

Universidade do Porto

Faculdade de Engenharia

FEUP

Aplicação do conceito: *Risk-Based Inspection* (RBI) em equipamentos dinâmicos

António José de Andrade Gomes Correia

Dissertação submetida para a obtenção do grau de mestre em:
Engenharia Mecânica – Ramo Projecto de Máquinas

Dissertação realizada sob a orientação:

Professor Doutor Luis Andrade Ferreira, do Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial da Universidade do Porto

Engenheiro Mestre António Paulo Vasconcelos, responsável pela área da Inspecção da Refinaria do Porto da Petrogal

Porto, Fevereiro 2008

Resumo

A manutenção é uma das funções mais importantes de uma empresa. Através dela é possível manter ou restabelecer um sistema produtivo, num estado ou em condições próprias de segurança e de funcionamento, para que este realize a função que lhe é requerida com o nível de performance desejado e com um custo de ciclo de vida previsível. Quando bem organizada e programada, é um factor fundamental para a qualidade e segurança dos sistemas produtivos, para a redução de atrasos e para a produtividade das empresas. Para isso, é necessário, cada vez mais, a mudança da implementação da Manutenção correctiva para a Manutenção preventiva. Para se conseguir esta mudança, é necessário integrar os pressupostos *Risk-Based Inspection*, ao longo de todo o ciclo de vida dos equipamentos de um sistema produtivo, de modo a estabelecer e definir as tarefas de inspecção e manutenção a implementar.

Assim, no âmbito da dissertação para obtenção do grau de mestre e dos interesses da actividade efectuda na Refinaria do Porto da Petrogal, foi desenvolvida uma metodologia de análise de equipamentos industriais baseada nos critérios definidos na metodologia RBI. Esta é composta pelas seguintes etapas: 1.Definição do sistema a analisar; 2.Informação do sistema; 3.Avaliação qualitativa do risco; 4.Ferramentas para a análise do sistema; 5.Avaliação quantitativa do risco; 6.Múltipla classificação dos componentes baseado na optimização; 7.Desenvolvimento do programa de inspecção; 8.Análise de sensibilidade. Esta metodologia permite, através da utilização de ferramentas como a análise HAZOP, FME(C)A e análise de Pareto, entre outras, identificar os subsistemas e respectivos componentes críticos dos sistemas analisados, para proceder à selecção das tarefas de inspecção e manutenção e respectivas frequências adequadas a implementar.

A metodologia desenvolvida foi então aplicada aos equipamentos dinâmicos existentes na Unidade 1200 "*Unifining*" da Fábrica de Combustíveis na Refinaria do Porto da Petrogal. Devido aos dados insuficientes verificados para realizar este estudo, utilizaram-se valores para as taxas de falha retirados de uma base de dados disponível, de forma a poder fornecer um ponto de partida numa primeira abordagem. Numa segunda etapa, espera-se reajustar os valores com os novos dados obtidos na Refinaria.

Da aplicação da metodologia, conclui-se que esta permite seleccionar, de uma forma objectiva, completa e organizada, os subsistemas e os respectivos componentes críticos, classificados como de risco "intolerável". Permite definir as tarefas de inspecção e manutenção adequadas e a respectiva frequência com que se devem realizar. E por fim, permite também dar uma estimativa do tempo onde é financeiramente mais rentável a aquisição de um novo equipamento.

Foi ainda possível concluir que os históricos de avarias da empresa são incompletos e pouco precisos, principalmente no que diz respeito aos seguintes campos: modos de falha, reparações de componentes, tempos de paragem e tempos de reparações; sendo necessário a consciencialização da empresa que, para realizar uma manutenção adequada e "rentável", carece de históricos objectivos, organizados e completos.

Para a aplicação desta metodologia aos equipamentos da Unidade 1200, recorreu-se a uma base de dados para retirar as taxas de falha dos modos de falha. Os valores obtidos são um pouco diferentes dos encontrados nos equipamentos analisados da Refinaria, o que de alguma forma se esperava, pois a base de dados é referente a equipamentos de instalações petrolíferas offshore. Por estas razões, a base de dados serve apenas em caso de inexistência de informação como ponto de partida para uma análise deste tipo, sendo depois completada e reajustada com os valores obtidos da Refinaria, como foi sugerido no trabalho anteriormente desenvolvido. Portanto, é necessário ter em conta que esta análise é uma análise subjectiva, o que poderá levar a discrepâncias em relação à realidade existente na Refinaria e no seu ambiente operativo.

Considerando os valores utilizados nesta análise o mais perto possíveis da realidade da Refinaria, se a análise desenvolvida fosse implementada "hoje", representaria um aumento nos lucros da Refinaria de 0,2% (37.000€).

Summary

Maintenance it is one of the most important functions in a company. Through it is possible to keep or re-establish a productive system in one state or in proper conditions of safety and operation, so it can perform is required function with the desired level of performance and with predictable life cycle cost. When well organized and scheduled, maintenance it is one basic factor for the quality and safety of the productive system, as well as for the reduction of delays and company's productivity. For this, we must, increasingly, change the implementation of the Corrective Maintenance for the Preventive Maintenance. To accomplish this change, it is necessary to include Risk-Based Inspection analysis in the entire productive system life cycle, and in the definition and implementation of the inspection and maintenance task.

Therefore, in the scope of the dissertation for obtaining the Master´s degree and the interests of the activity performed by the Porto Refinery of the Petrogal, an analysis methodology for industrial equipments was developed based on the criteria of the RBI methodology. This methodology has eight stages: 1.System definition; 2.Information assembly; 3.Qualitative risk assessment; 4.System analysis tools; 5.Failure data analysis; 6.Multiple component ranking based upon optimization; 7.Inspection program development; 8.Sensitivity analysis. This methodology allows us, using tools like HAZOP analysis, FME(C)A and Pareto analysis, among others, to identify the critical subsystems and the critical components of the analyzed system and to proceed to the selection of the inspection and maintenance task to use, as well as the frequency that they should have.

The developed methodology has been applied on the dynamic equipment available in Unit 1200 "Unifining" of Fuel Plant, in Porto Refinery of the Petrogal. Because of the insufficient data available to perform this study, failure rates values collected from databases were used, providing a starting point for a first approach. Then, it is expected to readjust the Refinery data with the new values.

From the application of this methodology results that implementation allows an objective, complete and organized selection of the critical subsystems and components of one system. It allows the adequate inspection and maintenance tasks and frequency to be carried out. It also gives an estimative on when to buy new equipment.

It was also possible to conclude that the company failure records are incomplete and ambiguous, especially in the following fields: failure modes; components repair, stop time, repair time. So it is extremely necessary that the company take conscience that in order to make the adequate and profitable maintenance it is necessary to have precise, organized and complete failure records.

For the application of this methodology to the equipment of Unit 1200 "Unifining" we used a database to collected the failure rates of failure modes. The values were different from the ones using the failure rates values calculated from the Refinery failures records. This was in some way, predictable, because the database is relative to equipment for offshore installations. For these reasons, the database should only be used as a starting point for an analysis of this type, and then be completed and readjusted with the values obtained from the Refinery, as it was suggested earlier. So it is necessary to understand that this analysis will always be subjective in relation to the real situation of the Refinery and its operating environment.

Considering the data used in this analysis as close as possible to the reality of the Refinery if the analysis developed was implemented "today" it would represent an increase in the profits of the Refinery of 0,2% (37.000€).

Agradecimentos

Por todo o apoio e ajuda para a realização deste trabalho gostaria de agradecer às seguintes pessoas:

- ao Professor Luis Andrade Ferreira por toda orientação, ajuda, disponibilidade e fornecimento de informação para a realização deste trabalho, bem como, todos os ensinamentos sem os quais seria impossível a realização deste estudo;
- à Refinaria do Porto da Petrogal, especialmente ao Engenheiro António Paulo Vasconcelos responsável, pela área da Inspecção, ao Engenheiro Telmo Salgado e ao Engenheiro Nuno Carvalho, da área da Inspecção pela disponibilização de informações e esclarecimento de algumas dúvidas;
- a todas as pessoas que contribuíram para a realização do Projecto Fim de Curso;
- a toda a minha família, namorada e amigos pelo apoio incondicional, paciência, dedicação, amizade, compreenção e análise crítica, que tanto contribuíram para que eu podesse realizar este trabalho.

