitações dos métodos estatísticos e definir corretamente os seus limites, com a finalidade de diminuir a probabilidade de realizar uma análise incorreta e consequentemente se alcançarem resultados adequados. Por outro lado, estes métodos, sendo precedidos por metodologias que permitam a determinação das causas das falhas e suas ações corretivas, podem oferecer contribuições muito positivas.

A fiabilidade é influenciada pelas dispersões. As operações humanas, particularmente aquelas que são repetitivas, representam fontes de dispersões muito comuns, daí a valorização da automação nos dias de hoje. A automatização dos processos diminui a sua variabilidade e melhora a qualidade dos produtos, contudo as dispersões nunca podem ser completamente eliminadas. Desta forma, os métodos estatísticos fornecem os meios adequados para analisar, compreender e controlar tais dispersões e assim auxiliam na criação de projetos e desenvolvimento de processos intrinsecamente fiáveis, de acordo com condições previamente estabelecidas.

6.5.1 Distribuição de Weibull

A análise efetuada na secção 5.3 permitiu detetar as válvulas da unidade que apresentavam um maior número de avarias. Por outro lado, com a realização da FMECA identificaram-se os modos de falha críticos consoante a classificação das válvulas. Assim, na presente secção foca-se o estudo no grupo crítico das válvulas de controlo borboleta e globo e das válvulas de bloqueio. Consideram-se as válvulas responsáveis pela alimentação e repressurização, envio ou receção da purga e produto, e as avarias provenientes de falhas na rotação do disco, falhas na translação do obturador, execução inadequada e passagem. Das 6 válvulas existentes em cada um desses conjuntos, analisaram-se as 3 que apresentavam um maior número de avarias.

Para realizar a análise estatística é estritamente necessário discriminar os tempos de funcionamento entre avarias. No Anexo 3 apresentam-se os TTF segundo os modos de falha e válvulas supracitados.

Teste de Laplace

Tal como foi referido na secção 3.2, em primeiro lugar deve analisar-se a independência dos dados. Assim, e com recurso a uma ferramenta Excel disponível na literatura (Assis 2014), efetuou-se a análise para as válvulas e seus modos de falha, com um nível de significância de 95%.

É de salientar que em determinados modos de falha de algumas válvulas selecionadas não se realizou o teste de Laplace uma vez que não tinha ocorrido uma única avaria, inviabilizando a análise.

Como é passível de ser visualizado na tabela 26,27 e 28 do Anexo 4, a hipótese nula H_0 pode ser aceite em todos os casos analisados. Assim, pode admitir-se a estabilidade da taxa de falhas e consequentemente, afirmar -se que o processo é Poisson homogéneo.

Análise de Weibull

Numa fase posterior, procede-se então à análise de Weibull. Na tabela 12 e 13 apresentam-se os parâmetros obtidos pela análise Weibull para o modo de falha “Falha na Rotação do Disco” e “Falha na Translação do Obturador”, respetivamente. Por outro lado, as tabelas 14 e 15 exibem os valores das propriedades para os modos de falha “Passagem na Válvula” e “Execução Inadequada”. De salientar que o cálculo dos parâmetros e obtenção dos gráficos foram alcançados com o auxílio a uma ferramenta Excel desenvolvida pelo Eng. Manuel Melo.

Na análise de Weibull aos equipamentos para os diferentes modos de falha, optou por se demonstrar apenas a distribuição de uma das válvulas, sendo as restantes apresentadas no Anexo 4.

Falha na Rotação do Disco

Tabela 10-Parâmetros obtidos pela análise de Weibull para o modo de falha “Falha na Rotação do Disco”

	Alimentação e Repressurização		Produto (Hidrogénio)
	XCV-1741	XCV-1761	XV-1722
β	0,39	0,66	0,37
η	1527,95	2356,2	675,99
R^2	1	0,88	1
b	-1,6	-2,59	-1,41
MTTF (dias)	5564,2	3165,63	2794,33
λ_{avg} ($/10^6$ horas)	7,49	13,16	14,91

Os valores do parâmetro de forma β traduzem o mecanismo de degradação corrente no item, isto é, permitem inferir em que período da sua vida se encontra. Assim, é de esperar que, decorrente do intervalo de tempo de funcionamento das válvulas em análise (≈ 18 anos) e das suas taxas de avarias, os itens se situem no período de mortalidade infantil ou de vida útil. Tal previsão enquadra-se com os valores dos parâmetros de escala obtidos, uma vez que $\beta < 1$ e, por conseguinte, pode afirmar-se que as válvulas estão na fase de vida de mortalidade infantil. Esta fase é caracterizada pela diminuição da taxa de avarias e redução da taxa de risco, o que é adequado no contexto vigente.

Quando se trataram os dados dos modos de falha das válvulas, considerou-se o limite inferior de vida $\gamma = 0$, uma vez que se trata de uma aproximação bastante aceitável. Assim, o cálculo do MTTF baseou-se nos intervalos de tempo até ocorrer a falha e na não ocorrência de falhas até ao momento de análise. Analisando as válvulas de alimentação e repressurização é possível destacar a válvula XCV-1761 pelo seu valor mais pequeno do parâmetro do tempo médio entre falhas e consequente maior taxa de avarias. Por outro lado, ao comparar equipamentos com

valores de β idênticos (XCV-1741 e XV-1722) pode demonstrar-se a influência do parâmetro de escala η no MTTF, que quanto mais avultado mais prolongado é o tempo médio de funcionamento das válvulas (denotado pelo maior MTTF da XCV-1741).

A presente análise permitiu, mais uma vez, denotar o carácter duradouro dos equipamentos em análise uma vez que, mesmo sendo críticos em relação às restantes válvulas, apresentam um MTTF bastante aceitável.

O gráfico 13 apresenta a distribuição de Weibull para a válvula XCV-1741 para o modo de falha “Falha na Rotação do Disco”. É de salientar a presença de um número reduzido de falhas neste equipamento, que, apesar de não inviabilizar a análise, lhe confere uma incerteza grande.

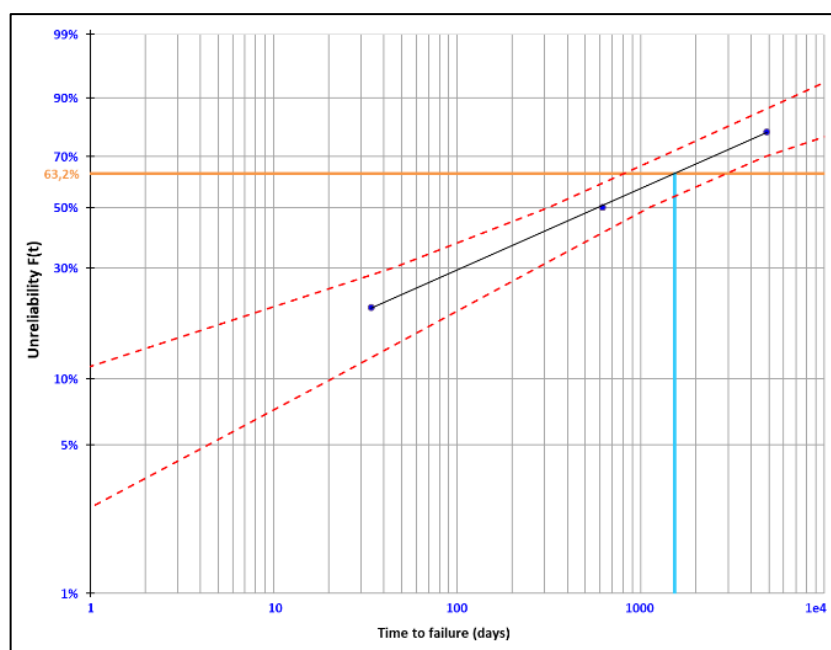


Gráfico 13-Representação de Weibull para a válvula XCV-1741- “Falha na Rotação do Disco”

Falha na Translação do Obturador

Tabela 11- Parâmetros obtidos pela análise de Weibull para o modo de falha “Falha na Translação do Obturador”

Purga enviada ou recebida XCV-1733	
β	0,81
η	3776,7
R^2	1
b	-3,25
MTTF (dias)	4242,15
λ_{avg} ($/10^6$ horas)	9,82

Os valores do parâmetro de forma para o modo de falha “Falha na Translação do Obturador” são muito idênticos aos atingidos para a “Falha na Rotação do Disco”. Desta forma, estes resultados também indicam a presença da fase de infância, denotando a elevada fiabilidade destes equipamentos mecânicos.

No que respeita ao MTTF, o valor atingido é semelhante aos supramencionados, ou seja, o tempo médio de funcionamento até à falha é bastante longo, conferindo elevados níveis de fiabilidade aos equipamentos.

O gráfico 14 apresenta a distribuição de Weibull para a válvula XCV-1733 de acordo com o modo de falha “Falha na Translação do Obturador”. Mais uma vez, a quantidade de dados demonstra ser demasiado escassa para que qualquer tipo de extrapolação seja realizado com o mínimo de incerteza associada.

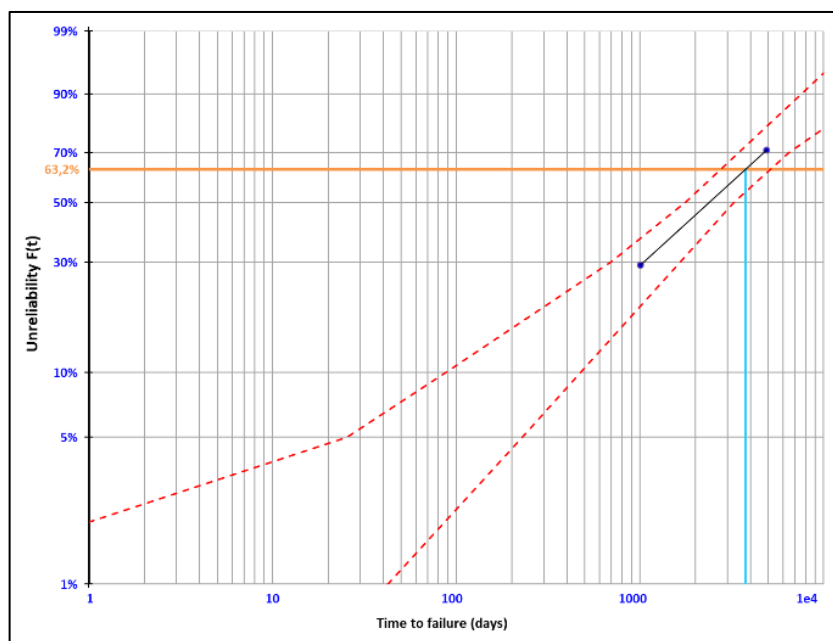


Gráfico 14-Representação de Weibull para a válvula XCV-1733- “Falha na Translação do Obturador”

Passagem na Válvula

Tabela 12- Parâmetros obtidos pela análise de Weibull para o modo de falha “Passagem na Válvula”

	Alimentação e Repressurização		Purga enviada ou recebida
	XCV-1741	XCV-1751	XCV-1753
β	0,79	0,59	1,22
η	2023,27	1056,23	192,22
R^2	0,93	0,81	0,98
b	-2,97	-2,13	-4,37
MTTF (dias)	2313,53	1639,98	1849,25
λ_{avg} (10^6 horas)	18,01	25,41	22,53

As válvulas responsáveis pela alimentação e repressurização apresentam novamente valores do parâmetro de forma $\beta < 1$. Por outro lado, ao atentar na válvula de controlo globo XCV-1753 pode destacar-se o valor de β por ser aproximadamente um. Como tal, é legítimo afirmar que o equipamento se encontra no seu período de vida útil, sendo a função de risco $h(t)$ constante e aproximando-se a função densidade de probabilidade de uma distribuição exponencial com $\lambda = 1/\beta$. Este período é frequentemente consequência de falhas aleatórias, podendo estar associado a possíveis movimentos imprecisos do atuador, posicionamentos incorretos do obturador ou condições de serviço inadequadas para a capacidade dos equipamentos (o adsorvedor e material adsorvente podem necessitar de substituição, permitindo a passagem de certas impurezas), que normalmente se manifesta pelo desgaste excessivo das sedes e obturador. Desta forma, qualquer tipo de substituição preventiva neste equipamento adiciona pouco ou nenhum valor.

É de salientar a diminuição verificada nos MTTF relativamente aos modos de falha estudados anteriormente. Esse decréscimo demonstra a maior frequência de avarias segundo o modo de falha “Passagem na Válvula”, tal como foi previsto em 6.3.

O gráfico 15 apresenta a distribuição de Weibull para a válvula responsável pelo envio e receção de purga XCV-1753. Contacta-se novamente com a escassez de dados, em grande parte devido à elevada fiabilidade associada aos equipamentos em análise.

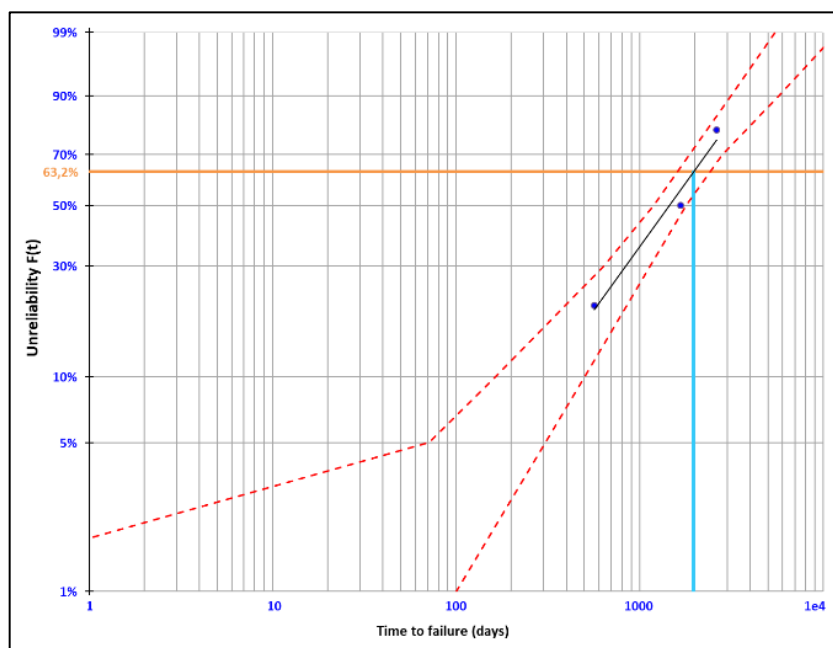


Gráfico 15-Representação de Weibull para a válvula XCV-1753- “Passagem na Válvula”

Execução Inadequada

Tal como tinha sido referenciado em 6.3, o modo de falha “Execução Inadequada” é aquele que apresenta uma taxa de avarias superior. Assim, ao analisar a tabela 15 evidenciam-se os valores da taxa de avarias. Como o número de dados analisados é superior àqueles que se estudaram para outros modos de falha, os valores atingidos para este modo de falha são mais fidedignos do que os restantes.

É possível verificar que as válvulas responsáveis pelo envio ou receção da purga e produto se encontram no seu período de vida útil, $\beta \sim 1$, sendo inútil qualquer tipo de ação de manutenção preventiva no órgão. Provavelmente, os valores do parâmetro de forma nas válvulas de controlo

globo advêm de falhas aleatórias como movimentos imprecisos do atuador ou posicionamentos incorretos do obturador que provocam um desgaste excessivo dos fins-de-curso. Por outro lado, as válvulas borboleta responsáveis pelo produto possivelmente denotam falhas aleatórias ao nível do alinhamento do disco e devido a movimentos imprecisos do atuador, que suscitam um maior desgaste nos fins-de-curso.

Tabela 13- Parâmetros obtidos pela análise de Weibull para o modo de falha “Execução Inadequada”

	Alimentação e Repressurização			Purga enviada ou recebida		Produto (Hidrogénio)
	XCV-1741	XCV-1751	XCV-1761	XCV-1743	XCV-1753	XV-1712
β	0,6	0,68	0,58	1,52	1,16	1,62
η	1283,58	1158,73	1202,5	1423,31	1107,43	1022,74
R^2	0,89	0,99	1	0,88	0,88	0,94
b	-2,24	-2,44	-2,14	-5,15	-3,89	-5,25
MTTF (dias)	1915,56	1512,47	1910,91	1282,93	1051,47	915,74
λ_{avg} ($/10^6$ horas)	21,75	27,55	21,8	32,48	39,63	45,5

Relativamente ao tempo médio entre falhas, verificou-se que os valores atingidos nas válvulas de controlo globo e de bloqueio não diferem muito para o modo de falha em análise.

O gráfico 16 ilustra a distribuição de Weibull para a válvula XV-1712 para o modo de falha “Execução Inadequada”.

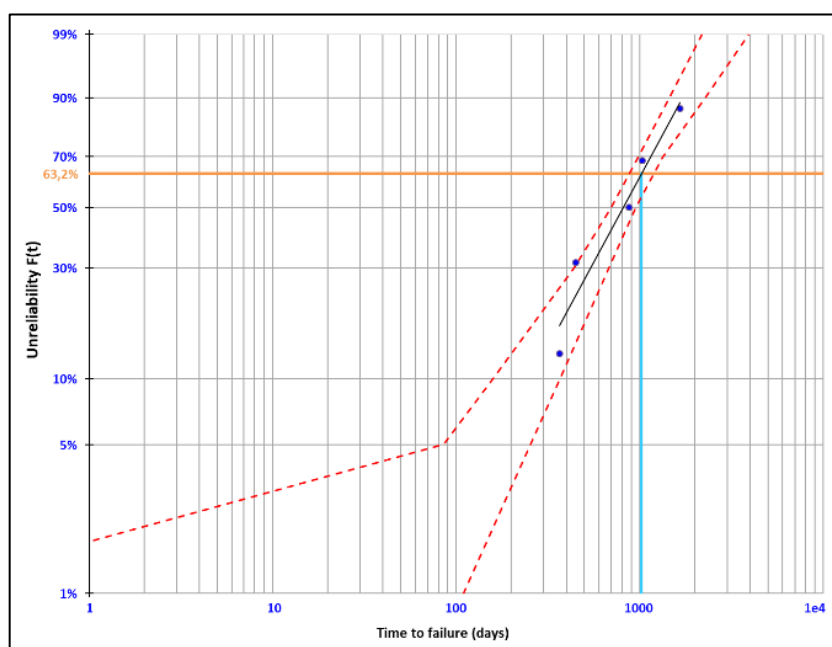


Gráfico 16-Representação de Weibull para a válvula XV-1712- “Execução Inadequada”

6.5.2 CROW-AMSAA

Nesta secção, optou por se realizar uma análise pelo modelo de Crow-AMSAA de forma a compreender e justificar as intervenções realizadas na refinaria. Nos equipamentos em análise realizam-se intervenções periódicas, que implicam a substituição de apenas um número reduzido de componentes. Esses componentes são considerados como novos, mas os restantes permanecem no mesmo estado após a reparação. Desta forma, a fiabilidade das válvulas não é efetivamente alterada pela substituição desses componentes, permanecendo praticamente com os mesmos níveis de fiabilidade que possuíam antes da falha. Assim, as reparações no equipamento repõem o seu estado para uma situação semelhante à verificada antes da falha (ABAO - *as bad as old*) e a intervenção de manutenção pode ser qualificada como reparação mínima. Este comportamento é comumente descrito por um processo de Poisson não homogéneo, característico do modelo de Crow-AMSAA. Para além disso, o recurso a este método permite precisar sobre futuras falhas, independentemente do seu modo de falha.

O estudo encontra-se dividido em três partes. Primeiramente, comprova-se a presença de um Processo de Poisson não homogéneo. Segue-se a análise de cada uma das válvulas abrangidas no método de Weibull. Numa terceira fase, optou por se avaliar o desempenho de conjuntos de equipamentos semelhantes, isto é, todas as válvulas responsáveis pela alimentação e repressurização, envio ou receção de purga e produto. Como válvulas do mesmo grupo possuem funções semelhantes e estão sujeitas a solicitações idênticas, a sua análise conjunta não inviabiliza o emprego do modelo. No que respeita aos modos de falha, consideraram-se apenas aqueles que foram definidos como críticos, nomeadamente a “Falha na Rotação do Disco”, “Falha na Translação do Obturador”, “Passagem na Válvula” e “Execução Inadequada”. Desta forma, e segundo os passos definidos em 3.2.3, construíram-se tabelas com os dados considerados pertinentes, sendo apenas apresentada uma tabela por tipo de válvula, encontrando-se as restantes no anexo 5.

Teste de Laplace

Em primeiro lugar é necessário analisar a independência dos dados. Desta forma, e recorrendo novamente à ferramenta Excel disponível na literatura (Assis 2014), efetuou-se a análise para as válvulas, com um nível de significância de 95%. A hipótese alternativa H_1 pode ser aceite em todos os casos analisados. Desta forma, pode admitir-se que a taxa de falhas é função do tempo e consequentemente, afirmar-se que se trata de um processo de Poisson não-homogéneo.

Válvula de Controlo Borboleta XCV-1741

Tabela 14-Dados da XCV-1741 no modelo de Crow-AMSAA

Data	TTF (dias)	ti (dias)	N	ln(ti)	MLE	$\rho(t_i)$	MTBF(ti)	R(ti)
28/06/2000								
30/10/2003	1219	1219	1	7,11	0,80	9,56E-04	1045,69	3,12E-01
13/02/2004	106	1325	2	7,19	0,90	9,94E-04	1006,14	2,68E-01
18/12/2007	1404	2729	3	7,91	2,59	1,39E-03	720,36	2,26E-02
17/09/2008	274	3003	4	8,01	2,98	1,45E-03	689,18	1,28E-02
19/11/2012	1524	4527	5	8,42	5,43	1,75E-03	570,03	3,56E-04
11/09/2013	296	4823	6	8,48	5,96	1,81E-03	553,58	1,65E-04
23/10/2013	42	4865	7	8,49	6,03	1,81E-03	551,36	1,47E-04
26/11/2013	34	4899	8	8,50	6,10	1,82E-03	549,59	1,35E-04
07/08/2015	619	5518	9	8,62	7,25	1,92E-03	520,17	2,47E-05
31/12/2017	-	6395	9	8,76	9,00	2,06E-03	485,87	1,92E-06

Os valores dos parâmetros de distribuição foram calculados, sendo:

$$\beta = 1,46$$

$$\lambda = 2,45 * 10^{-5}$$

Ao analisar a tabela 16 é possível denotar a presença de TTF de pequenas dimensões. Esses intervalos de tempo reduzidos, possivelmente provêm de falhas aleatórias, devido a ações de manutenção deficientes ou alterações inesperadas na constituição do gás de alimentação, e influenciam o valor dos parâmetros de forma e escala.