Índice

Resumo ..... **i**
Summary ..... **iii**
Agradecimentos ..... **v**
Índice ..... **vii**
Índice de figuras ..... **xi**
Índice de tabelas ..... **xiii**
Índice de gráficos ..... **xv**
Índice de equações ..... **xvii**
Lista de abreviaturas ..... **xviii**
Lista de símbolos ..... **xx**
Glossário ..... **xxi**
1 Introdução e objectivos **1**
1.1 Objectivos 2
1.2 Desenvolvimento do trabalho 3
2 Manutenção **5**
2.1 Estratégias de manutenção 9
2.1.1 Terotecnologia 9
2.1.2 EUT (The Eindhoven University of Technology model) 11
2.1.3 TQMain (Total Quality Maintenance) 12
2.1.4 TPM (Total Productive Maintenance) 13
2.1.5 RCM (Reliability-Centered Maintenance) 15
2.1.6 RAMS (Reliability, Availability, Maintainability and Safety) 16
2.1.7 RBI (Risk-Based Inspection) 18
2.2 Tipos de manutenção 21
2.2.1 Manutenção correctiva (CM) 21
2.2.2 Manutenção preventiva (PM) 23
2.2.3 Selecção do tipo de Manutenção a utilizar 26
2.3 Componentes reparáveis e não reparáveis 27
2.4 Fiabilidade 27
2.4.1 Lei Exponencial 29
2.4.2 Lei Gamma 30

2.4.3 Lei Normal 31
2.4.4 Lei de Weibull 32
2.5 O papel e importância da Fiabilidade, Manutenção, Manutibilidade e Qualidade 33
3 Risk-Based Inspection (RBI) 36
3.1 Definição 36
3.2 Sistema RBI 36
3.2.1 *Fitness-for-service* (FFS) 37
3.3 Utilização do RBI como uma ferramenta de melhoria contínua 38
3.4 RBI como uma ferramenta de gestão integrada 38
3.5 Risco 38
3.5.1 Princípio ALARP 39
3.5.2 Princípio GAMAB 39
3.5.3 Princípio MGS 40
3.6 Flexibilidade na aplicação 40
3.7 Integridade mecânica 41
3.8 Panorâmica do desenvolvimento do programa 41
4 Metodologia da análise desenvolvida 43
4.1 Definição do sistema 43
4.1.1 Definição da fronteira do sistema 45
4.1.2 Definição do critério de sucesso 46
4.2 Informação do sistema 47
4.2.1 Listagem e recolha de dados 47
4.2.2 Dados genéricos 47
4.3 Avaliação qualitativa 48
4.3.1 Listagem dos sistemas e componentes 48
4.3.2 Estimar a probabilidade de falha (POF) 49
4.3.3 Estimar a severidade das consequências da falha (COF) 49
4.3.4 Criação da matriz criticidade qualitativa 49
4.4 Ferramentas para a análise do sistema 50
4.5 Análise dos dados de falha 52
4.6 Múltipla classificação dos componentes baseado na optimização 53
4.6.1 Necessidade de optimização 54

4.6.2 Abordagem analítica 54
4.7 Desenvolvimento do programa de inspecção 57
4.7.1 Desenvolvimento da tabela de estratégia 57
4.7.2 Desenvolvimento do diagrama de influência 58
4.7.3 Desenvolvimento da árvore de decisão 59
4.7.4 Construção da folha de cálculo 59
4.7.5 Utilizar o modelo de decisão para determinar a melhor estratégia 59
4.8 Análise de sensibilidade 59
4.8.1 Métodos de refinação das variáveis importantes 60
5 Aplicação da metodologia desenvolvida 62
5.1 Definição do sistema 63
5.2 Informação do sistema 65
5.2.1 Bombas 65
5.2.2 Compressores 67
5.2.3 Turbinas 68
5.2.4 Motores eléctricos 70
5.3 Avaliação qualitativa 72
5.1 Ferramentas para a análise do sistema 76
5.2 Análise dos dados de falha 89
5.3 Múltipla classificação dos componentes baseado na optimização 105
5.4 Desenvolvimento do programa de inspecção 111
5.4.1 Desenvolvimento da tabela de estratégia 111
5.4.2 Desenvolvimento do diagrama de influência 115
5.4.3 Determinação da melhor estratégia 115
6 Discussão dos resultados 118
6.1 Fonte de dados – Refinaria *vs.* Base de dados 118
6.2 Comparação dos valores de taxa de falha no caso da Refinaria e da OREDA® 119
6.3 Comparação dos modos de falhas críticos da OREDA® e os verificados na Refinaria 120
6.4 Optimização do plano de manutenção 122
6.5 Vantagem da inspecção a realizar 123
7 Conclusões 124
8 Trabalhos futuros 127

Referências 128
Referências electrónicas: 130
Base de dados utilizadas: 130
Softwares utilizados: 131
Anexo I – Curva da banheira "bathtube" 132
Anexo II – Campos para uma base de dados 134
Anexo III – Diagrama para aplicação de uma análise HAZOP 136
Anexo IV – Exemplo de ferramentas para análise do sistema 137
Anexo V – Criação do modelo de decisão 145
Anexo VI – Simplificação do sistema a analisar 147
Anexo VII – Características dos equipamentos 159
Anexo VIII – Lista de intervenções nos equipamentos 167
Anexo IX – Taxas de falhas (OREDA®) 169
Anexo X – Análise qualitativa 181
Anexo XI – Análise de Pareto aos modos de falha de risco "intolerável" 186
Anexo XII – Árvores de falha 199
Anexo XIII – Folhas HAZOP 209
Anexo XIV – Análise FME(C)A 227
Anexo XV – Horas de Marcha dos equipamentos da U-1200 228
Anexo XVI – Gráficos de fiabilidade dos equipamentos P-1201 A e C-1201 A 229
Anexo XVII – Preços dos combustíveis 235
Anexo XVIII – Gráficos de risco 236
Anexo XIX – Diagrama e árvore de decisão 243
Anexo XX – NPV do equipamento P-1201 A 245
Anexo XXI - NPV dos componentes 250
Anexo XXII – Tabela de estratégia dos tipos de inspecção 275
Anexo XXIII – Cálculo do NPV das estratégias de Inspecção 276
Anexo XXIV – Diagrama de decisão do programa de manutenção e do programa inspecção ideais 278

Índice de figuras

Figura 1 - Evolução da manutenção. 5
Figura 2 - Tipo de manutenção *vs.* resultados. 6
Figura 3- Manutenção como negócio de processo. 7
Figura 4 - Evolução do pessoal da manutenção. 8
Figura 5 - Terotecnologia - Conceito de Base. 10
Figura 6 - Modelo EUT. 11
Figura 7 - Modelo TQMain. 13
Figura 8 – Os oito pilares do TPM. 14
Figura 9 - Distribuições possíveis para os componentes. 16
Figura 10 - Diagrama RAMS para o ciclo de vida dos sistemas. 17
Figura 11 - Planeamento do processo RBI. 19
Figura 12 - Gestão do risco utilizando RBI. 20
Figura 13 - Árvore de decisão para a escolha do tipo de manutenção. 26
Figura 14 - Filosofia RBI. 36
Figura 15 - Programa RBI para equipamentos em serviço. 37
Figura 16 - Representação das zonas ALARP e medidas a adoptar. 40
Figura 17 - Diagrama para a aplicação da metodologia RBI. 42
Figura 18 - Diagrama proposto para o desenvolvimento da metodologia RBI. 44
Figura 19 - Exemplo de uma matriz de risco. 50
Figura 20 - Consequências da paragem da Unidade 1200. 63
Figura 21 - Organização da FCO. 64
Figura 22 - Fluxograma simplificado dos equipamentos dinâmicos da Unidade 1200. 64
Figura 23 - Divisão das bombas segundo a sua função e construção. 65
Figura 24 - Diagrama funcional das bombas. 65
Figura 25 - Bomba e seus subsistemas e componentes. 66
Figura 26 - Divisão dos compressores segundo a sua função e construção. 67
Figura 27 - Diagrama funcional dos compressores. 67
Figura 28 – Compressores e seus subsistemas e componentes. 68
Figura 29 - Diagrama funcional das turbinas. 69
Figura 30 - Turbinas e seus subsistemas e componentes. 69
Figura 31 - Diagrama funcional dos motores eléctricos. 70
Figura 32 - Motores eléctricos e seus subsistemas e componentes. 71
Figura 33 - Diagrama de blocos da Unidade 1200. 86
Figura 34 - Equipamento P-1201 A. 89
Figura 35 - Árvore de decisão. 106
Figura 36 - Cálculo do NPV casa base *vs.* caso alternativo (melhor). 108
Figura 37 - Diagrama de influência da decisão da estratégia de inspecção. 115
Figura 38 - A "bathtube", a curva função de risco. 132
Figura 39 - Procedimento para aplicação da análise HAZOP. 136
Figura 40 - Exemplo de um diagrama de blocos. 137
Figura 41 - Exemplo de uma árvore de eventos. 137
Figura 42 - Exemplo de uma árvore de falha. 138
Figura 43 - Complexo da Refinaria do Porto. 148
Figura 44 - Organização da FCO. 150
Figura 45 - Fluxograma da *Alimentação do fraccionador*. 152
Figura 46 - Fluxograma da *Secção de Desexanização*. 153
Figura 47 - Fluxograma da *Secção de Reacção*. 153
Figura 48 - Fluxograma do *Circuito H2 Make-Up*. 154
Figura 49 - Fluxograma da *Secção de Desbutanização*. 155
Figura 50 - Fluxograma dos equipamentos dinâmicos da Unidade 1200. 156

Figura 51 - Fluxograma simplificado dos equipamentos dinâmicos da Unidade 1200. 157
Figura 52 - Árvore de falha das Bombas centrífugas - Processamento do produto. 199
Figura 53 - Árvore de falha das Bombas centrífugas - Processamento do produto (componentes críticos). 200
Figura 54 - Árvore de falha das Compressores alternativos - Accionamento eléctrico (100 a 1000 kW). 201
Figura 55 - Árvore de falha das Compressores alternativos - Accionamento eléctrico (100 a 1000 kW) (componentes críticos). 202
Figura 56 - Árvore de falha das Motores eléctricos - Bombas - Processamento do produto. 203
Figura 57 - Árvore de falha das Motores eléctricos - Bombas - Processamento do produto (componente crítico). 204
Figura 58 - Árvore de falha das Motores eléctricos - Compressores - Processamento de gás. 205
Figura 59 - Árvore de falha das Motores eléctricos - Compressores - Processamento de gás (componentes críticos). 206
Figura 60 - Árvore de falha das Turbina a gás - Industrial (0 a 1000 kW). 207
Figura 61 - Árvore de falha das Turbina a gás - Industrial (0 a 1000 kW) (componentes críticos). 208
Figura 62 - Superfície da função verosimilhança do equipamento P-1201 A. 233
Figura 63 - Superfície da função verosimilhança do equipamento C-1201 A. 234
Figura 64 - Diagrama de decisão. 243
Figura 65 - Árvore de decisão. 244
Figura 66 - Cálculo do NPV casa base *vs*. caso alternativo (reparação 1º ano) da P-1201 A. 245
Figura 67 - Cálculo do NPV casa base *vs*. caso alternativo (reparação 2º ano) da P-1201 A. 246
Figura 68 - Cálculo do NPV casa base *vs*. caso alternativo (reparação 3º ano) da P-1201 A. 247
Figura 69 - Cálculo do NPV casa base *vs*. caso alternativo (duas reparações) da P-1201 A. 248
Figura 70 - Cálculo do NPV casa base *vs*. caso alternativo (reparação todos os anos) da P-1201 A. 249
Figura 71 - Cálculo do NPV casa base *vs*. caso alternativo (reparação 1º ano) do estator (c/ p.p.). 250
Figura 72 - Cálculo do NPV casa base *vs*. caso alternativo (reparação 2º ano) do estator (c/ p.p.). 251
Figura 73 - Cálculo do NPV casa base *vs*. caso alternativo (reparação 3º ano) do estator (c/ p.p.). 252
Figura 74 - Cálculo do NPV casa base *vs*. caso alternativo (duas reparações) do estator (c/ p.p.). 253
Figura 75 - Cálculo do NPV casa base *vs*. caso alternativo (reparação todos os anos) do estator (c/ p.p.). 254
Figura 76 - Cálculo do NPV casa base *vs*. caso alternativo (reparação 1º ano) do estator (s/ p.p.). 255
Figura 77 - Cálculo do NPV casa base *vs*. caso alternativo (reparação 2º ano) do estator (s/ p.p.). 256
Figura 78 - Cálculo do NPV casa base *vs*. caso alternativo (reparação 3º ano) do estator (s/ p.p.). 257
Figura 79 - Cálculo do NPV casa base *vs*. caso alternativo (duas reparações) do estator (s/ p.p.). 258
Figura 80 - Cálculo do NPV casa base *vs*. caso alternativo (reparação todos os anos) do estator (s/ p.p.). 259
Figura 81 - Cálculo do NPV casa base *vs*. caso alternativo (reparação 1º ano) das tubagens. 260
Figura 82 - Cálculo do NPV casa base *vs*. caso alternativo (reparação 2º ano) das tubagens. 261
Figura 83 - Cálculo do NPV casa base *vs*. caso alternativo (reparação 3º ano) das tubagens. 262
Figura 84 - Cálculo do NPV casa base *vs*. caso alternativo (duas reparações) das tubagens. 263
Figura 85 - Cálculo do NPV casa base *vs*. caso alternativo (reparação todos os anos) das tubagens. 264
Figura 86 - Cálculo do NPV casa base *vs*. caso alternativo (reparação 1º ano) das válvulas. 265
Figura 87 - Cálculo do NPV casa base *vs*. caso alternativo (reparação 2º ano) das válvulas. 266
Figura 88 - Cálculo do NPV casa base *vs*. caso alternativo (reparação 3º ano) das válvulas. 267
Figura 89 - Cálculo do NPV casa base *vs*. caso alternativo (duas reparações) das válvulas. 268
Figura 90 - Cálculo do NPV casa base *vs*. caso alternativo (reparação todos os anos) das válvulas. 269
Figura 91 - Cálculo do NPV casa base *vs*. caso alternativo (reparação 1º ano) dos vedantes. 270
Figura 92 - Cálculo do NPV casa base *vs*. caso alternativo (reparação 2º ano) dos vedantes. 271
Figura 93 - Cálculo do NPV casa base *vs*. caso alternativo (reparação 3º ano) dos vedantes. 272
Figura 94 - Cálculo do NPV casa base *vs*. caso alternativo (duas reparações) dos vedantes. 273
Figura 95 - Cálculo do NPV casa base *vs*. caso alternativo (reparação todos os anos) dos vedantes. 274
Figura 96 - Diagrama de decisão do programa de manutenção ideal. 278
Figura 97 - Diagrama de decisão do programa de inspecção ideal. 278

Índice de tabelas

Tabela 1 - Categorias de risco e acções a aplicar em cada uma. ... 73
Tabela 2 - Matriz criticidade das Bombas centrífugas - Processamento do produto. ... 74
Tabela 3 - Matriz criticidade das Compressores alternativos - Accionamento eléctrico (100 a 1000 kW). ... 75
Tabela 4 - Matriz criticidade das Motores eléctricos - Bombas - Processamento do produto. ... 75
Tabela 5 - Matriz criticidade das Motores eléctricos - Compressores - Processamento de gás. ... 75
Tabela 6 - Matriz criticidade das Turbina a gás - Industrial (0 a 1000 kW). ... 76
Tabela 7 - Lista de palavras-chave e seu significado. ... 87
Tabela 8 - Níveis de severidade considerados para a análise FME(C)A e a sua descrição. ... 87
Tabela 9 - Níveis de ocorrência considerados para a análise FME(C)A e a sua descrição. ... 88
Tabela 10 - Níveis de detectabilidade considerados para a análise FME(C)A e a sua descrição. ... 88
Tabela 11 - Valores de β normalmente considerados. ... 88
Tabela 12 - Intervenções devido a falhas que induzem perturbações no funcionamento da P-1201 A e do sistema. ... 90
Tabela 13 - Intervenções devido a falhas que induzem perturbações no funcionamento do C-1201 A e do sistema. ... 90
Tabela 14 - Parâmetros de Weibull da P-1201 A e C-1201 A. ... 92
Tabela 15 - Valores de MTBF, MTTR, MWT e disponibilidade dos equipamentos P-1201 A e C-1201 A. ... 97
Tabela 16 - POF dos equipamentos P-1201 A e C-1201 A. ... 98
Tabela 17 - Custo dos equipamentos, componentes e reparações. ... 99
Tabela 18 - Taxas de falha, custos e risco para as bombas centrífugas – processamento do produto. ... 100
Tabela 19 - Taxas de falha, custos e risco para os compressores alternativos - accionamento eléctrico (100 a 1000 kW). ... 100
Tabela 20 - Taxas de falha, custos e risco para os motores eléctricos. ... 101
Tabela 21 - Taxas de falha, custos e risco para as turbinas a gás - industriais (0 a 1000 kW). ... 101
Tabela 22 - Valores de risco, criticidade e RPN dos equipamentos críticos. ... 105
Tabela 23 - Valores de MTBF e MTTF dos equipamentos críticos. ... 105
Tabela 24 – Valor NPV dos componentes. ... 111
Tabela 25 - Categorias a serem estudadas no desenvolvimento do programa de inspecção. ... 113
Tabela 26 - Valores de NPV para a inspecção. ... 116
Tabela 27 - Comparação dos valores de taxa de falha da Refinaria e da OREDA®. ... 119
Tabela 28 - Comparação financeira entre metodologia da manutenção actual da Refinaria e a RBI. ... 122
Tabela 29 - Comparação financeira entre MTBF/MTTF e RBI. ... 123
Tabela 30 - Base de dados proposta. ... 135
Tabela 32 - Exemplo de uma análise HAZOP efectuada na Refinaria. ... 139
Tabela 33 - Quantidade dos produtos produzidos na Refinaria. ... 147
Tabela 34 - Intervenções efectuadas na bomba P-1201 A. ... 167
Tabela 35 - Intervenções efectuadas no compressor C-1201 A/B. ... 168
Tabela 36 - Taxa de falha dos modos de falha das bombas centrífugas. ... 169
Tabela 37 - Taxa de falha dos equipamentos em cada modo de falha (Bombas centrífugas). ... 170
Tabela 38 - Percentagem de contribuição das causas em cada modo de falha (Bombas centrífugas). ... 171
Tabela 39 - Taxa de falha dos modos de falha dos compressores alternativos. ... 172
Tabela 40 - Taxa de falha dos equipamentos em cada modo de falha (Compressores alternativos). ... 173
Tabela 41 - Percentagem de contribuição das causas em cada modo de falha (Compressores alternativos). ... 173
Tabela 42 - Taxa de falha dos modos de falha dos motores eléctricos de accionamento de bombas. ... 174
Tabela 43 - Taxa de falha dos equipamentos em cada modo de falha (Motores eléctricos de accionamento de bombas). ... 175
Tabela 44 - Percentagem de contribuição das causas em cada modo de falha (Motores eléctricos de accionamento de bombas). 175
Tabela 45 - Taxa de falha dos modos de falha dos motores eléctricos de accionamento de compressores. ... 176
Tabela 46 - Taxa de falha dos equipamentos em cada modo de falha (Motores eléctricos de accionamento de compressores). ... 177
Tabela 47 - Percentagem de contribuição das causas em cada modo de falha (Motores eléctricos de accionamento de compressores). ... 177
Tabela 48 - Taxa de falha dos modos de falha das turbinas. ... 178
Tabela 49 - Taxa de falha dos equipamentos em cada modo de falha (Turbinas). ... 179
Tabela 50 - Percentagem de contribuição das causas em cada modo de falha (Turbinas). ... 180
Tabela 51 - Classificação de severidade e probabilidade para Bombas centrífugas - Processamento do produto. ... 181
Tabela 52 - Matriz criticidade das Bombas centrífugas - Processamento do produto. ... 181