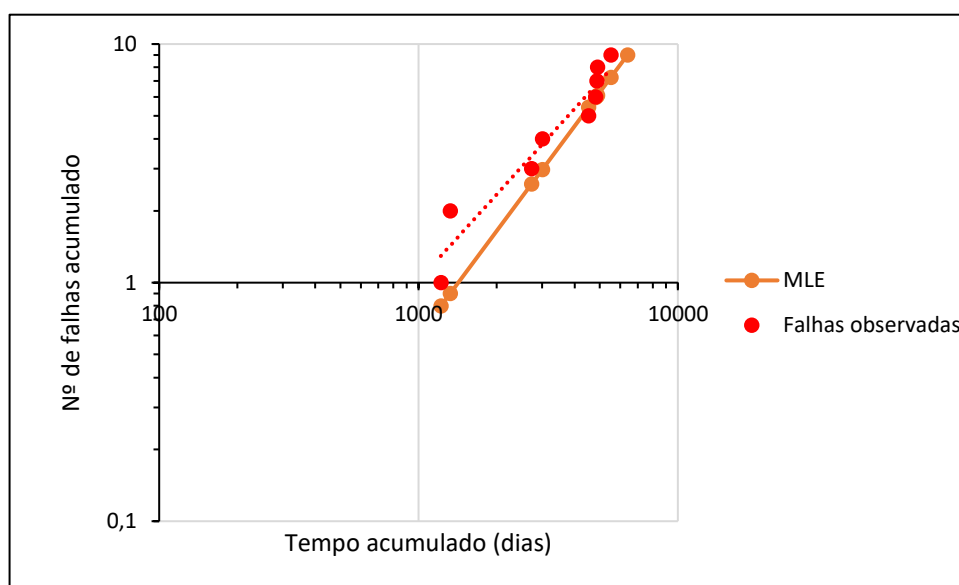


Gráfico 17-Distribuição das falhas na XCV-1741 ao longo do tempo

Considerou-se interessante extrapolar o tempo que resta até uma futura falha ocorrer, de modo a possibilitar ações de manutenção preventivas e assim evitar o seu aparecimento. Como maioria das falhas apresentadas estão associadas ao envelhecimento das válvulas (carácter previsível), manifestando-se através do desgaste de sedes, discos e fins-de-curso, a renovação ou substituição programada é um processo vantajoso.

$$t_i = 6872 \text{ dias}$$

$$TTF = 477 \text{ dias}$$

Pelo valor de β alcançado é possível prever uma deterioração da fiabilidade. O gráfico 18 demonstra a diminuição dos tempos médios entre falhas e aumento progressivo da função intensidade com o tempo

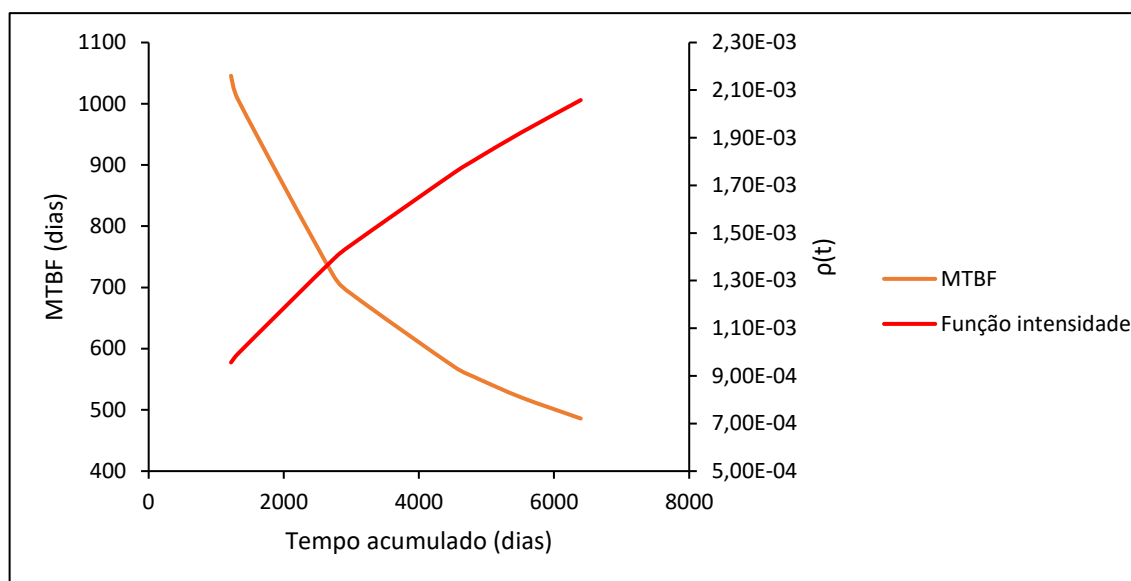


Gráfico 18-MTBF e função intensidade para a XCV-1741

Derivado do crescimento registado na função intensidade ao longo do tempo, a função fiabilidade decresce, o que vai de encontro ao valor de β calculado. No gráfico 19, apresenta-se a curva da função de fiabilidade, salientando-se o facto de em 2000 dias 15% destas válvulas não apresentarem qualquer falha, o que demonstra a elevada fiabilidade deste tipo de equipamentos. No entanto, a curva da fiabilidade não aparenta ser representativa da situação vigente, uma vez que ocorre um decréscimo acentuado dos níveis de fiabilidade.

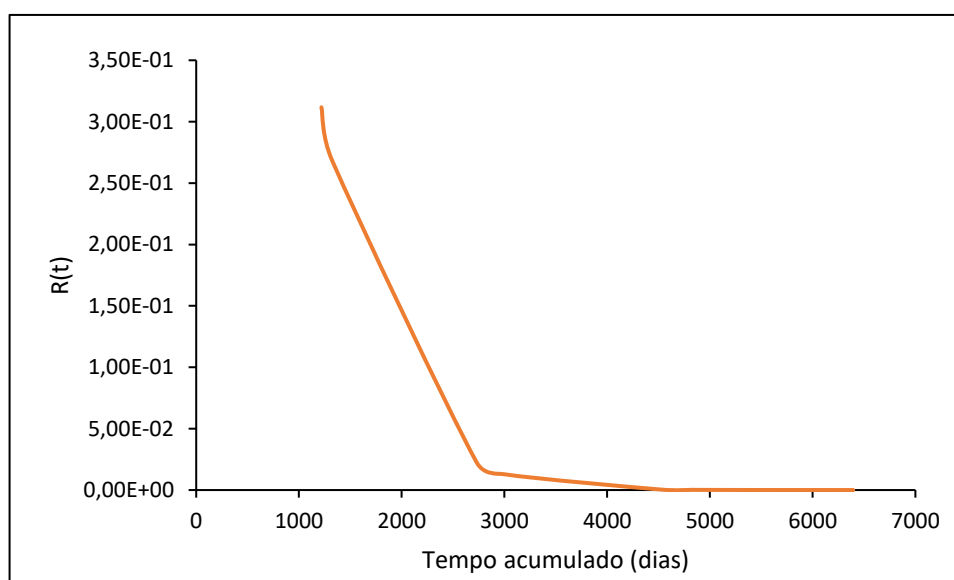


Gráfico 19-Função de fiabilidade para a XCV-1741

Válvula de Controlo Globo- XCV-1753

Tabela 15-Dados da XCV-1753 no modelo de Crow-AMSAA

Data	TTF (dias)	ti (dias)	N	ln(ti)	MLE	$\rho(t_i)$	MTBF(ti)	R(ti)
28/06/2000								
09/11/2004	1595	1595	1	7,37	0,84	9,02E-04	1108,68	2,37E-01
21/01/2005	73	1668	2	7,42	0,91	9,31E-04	1074,28	2,12E-01
11/08/2006	567	2235	3	7,71	1,50	1,14E-03	874,20	7,76E-02
27/06/2011	1781	4016	4	8,30	4,07	1,73E-03	578,57	9,67E-04
20/08/2013	785	4801	5	8,48	5,52	1,96E-03	510,20	8,19E-05
09/10/2013	50	4851	6	8,49	5,62	1,97E-03	506,49	6,93E-05
19/05/2014	222	5073	7	8,53	6,06	2,04E-03	490,78	3,24E-05
25/06/2015	402	5475	8	8,61	6,91	2,15E-03	465,11	7,72E-06
16/08/2016	418	5893	9	8,68	7,83	2,26E-03	441,63	1,60E-06
31/12/2017	-	6395	9	8,76	9,00	2,40E-03	416,92	2,18E-07

Os valores dos parâmetros de forma e escala obtidos foram:

$$\beta = 1,70$$

$$\lambda = 2,94 * 10^{-6}$$

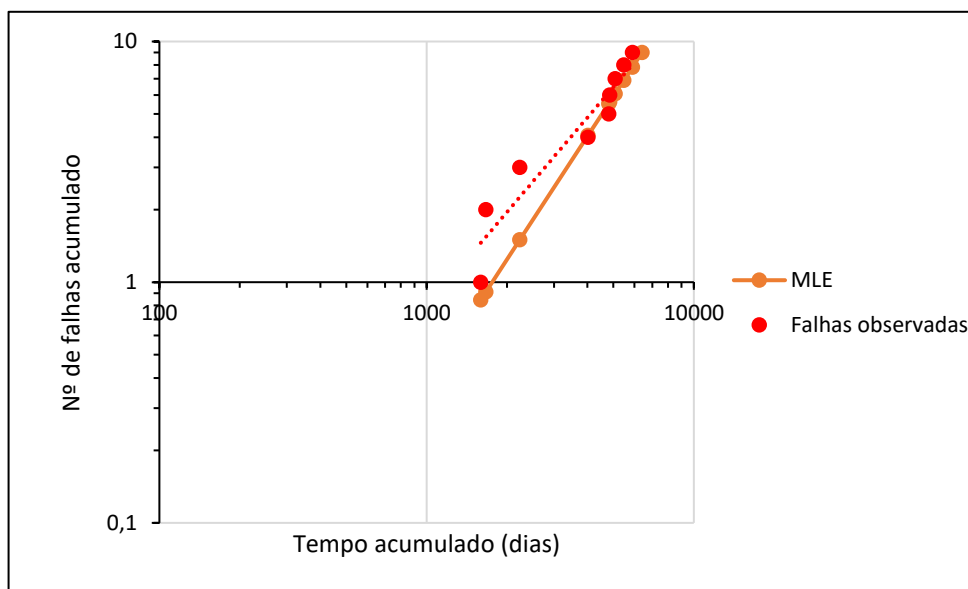


Gráfico 20-Distribuição das falhas na XCV-1753 ao longo do tempo

Efetuuou-se novamente a extrapolação do tempo de funcionamento até à próxima falha. No entanto, há que ressaltar o reduzido número de falhas que ocorreram nas válvulas, pela possibilidade de comprometerem os resultados obtidos.

$$t_i = 6802 \text{ dias}$$

$$TTF = 407 \text{ dias}$$

Como era de esperar, devido ao valor de β encontrado, ocorre uma diminuição do tempo médio entre falhas e consequente aumento da função intensidade ao longo do tempo. Deste modo, é possível assegurar que os níveis de fiabilidade do equipamento se têm deteriorado. A função da fiabilidade obtida para a válvula XCV-1753 denota um decréscimo da fiabilidade até aos 4000 dias, apresentando posteriormente valores muito próximos de zero para os restantes tempos de funcionamento. De ressaltar que, devido muito provavelmente a intervenções prévias inadequadas, se registam novamente TTF muito reduzidos. Essas pequenas variações induzem alterações no traçado da função de fiabilidade, nomeadamente a diminuição dos valores de $R(t)$, ou seja, o decréscimo da probabilidade de o equipamento sobreviver sem falhas até ao momento t .

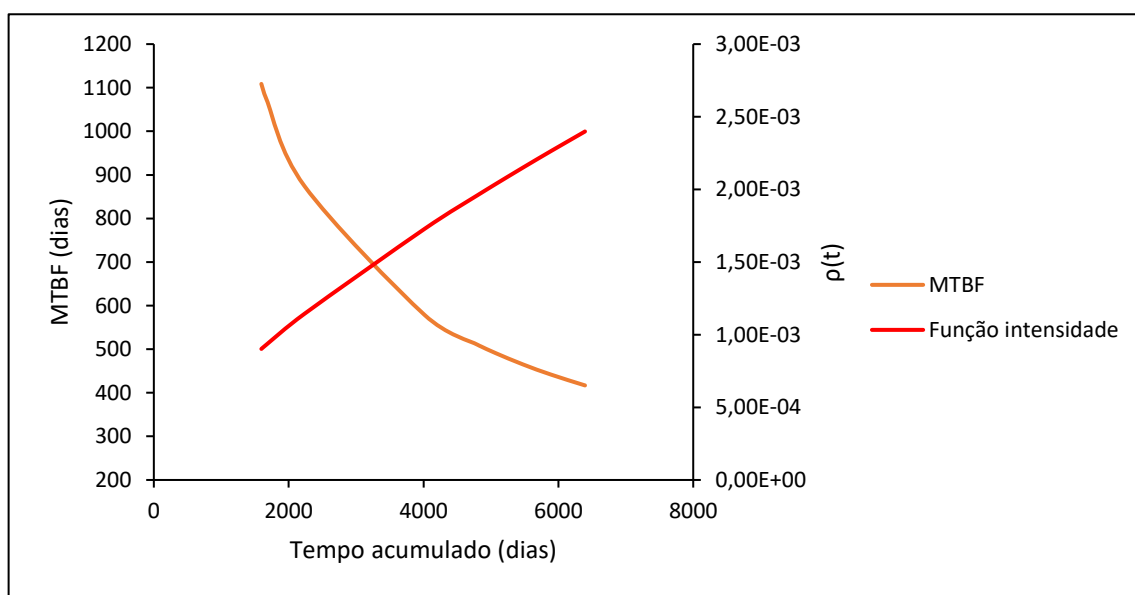


Gráfico 21-MTBF e função intensidade para a XCV-1753

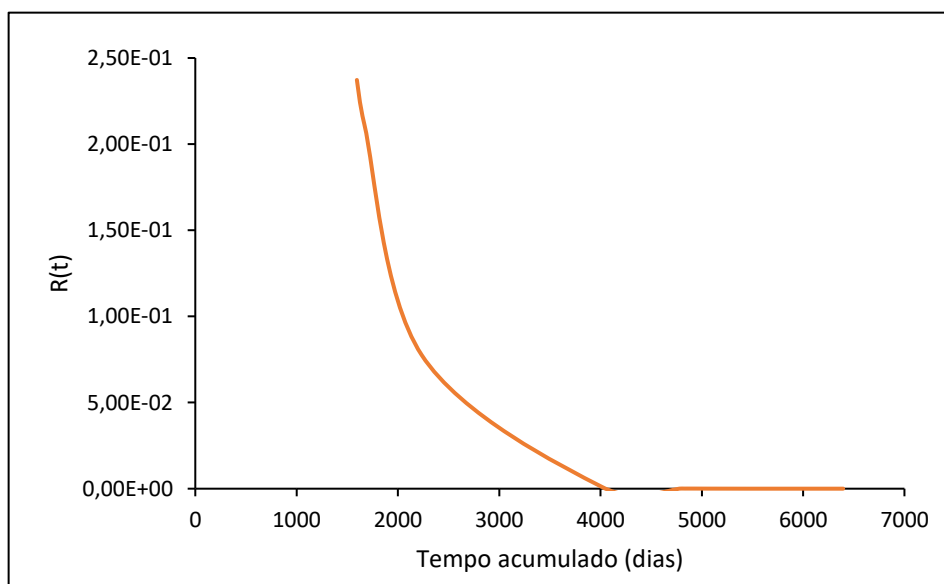


Gráfico 22-Função de fiabilidade para a XCV-1753

Válvula de Bloqueio- XV-1712

Tabela 16- Dados da XV-1712 no modelo de Crow-AMSAA

Data	TTF (dias)	ti (dias)	N	ln(ti)	MLE	$\rho(t_i)$	MTBF(ti)	R(ti)
28/06/2000								
22/11/2002	877	877	1	6,78	0,73	8,07E-04	1239,48	4,93E-01
13/02/2004	448	1325	2	7,19	1,09	7,96E-04	1256,14	3,48E-01
26/08/2008	1656	2981	3	8,00	2,39	7,75E-04	1289,52	9,91E-02
27/06/2011	1035	4016	4	8,30	3,19	7,68E-04	1302,01	4,58E-02
28/06/2012	367	4383	5	8,39	3,47	7,66E-04	1305,70	3,48E-02
31/12/2017	-	6395	5	8,76	5,00	7,57E-04	1321,75	7,92E-03

Os valores dos parâmetros de distribuição foram calculados, obtendo-se:

$$\beta = 0,97$$

$$\lambda = 1,04 * 10^{-3}$$

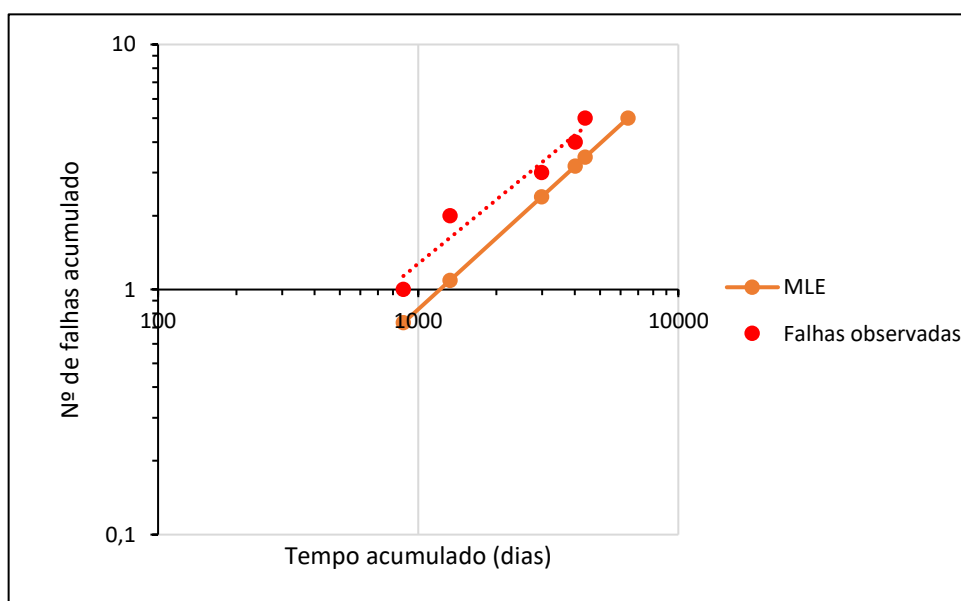


Gráfico 23-Distribuição das falhas na XV-1712 ao longo do tempo

Apesar de existir novamente um número reduzido de falhas, e desta forma a extrapolação do tempo até à futura falha poder não ser totalmente credível, procedeu-se ao cálculo do presente parâmetro:

$$t_i = 7721 \text{ dias}$$

$$TTF = 1326 \text{ dias}$$

O valor do parâmetro de forma $\beta \sim 1$ indica a estagnação da fiabilidade. Como se pode visualizar no gráfico 24, o tempo médio entre falhas apresenta decréscimos mínimos ao longo do tempo e consequentemente, a função de intensidade apresenta um crescimento muito pouco significativo.

A fisionomia da função de fiabilidade da válvula XV-1712 é relativamente semelhante ao esperado, apresentando uma diminuição suave de fiabilidade ao longo do tempo. No entanto, poderia ser ainda mais idêntica, caso existisse um número de dados superior ou o TTF registado na segunda falha fosse maior.

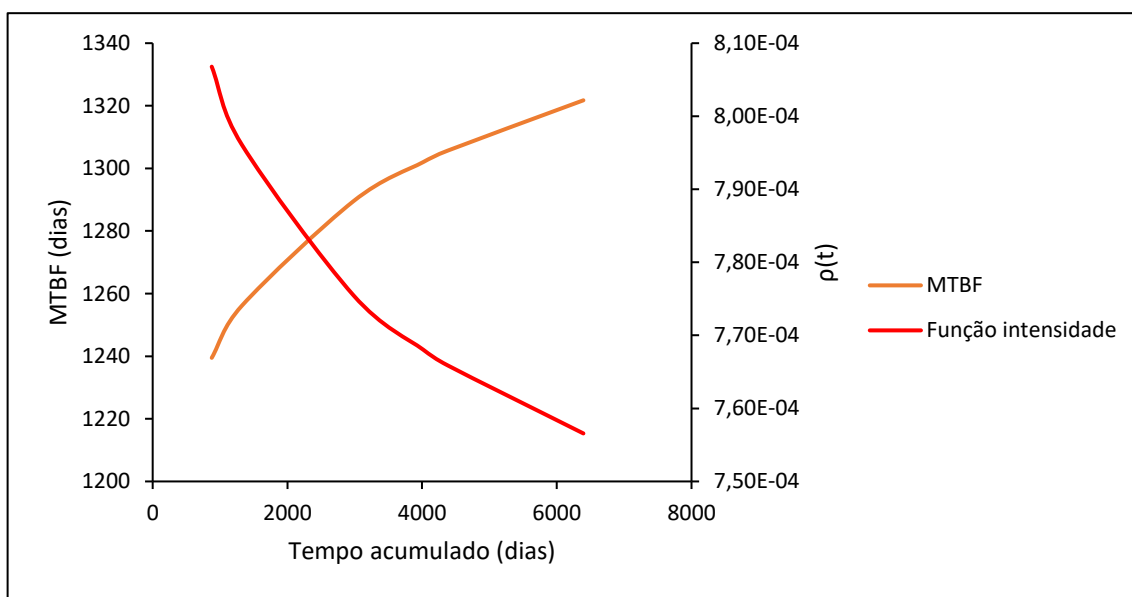


Gráfico 25- MTBF e função intensidade para a XV-1712

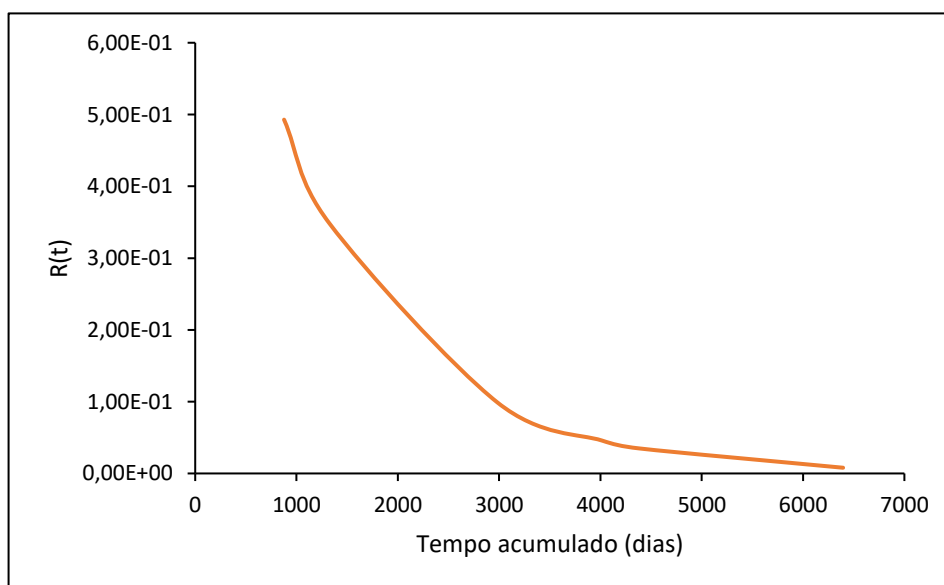


Gráfico 24- Função de fiabilidade para a XV-1712

Válvulas de Controlo Borboleta (Alimentação e Repressurização)

Tabela 17- Dados das válvulas de controlo borboleta no modelo de Crow-AMSAA

Data	TTF (dias)	ti (dias)	N	ln(t _i)	MLE	$\rho(t_i)$	MTBF(ti)	R(t _i)
28/06/2000								
06/10/2003	1195	1195	1	7,09	2,30	2,87E-03	348,92	3,26E-02
30/10/2003	24	1219	2	7,11	2,37	2,89E-03	345,53	2,94E-02
13/02/2004	106	1325	3	7,19	2,68	3,01E-03	331,68	1,84E-02
11/10/2004	241	1566	4	7,36	3,44	3,27E-03	305,57	5,95E-03
06/05/2005	207	1773	5	7,48	4,14	3,48E-03	287,51	2,10E-03
04/08/2005	90	1863	6	7,53	4,45	3,56E-03	280,61	1,31E-03
26/07/2006	356	2219	7	7,70	5,78	3,88E-03	257,54	1,81E-04
26/02/2007	215	2434	8	7,80	6,63	4,06E-03	246,12	5,07E-05
18/12/2007	295	2729	9	7,91	7,87	4,30E-03	232,68	8,06E-06
21/07/2008	216	2945	10	7,99	8,81	4,46E-03	224,15	1,97E-06
31/07/2008	10	2955	11	7,99	8,86	4,47E-03	223,77	1,84E-06
26/08/2008	26	2981	12	8,00	8,98	4,49E-03	222,81	1,55E-06
30/11/2009	461	3442	13	8,14	11,12	4,82E-03	207,64	6,32E-08
07/03/2011	462	3904	14	8,27	13,42	5,12E-03	195,19	2,06E-09
04/04/2011	28	3932	15	8,28	13,56	5,14E-03	194,51	1,66E-09
28/06/2012	451	4383	16	8,39	15,94	5,42E-03	184,42	4,77E-11
19/11/2012	144	4527	17	8,42	16,73	5,51E-03	181,52	1,47E-11
26/06/2013	219	4746	18	8,47	17,95	5,64E-03	177,36	2,39E-12
20/08/2013	55	4801	19	8,48	18,26	5,67E-03	176,36	1,50E-12
26/08/2013	6	4807	20	8,48	18,30	5,67E-03	176,25	1,43E-12
11/09/2013	16	4823	21	8,48	18,39	5,68E-03	175,96	1,25E-12
23/10/2013	42	4865	22	8,49	18,63	5,71E-03	175,22	8,74E-13
26/11/2013	34	4899	23	8,50	18,82	5,73E-03	174,62	6,54E-13
23/10/2014	331	5230	24	8,56	20,75	5,91E-03	169,11	3,70E-14
22/06/2015	242	5472	25	8,61	22,19	6,05E-03	165,39	4,28E-15
25/06/2015	3	5475	26	8,61	22,21	6,05E-03	165,35	4,17E-15
07/08/2015	43	5518	27	8,62	22,47	6,07E-03	164,72	2,83E-15
27/06/2016	325	5843	28	8,67	24,47	6,24E-03	160,16	1,43E-16
31/12/2017	-	6395	28	8,76	28,00	6,53E-03	153,22	7,47E-19

Os parâmetros de forma e escala obtidos foram:

$$\beta = 1,49$$

$$\lambda = 5,94 * 10^{-5}$$

A existência de uma amostra de dimensões consideráveis oferece uma maior credibilidade à aplicação do método. O volume de dados ainda seria maior se se considerassem avarias ocorrentes no mesmo dia. Embora seja raro presenciar avarias em diferentes válvulas de controlo borboleta nos mesmos dias, existiram datas em que tal dilema se sucedeu. Estas situações provavelmente advêm de alterações inesperadas no gás de alimentação a nível da sua constituição, ou de ações de manutenção no conjunto de válvulas. No entanto, na análise corrente apenas se considerou uma avaria por dia.