Tabela 53 - Classificação de severidade e probabilidade para Compressores alternativos - Accionamento eléctrico (100 a 1000 kW). 182
Tabela 54 - Matriz criticidade dos Compressores alternativos - Accionamento eléctrico (100 a 1000 kW). 182
Tabela 55 - Classificação de severidade e probabilidade para Motores eléctricos - Bombas - Processamento do produto. 183
Tabela 56 - Matriz criticidade dos Motores eléctricos - Bombas - Processamento do produto. 183
Tabela 57 - Classificação de severidade e probabilidade para Motores eléctricos - Compressores - Processamento de gás. 184
Tabela 58 - Matriz criticidade dos Motores eléctricos - Compressores - Processamento de gás. 184
Tabela 59 - Classificação de severidade e probabilidade para Turbina a gás - Industrial (0 a 1000 kW). 185
Tabela 60 - Matriz criticidade dos Turbina a gás - Industrial (0 a 1000 kW). 185
Tabela 61 - Folha HAZOP das bombas centrífugas. 209
Tabela 62 - Folha HAZOP dos compressores alternativos. 218
Tabela 63 - Folha HAZOP dos motores eléctricos. 221
Tabela 64 - Folha HAZOP das turbinas a gás. 225
Tabela 65 - Análise FME(C)A. 227
Tabela 66 - Horas de marcha dos equipamentos da Unidade 1200. 228
Tabela 67 - Tabela de estratégia para escolha da inspecção a utilizar. 275
Tabela 68 - Cálculo do NPV para o modo de falha "Fuga do lubrificante" para as bombas centrífugas. 276
Tabela 69 - Cálculo do NPV para o modo de falha "Fuga do produto" para as bombas centrífugas. 276
Tabela 70 - Cálculo do NPV para o modo de falha "Vibração" para as bombas centrífugas. 276
Tabela 71 - Cálculo do NPV para o modo de falha "Débito insuficiente" para os compressores alternativos. 276
Tabela 72 - Cálculo do NPV para o modo de falha "Fuga do produto" para os compressores alternativos. 277
Tabela 73 - Cálculo do NPV para o modo de falha "Vibração" para os compressores alternativos. 277
Tabela 74 - Cálculo do NPV para o modo de falha "Falha no arranque" para os motores eléctricos. 277

Índice de gráficos

Gráfico 1 – Análise de Pareto aos componentes das bombas centrífugas no modo de falha FEPP..... 77
Gráfico 2 – Análise de Pareto aos componentes das bombas centrífugas no modo de falha FEPA. 77
Gráfico 3 – Análise de Pareto aos componentes dos compressores alternativos no modo de falha FP..... 78
Gráfico 4 – Análise de Pareto aos componentes dos compressores alternativos no modo de falha DIN. 78
Gráfico 5 – Análise de Pareto aos componentes dos compressores alternativos no modo de falha FA. 79
Gráfico 6 – Análise de Pareto aos componentes dos motores eléctricos das bombas no modo de falha FP. 79
Gráfico 7 – Análise de Pareto aos componentes dos motores eléctricos das bombas no modo de falha DE..... 80
Gráfico 8 – Análise de Pareto aos componentes dos motores eléctricos das bombas no modo de falha CO. 80
Gráfico 9 – Análise de Pareto aos componentes dos motores eléctricos das bombas no modo de falha FA..... 81
Gráfico 10 – Análise de Pareto aos componentes dos motores eléctricos das bombas no modo de falha DIN. 81
Gráfico 11 – Análise de Pareto aos componentes dos motores eléctricos das bombas no modo de falha VIB..... 81
Gráfico 12 – Análise de Pareto aos componentes do motor eléctrico dos compressores no modo de falha DIN. 82
Gráfico 13 – Análise de Pareto aos componentes do motor eléctrico dos compressores no modo de falha FP. 82
Gráfico 14 – Análise de Pareto aos componentes do motor eléctrico dos compressores no modo de falha FNP. 83
Gráfico 15 – Análise de Pareto aos componentes do motor eléctrico dos compressores no modo de falha DPF. 83
Gráfico 16 – Análise de Pareto aos componentes das turbinas no modo de falha FP..... 84
Gráfico 17 – Análise de Pareto aos componentes das turbinas no modo de falha FA. 85
Gráfico 18 - Número de equipamentos analisados e não analisados. 89
Gráfico 19 - Tipo das intervenções realizadas ao equipamento P-1201 A..... 91
Gráfico 20 - Tipo das intervenções realizadas ao equipamento C-1201 A. 91
Gráfico 21 - Curva pdf do equipamento P-1201 A..... 92
Gráfico 22 - Curva pdf do equipamento C-1201 A. 93
Gráfico 23 - Curva da probabilidade de falha do equipamento P-1201 A. 93
Gráfico 24 - Curva da probabilidade de falha do equipamento C-1201 A. 94
Gráfico 25 - Curva da fiabilidade do equipamento P-1201 A. 94
Gráfico 26 - Curva da fiabilidade do equipamento C-1201 A. 95
Gráfico 27 - Curva da taxa de falha do equipamento P-1201 A..... 95
Gráfico 28 - Curva da taxa de falha do equipamento C-1201 A. 96
Gráfico 29 - Superfície da função verosimilhança do equipamento P-1201 A. 96
Gráfico 30 - Superfície da função verosimilhança do equipamento C-1201 A. 97
Gráfico 31 - Risco das combinações (componentes/modos de falha) dos equipamentos dinâmicos existentes na Unidade 1200. 102
Gráfico 32 - Relação entre os componentes dos equipamentos analisados. 103
Gráfico 33 - Componentes críticos baseados no cálculo da criticidade. 103
Gráfico 34 - Componentes críticos baseados no cálculo do RPN. 104
Gráfico 35 - NPV da aplicação da estratégia de inspecção. 116
Gráfico 36 - Número de equipamentos analisados e não analisados. 118
Gráfico 37 - Tipo das intervenções realizadas ao equipamento P-1201 A..... 120
Gráfico 38 - Tipo das intervenções realizadas ao equipamento P-1201 A..... 120
Gráfico 40 - Benefício da aplicação do pograma de manutenção baseada no risco para a Unidade 1200. 125
Gráfico 41 – Benefício da aplicação do programa de manutenção e inspecção baseada no risco para a Unidade 1200. 125
Gráfico 42 – Análise de Pareto aos componentes das bombas centrífugas no modo de falha FEPP. 186
Gráfico 43 – Análise de Pareto aos componentes das bombas centrífugas no modo de falha FEPA. 187
Gráfico 44 – Análise de Pareto aos componentes dos compressores alternativos no modo de falha FP..... 188
Gráfico 45 – Análise de Pareto aos componentes dos compressores alternativos no modo de falha DIN. 189
Gráfico 46 – Análise de Pareto aos componentes dos compressores alternativos no modo de falha FA. 189
Gráfico 47 – Análise de Pareto aos componentes dos motores eléctricos das bombas no modo de falha FP. 190
Gráfico 48 - Análise de Pareto aos componentes dos motores eléctricos das bombas no modo de falha DE. 191
Gráfico 49 - Análise de Pareto aos componentes dos motores eléctricos das bombas no modo de falha CO. 191
Gráfico 50- Análise de Pareto aos componentes dos motores eléctricos das bombas no modo de falha FA. 192
Gráfico 51 - Análise de Pareto aos componentes dos motores eléctricos das bombas no modo de falha DIN. 192
Gráfico 52 - Análise de Pareto aos componentes dos motores eléctricos das bombas no modo de falha VIB. 193
Gráfico 53 - Análise de Pareto aos componentes dos motores eléctricos dos compressores no modo de falha DIN. 193