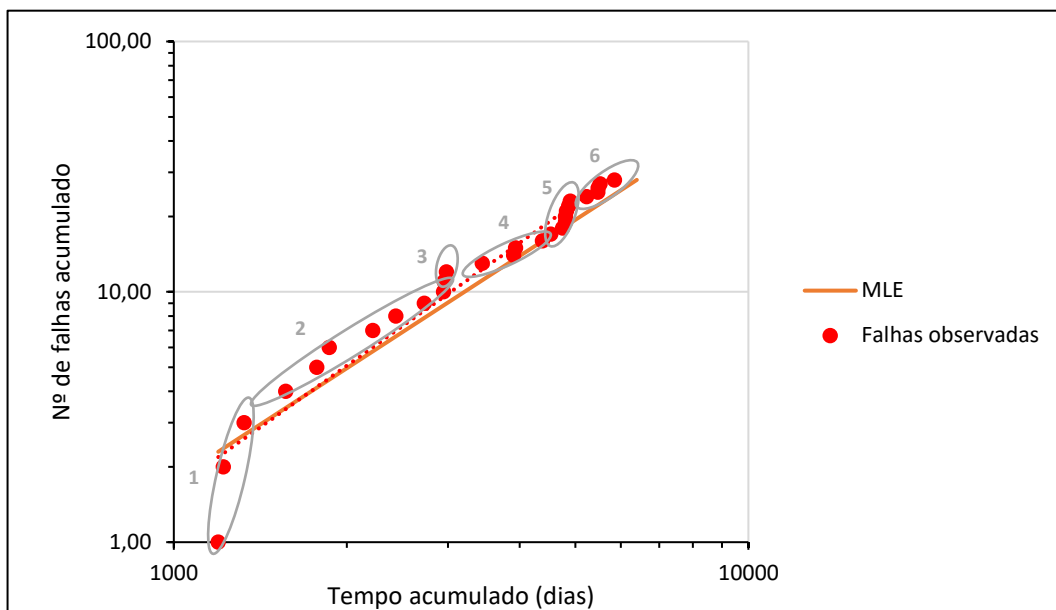


Gráfico 26- Distribuição das falhas nas válvulas de controlo borboleta ao longo do tempo

Na presente análise às válvulas de controlo borboleta responsáveis pela alimentação e repressurização dos adsorvedores, a quantidade de dados disponíveis é considerável, conferindo credibilidade ao resultado obtido (TTF) através da extrapolação da linha de tendência. Assim:

$$t_i = 6547 \text{ dias}$$

$$TTF = 152 \text{ dias}$$

Atentando no gráfico 26, é possível destacar a presença de 6 zonas com diferentes declives. As alterações verificadas nos declives informam acerca do comportamento da fiabilidade ao longo do tempo. Desta forma, caso tenha sido implementada alguma ação que efetivamente conduza a melhorias da fiabilidade, ocorre uma diminuição do declive para valores de $\beta < 1$. Quanto menor for o declive, maior os níveis de fiabilidade associados aos equipamentos em estudo. Procedeu-se então ao cálculo dos declives das diversas zonas do gráfico:

$$\beta_1 = \frac{\log(3) - \log(1)}{\log(1325) - \log(1195)} = 10,64$$

$$\beta_2 = \frac{\log(10) - \log(4)}{\log(2945) - \log(1566)} = 1,45$$

$$\beta_3 = \frac{\log(12) - \log(11)}{\log(2981) - \log(2955)} = 9,93$$

$$\beta_4 = \frac{\log(16) - \log(13)}{\log(4383) - \log(3442)} = 0,86$$

$$\beta_5 = \frac{\log(23) - \log(17)}{\log(4899) - \log(4527)} = 3,83$$

$$\beta_6 = \frac{\log(28) - \log(24)}{\log(6395) - \log(5230)} = 1,39$$

É de realçar os elevados declives atingidos nas zonas ímpares do gráfico. Estas zonas, frequentes de 4 em 4 anos, são caracterizadas por um valor reduzido dos TTF e consequente diminuição da fiabilidade dos equipamentos. Deste modo, é possível afirmar que as falhas nas válvulas se deveram maioritariamente ao envelhecimento de certos componentes, como as sedes, discos e fins-de-curso. Assim, é estritamente necessário desenvolver ações de manutenção para evitar ou minimizar o aparecimento destas faixas. A refinaria de Matosinhos realiza a substituição de componentes dos equipamentos de 4 em 4 anos, processo denominado por paragem programada e prevista em plano. Desta forma, ocorrem substituições ao nível das válvulas que podem restaurar os níveis de fiabilidade ($\beta \sim 1$) ou até mesmo melhorá-los ($\beta < 1$). Essas modificações ocorrem geralmente nos componentes supracitados. De salientar que estas intervenções são normalmente efetuadas não com o objetivo de se atingirem os níveis de fiabilidade verificados no instante inicial dos equipamentos, mas sim com o intuito de se reporem ou eventualmente melhorarem níveis de fiabilidade anteriores.

As zonas identificadas por um número par descrevem o comportamento da fiabilidade dos equipamentos precisamente após essas intervenções, verificando-se um aumento dos TTF, que pode ser sucedido ou não por uma melhoria na fiabilidade.

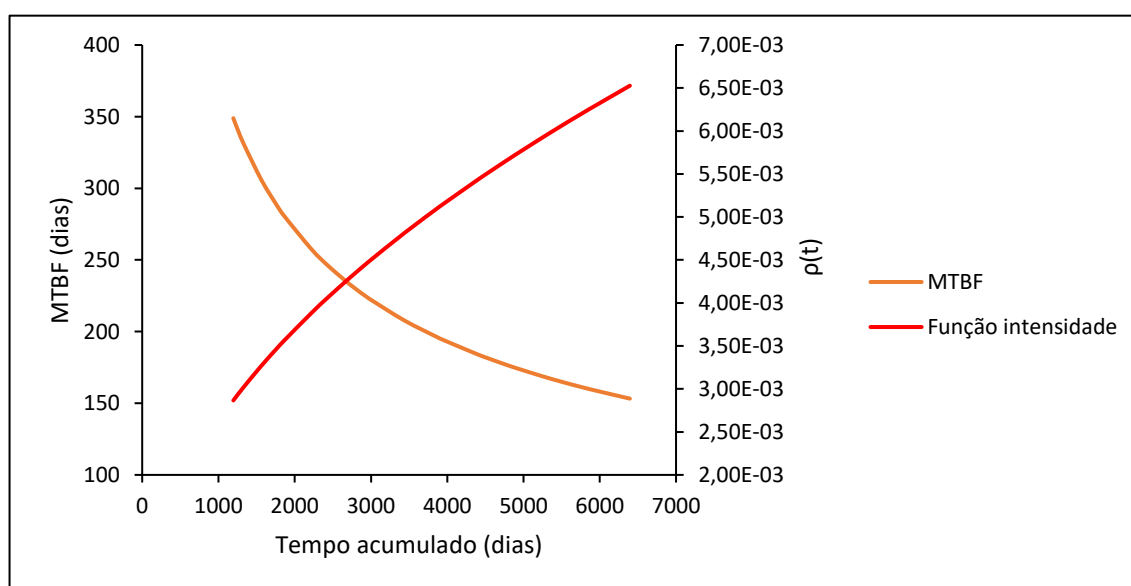


Gráfico 27- MTBF e função intensidade para as válvulas de controlo borboleta

Observando o gráfico 27, pode identificar-se a diminuição do tempo médio entre falhas com o decorrer do tempo, como era espectável pelo valor do parâmetro de forma. Esta variação

possivelmente é justificada pela constante substituição dos componentes aquando uma avaria ou processo de renovação, ao invés da substituição total das válvulas. Para além disso, a constituição do gás de alimentação pode ter sido alterada, induzindo um maior número de falhas nestas válvulas. Por sua vez, a função intensidade expressa um aumento ao longo do tempo.

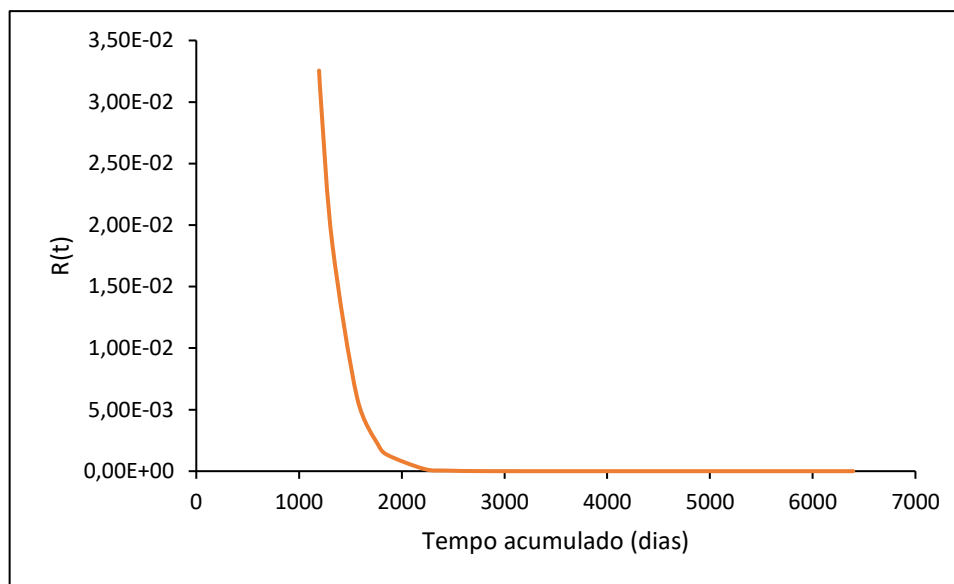


Gráfico 28-Função de fiabilidade para as válvulas de controlo borboleta

Válvulas de Controlo Globo (Envio e Receção da Purga)

Tabela 18- Dados das válvulas de controlo globo no modelo de Crow-AMSAA

Data	TTF (dias)	ti (dias)	N	ln(t _i)	MLE	$\rho(t_i)$	MTBF(ti)	R(t _i)
28/06/2000								
05/11/2004	1591	1591	1	7,37	1,76	1,89E-03	527,90	4,91E-02
09/11/2004	4	1595	2	7,37	1,77	1,90E-03	526,97	4,85E-02
21/01/2005	73	1668	3	7,42	1,91	1,96E-03	510,52	3,81E-02
11/08/2006	567	2235	4	7,71	3,15	2,41E-03	414,92	4,58E-03
12/02/2007	185	2420	5	7,79	3,61	2,55E-03	392,18	2,09E-03
07/02/2008	360	2780	6	7,93	4,58	2,81E-03	355,48	4,01E-04
24/06/2008	138	2918	7	7,98	4,97	2,91E-03	343,48	2,04E-04
26/08/2008	63	2981	8	8,00	5,16	2,96E-03	338,32	1,49E-04
27/06/2011	1035	4016	9	8,30	8,58	3,65E-03	273,92	4,29E-07
28/06/2012	367	4383	10	8,39	9,96	3,88E-03	257,46	4,04E-08
20/08/2013	418	4801	11	8,48	11,64	4,14E-03	241,37	2,30E-09
11/09/2013	22	4823	12	8,48	11,73	4,16E-03	240,59	1,97E-09
09/10/2013	28	4851	13	8,49	11,85	4,17E-03	239,60	1,61E-09
08/11/2013	30	4881	14	8,49	11,98	4,19E-03	238,56	1,30E-09
19/05/2014	192	5073	15	8,53	12,79	4,31E-03	232,12	3,23E-10
25/06/2015	402	5475	16	8,61	14,57	4,55E-03	219,91	1,54E-11
08/08/2016	410	5885	17	8,68	16,48	4,79E-03	208,94	5,86E-13
11/08/2016	3	5888	18	8,68	16,50	4,79E-03	208,87	5,72E-13
16/08/2016	5	5893	19	8,68	16,52	4,79E-03	208,74	5,49E-13
31/12/2017	-	6395	19	8,76	19,00	5,08E-03	196,99	7,97E-15

Os parâmetros de distribuição alcançados foram:

$$\beta = 1,71$$

$$\lambda = 5,97 * 10^{-6}$$

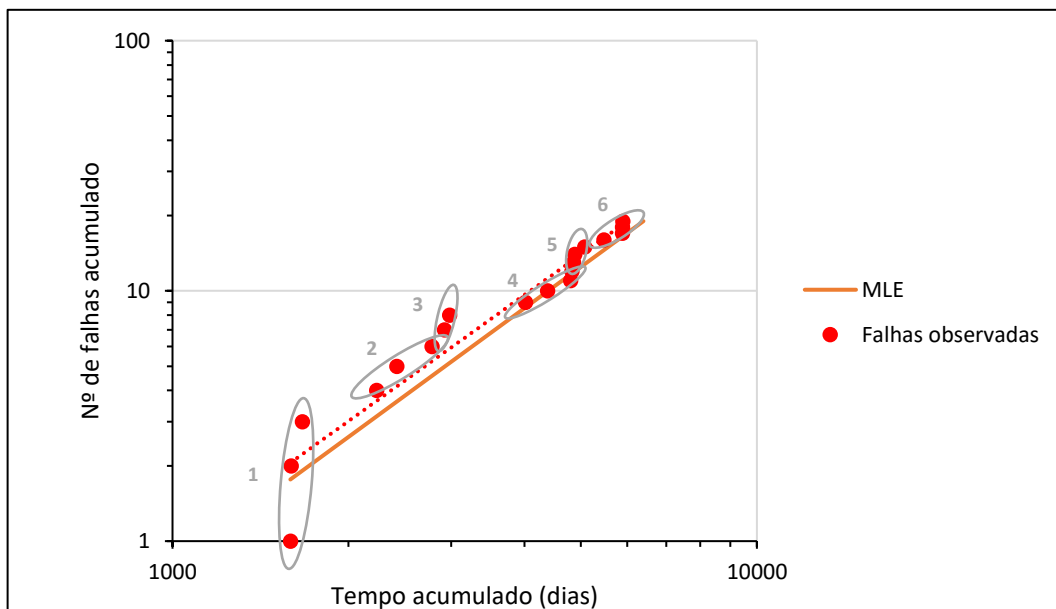


Gráfico 29- Distribuição das falhas nas válvulas de controlo globo ao longo do tempo

Optou por se calcular novamente o tempo até à próxima falha, de forma a poder atuar preventivamente sobre a mesma.

$$t_i = 6590 \text{ dias}$$

$$TTF = 195 \text{ dias}$$

A distribuição das falhas ao longo do tempo mostra ser muito semelhante para os dois tipos de válvulas de controlo, apesar de nas válvulas de controlo borboleta existir um número de ocorrências superior, consequência do elevado diferencial de pressão a que estão sujeitas. Desta forma, também se assiste à divisão da distribuição em seis zonas principais, cada uma caracterizada pelo seu próprio declive.

$$\beta_1 = \frac{\log(3) - \log(1)}{\log(1668) - \log(1591)} = 23,25$$

$$\beta_2 = \frac{\log(6) - \log(4)}{\log(2780) - \log(2235)} = 1,86$$

$$\beta_3 = \frac{\log(8) - \log(7)}{\log(2981) - \log(2918)} = 6,25$$

$$\beta_4 = \frac{\log(11) - \log(9)}{\log(4801) - \log(4016)} = 1,12$$

$$\beta_5 = \frac{\log(15) - \log(12)}{\log(5073) - \log(4823)} = 4,42$$

$$\beta_6 = \frac{\log(19) - \log(16)}{\log(5893) - \log(5475)} = 2,34$$

Demonstra-se, mais uma vez, a importância das intervenções de 4 em 4 anos realizadas pela refinaria. Esta conduta permite a estabilização da fiabilidade dos equipamentos. As substituições mais comuns neste período são ao nível das sedes, obturadores e fins-de-curso. Por vezes, ocorre a substituição precoce destes componentes, o que aumenta os custos associados, contudo tal procedimento é efetuado de forma a evitar a ocorrência de uma futura falha. Como também foi referido na seção 6.1, é frequente comprarem-se peças de reserva nas intervenções, com o intuito de, caso não sejam substituídos previamente os componentes, se proceder imediatamente à sua permuta após a falha.

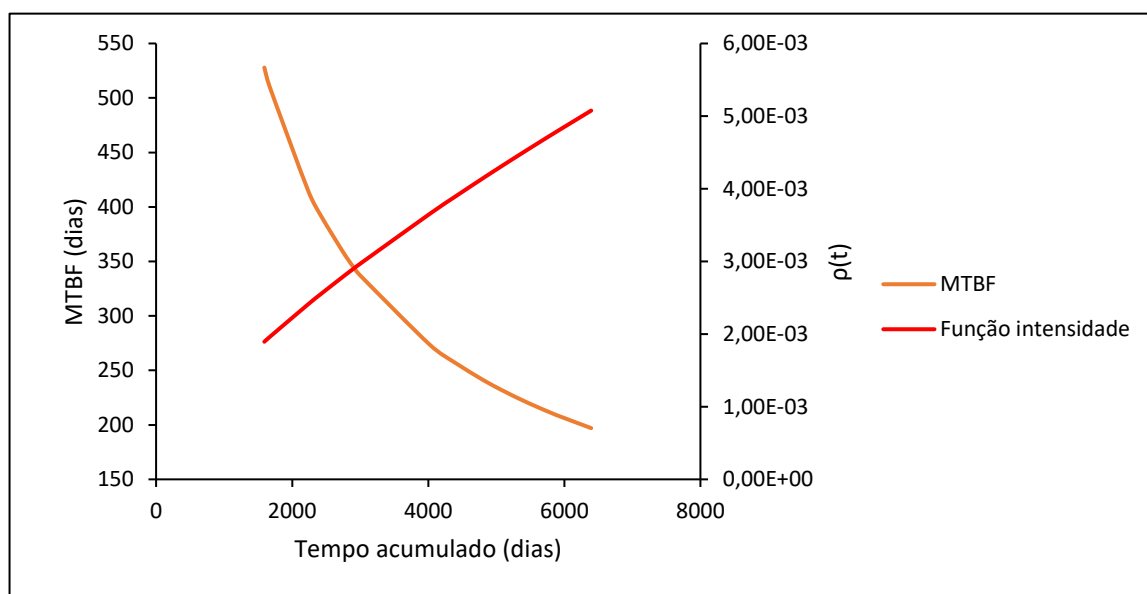


Gráfico 30-MTBF e função intensidade para as válvulas de controlo globo

Como se visualiza no gráfico 30, o tempo médio entre falhas tem diminuído e, consequentemente a função intensidade regista um acréscimo ao longo do tempo.

A fiabilidade dos equipamentos muito provavelmente tem diminuído uma vez que apenas se têm substituído componentes e raramente se procedeu à permuta de todo o conjunto da válvula. A substituição dos componentes, apesar de melhorar a fiabilidade, raramente possibilita um

comportamento da válvula idêntico àquele que era manifestado quando foi introduzida na unidade, isto é, os níveis de fiabilidade raramente são atingidos, e muito menos ultrapassados.

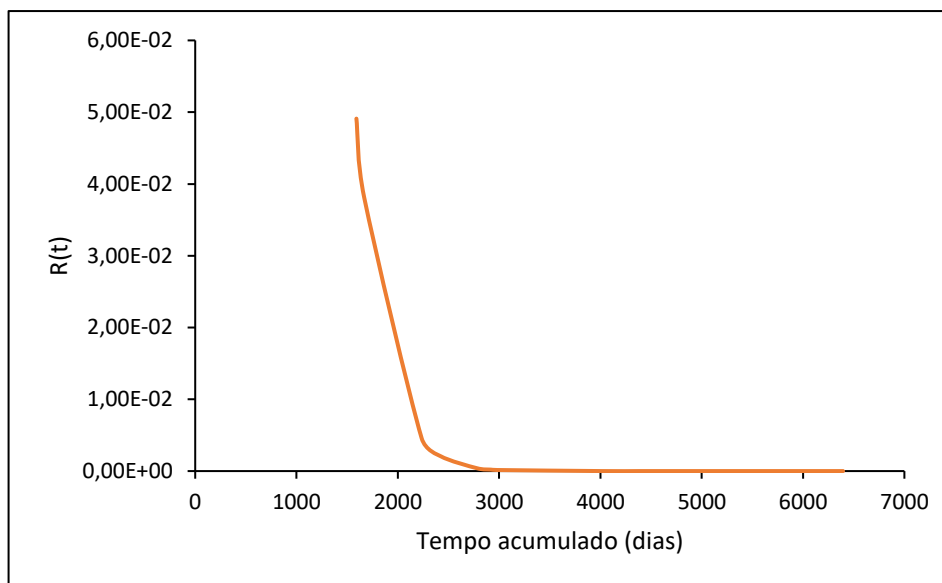


Gráfico 31-Função de fiabilidade para as válvulas de controlo globo

Válvulas de Bloqueio (Produto)

Tabela 19-Dados das válvulas de bloqueio no modelo de Crow-AMSAA

Data	TTF (dias)	ti (dias)	N	ln(ti)	MLE	$\rho(t_i)$	MTBF(ti)	R(t _i)
28/06/2000								
22/11/2002	877	877	1	6,78	1,70	1,98E-03	504,09	1,76E-01
12/01/2004	416	1293	2	7,16	2,53	2,00E-03	499,33	7,51E-02
13/02/2004	32	1325	3	7,19	2,59	2,00E-03	499,03	7,03E-02
17/02/2004	4	1329	4	7,19	2,60	2,00E-03	499,00	6,97E-02
31/10/2006	987	2316	5	7,75	4,59	2,03E-03	492,27	9,05E-03
13/11/2006	13	2329	6	7,75	4,62	2,03E-03	492,20	8,81E-03
24/07/2007	253	2582	7	7,86	5,13	2,04E-03	490,96	5,20E-03
18/12/2007	147	2729	8	7,91	5,43	2,04E-03	490,30	3,83E-03
26/08/2008	252	2981	9	8,00	5,95	2,04E-03	489,24	2,26E-03
27/06/2011	1035	4016	10	8,30	8,07	2,06E-03	485,69	2,56E-04
28/06/2012	367	4383	11	8,39	8,83	2,06E-03	484,65	1,18E-04
20/08/2013	418	4801	12	8,48	9,69	2,07E-03	483,58	4,88E-05
11/09/2013	22	4823	13	8,48	9,74	2,07E-03	483,52	4,66E-05
31/12/2017	-	6395	13	8,76	13,00	2,08E-03	480,20	1,65E-06

Os parâmetros de forma e escala calculados foram:

$$\beta = 1,02$$

$$\lambda = 1,64 * 10^{-3}$$

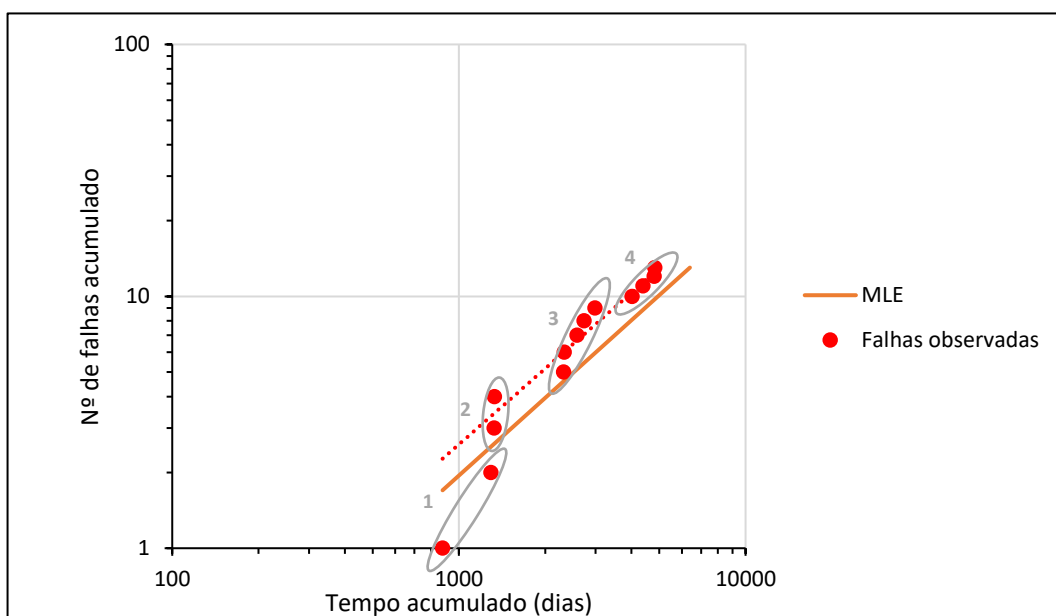


Gráfico 32- Distribuição das falhas nas válvulas de bloqueio ao longo do tempo

Seguiu-se a determinação do tempo até a futura falha:

$$t_i = 6875 \text{ dias}$$

$$TTF = 480 \text{ dias}$$

O valor de TTF apresentado, bem como aqueles presenciados na tabela 21 permitem a comprovação da elevada fiabilidade inerente às válvulas de bloqueio. Devido à solicitação a que estão sujeitas, bem como o mecanismo electropneumático que apresentam, possuem um número de falhas reduzido e consequentemente, níveis de fiabilidade elevados.

Atentando no gráfico 32 é possível destacar 4 zonas de diferentes declives:

$$\beta_1 = \frac{\log(2) - \log(1)}{\log(1293) - \log(877)} = 1,79$$

$$\beta_2 = \frac{\log(4) - \log(3)}{\log(1329) - \log(1325)} = 95,44$$

$$\beta_3 = \frac{\log(9) - \log(5)}{\log(2981) - \log(2316)} = 2,33$$

$$\beta_4 = \frac{\log(13) - \log(10)}{\log(4823) - \log(4016)} = 1,43$$

As zonas 2 e 3 possuem um maior declive, ocorrendo uma deterioração da fiabilidade. Contudo, estas faixas estão localizadas precisamente sobre o ano 2004 e 2008, isto é, sobre os anos em que ocorreu a paragem programada e prevista em plano da unidade. Assim, muito provavelmente procedeu-se à substituição de certos componentes das válvulas de bloqueio, como as sedes, discos e fins-de-curso prolongando-se a vida destes equipamentos e contribuindo assim para níveis de fiabilidade superiores. Como é passível de ser visualizado no gráfico 32, os TTF após as datas destas intervenções crescem exponencialmente.

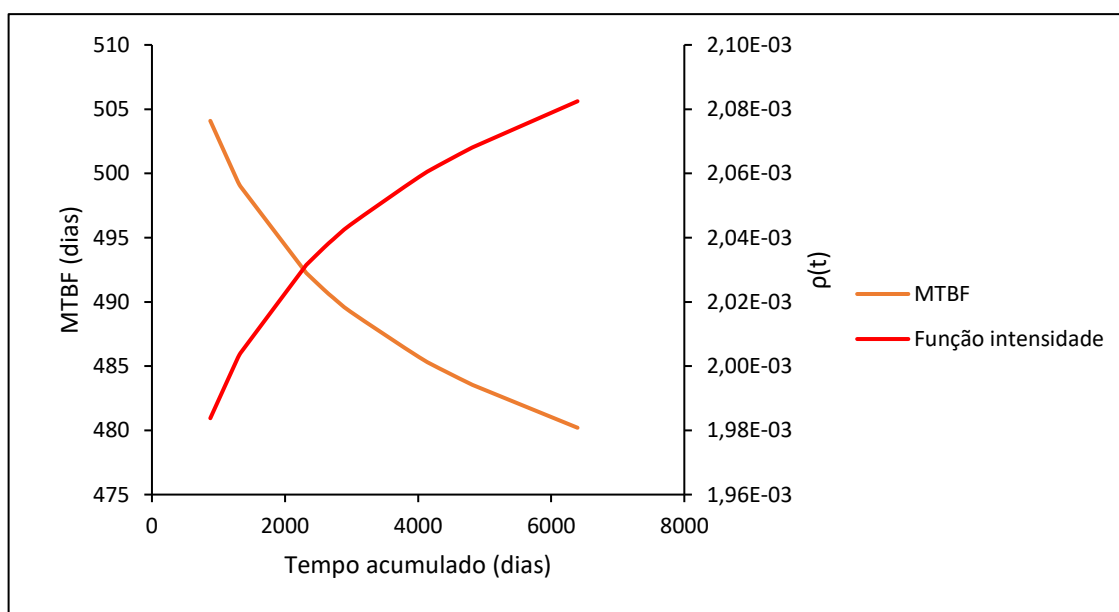


Gráfico 33-MTBF e função intensidade para as válvulas de bloqueio

Pela análise do gráfico 33 constata-se a redução do tempo médio entre falhas ao longo do tempo. No entanto, e tal como era esperado pelo valor de β calculado, estas alterações são mínimas, podendo afirmar-se que a fiabilidade se encontra praticamente estabilizada, isto é, não ocorre qualquer deterioração neste parâmetro ao longo da vida dos equipamentos. Ao longo de 18 anos assiste-se a uma redução de 5% dos MTBF, o que no contexto vigente é praticamente insignificante. Consequentemente, ocorre um aumento experimentalmente desprezável da função intensidade com o decorrer do tempo.

No gráfico 34 é comprovada a elevada fiabilidade associada a estes equipamentos, uma vez que num conjunto de 6 válvulas, a probabilidade desses equipamentos atingirem aproximadamente 3 anos sem qualquer tipo de falha é de 15%.

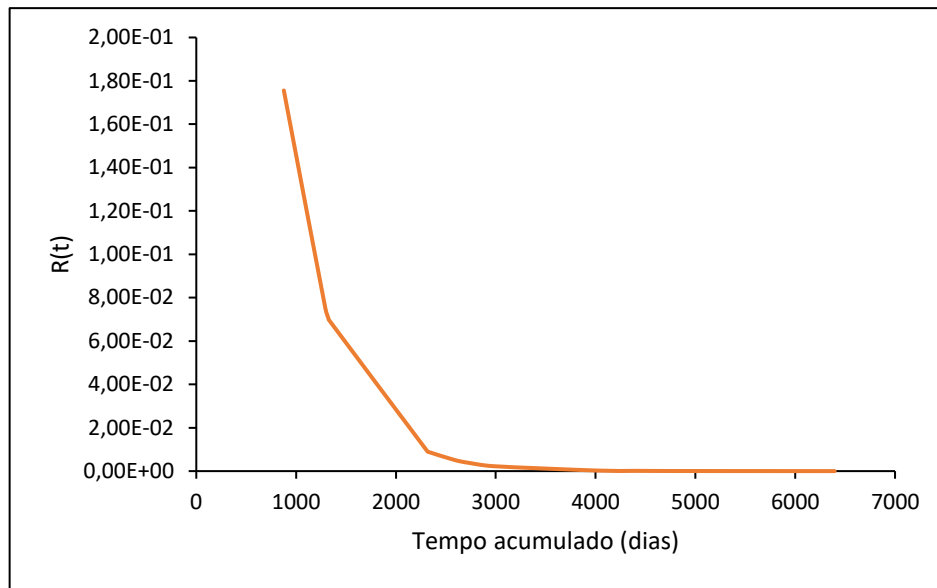


Gráfico 34- Função de fiabilidade para as válvulas de bloqueio

7 Conclusões e Perspetivas de Trabalhos Futuros

7.1 Conclusões

A preservação da função de qualquer equipamento durante um intervalo de tempo pré-definido numa indústria competitiva, como é a de refinação, ostenta um papel preponderante para uma resposta imediata e adequada às solicitações impostas e consequentemente, para a prosperidade da empresa. Deste modo, a presente dissertação incidiu na aplicação da metodologia RCM e métodos estatísticos, de forma a avaliar o comportamento de um conjunto de válvulas e verificar se os requisitos impostos eram cumpridos.

As diferenças entre a FMECA inicial e as FMECA aplicadas residem, maioritariamente, na definição dos modos de falha. Por um lado, na primeira apresentam-se todos os modos de falha definidos pelo OREDA. Já nas FMECA aplicadas exibem-se os modos de falha de acordo com os dados existentes, os quais frequentemente não apresentam a informação devida. Com a edificação da primeira FMECA aplicada, que considerou todos os equipamentos presentes na refinaria, foi desde logo exposta a elevada fiabilidade comumente associada às válvulas. Pela restrição do domínio apenas às válvulas da unidade, a segunda FMECA aplicada permitiu identificar quais delas eram críticas e modos de falha mais frequentes.

A função de Weibull permite descrever o tempo de vida até à falha de componentes sujeitos a fenómenos de degradação de uma forma bastante versátil e é vulgarmente adotada para amostras reduzidas. Embora com amostras pequenas, valores atípicos prejudiquem consideravelmente a interpretação dos resultados e a relevância estatística ser classificada como diminuta, as válvulas apresentaram a resposta esperada. Desta forma, os equipamentos em estudo revelaram encontrar-se nas fases de infância ou de vida útil, evidenciando mais uma vez a sua longevidade.

Por outro lado, o método de Crow-AMSAA foi aplicado com o intuito de detetar alguma alteração na fiabilidade dos equipamentos e determinar as possíveis causas da sua génese. A partir deste modelo identificaram-se diversas zonas nos conjuntos de equipamentos que evidenciavam diferentes tendências. Ao longo da análise, foi possível comprovar que as paragens de 4 em 4 anos introduzem melhorias na fiabilidade dos equipamentos e são devidamente aplicadas, isto é, são empregues após um registo anormal e excessivo do número de falhas. Desta forma, é também demonstrado o carácter previsível de maioria das falhas das válvulas, as quais resultam de fenómenos de envelhecimento de componentes como as sedes, discos, obturadores e fins de curso.

No decorrer do projeto contactou-se com uma das grandes limitações da área de Manutenção e Fiabilidade, a deficiência de dados. Os registos apresentavam algumas lacunas em termos de precisão e coerência, peculiarmente na definição dos modos de falha, dados do equipamento e tempos de reparação, o que influenciou a forma como posteriormente se procedeu a sua análise. Em alguns casos, nomeadamente nos mais antigos, a informação dos registos era demasiado genérica, não permitindo uma análise minimamente rigorosa, e consequentemente tiveram de ser ignorados. Desta forma, foi possível compreender a importância de doutrinar todos os

profissionais envolvidos a desenvolverem registos completos e objetivos, para mais tarde se efetuarem análises coerentes e rigorosas e de modo consequente se implementarem ações de manutenção eficazes.

7.2 Perspetivas de Trabalhos Futuros

Como perspetiva de trabalho futuro surge de imediato a proposta do emprego de diferentes métodos, também aplicáveis a amostras reduzidas, de modo a comparar os resultados obtidos com outras metodologias, nomeadamente, o método de Bootstrap. Este modelo é apresentado como um método computacional, que tem por base procedimentos de reamostragem para o cálculo de medidas de incerteza dos parâmetros de interesse. A sua grande vantagem reside no facto de ser adequado a diversas aplicações e permitir estimar erros de previsão e intervalos de confiança. Para além disso, o método de Bootstrap não inviabiliza a utilização do método de Weibull, podendo até ser utilizado como um complemento na análise dos resultados obtidos.

Para além disso, ao invés de determinar os parâmetros de distribuição de Weibull através de métodos analíticos (MLE), seria interessante recorrer aos métodos Bayesianos, normalmente associados a resultados bastante satisfatórios, considerados até de difícil aprimoramento.

Referências

- Abernethy R B., (2006). *The New Weibull Handbook* (5th ed.). R.B. Abernethy.
- Ascher H., Feingold H., (1984). *Repairable Systems Reliability-Modeling, inference, misconceptions and their causes*. Marcel Dekker, New York.
- Assis R., (2014). *Apoio à Decisão em Manutenção na Gestão de Ativos Físicos* (2nd ed.). LIDEL, Lisboa.
- Barringer P., (2002). *Crow/AMSAA Reliability Growth Plots*. Retirado de <http://www.barringer1.com/nov02prb.htm>
- Ben-Daya M., Duffua S.O., Raouf A., Knezevic J., Ait-Kadi D., (2009). *Handbook of Maintenance Management and Engineering*. Springer, New York.
- Deighton M. G., (2016). *Facility Integrity Management – Effective Principles and Practices for the Oil, Gas, and Petrochemical Industries*. Elsevier, Rio de Janeiro.
- Ferreira L. A., (1998). *Introdução à Manutenção*. Publindustria, Porto.
- Ferreira L. A., (2015). *Physical Asset Management: sua relevância atual*. Retirado de Repositório Aberto da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Filipe F. M. C., (2006). *Gestão e organização da manutenção, de equipamento de conservação e manutenção de infra-estruturas ferroviárias*. Retirado de Repositório Aberto da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Martins P.G, Leitão L.F., (2009). Predição de Falhas no Apoio à decisão na Gestão da Manutenção. Retirado de <https://bibliotecadigital.ipb.pt/bitstream/10198/1650/1/Artigo2.pdf>
- Galp Energia. (2010). *Refinaria de Matosinhos*. Retirado de <https://www.galp.com/corp/pt/sobre-nos/o-que-fazemos/refinacao-distribuicao/aprovisionamento-refinacao-e-logistica>
- Kiran D.R., (2016). *Total Quality Management*. Elsevier, Rio de Janeiro.
- ISO 14224:2016 *Petroleum, petrochemical and natural gas industries- Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment: ISO 14224:2016*.
- Lifetime Reliability Solutions. (2009). *Reliability Growth Plot using MS Excel Guidebook*. Retirado de <http://www.lifetime-reliability.com/store/reliability-engineering/reliability-growth-plotting-excel/Reliability Growth Plotting Guide for Excel.pdf>
- Masdi, M., Hussin, H., Mokhtar, A.A, & Majid, M.A. (2012). Reliability Assessment of Repairable System based on Performance Data. *Journal of Applied Sciences*. Retirado de <https://scialert.net/fulltext/?doi=jas.2012.2568.2573>
- Masdi M., Raza T., Majid M.A., (2016). Prediction of Failures by Using Crow/AMSAA Model in Microsoft Excel. Retirado de http://ieomsociety.org/ieom_2016/pdfs/58.pdf
- Moubray J., (1997). *Reliability Centered Maintenance* (2nd ed.). Industrial Press, New York.
- Moss T. R., (2005). *The Reliability Data Handbook*. Professional Engineering, Michigan.
- NP EN 13306:2007. *Terminologia de manutenção: NP EN 13306:2007*. Comité Europeu de Normalização.
- O'Connor D.T., Kleyner A., (2012). *Pactical Reliability Engineering* (5th ed.). Wiley, Manhattan.

- Oliveira J. F., (2010). *Análise de manutenção dos aeroarrefecedores na refinaria de Matosinhos*. Retirado de Repositório Aberto da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Pinto J. C. M., (2016). *Análise Fiabilística de um compressor alternativo na refinaria de Matosinhos*. Retirado de Repositório Aberto da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Rausand M., Hoyland A., (2004). *System Reliability Theory* (2nd ed.). Wiley-Interscience, Manhattan.
- Refinaria de Matosinhos – Data Book de Segurança, Saúde e Ambiente. (2013). Retirado de <http://docplayer.com.br/647192-Refinaria-de-matosinhos-data-book-de-seguranca-saude-e-ambiente-2013.html>
- Souza J. B., Marçal F.M., (2015). Reliability Centered Maintenance (RCM) e Failure Mode and Effects Analysis (FMEA): uma reflexão teórica-analítica. Retirado de https://www.researchgate.net/publication/267372112_Reliability_Centered_Maintenance_RCM_e_Failure_Mode_and_Effects_Analysis_FMEA_uma_reflexao_teorica-analitica
- Skousen P.L., (1997). *Valve Handbook*. McGraw-Hill, New York.
- Sun A., Kee E., Yu W., Popova E., Grantom R., Richards D., (2005). Application of Crow-AMSAA Analysis to Nuclear Power Plant Equipment Performance. *The 13th international conference on nuclear engineering abstracts*. Retirado de <http://www.me.utexas.edu/~popova/icone50049.pdf>
- Tang Z., Zhou W., Yang Y., Zhou W., (2015). Comparison of the Weibull and the Crow-AMSAA Model in Prediction of Early Cable Joint Failures. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 30, 2410-2418.
doi: 10.1109/TPWRD.2015.2404926
- Tinga, T. (2013). *Principles of Loads and Failure Mechanisms*. Springer, New York.
- Tinga, T. (2012). *Mechanism Based Failure Analysis*. Netherlands Defence Academy, Twente.
- Tobias, P. A., & Trindade, D.C. (2012). *Applied Reliability* (3rd ed.). CRC Press, Florida.
- Villacourt, M. (1992). Failure Mode and Effects Analysis (FMEA): A Guide for Continuous Improvement for the Semiconductor Equipment Industry. *International SEMATECH*. Retirado de <http://www.semtech.org/docubase/document/0963beng.pdf>
- .

ANEXO 1 - Principais Problemas nas Válvulas Borboleta e Globo

Quedas de Pressão nas Válvulas

O fluido move-se na válvula devido a um fenómeno denominado por queda de pressão, ou seja, graças à diferença de pressões a montante e a jusante. Caso as tubagens sejam iguais na entrada e na saída e a velocidade se verifique constante, a válvula tem de reduzir a pressão do fluido, através de perdas por atrito, de forma a poder ocorrer a sua movimentação (Skousen 1997).

É correto afirmar que essas perdas ocorrem entre o fluido e a parede do corpo da válvula, contudo essas perdas são mínimas, não diminuindo suficientemente a pressão do fluido para que possa ocorrer a sua movimentação. Assim, e recorrendo ao projeto das válvulas, é possível criar certas restrições no seu corpo que aumentem as perdas por atrito. Uma simples redução na dimensão da via onde circula o fluido pode possibilitar a circulação do fluido. Desta forma, o fluido ao transpor a zona em questão, aumenta a sua velocidade e diminui a sua pressão, tal como representado no gráfico.

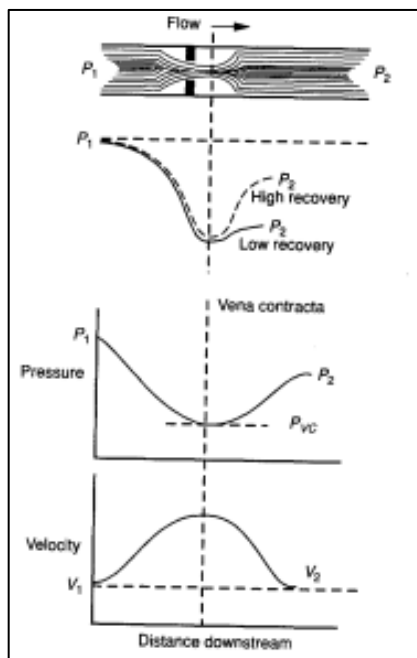


Figura 21-Vena contracta (Skousen 1997)

A zona de vena contracta, onde a velocidade é máxima e a pressão mínima, ocorre a jusante da restrição implementada. Posteriormente, ocorre um decréscimo na velocidade do fluido e um aumento da sua pressão. De referir que os valores de pressão iniciais nunca mais serão atingidos, uma vez que se perdeu parte da energia do fluido. Desta forma, a diferença de pressões possibilita a movimentação do fluido, mas induz desgaste nos componentes sobre os quais incide o fluido, podendo mesmo originar a falha funcional do equipamento.

Cavitação

Cavitação é um fenómeno presente apenas nos líquidos, daí não ser apropriado nas válvulas da unidade. Contudo, é um processo muito frequente nas válvulas borboleta e globo, daí a sua referência e explicitação.