Gráfico 54 - Análise de Pareto aos componentes dos motores eléctricos dos compressores no modo de falha FP. 194
Gráfico 55 - Análise de Pareto aos componentes dos motores eléctricos dos compressores no modo de falha FA. 194
Gráfico 56 - Análise de Pareto aos componentes dos motores eléctricos dos compressores no modo de falha DPF. 195
Gráfico 57 - Análise de Pareto aos componentes das turbinas no modo de falha FP. 196
Gráfico 58 - Análise de Pareto aos componentes das turbinas no modo de falha FA. 198
Gráfico 59 - Curva pdf do equipamento P-1201 A. 229
Gráfico 60 - Curva pdf do equipamento C-1201 A. 230
Gráfico 61 - Curva da probabilidade de falha do equipamento P-1201 A. 230
Gráfico 62 - Curva da probabilidade de falha do equipamento C-1201 A. 231
Gráfico 63 - Curva da fiabilidade do equipamento P-1201 A. 231
Gráfico 64 - Curva da fiabilidade do equipamento C-1201 A. 232
Gráfico 65 - Curva da taxa de falha do equipamento P-1201 A. 232
Gráfico 66 - Curva da taxa de falha do equipamento C-1201 A. 233
Gráfico 67 - Risco das combinações (componentes/modo de falha) das bombas centrífugas - processamento do produto. 236
Gráfico 68 - Risco dos componentes das bombas centrífugas - processamento do produto. 236
Gráfico 69 - Risco das combinações (componentes/modo de falha) dos compressores alternativos - accionamento eléctrico (100 a 1000 kW) 237
Gráfico 70 - Risco dos componentes dos compressores alternativos - accionamento eléctrico (100 a 1000 kW). 237
Gráfico 71 - Risco das combinações (componentes/modo de falha) dos motores eléctricos - bombas - processamento do produto. 238
Gráfico 72 - Risco dos componentes dos motores eléctricos - bombas - processamento do produto. 238
Gráfico 73 - Risco das combinações (componentes/modo de falha) dos motores eléctricos - compressores - processamento de gás. 239
Gráfico 74 - Risco dos componentes dos motores eléctricos - compressores - processamento de gás. 239
Gráfico 75 - Risco das combinações (componentes/modo de falha) das turbinas a gás - industrial (0 a 1000 kW). 240
Gráfico 76 - Risco dos componentes das turbinas a gás - industrial (0 a 1000 kW). 240
Gráfico 77 - Risco das combinações (componentes/modos de falha) dos equipamentos dinâmicos existentes na Unidade 1200. 241
Gráfico 78 - Risco dos componentes dos equipamentos dinâmicos existentes na Unidade 1200. 242

Índice de equações

Equação 1 - Definição de OPE 12
Equação 2 - Definição de OEE 14
Equação 3 - Função geral de fiabilidade. 29
Equação 4 - Função probabilidade de avarias geral. 29
Equação 5 - Função geral do pdf. 29
Equação 6 - Função geral da taxa de avarias instantânea. 29
Equação 7 - Função pdf da distribuição Exponencial. 30
Equação 8 - Função de fiabilidade da distribuição Exponencial. 30
Equação 9 - Função da taxa de avarias instantânea da distribuição Exponencial. 30
Equação 10 - Função pdf da distribuição Gamma. 30
Equação 11 - Função Gamma. 30
Equação 12 - Função de fiabilidade da distribuição Gamma. 31
Equação 13 - Função de fiabilidade simplificada da distribuição Gamma. 31
Equação 14 - Função da taxa de avarias instantânea da distribuição Gamma. 31
Equação 15 - Função pdf da distribuição Normal. 31
Equação 16 - Função de fiabilidade da distribuição Normal. 32
Equação 17 - Função da taxa de avarias instantânea da distribuição Normal. 32
Equação 18 - Função pdf da distribuição Weibull 3 parâmetros. 32
Equação 19 - Função pdf da distribuição Weibull 2 parâmetros. 32
Equação 20 - Função de fiabilidade da distribuição Weibull 3 parâmetros. 33
Equação 21 - Função de fiabilidade da distribuição Weibull 2 parâmetros. 33
Equação 22 - Função da taxa de avarias instantânea da distribuição Weibull 3 parâmetros. 33
Equação 23 - Função da taxa de avarias instantânea da distribuição Weibull 2 parâmetros. 33
Equação 24 - Cálculo do risco. 49
Equação 25 – Criticidade calculada através da norma (MIL-STD-1629A). 52
Equação 26 - Criticidade calculada através do método RPN. 52
Equação 27 - NPV quando não compensa implementar o projecto. 55
Equação 28 - NPV quando compensa implementar o projecto. 55
Equação 29 - Cálculo do MTBF. 97
Equação 30 - Cálculo do MTTR. 97
Equação 31 - Cálculo da disponibilidade. 97
Equação 32 - Cálculo do risco para o equipamento P-1201 A sem paragem programada. 98
Equação 33 - Cálculo do risco para o equipamento C-1201 A com paragem programada (1 em 1 ano). 98
Equação 34 - Simplificação do cálculo do MTBF ou MTTF. 105
Equação 35 - Cálculo do custo dos componentes. 110
Equação 36 - Cálculo da probabilidade de falha sem o modo de falha ser detectado. 114
Equação 37 - Cálculo do PV. 115
Equação 38 - Ramos da "Curva da banheira". 133

Lista de abreviaturas

ALARP – As Low As Reasonably Practible

API – American Petroleum Institute

ASME – The American Society of Mechanical Engineers

CM – Corrective Maintenance "Manutenção Correctiva"

COF – Consequence of Failure "Consequencias da falha"

D - Disponibilidade

ETA – Event Tree Analysis "Árvore de eventos"

EUT – The Eindhoven University of Technology model

FCO – Fábrica dos Combustíveis

FME(C)A – Failure Mode, Effects and Criticality Analysis

FTA – Fault Tree Analysis "Árvore de falhas"

GAMAB – Globalement Au Moins Aussi Bon

HAZOP – Hazard and Operability studies

JIT – Just In Time

LCC – Life Cycle Cost "Custo de ciclo de vida"

MGS – Mindestens Gleiche Sicherheit

MTBF – Mean Time Between Failures

MTTF – Mean Time To Failure

MTTR – Mean Time To Repair

MWT – Mean Waiting Time

NET – Net Present Value

OEE – Overall Equipment Effectiveness

OPE – Overall Process Effectiveness

OREDA® - Offshore Reliability Data Handbook

PDCA – Plan-Do-Check-Act.

pdf – Função densidade de probabilidade

PHA – Process Hazards Analysis

PM – Preventive Maintenance "Manutenção Preventiva"

POF – Probability of Failure "Probabilidade de falha"

PV – Present Value

QIP – Quality Improvement Process "Processo de Melhoria da Qualidade"

RAMS – Reliability, Availability, Maintainability and Safety

RBI – Risk-Based Inspection

RCM – Reliability-Centered Maintenance

RLA – Remaining Life Assessment

RP – Recommended Practice "Prática Recomendada"

RPN – Risk Priority Number

TQMain – Total Quality Maintenance

TPM – Total Productive Maintenance

Lista de símbolos

α – Contribuição do modo de falha para a avaria

β – Parâmetro de forma (distribuição de Weibull)

γ – Parâmetro de posição (distribuição de Weibull)

δ – Probabilidade de ocorrência do modo de falha

η – Parâmetro de de escala (distribuição de Weibull)

θ – Parâmetro de escala (distribuição Gamma)

κ – Parâmetro de forma (distribuição Gamma)

λ – Taxa de avaria ou falha

μ – Média (distribuição Normal)

ρ – Coeficiente de correlação

σ – Desvio-padrão (distribuição Normal)

C – Criticidade do modo de falha

D – Detectabilidade

f(t) – Função densidade de probabilidade de avaria

F(t) – Função acumulada de avarias

O – Ocorrência

R(t) – Função de fiabilidade

RPN – Risk Priority Number

S – Severidade

t – tempo de operação

Glossário

Ambiente[1]**:** espaço fora da área de jurisdição de uma instalação que implicaria custos substanciais em caso de contaminação dessa área. Esta pode incluir canais de água subterrâneos, que passam para fora da instalação, contaminando a água externa à instalação.

Árvore de eventos[2]**:** ferramenta analítica que organiza e caracteriza potenciais acidentes de uma maneira lógica e gráfica. A árvore de eventos começa com a identificação dos potenciais eventos iniciais. Possíveis eventos subsequentes (incluindo a activação de funções de segurança) resultantes do evento inicial, são então apresentados como o segundo nível da árvore de eventos. Este processo é repetido, desenvolvendo todos os percursos ou cenários, desde o evento inicial aos resultados potenciais.

Árvore de falha[1]**:** abordagem dedutiva da identificação do risco que incide sobre as causas de um evento indesejável.

Avaria[3]**:** é a ocorrência que determina a degradação ou cessação da aptidão de um bem para desempenhar uma função requerida.

Balanced Scorecard[4]**:** metodologia disponível e aceite no mercado desenvolvida pelos professores da Harvard Business School, Robert Kaplan e David Norton, em 1992. Os passos desta metodologia incluem: definição da estratégia impresarial, gerência do negócio, gerência de serviços e gestão da qualidade; passos estes implementados através de indicadores de desempenho.

Ciclo de vida do equipamento[1]**:** indicador que tem por base o tempo de vida de um bem do equipamento estimado no projecto e o número de anos que o bem actualmente tem de serviço.

Ciclo Deming (ou PDCA)[4]**:** tem por princípio tornar mais claros e ágeis os processos envolvidos na execução da gestão, dividindo-a em quatro principais passos. O PDCA é aplicado principalmente nas normas de sistemas de gestão e deve ser utilizado (pelo menos na teoria) em qualquer empresa de forma a garantir o sucesso nos negócios, independentemente do departamento. O ciclo começa pelo planeamento, em seguida a acção ou conjunto de acções planeadas são executadas, verifica-se o que foi feito e se estava de acordo com o planeado, tomando-se uma acção para eliminar ou pelo menos mitigar defeitos no produto ou na execução, aplicando constantemente e repetidamente estes passos.

Consequência[2]**:** resultado de um evento. Pode existir uma ou mais consequências de um evento. As consequências podem ser positivas ou negativas. No entanto, são sempre consequências negativas para a segurança. As consequências podem ser expressas qualitativamente ou quantitativamente.