Quando o fluido transpõe a restrição imposta na vena contracta, a sua velocidade aumenta e ocorre uma diminuição da pressão. Este decréscimo pode ser de tal ordem que uma pressão inferior à de vapor do fluido é atingida, conduzindo à formação de bolhas de vapor. Estas bolhas, formadas na vena contracta, seguem o movimento do fluido, aumentando assim a sua pressão e diminuindo a velocidade. O aumento da pressão traduz-se na implosão das bolhas que, caso ocorra perto de um componente, provoca o seu desgaste. Todo o processo de cavitação é demonstrado na figura 22.

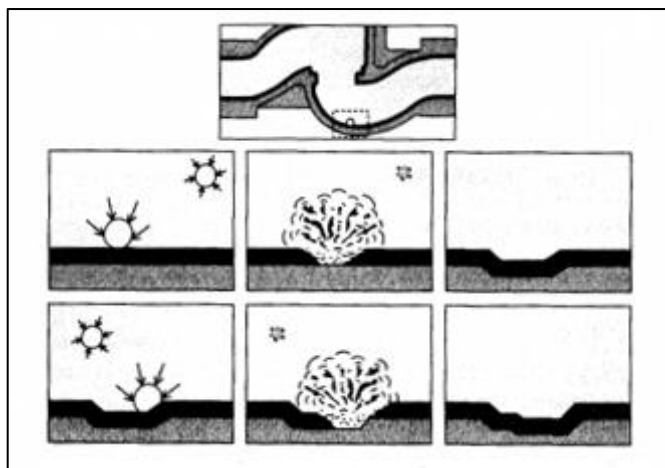


Figura 22-Fenómeno de cavitação (Skousen 1997)

Para o fenómeno de cavitação ocorrer é então necessário:

- Fluido mantém-se no estado líquido ao longo da válvula;
- Líquido não pode encontrar-se no estado saturado quando entra na válvula, uma vez que a queda de pressão irá formar um vapor residual a jusante da válvula;
- Queda de pressão na vena contracta deve ser suficiente para se atingir pressões inferiores à de vapor do fluido;
- Recuperação de pressão deve ser efetuada até um certo nível acima da pressão de vapor do líquido;
- Líquido deve conter certos gases ou impurezas na sua constituição, de forma a impulsionar a formação de bolhas de vapor.

“Flashing”

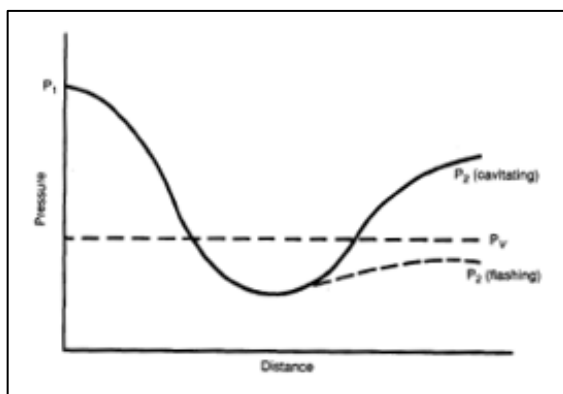


Figura 23-Pressão no fenómeno de "flashing"
(Skousen 1997)

O fenómeno “Flashing” ocorre também pela vaporização do líquido por efeito da queda de pressão, contudo distingue-se da cavitação pelo facto do aumento de pressão a que é sujeito não ser suficiente para o fluido passar novamente ao estado líquido. Desta forma, após se dar a passagem do estado líquido para o gasoso, o fluido permanece neste estado. O “Flashing” pode provocar vibrações da válvula e ruído excessivo, embora as consequências que deste processo advêm não sejam tão pejorativas como as da cavitação.

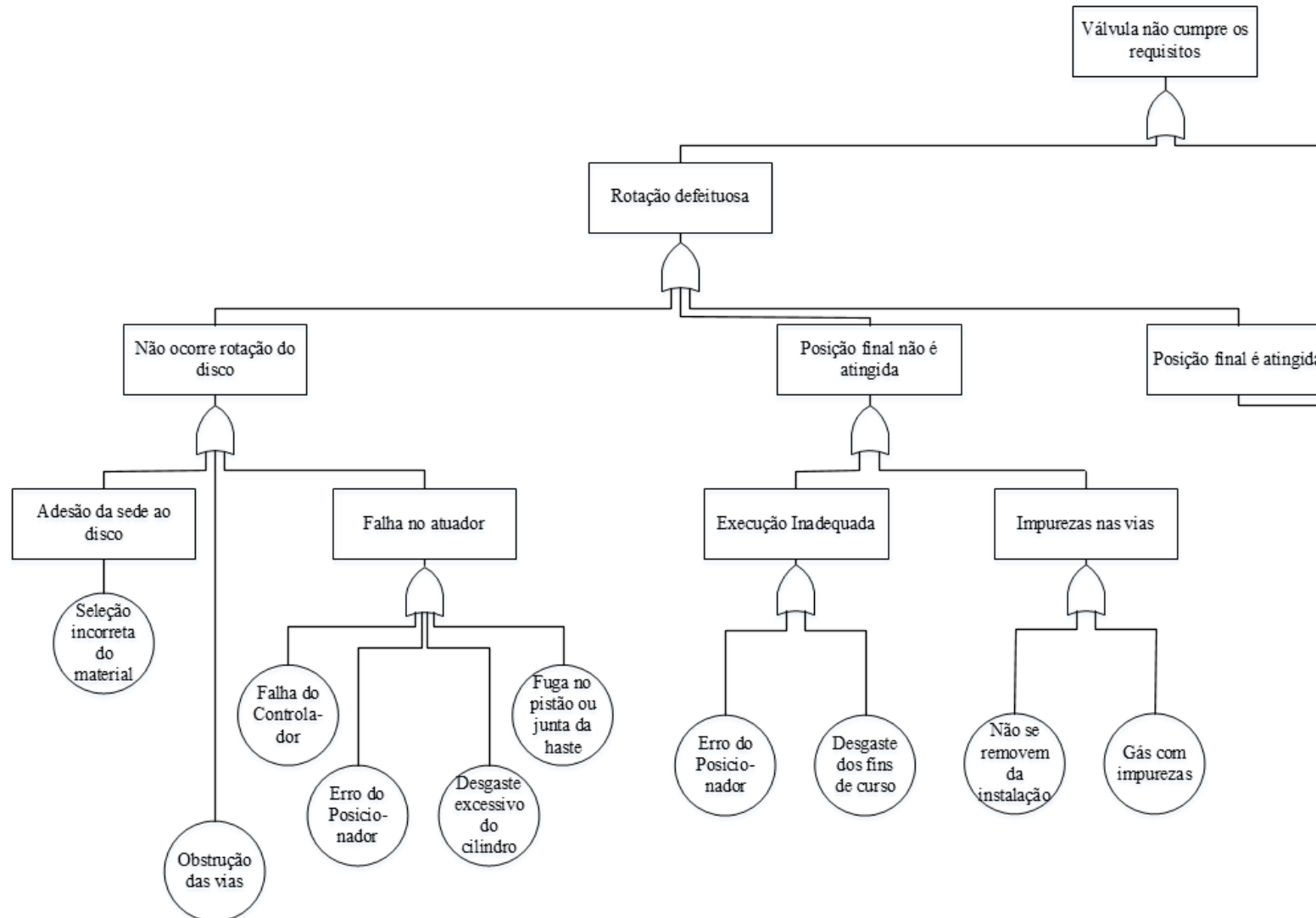
Velocidades elevadas

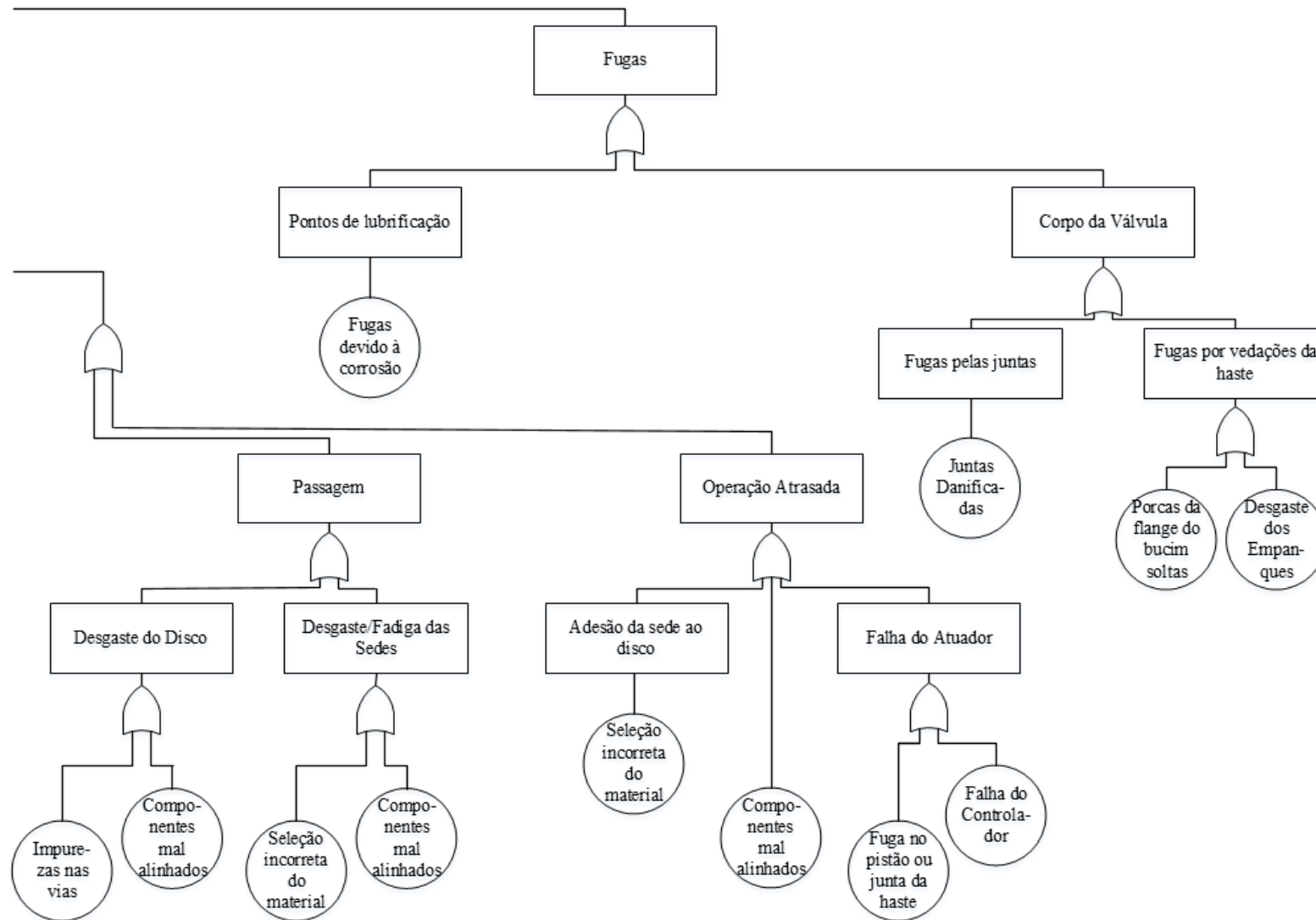
De um modo geral, as grandes quedas de pressão que ocorrem nas válvulas originam velocidades elevadas. Esses valores de velocidade quando são atingidos por um líquido criam turbulência e vibração no equipamento. Por outro lado, caso o fluido se trate de um gás, estes valores desencadeiam intensos ruídos. Para além disso, o aumento de velocidade propicia o desgaste, uma vez que o embate do fluido nas paredes e outros componentes da válvula é mais agressivo e por isso, provoca uma deterioração superior.

Tal como foi anteriormente explicitado, os valores máximos de velocidade na válvula são atingidos justamente na vena contracta, estando os componentes desta área, nomeadamente as sedes, sujeitos a um maior desgaste.