Critério de sucesso[1]**:** define um modo de falha, dando uma função onde as variáveis aleatórias associadas à falha do equipamento. A probabilidade de falha é dada pelo início da falha do conjunto.

Custo[1]**:** das actividades, directa ou indirecta que envolvam qualquer impacto negativo, incluindo dinheiro, tempo de trabalho, ruptura, comércio, politicas e outras perdas tangíveis.

Deterioração[2]**:** redução na capacidade de um componente para prestar a sua finalidade. Isto pode ser causado por diversos mecanismos de deterioração (desgaste, *crackers*, mecânico). O termo danos ou degradação pode ser utilizado em vez de deterioração.

Disponibilidade[3]**:** aptidão de um bem para cumprir uma função requerida sob determinadas condições, num dado instante ou durante um dado intervalo de tempo, assumindo que é assegurado o fornecimento dos necessários recursos externos.

Elemento de monitorização da vibração[1]**:** valor atribuido à monitorização de equipamentos rotativos, como bombas e compressores, para detecção do desenvolvimento de uma avaria nos mesmos.

Evento[2]**:** ocorrência de um determinado conjunto de circunstâncias. O evento pode ser certo ou incerto. O evento pode ser singular ou múltiplo. A probabilidade associada ao evento pode ser estimada para um determinado período de tempo.

Fiabilidade[3]**:** aptidão de um bem para cumprir uma função requerida sob determinadas condições, durante um dado intervalo de tempo.

Failure Mode, Effects and Criticality Analysis[1]**:** análise indutiva que detalha sistematicamente o nível do equipamento, todos os modos de falha possíveis, avalia os seus efeitos sobre o sistema em causa e prioritiza as falhas de acordo com a severidade dos efeitos. A técnica é mais eficiente para identificar falhas num determinado ponto do sistema.

Falha[2]**:** fim da capacidade de um sistema executar a função a que estava destinado, a estrutura ou componentes necessários para executar essa função não a conseguem efectuar. A falha pode acontecer sem aviso prévio e ser indetectável até à próxima inspecção (falha inesperada), ou pode ser evidenciada e detectada por diversos de métodos em caso de ocorrência (falha anunciada).

Hazard and Operability studies[2]**:** estudo HAZOP é uma forma de análise dos modos de falha e seus efeitos. Os estudos HAZOP foram originalmente desenvolvidos para a indústria de processo, utilizando técnicas sistemáticas de identificação dos perigos e questões de operacionalidade em toda a instalação. São particularmente úteis na identificação de riscos imprevistos na concepção das instalações devido à falta de informação, ou introduzidos nas instalações existentes devido às mudanças nas condições de processo ou procedimentos operacionais.

Manutibilidade[3]**:** aptidão de um bem, sob condições de utilização definidas, para ser mantido ou restaurado, de tal modo que possa cumprir uma função requerida, quando a manutenção é realizada em condições definidas, utilizando procedimentos e recursos prescritos.

Mean Time To Failure[5]**:** medida básica de fiabilidade para bens não-reparáveis: o número total de unidades de vida de um bem dividido pelo número total de falhas dentro dessa população, durante um determinado intervalo de tempo em condições definidas.

Mean Time Between Failures[5]**:** medida básica de fiabilidade para bens reparáveis: o tempo médio de unidades de vida durante as quais todas os componentes funcionam dentro dos limites especificados, durante um intervalo de tempo em condições definidas.

Mean Time To Repair[6]**:** tempo médio de reparação para o reparador efectuar a revisão ou reparação de um bem.

Mean Waiting Time[4]**:** fornece um indicador sobre as condições de atendimento do serviço de manutenção às situações de avaria.

Mitigar[2]**:** limitação de qualquer consequência negativa ou redução da probabilidade de um determinado evento.

Modo de falha[2]**:** forma de uma falha. Para a metodologia RBI a principal preocupação de falha é a perda de confinamento dos equipamentos sob pressão.

Probabilidade[2]**:** medida de um evento que é provável que ocorra dentro do prazo em questão. A definição matemática de probabilidade é "um número real na escala de 0 a 1 anexado a um acontecimento aleatório". A probabilidade pode estar relaccionada com a frequência relativa a longo prazo ou a um certo grau de certeza de que um evento ocorrerá. Para um grande grau de certeza a probabilidade é perto de 1. A frequência pode ser utilizada em vez de probabilidade na descrição de risco. Os graus de certeza sobre a probabilidade podem ser escolhidos como classes ou classificados como "rara/ improvável/ moderado/ provável/ quase certo" ou "inacreditável/ improvável/ remoto/ ocasional/ provável/ frequente".

Qualidade[4]**:** vem do latin *Qualitate*, e é um termo utilizado em várias situações distintas. Neste caso a qualidade pode ser associada à concepção e produção de um produto que vá ao encontro das necessidades do cliente. E também está associada ao valor das utilidades reconhecidas ao produto. A Fiabilidade e Manutibilidade são duas das várias dimensões do conceito lato de qualidade.

Remaining Life Analysis[7]**:** é uma ferramenta matemática de engenharia que combina um modelo de danos mecanicista com o serviço relacionado com a inserção no modelo de uma progressão de danos ao longo do tempo. O modelo "detecta" a falha quando os danos ultrapassam o que é tolerado pelo equipamento.

Risco[2]**:** combinação da probabilidade de um evento e as suas consequências. Em algumas situações, o risco é o desvio do esperado. Quando a probabilidade e as consequências são expressas numericamente, o risco é o produto.

Risk-Based Inspection[2]**:** processo de avaliação e gestão dos riscos focado na perda de contenção dos equipamentos sob pressão, em instalações de processo, devido à deterioração dos materiais. Estes riscos são geridos essencialmente através da inspecção dos equipamentos.

Segurança[8]**:** condição de estado ou de ser segura, livre de perigo ou risco; isenção de prejuízo ou perda; prevenção e protecção contra a quebra ou fracasso. As considerações de segurança aplicam-se a ambos: seres humanos que interagem com um sistema e entre os próprios sistemas.

Segurança de funcionamento[3]**:** conjunto das propriedas utilizadas para descreverem a disponibilidade e os factores que a condicionam: fiabilidade, manutibilidade e logística de manutenção.

Subsistema[9]**:** um equipamento é subdividido em vários subsistemas, cada um com funções necessárias para que o equipamento realize a sua função principal. Os subsistemas podem ser redundantes.

[1] Retirado da (API RP 581, 2000).
[2] Retirado da (API RP 580, 2002).
[3] Retirado da (NP EN 13306, 2001).
[4] Retirado da Wikipédia.
[5] Retirado do (Barringer, 1995).
[6] Retirado da (NF X 60-503, 1985)
[7] Retirado do (ASME, 2003).
[8] Retirado do (Holst, 2007).
[9] Retirado do (OREDA, 2002).

1 Introdução e objectivos

A manutenção é uma das funções mais importantes de uma empresa e também uma das mais dispendiosas. Como tal, deve ser merecedora de uma especial atenção. Através dela, é possível manter ou restabelecer um sistema produtivo num estado ou em condições próprias de segurança e de funcionamento, para que este realize a função que lhe é requerida, com os níveis de performance desejados e com um custo de ciclo de vida (LCC) previsíveis. Hoje em dia, as exigências mínimas de segurança e saúde para as instalações e as áreas circundantes são cada vez mais elevadas.

"*Um grande efeito colateral das modernas tecnologias de processo químico e seus produtos é o aumento dos danos causados ao ambiente devido às descargas industriais. A sociedade, através de uma organização de regulação, deu resposta à crescente preocupação com os efeitos ambientais adversos causados pelos graves acidentes, introduzindo um rigoroso quadro legislativo, como a directiva introduzida pela Comissão Europeia depois do incidente de Seveso no norte de Italia"* (Vassiliadis & Pistikopoulos, 2000).

Pretende-se aplicar a metodologia *Risk-Based Inspection* (RBI) nos equipamentos dinâmicos da Unidade 1200 "*Unifining*" existente na Refinaria do Porto da Petrogal. Como o próprio nome indica, é uma metodologia baseada no cálculo e prioritização do risco. Este processo define as prioridades e optimização do esforço de inspecção e manutenção sobre os diversos equipamentos existentes numa unidade processual.

A inspecção e manutenção, devidamente organizadas e programadas, são um factor de extrema importância para a qualidade e segurança dos sistemas produtivos. Reduzem os atrasos e aumentam a produtividade da empresa, contribuindo assim para o desenvolvimento e competitividade da mesma.

Assim, para realizar uma manutenção bem programada e organizada, é necessário conhecer os componentes críticos de um sistema, bem como definir as tarefas de inspecção e manutenção e a frequência de realização adequadas. Para isso, no âmbito desta dissertação e dos interesses da actividade efectuada na Refinaria do Porto da Petrogal, foi desenvolvida uma metodologia de análise de equipamentos industriais, baseada nos critérios definidos na metodologia RBI, permitindo assim uma análise estruturada e objectiva de um sistema, por forma a identificar os componentes mais críticos, definindo as tarefas de inspecção e manutenção e a frequência de realização destas.