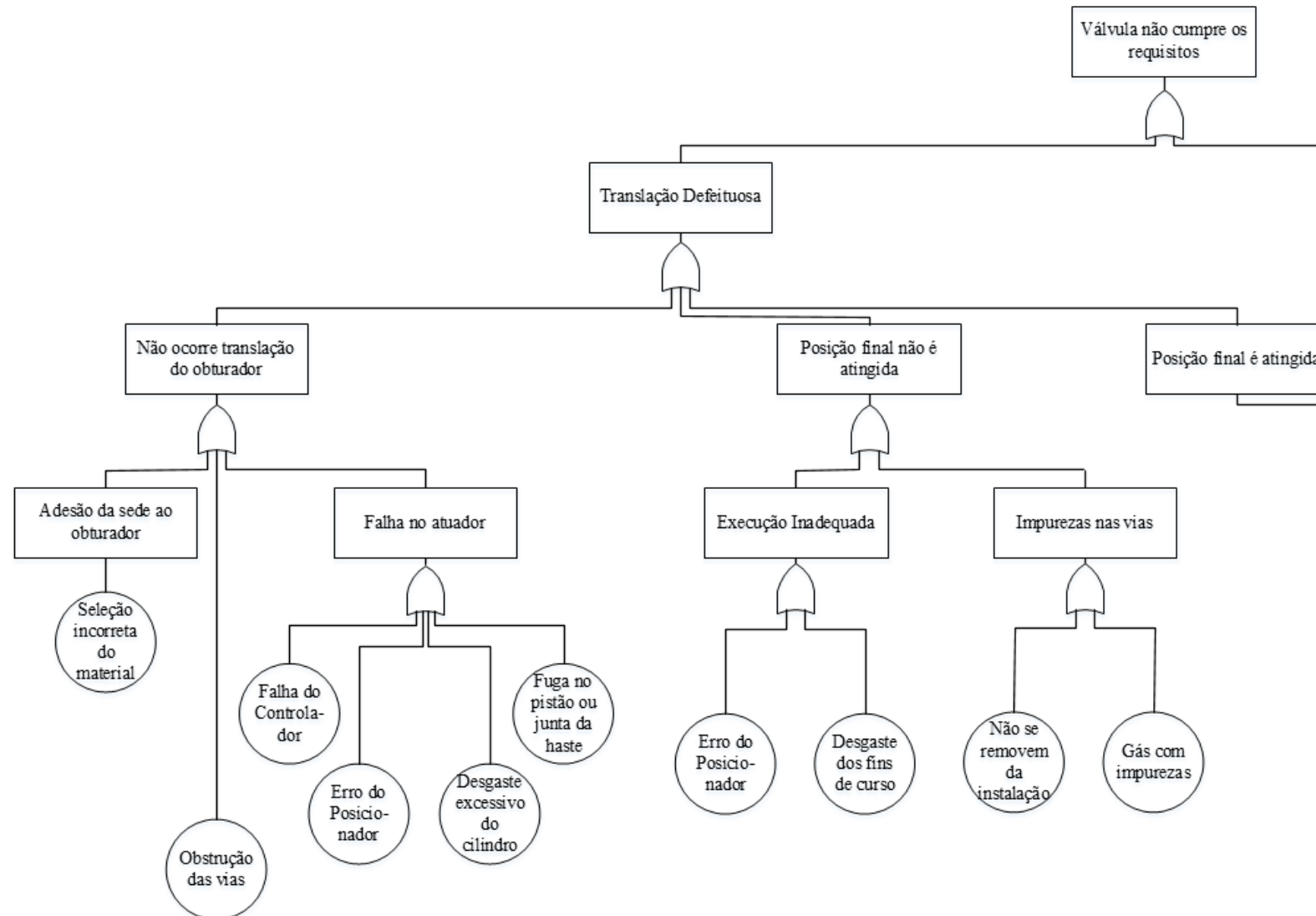
ANEXO 2 - FTA

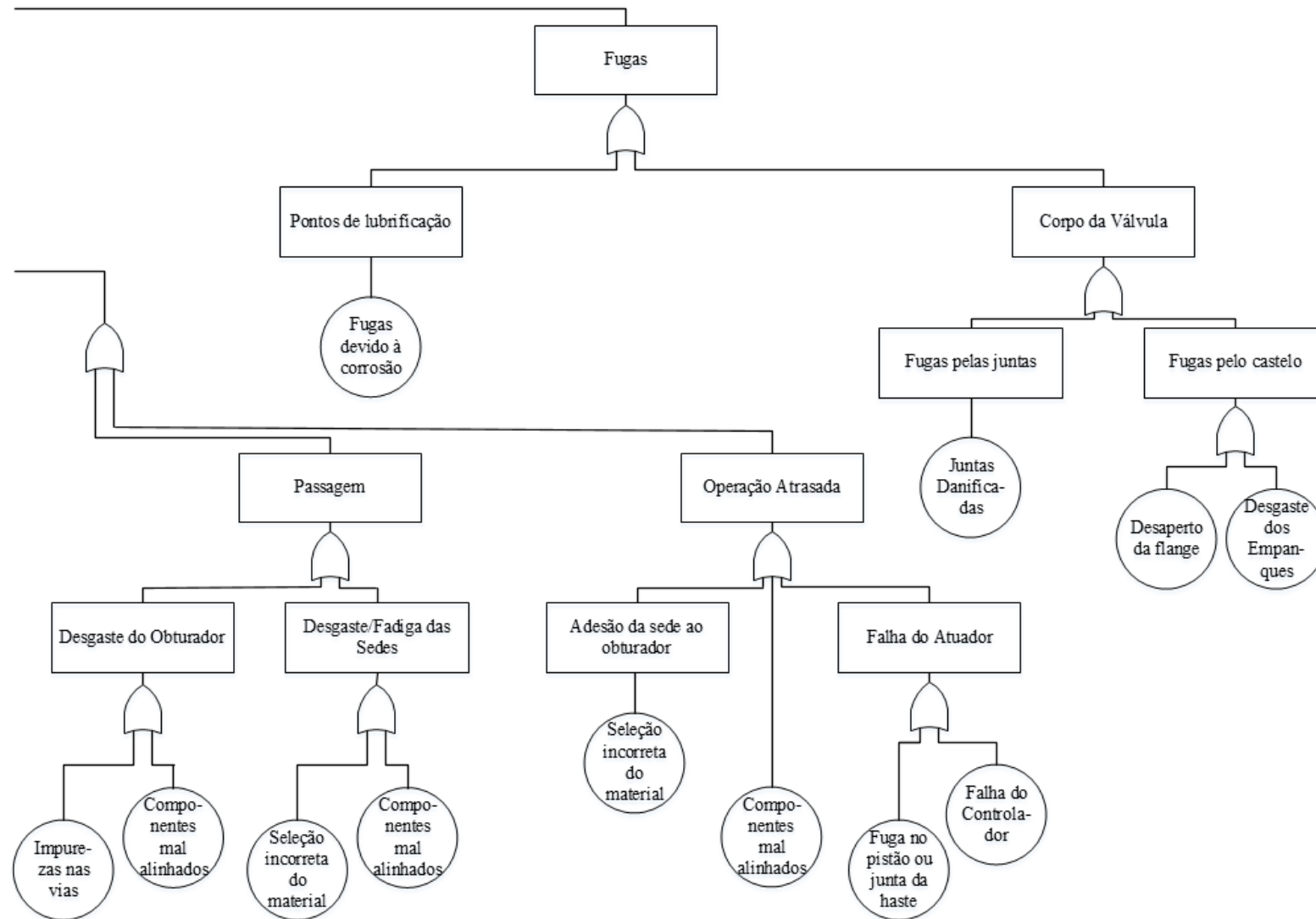
Válvula de Controlo Borboleta



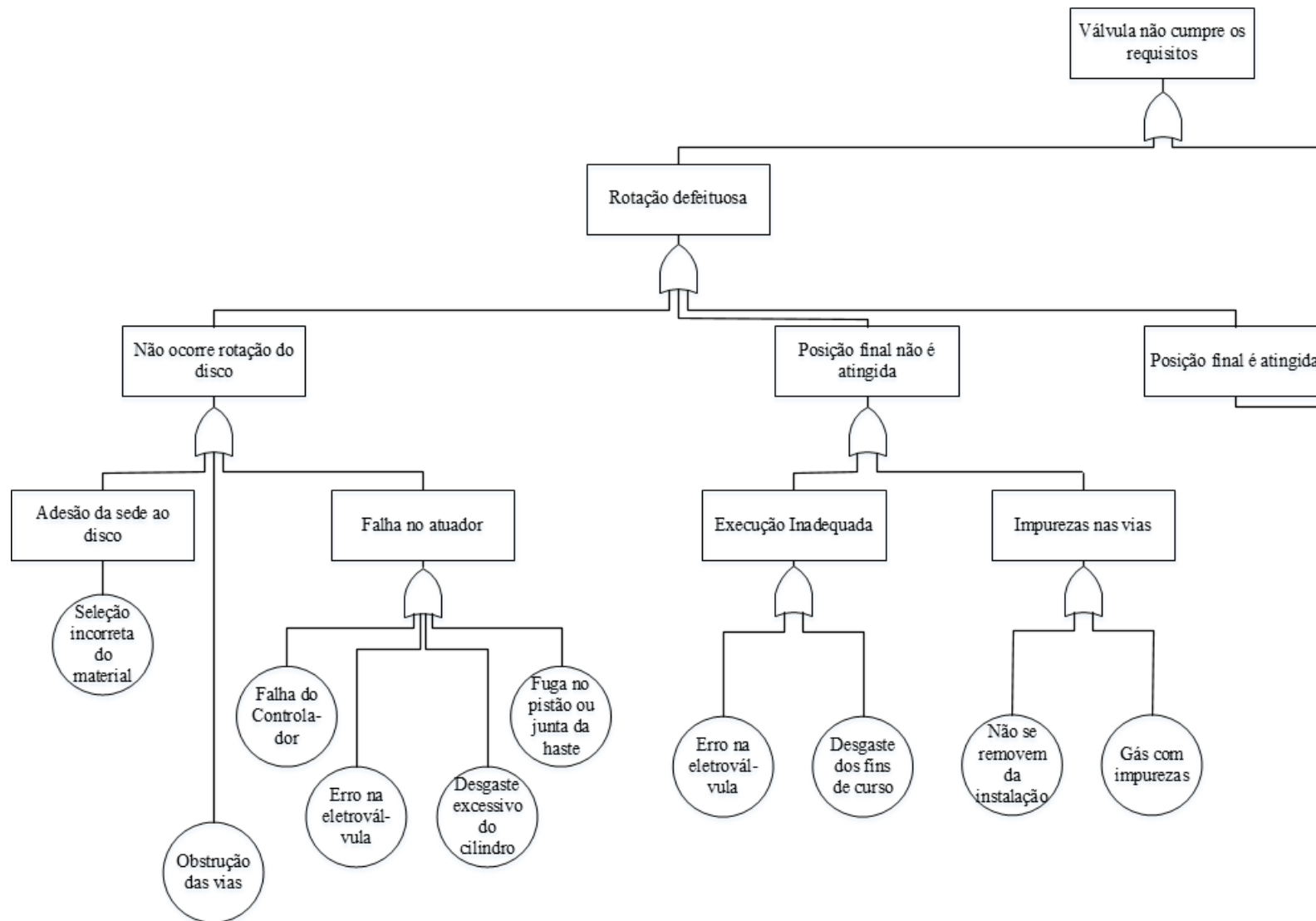


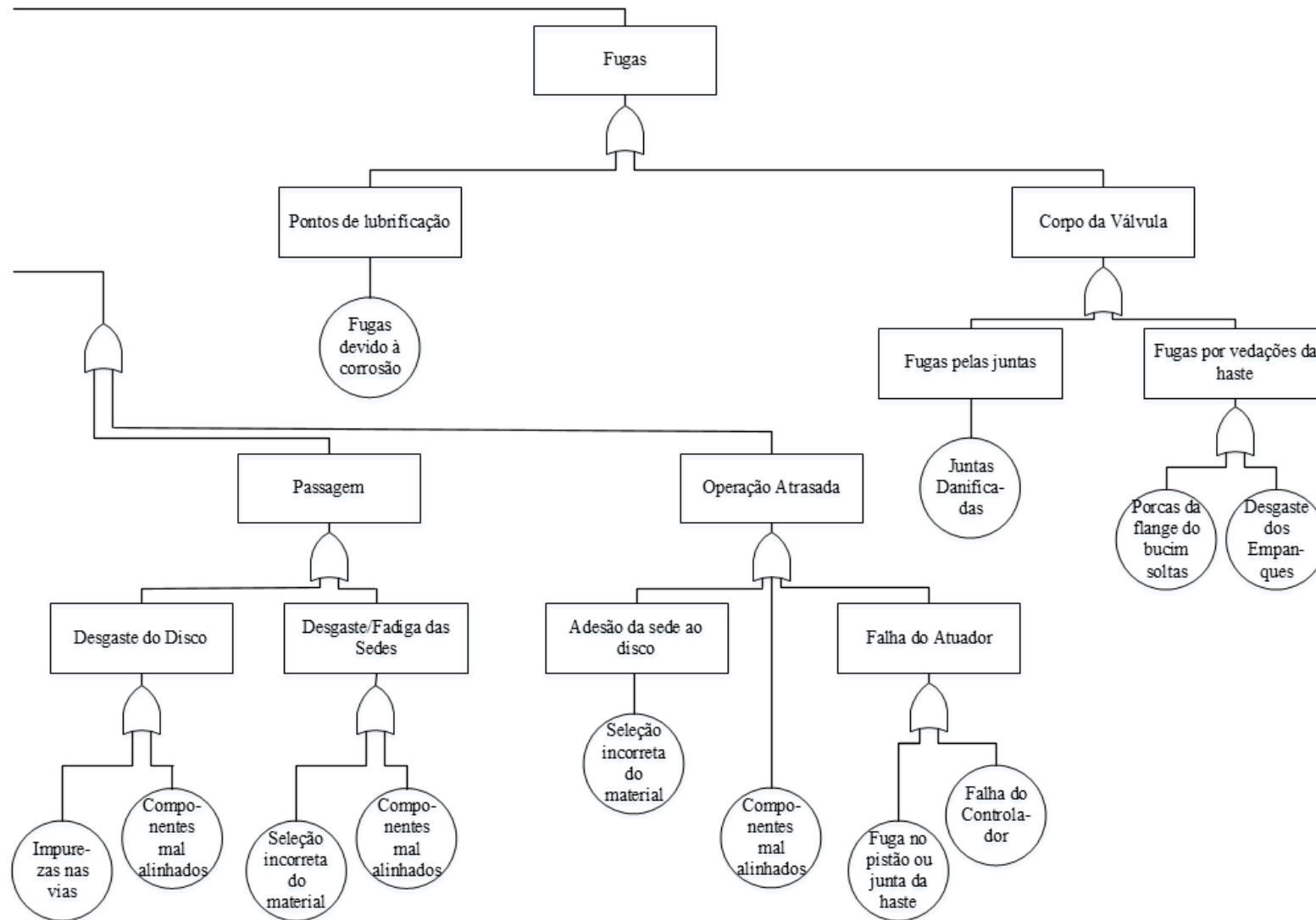
Válvula de Controlo de Globo





Válvula de Bloqueio Borboleta





ANEXO 3 - Tempos de funcionamento entre avarias

Tabela 20-Tempos de funcionamento entre avarias para a falha na rotação do disco

Alimentação e Repressurização					
XCV-1741		XCV-1751		XCV-1761	
Data	TTF (dias)	Data	TTF (dias)	Data	TTF (dias)
28/06/2000	-	28/06/2000	-	28/06/2000	-
23/10/2013	4865	26/02/2007	2434	21/07/2008	2945
26/11/2013	34			23/10/2014	2285
07/08/2015	619			22/06/2015	242

Produto (hidrogénio)					
XV-1712		XV-1722		XV-1742	
Data	TTF (dias)	Data	TTF (dias)	Data	TTF (dias)
28/06/2000	-	28/06/2000	-	28/06/2000	-
		31/10/2006	2316		
		13/11/2006	13		
		24/07/2007	253		

Tabela 21-Tempos de funcionamento entre avarias para a falha na translação do obturador

Purga enviada ou recebida					
XCV-1733		XCV-1743		XCV-1753	
Data	TTF (dias)	Data	TTF (dias)	Data	TTF (dias)
28/06/2000	-	28/06/2000	-	28/06/2000	-
08/11/2013	4881				
11/08/2016	1007				

Tabela 22-Tempos de funcionamento entre avarias para a execução inadequada

Alimentação e Repressurização					
XCV-1741		XCV-1751		XCV-1761	
Data	TTF (dias)	Data	TTF (dias)	Data	TTF (dias)
28/06/2000	-	28/06/2000	-	28/06/2000	-
30/10/2003	1219	26/08/2008	2981	06/10/2003	1195
13/02/2004	106	28/06/2012	1402	28/06/2012	3188
17/09/2008	1678	26/06/2013	363	26/06/2013	363
		20/08/2013	55	20/08/2013	55
		25/06/2015	674		
Purga enviada ou recebida					
XCV-1733		XCV-1743		XCV-1753	
Data	TTF (dias)	Data	TTF (dias)	Data	TTF (dias)
28/06/2000	-	28/06/2000	-	28/06/2000	-
		05/11/2004	1591	09/11/2004	1595
		12/02/2007	829	27/06/2011	2421
		27/06/2011	1596	20/08/2013	785
		28/06/2012	367	19/05/2014	272
		11/08/2016	1505	25/06/2015	402
				16/08/2016	418
Produto (hidrogénio)					
XV-1712		XCV-1722		XV-1742	
Data	TTF (dias)	Data	TTF (dias)	Data	TTF (dias)
28/06/2000	-	28/06/2000	-	28/06/2000	-
22/11/2002	877	26/08/2008	2981	17/12/2004	1633
13/02/2004	448				
26/08/2008	1656				
27/06/2011	1035				
28/06/2012	367				

Tabela 23-Tempos de funcionamento para a passagem na Válvula

Alimentação e Repressurização					
XCV-1741		XCV-1751		XCV-1761	
Data	TTF (dias)	Data	TTF (dias)	Data	TTF (dias)
28/06/2000	-	28/06/2000	-	28/06/2000	-
18/12/2007	2729	11/10/2004	1566	26/08/2013	4807
19/11/2012	1798	26/07/2006	653		
11/09/2013	296	31/07/2008	736		
		07/03/2011	949		
		04/04/2011	28		

Purga enviada ou recebida					
XCV-1733		XCV-1743		XCV-1753	
Data	TTF (dias)	Data	TTF (dias)	Data	TTF (dias)
28/06/2000	-	28/06/2000	-	28/06/2000	-
11/08/2006	2235	11/09/2013	4823	21/01/2005	1668
				11/08/2006	567
				09/10/2013	2616

Produto (hidrogénio)					
XV-1712		XCV-1722		XV-1742	
Data	TTF (dias)	Data	TTF (dias)	Data	TTF (dias)
28/06/2000	-	28/06/2000	-	28/06/2000	-
				11/09/2013	4823

ANEXO 4 - Teste de Laplace e Análise de Weibull

Tabela 24-Z de teste e respetivos limites para as válvulas de alimentação e repressurização

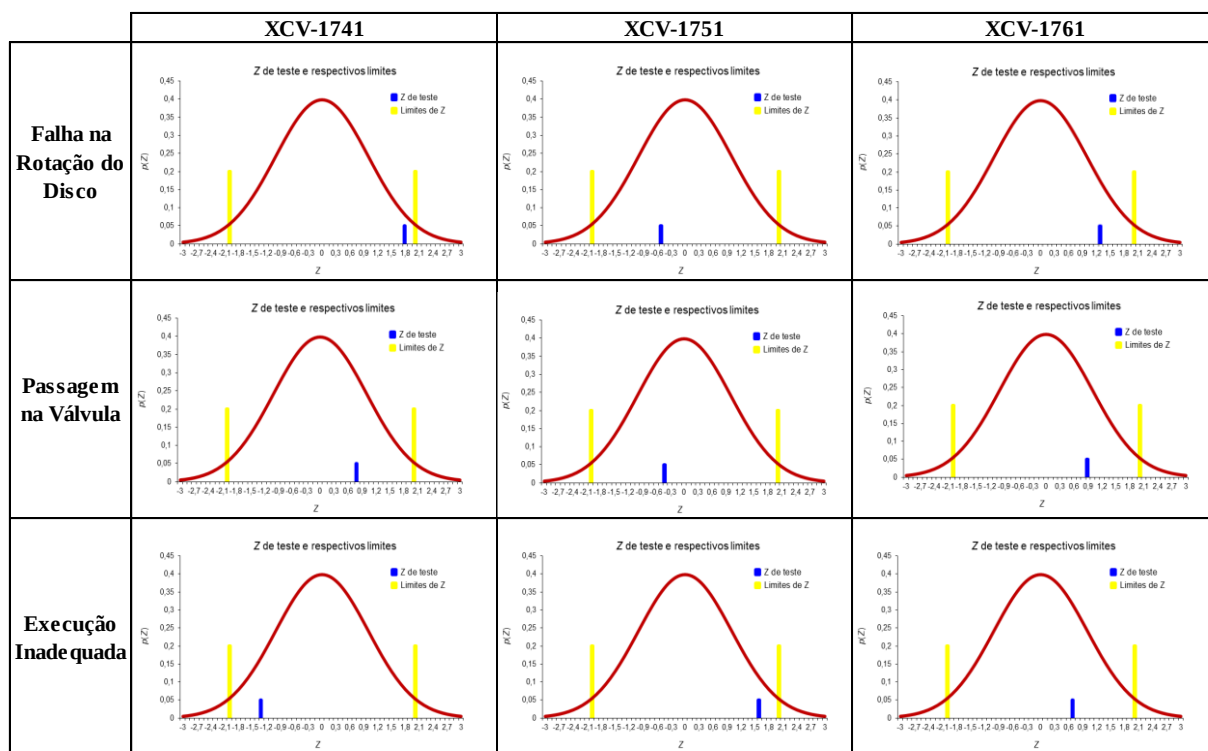


Tabela 25-Z de teste e respetivos limites para as válvulas de envio ou receção de purga

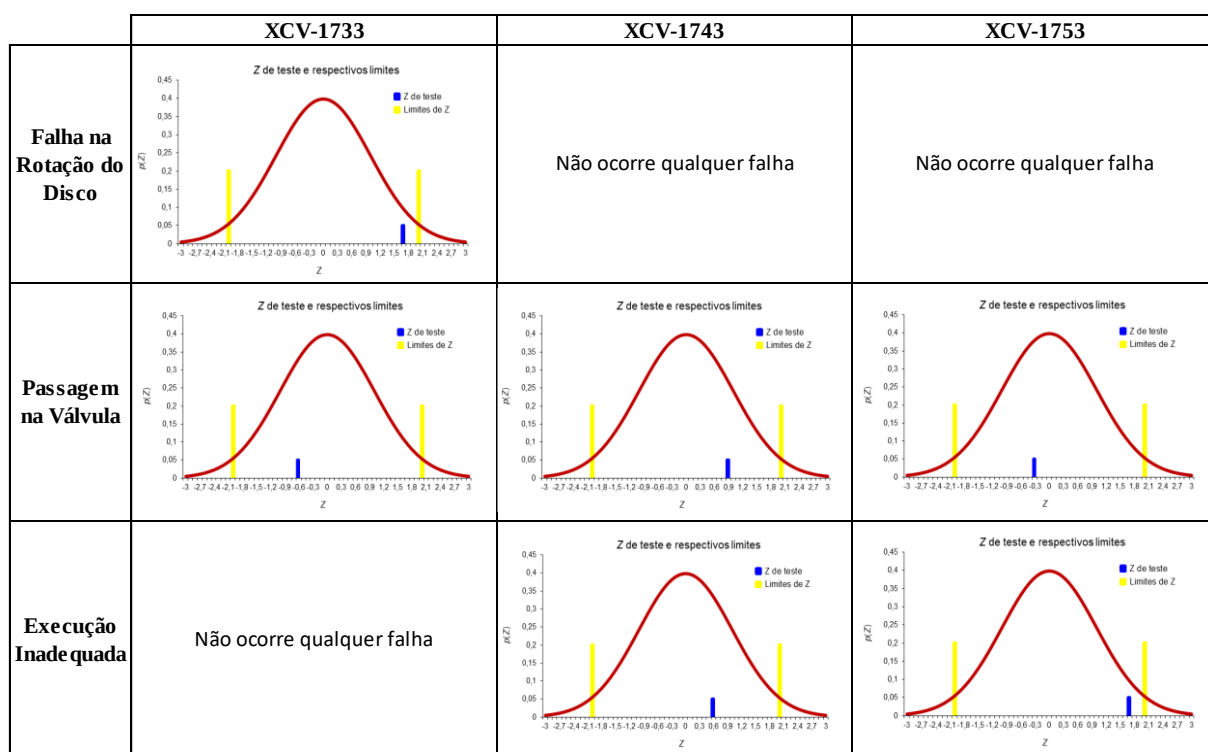
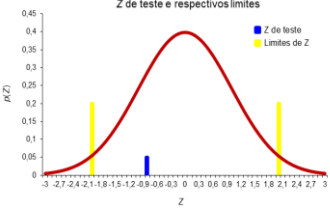
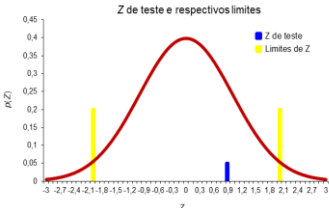
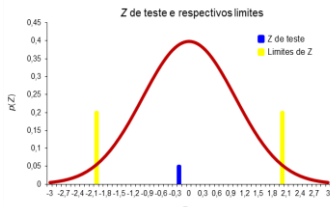


Tabela 26- Z de teste e respetivos limites para as válvulas responsáveis pelo produto

	XV-1712	XV-1722	XV-1742
Falha na Rotação do Disco	Não ocorre qualquer falha		Não ocorre qualquer falha
Passagem na Válvula	Não ocorre qualquer falha	Não ocorre qualquer falha	
Execução Inadequada			

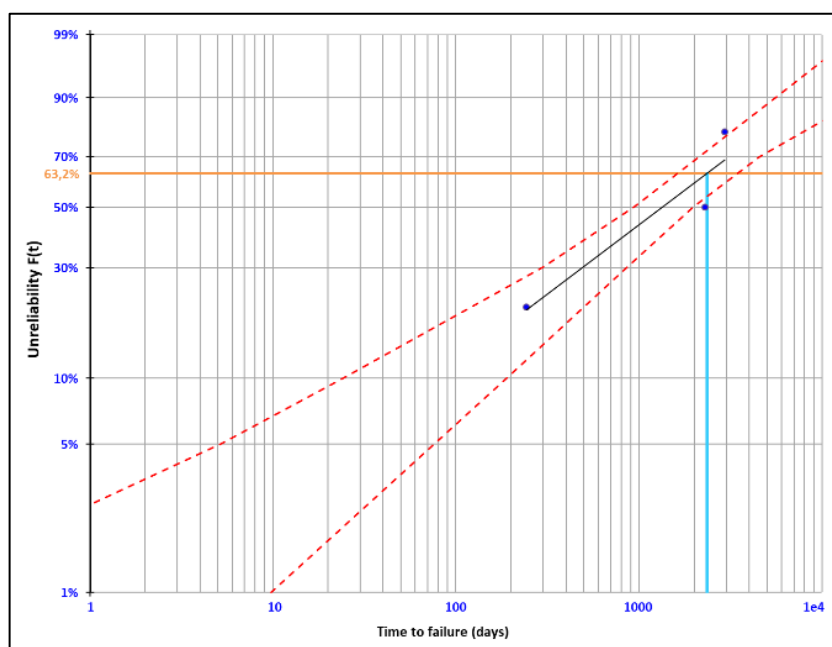
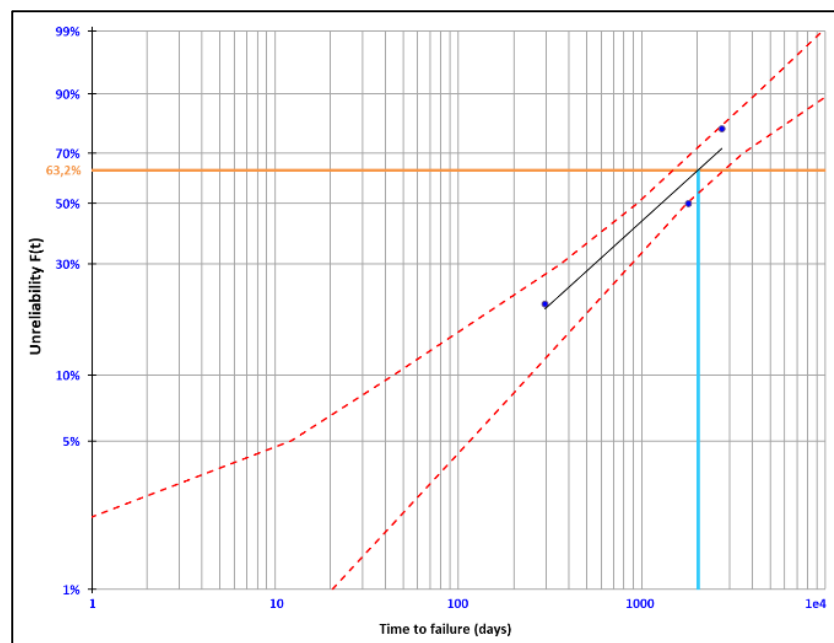
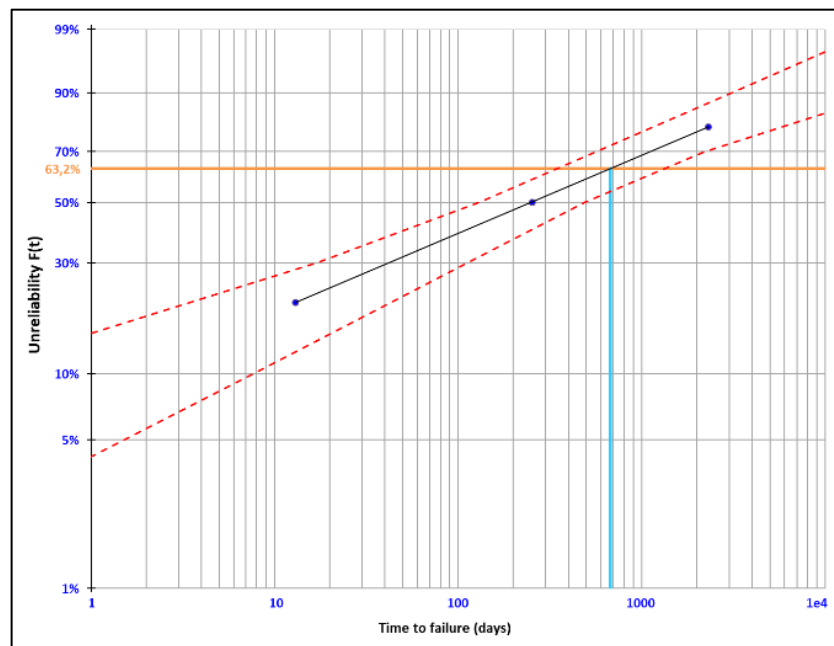


Gráfico 35- Representação de Weibull para a válvula XCV-1761- “Falha na Rotação do Disco”



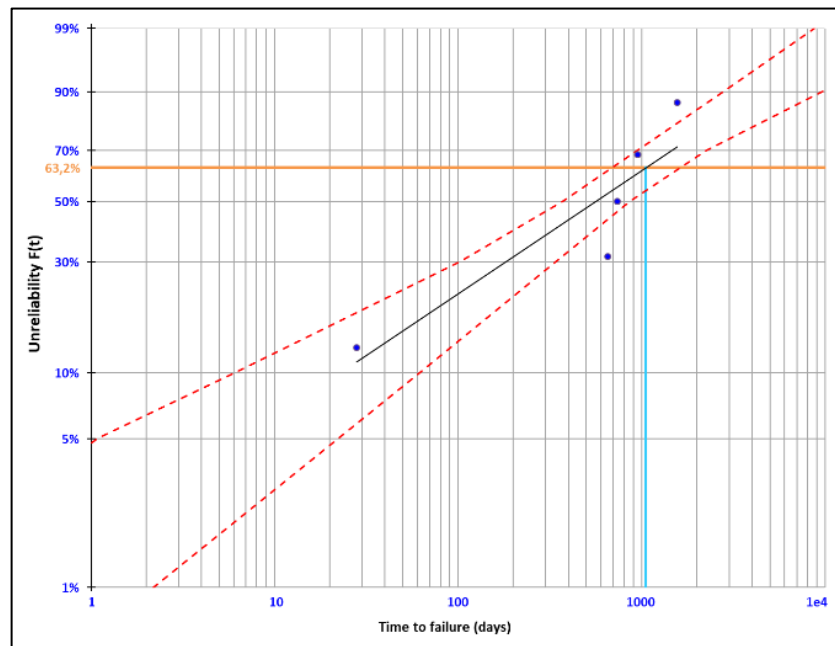


Gráfico 38-Representação de Weibull para a válvula XCV-1751- “Passagem na Válvula”

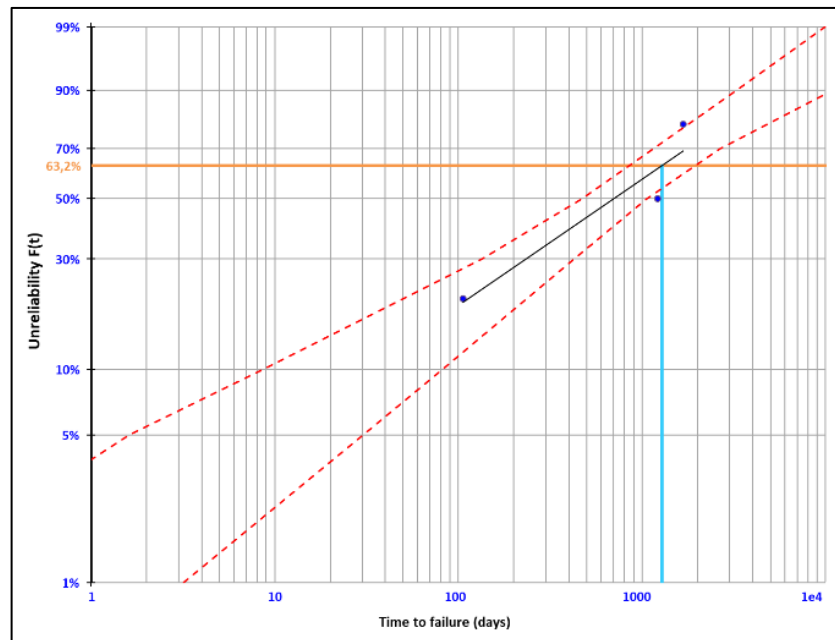


Gráfico 39-Representação de Weibull para a válvula XCV-1741- “Execução Inadequada”

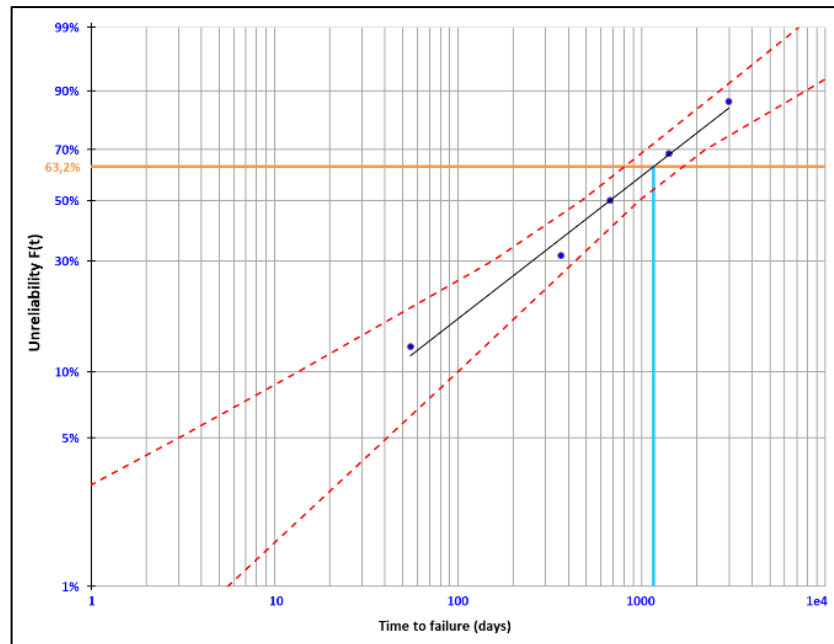


Gráfico 40- Representação de Weibull para a válvula XCV-1751- “Execução Inadequada”

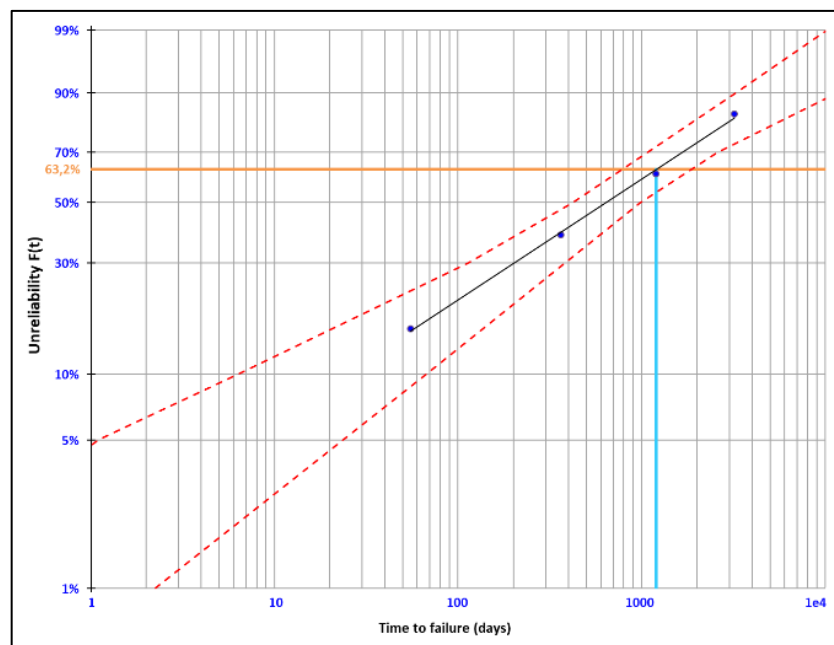


Gráfico 41- Representação de Weibull para a válvula XCV-1761- “Execução Inadequada”

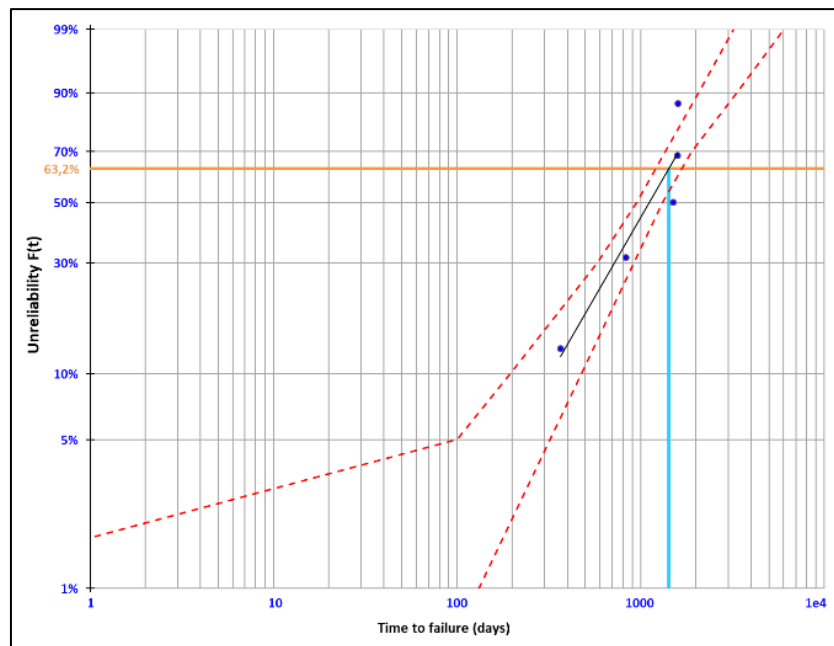


Gráfico 42- Representação de Weibull para a válvula XCV-1743- “Execução Inadequada”

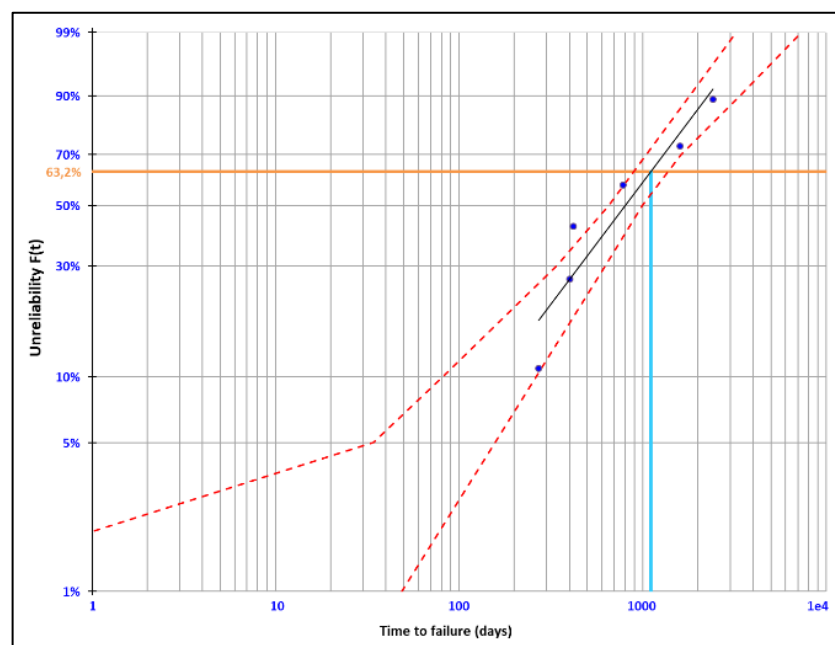


Gráfico 43- Representação de Weibull para a válvula XCV-1753- “Execução Inadequada”

ANEXO 5 - Teste de Laplace e método de CROW-AMSAA

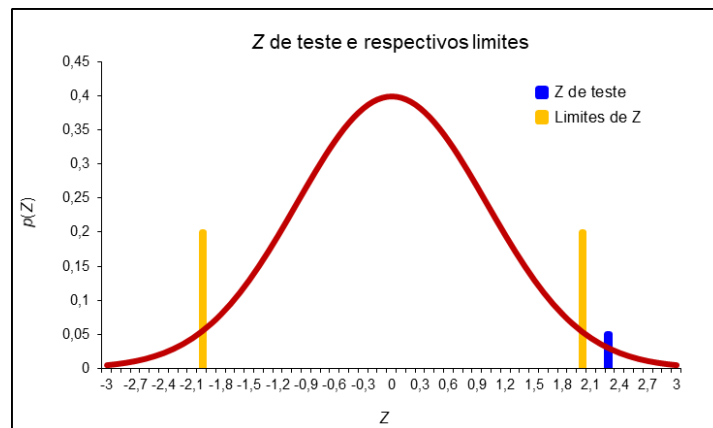


Gráfico 44-Z de teste e respetivos limites para as válvulas de controlo borboleta