Esta metodologia consiste em oito módulos, os quais permitem, em primeiro lugar, conhecer o sistema a analisar, criando a sua fronteira em relação a todo o sistema, e determinar os critérios de funcionamento. Após a determinação destes limites, recolhe-se toda a informação possível sobre o sistema, equipamentos e componentes. Seguidamente, procura-se definir quais os modos de falha mais críticos, realizando uma análise de risco

qualitativa, procedendo-se posteriormente a uma análise quantitativa dos mesmos. Esta etapa é realizada recorrendo a algumas ferramentas, tais como: análises *Hazard and Operability studies* (HAZOP), *Failure Mode, Effects and Criticality Analysis* (FME(C)A), Árvores de Falha (FTA), entre outras. Assim, utilizando as ferramentas anteriormente apresentadas pode-se realizar uma análise dos dados de falha. Posteriormente, efectua-se a optimização financeira da classificação do risco dos componentes e o tempo em que se devem realizar as tarefas, sendo este módulo o coração da análise. Depois de prioritizar os componentes no tempo e seleccionar aqueles que necessitam de uma atenção imediata, foca-se a atenção sobre a estratégia de inspecção para esses componentes. Por fim, realizar uma análise de sensibilidade, para determinar se os dados utilizados no modelo de decisão estão suficientemente bem definidos para suportar a análise efectuada. Com a aplicação desta metodologia, espera-se: aumentar a cobertura dos equipamentos de maior risco com os recursos disponíveis; garantir que o risco seja reduzido a valores razoavelmente praticáveis; optimizar o calendário de inspecção e manutenção; identificar e usar as técnicas mais apropriadas de inspecção e manutenção; adequar o esforço necessário e suficiente aos equipamentos de menor risco.

Esta metodologia foi aplicada aos equipamentos dinâmicos existentes na Unidade 1200 "*Unifining*" da Fábrica de combustíveis (FCO), na Refinaria do Porto da Petrogal. Devido à insuficiência de dados verificados para realizar este estudo, utilizaram-se valores para as taxas de falha retirados de base de dados disponíveis, de forma a poder fornecer um ponto de partida numa primeira abordagem. No futuro, espera-se reajustar os valores com os novos dados obtidos na Refinaria.

1.1 Objectivos

Este trabalho apresenta os seguintes objectivos:

- Desenvolver uma metodologia de análise de equipamentos que permita, de forma estruturada e objectiva, conhecer os subsistemas e componentes críticos de um sistema, e estabelecer as tarefas de inspecção e manutenção e respectivas frequências adequadas aos modos de falha críticos desses componentes;
- Proceder à sua aplicação e validação, implementando-a nos equipamentos dinâmicos da Unidade 1200 "*Unifining*" da FCO, na Refinaria do Porto da Petrogal;
- Utilizar dados de taxas de falha retirados da base de dados, por forma a validar a sua utilização na metodologia desenvolvida e verificar a sua aplicabilidade neste tipo de equipamentos, através da sua comparação com a experiência do pessoal da área de Inspecção da Refinaria do Porto da Petrogal;
- Demonstrar os níveis possíveis da profundidade da análise realizada, para se determinar a relação/precisão da análise *vs.* custo, indicada no caso da Refinaria do Porto da Petrogal.

1.2 Desenvolvimento do trabalho

Neste primeiro capítulo, enquadra-se o desenvolvimento da metodologia da análise de equipamentos ao nível da inspecção e manutenção. Descreve-se a forma como foi desenvolvido o trabalho e define-se os seus objectivos.

No segundo capítulo, procede-se a uma breve descrição do conceito de Manutenção. São descritas as estratégias de Manutenção e, em alguns casos, são representados os diagramas funcionais dos modelos. São igualmente apresentados os tipos de Manutenção existente. No caso da Manutenção Correctiva (CM), é feita uma classificação quanto ao tipo de reparação efectuada e a evolução da CM até aos dias de hoje, apresentando exemplos de aplicações possíveis. No que concerne o caso da Manutenção Preventiva (PM), é feita uma classificação das categorias quanto ao tipo de Manutenção empregue, e são apresentados também alguns exemplos de técnicas de inspecção a aplicar, sendo representada uma árvore de decisão para a escolha do tipo de Manutenção a utilizar. Por fim, é abordado o papel e importância da Fiabilidade, Manutenção, Manutibilidade e Qualidade nas indústrias hoje em dia.

No terceiro capítulo, pretende-se sumariamente definir o conceito RBI. Inicia-se com uma breve apresentação da definição de RBI. Seguidamente é descrito o sistema RBI, que inclui as actividades de inspecção, recolha de dados, actualização e melhoria contínua do sistema. É também apresentado o significado do método *Fitness-for-service* (FFS). De seguida , procede-se à demonstração da metodologia RBI como uma ferramenta de melhoria contínua e de gestão integrada. Faz-se ainda referência à definição de risco e aos princípios de aceitação do risco presentes na norma NP EN 50126. Posteriormente, é demonstrada a flexibilidade e a integridade mecânica na aplicação da metodologia. Por fim, é apresentado um programa sugerido pela ASME para implementação e desenvolvimento da metodologia.

No quarto capítulo, está descrita a metodologia de análise desenvolvida neste trabalho, e as suas etapas, sendo possível verificar quais os métodos e hipóteses utilizadas em cada uma delas.

No quinto, aplica-se a metodologia desenvolvida a um caso prático, os equipamentos dinâmicos da Unidade 1200 "*Unifining*", sendo descritas: a constituição e os princípios de funcionamento dos equipamentos dinâmicos existentes na Unidade, as diferentes etapas e os resultados da metodologia aplicada a esses equipamentos. Utilizou-se, sempre que possível , os valores obtidos na Refinaria procedendo-se à mesma análise com os valores obtidos através de uma base de dados.

No sexto capítulo, discutem-se os resultados obtidos no capítulo anterior, efectuando-se primeiramente a identificação dos aspectos negativos na utilização dos valores obtidos da Refinaria e dos obtidos através da base de dados. Seguidamente, procede-se à comparação dos valores das taxas de falha e dos modos de falha críticos obtidos através dos dados da

Refinaria com os da base de dados. Por fim, demonstra-se as vantagens desta metodologia, tanto na aplicação do programa de manutenção, como no programa de inspecção.

No sétimo capítulo, apresenta-se as conclusões gerais deste trabalho, avaliando assim a metodologia da análise desenvolvida, a aplicabilidade da base de dados a estes equipamentos e a vantagem económica na aplicação da mesma aos equipamentos dinâmicos da Unidade 1200.

Finalmente, no oitavo, sugere-se uma lista de trabalhos futuros que permitam complementar a metodologia desenvolvida e torná-la mais adequada a uma aplicação mais ampla na Refinaria.

2 Manutenção

Manutenção é a combinação das acções de gestão, técnicas e económicas, aplicadas aos bens para optimização dos seus ciclos de vida, entendendo-se por bem o produto concebido para assegurar uma determinada função. A manutenção traduz-se, portanto, no conjunto de reparações e recondicionamentos necessários para compensar a deterioração e os desgastes provocados pelo movimento relativo das peças, pela oxidação ou pela perda de função dos equipamentos, materiais ou seus elementos protectores. A boa manutenção consiste em assegurar todas estas operações a um custo global optimizado (Cabral, 2004).

Com o decorrer dos anos, tem havido uma passagem da manutenção baseada no tempo para uma manutenção baseada na condição. A Figura 1 representa cronologicamente a evolução da manutenção (Junior, 2006).

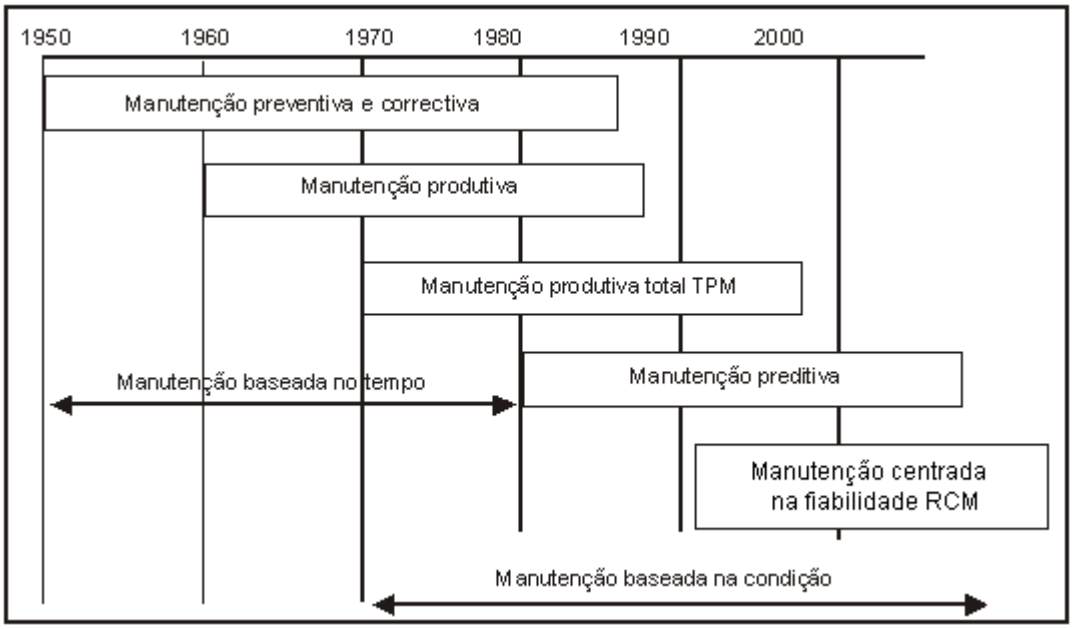


Figura 1 - Evolução da manutenção.