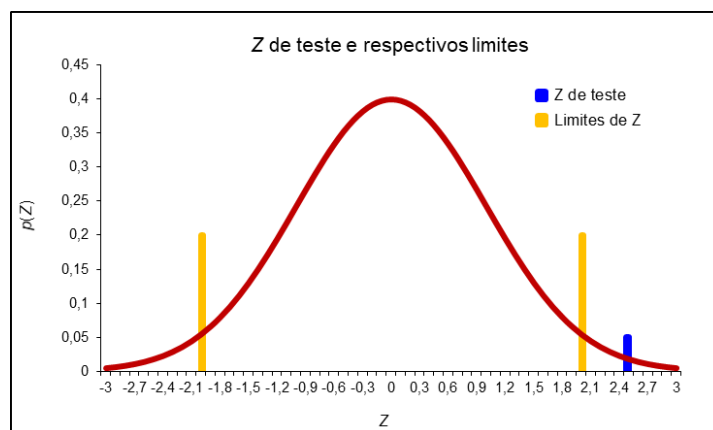


Gráfico 45-Z de teste e respetivos limites para as válvulas de controlo globo

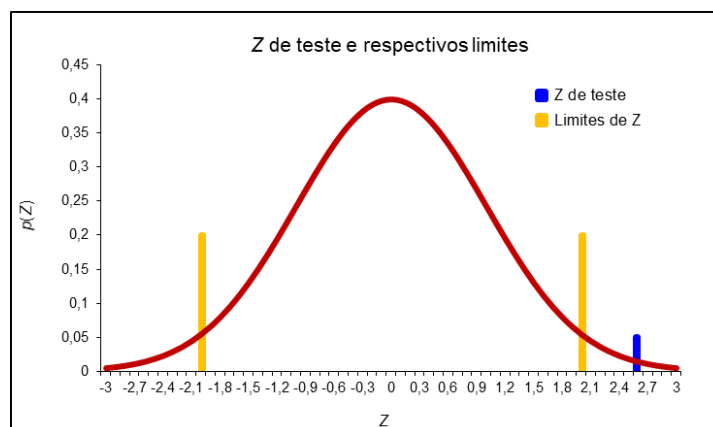


Gráfico 46- Z de teste e respetivos limites para as válvulas de bloqueio

Válvula de Controlo Borboleta- XCV-1751

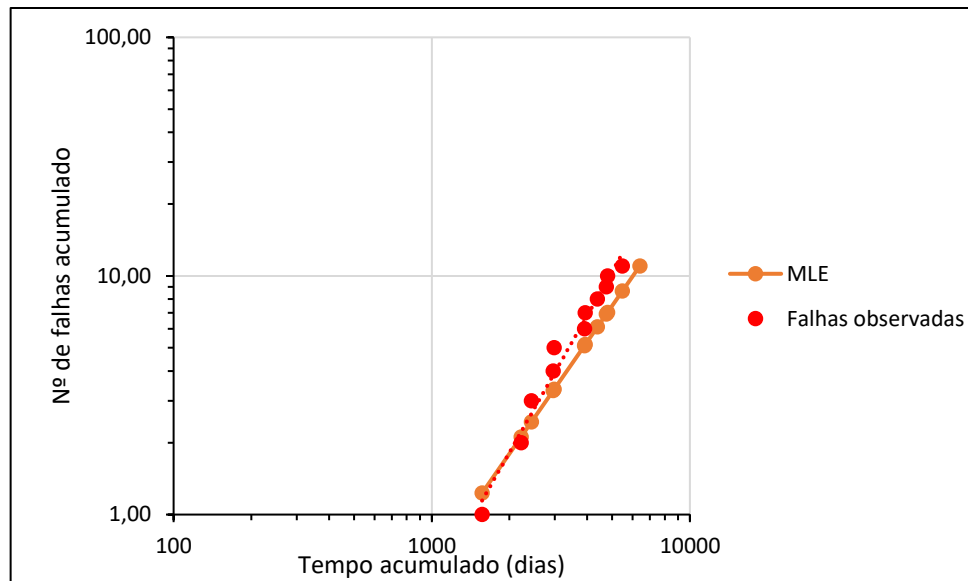


Gráfico 47-Distribuição das falhas na XCV-1751 ao longo do tempo

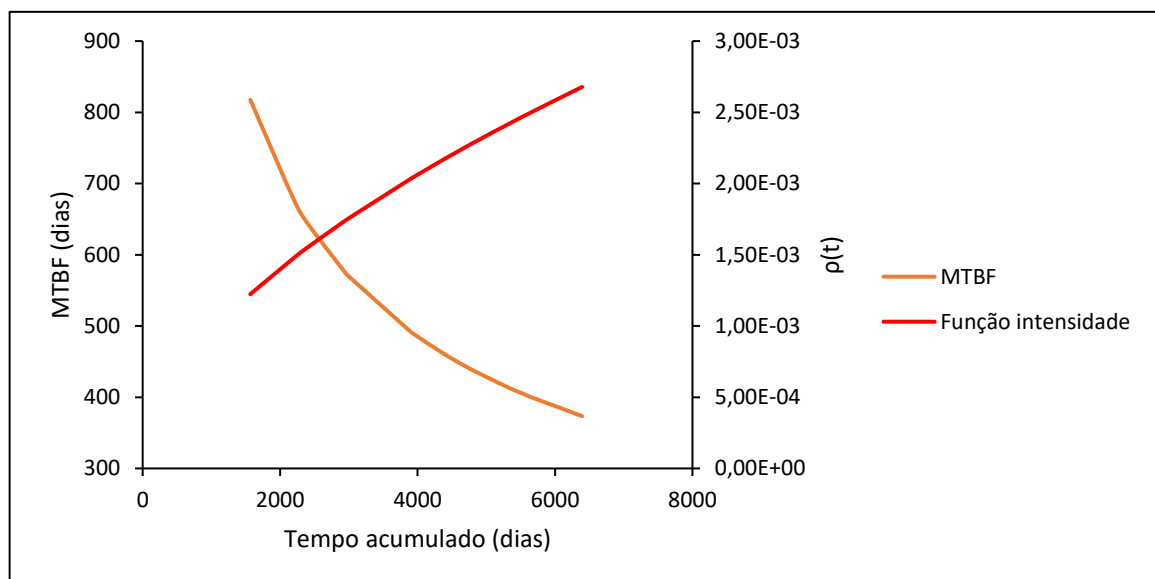


Gráfico 48-MTBF e função intensidade para a XCV-1751

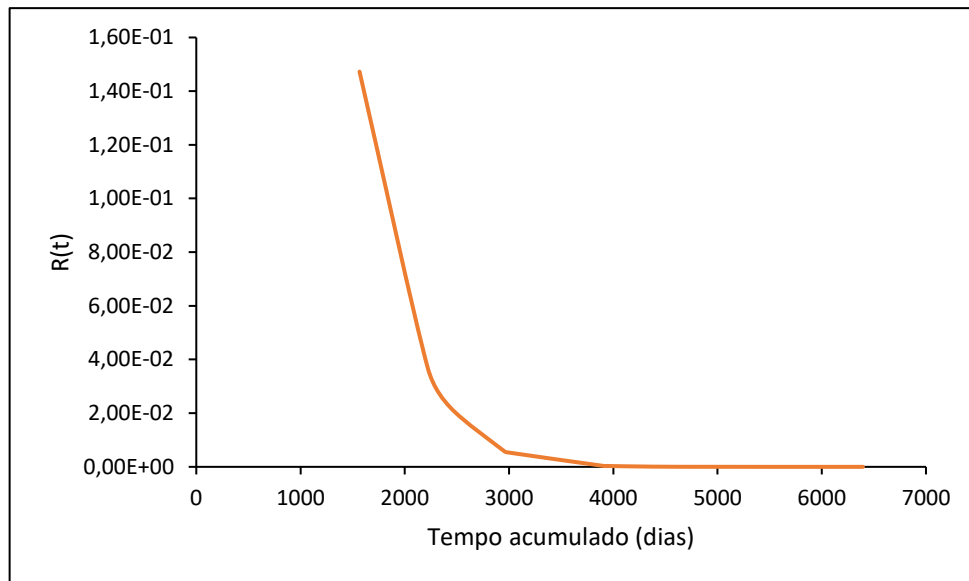


Gráfico 49-Função de fiabilidade para a XCV-1751

Válvula de Controlo Borboleta- XCV-1761

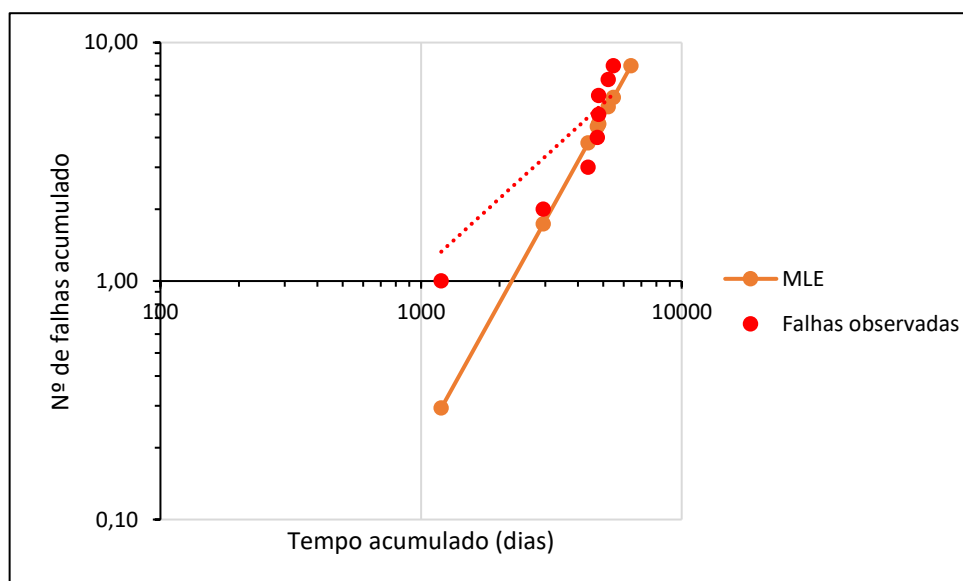


Gráfico 50-Distribuição das falhas na XCV-1761 ao longo do tempo

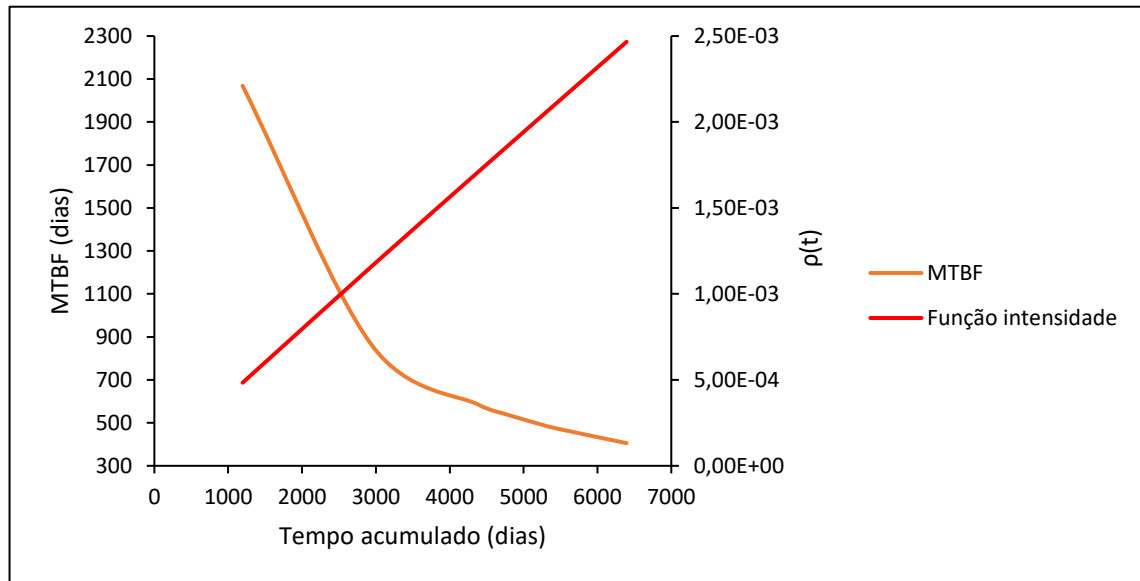


Gráfico 51-MTBF e função intensidade para a XCV-1761

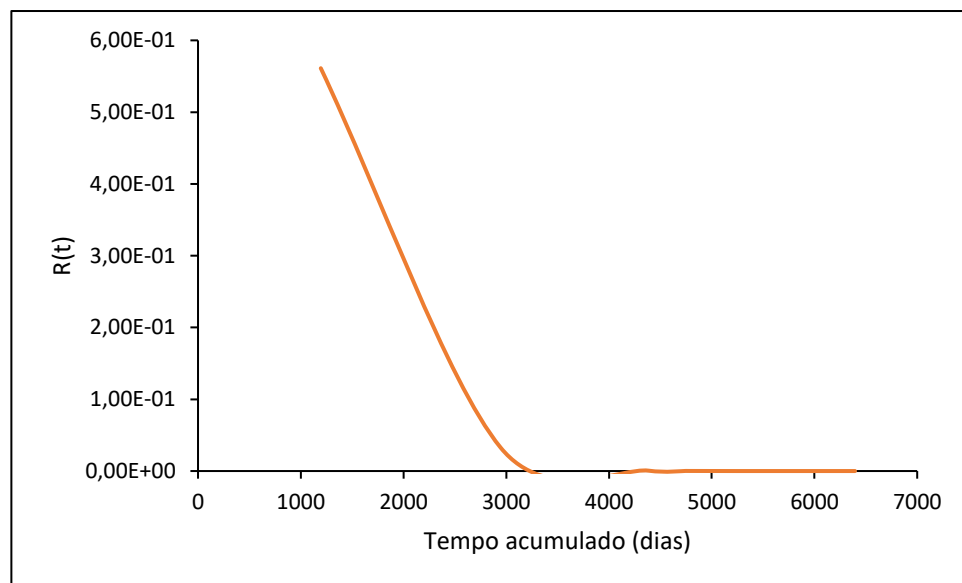


Gráfico 52- Função de fiabilidade para a XCV-1761

Válvula de Controlo Globo- XCV-1733

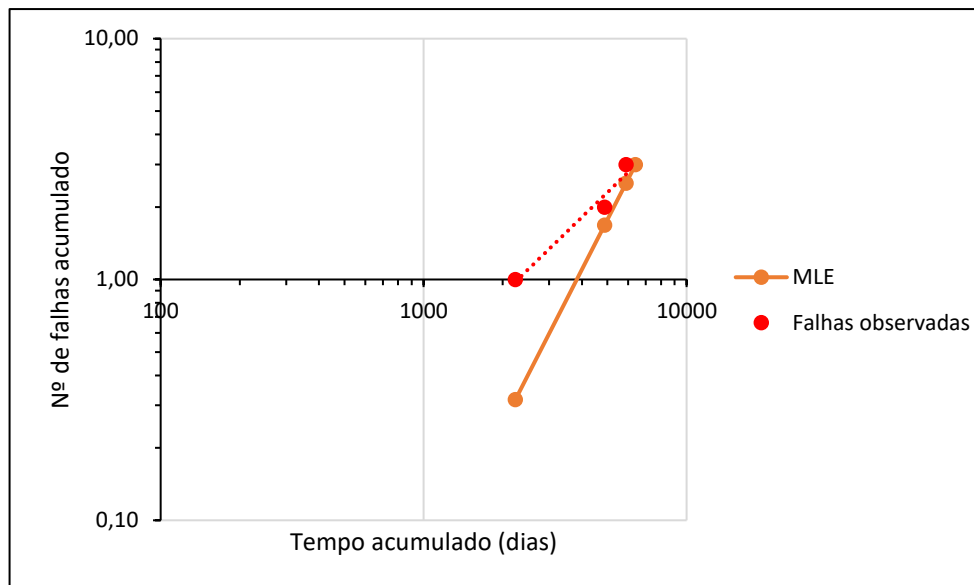


Gráfico 53- Distribuição das falhas na XCV-1733 ao longo do tempo

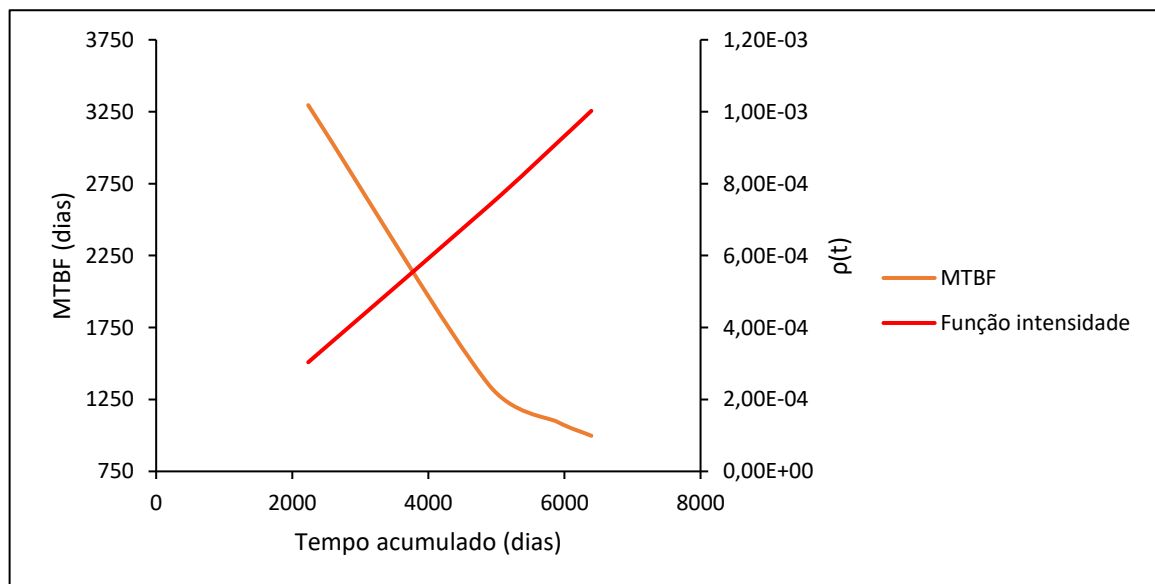


Gráfico 54- MTBF e função intensidade para a XCV-1733

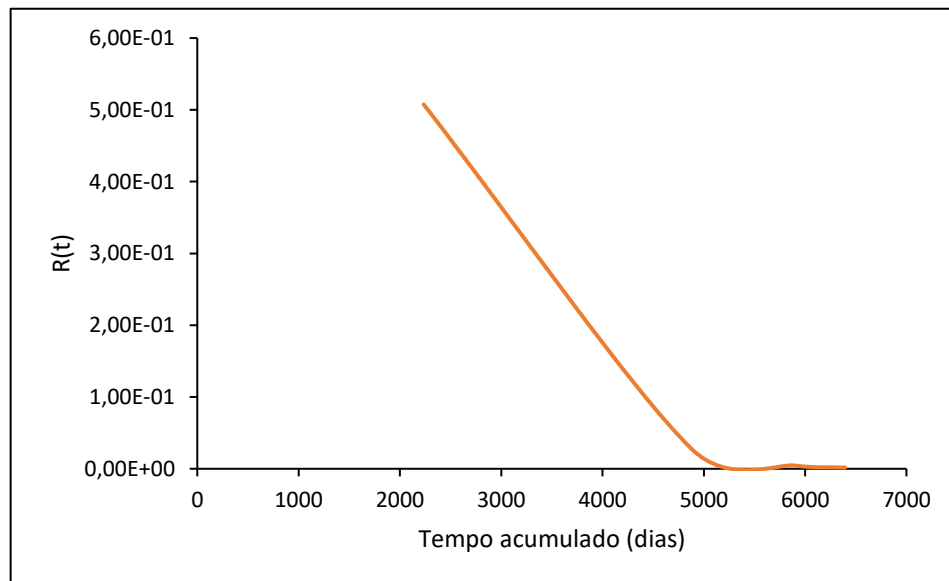


Gráfico 55-Função de fiabilidade para a XCV-1733

Válvula de Controlo Globo- XCV-1743

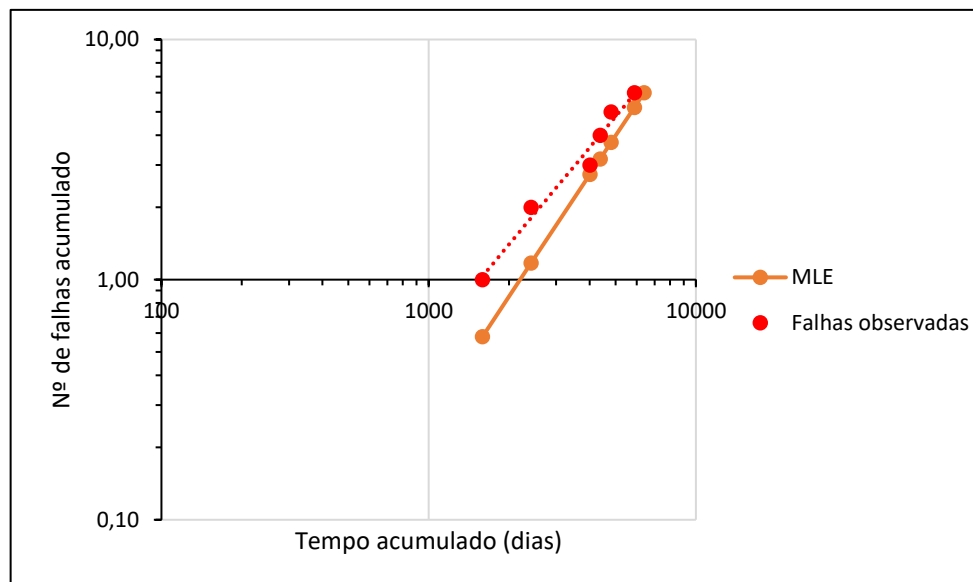


Gráfico 56-Distribuição das falhas na XCV-1743 ao longo do tempo

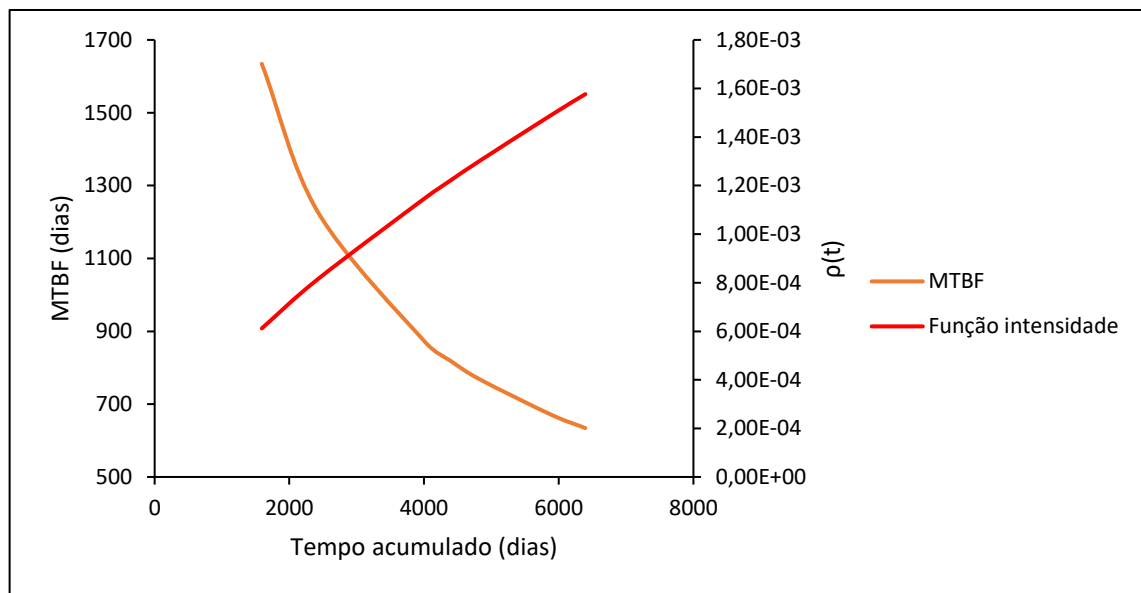


Gráfico 57-MTBF e função intensidade para a XCV-1743

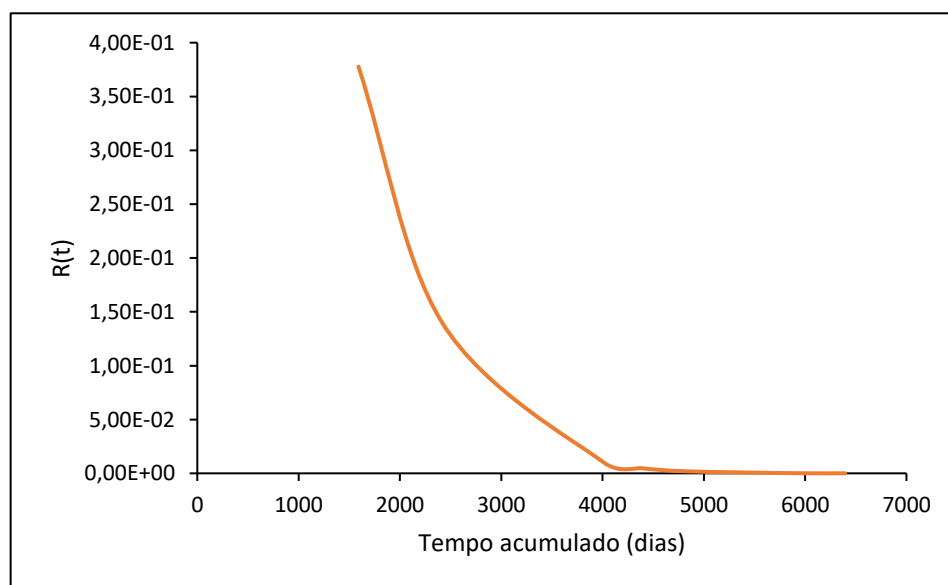


Gráfico 58-Função de fiabilidade para a XCV-1743

Válvula de Bloqueio- XV-1722

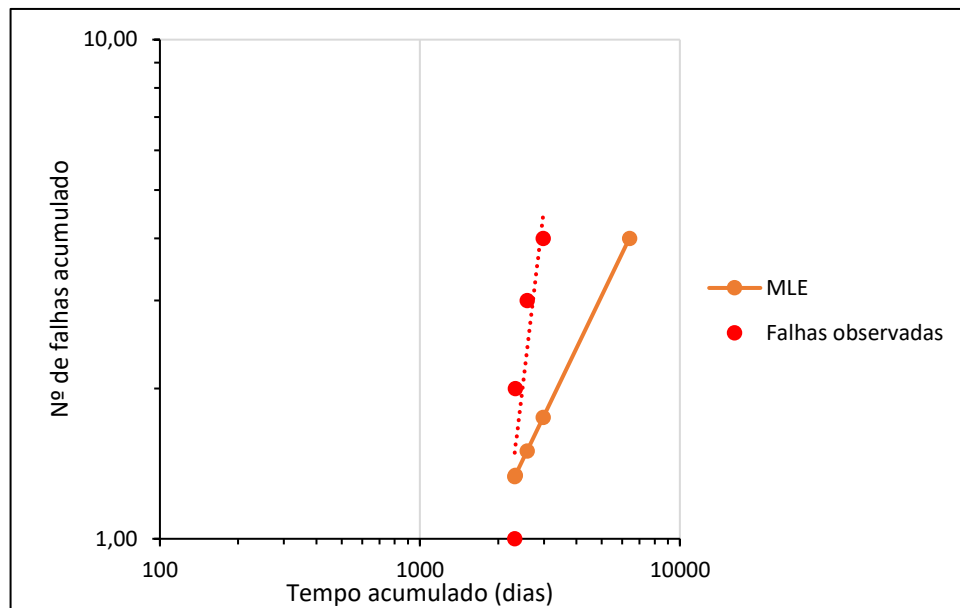


Gráfico 59-Distribuição das falhas na XV-1722 ao longo do tempo

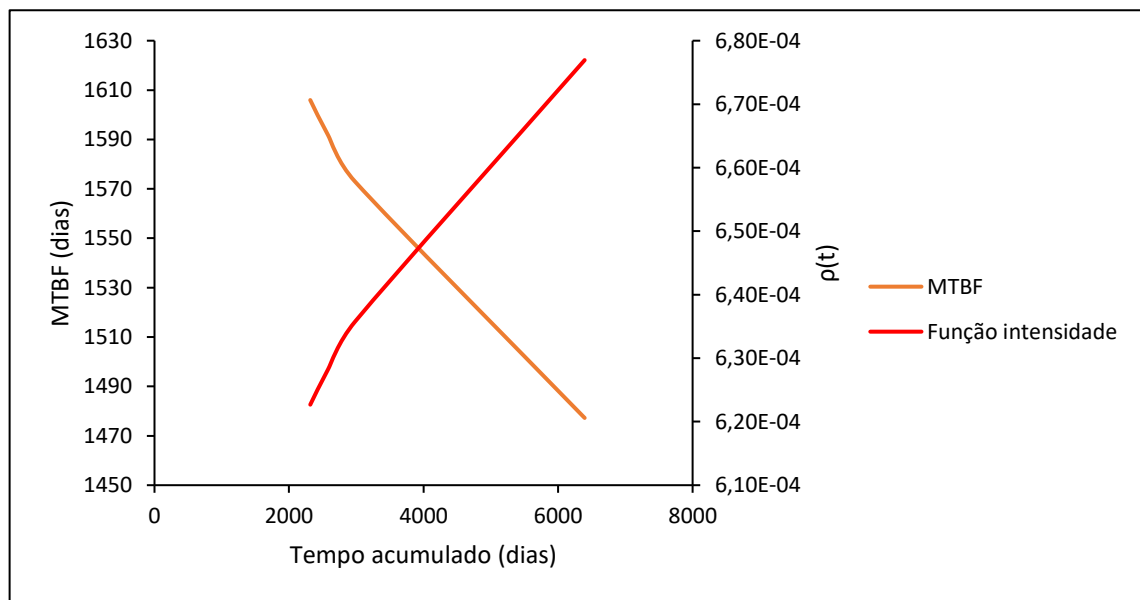


Gráfico 60-MTBF e função intensidade para a XV-1722

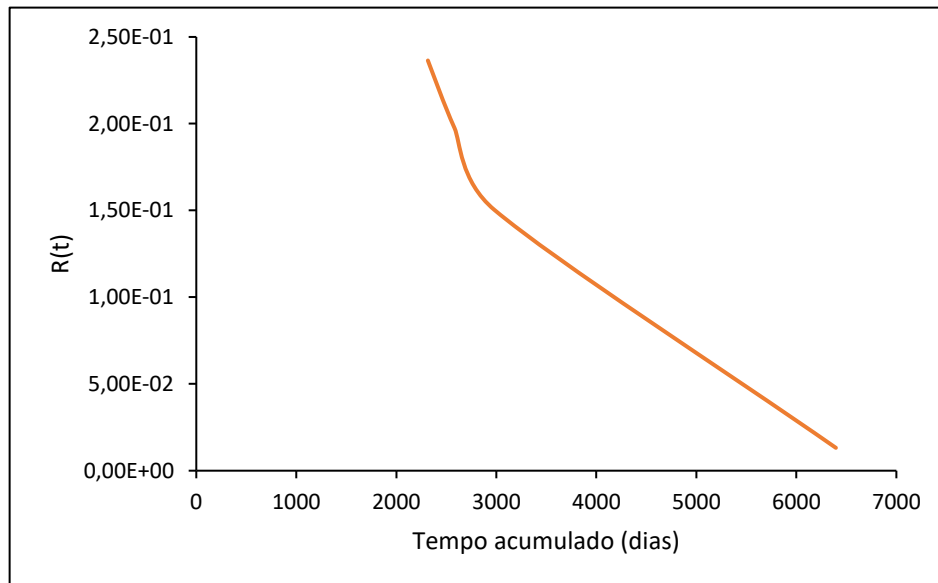


Gráfico 61-Função de fiabilidade para a XV-1722

Válvula de Bloqueio- XV-1742

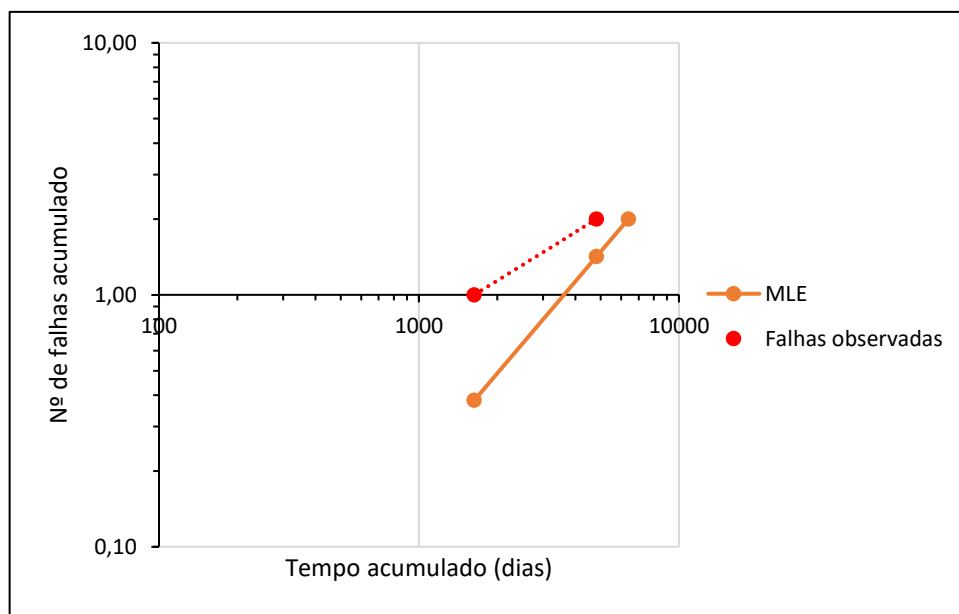


Gráfico 62-Distribuição das falhas na XV-1742 ao longo do tempo

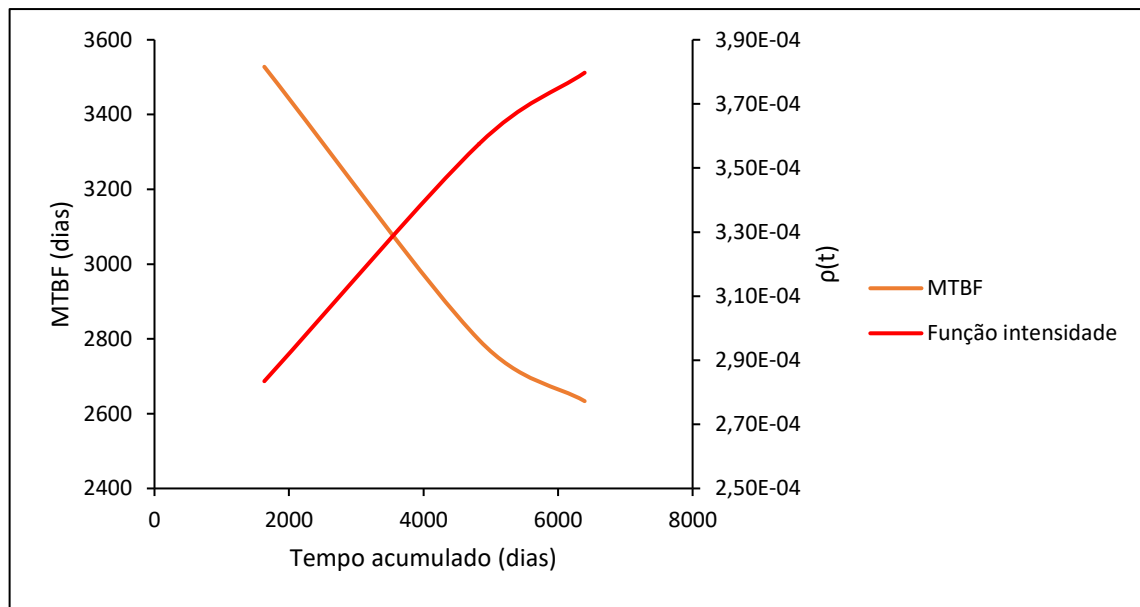


Gráfico 63-MTBF e função intensidade para a XV-1742

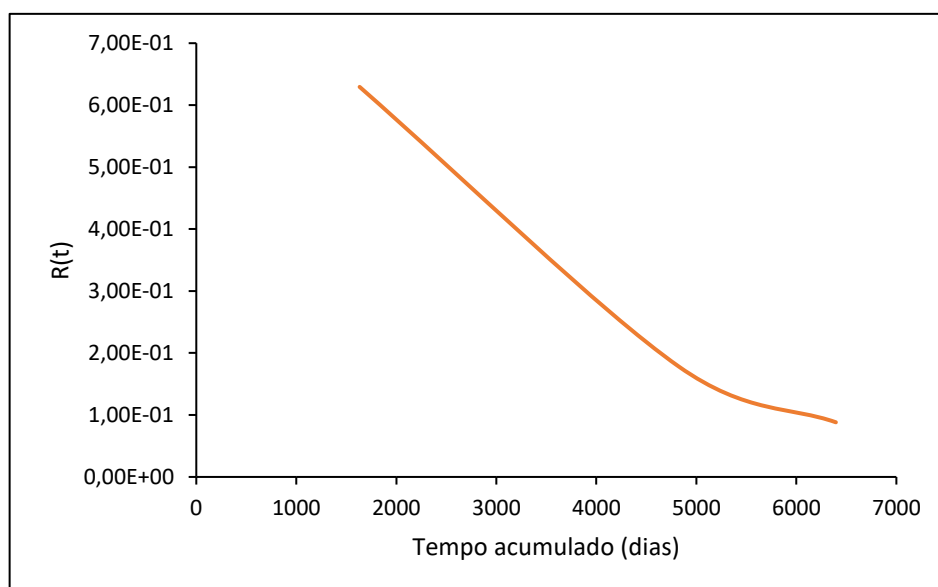


Gráfico 64- Função de fiabilidade para a XV-1742