Esta evolução teve sempre como base o aumento da disponibilidade e fiabilidade, entre outros, e a redução dos custos para a empresa. Na Figura 2, é possível verificar os resultados, em termos de custos, fiabilidade, entre outros, obtidos com cada tipo de manutenção.

Cada vez mais as empresas procuram sistemas produtivos que desempenhem a função requerida, com níveis de performance desejados e com LCC previsíveis. No entanto, devido a avarias inesperadas dos sistemas produtivos, provocadas por falhas provenientes da fase de projecto, por um apoio deficiente no seu ambiente operativo, ou ainda pela sua utilização

incorrecta, estes não atingem os requisitos para os quais foram concebidos, conduzindo a custos inesperados e à insatisfação das empresas que os adquirem (Markeset & Kumar, 2003).

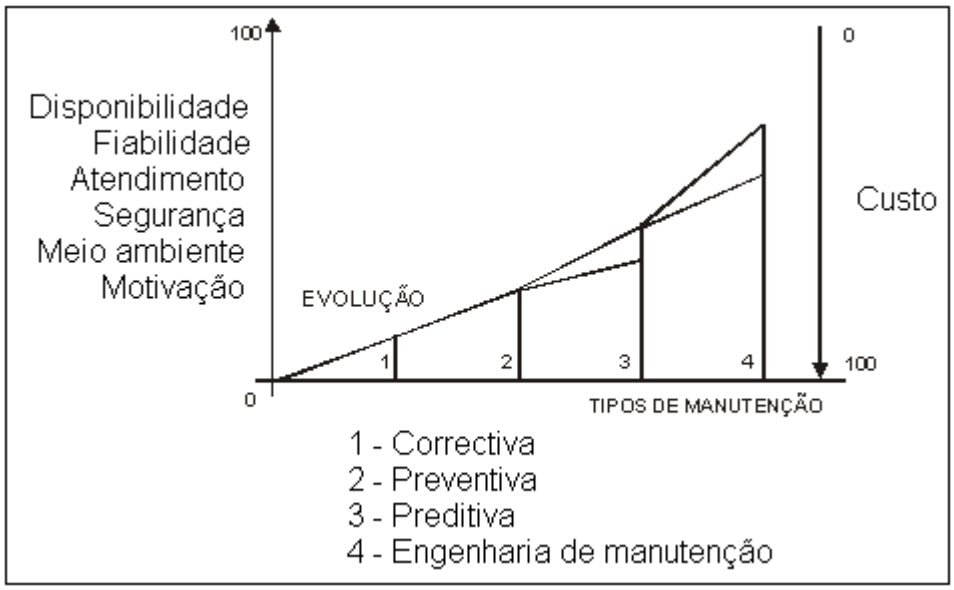


Figura 2 - Tipo de manutenção *vs.* resultados.

Um equipamento começa a envelhecer a partir do momento em que é construído. As tensões cíclicas causam folgas e fadiga; as altas temperaturas causam fluência; a erosão e corrosão causam enfraquecimento. A idade em muitos aspectos degrada, deteriora e destrói. A manutenção gere o processo de envelhecimento, a realização de inspecções e testes detectam a deterioração e a reparação e restauração limitam os danos ou restauram o nível de danos para os níveis que existiam originalmente. No entanto, componentes com diferentes idades em diferentes formas têm diferentes taxas de falha. Componentes com diferentes falhas têm diferentes consequências (ASME, 2003).

A gestão do desempenho de um equipamento é uma das exigências básicas de uma operação eficaz. Mas uma gestão bem orientada pode não ser tão simples como parece. A aferição de valores é importante na melhoria contínua da manutenção e na identificação e resolução prioritárias dos conflitos. Pode realizar-se uma abordagem macro ou micro. No nível macro, este inclui the *Balanced Scorecard*, enquanto ao nível micro, tem-se como exemplo o processo histórico de alinhamento de um veio. A aferição dos valores de desempenho é realizada tendo em conta os cinco grupos seguintes: produtividade, organização, eficiência, custos e qualidade. O truque consiste em saber como utilizar os resultados para efectuar as acções necessárias. Desde que a optimização da manutenção é alvo da gestão executiva e das salas de reuniões, é vital que os resultados reflitam a equação básica dos negócios "*Maintenance is a business process turning inputs into useable outputs*", podendo ser representada pelo diagrama da Figura 3 (Campbell & Jardine, 2001).

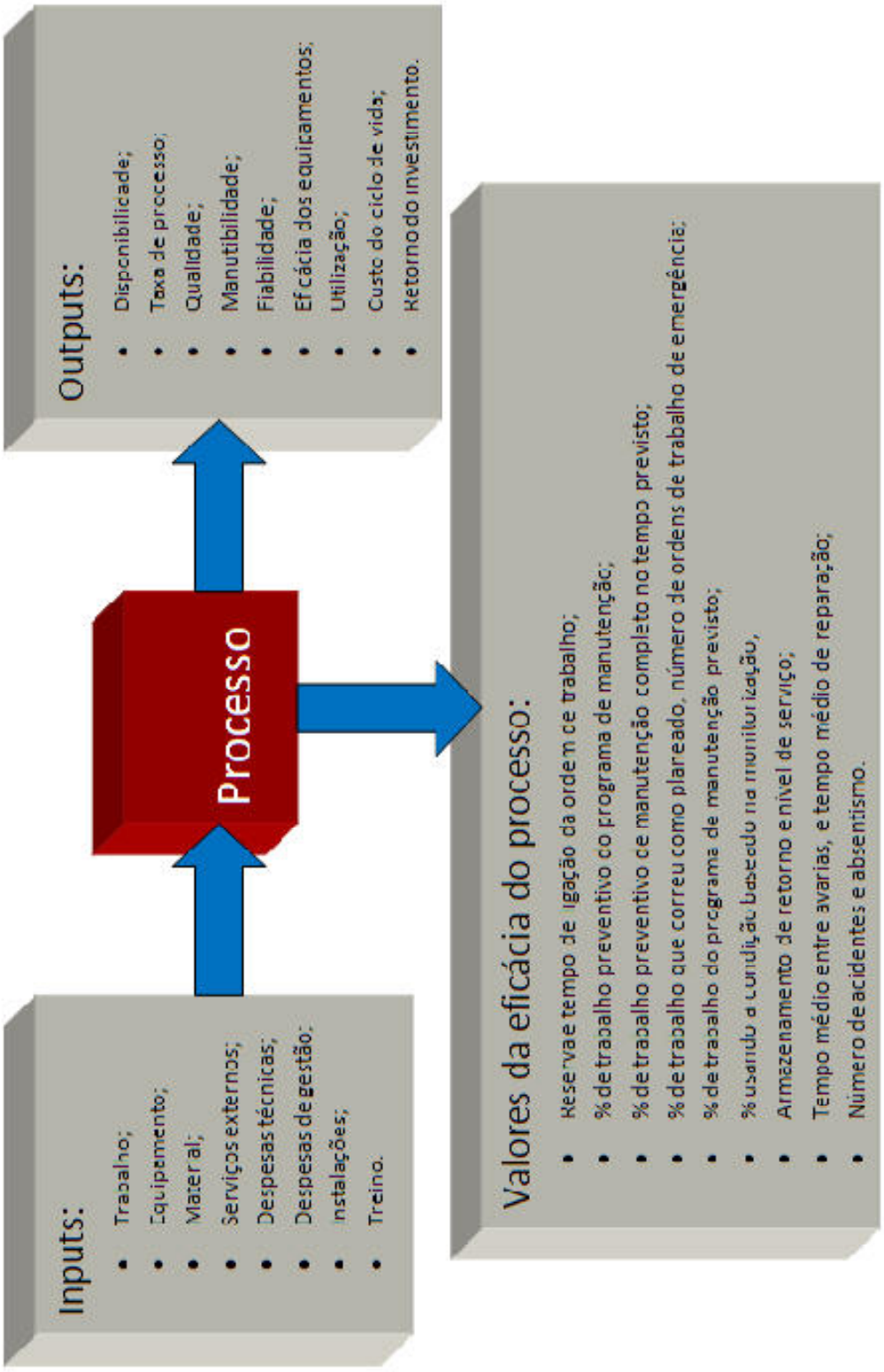


Figura 3- Manutenção como negócio de processo.

O desempenho de um produto ou sistema não depende apenas da sua concepção e funcionamento, mas também do serviço técnico e da manutenção do bem durante o seu tempo de vida útil. Um bom desempenho ao longo de um prolongado período de tempo exige um serviço adequado e de forma regular e uma reparação adequada, substituição de peças ou componentes avariados. Quando não se encontram em serviço, é necessário uma armazenagem adequada (Blischke & Murthy, 2003).

O conceito manutenção tem evoluído ao longo dos tempos assim como tem evoluído o que se deve entender, dentro da empresa, como função "serviço de manutenção". A evolução tem-se dado no sentido de aumentar o seu âmbito e diversificar as estratégias de intervenção. Como já dizia Einstein:

"*The problems we face today cannot be solved at the same level of thinking we were at, when we created them.*" (Albert Einstein).



Figura 4 - Evolução do pessoal da manutenção.

Hoje em dia, na indústria em geral, o objectivo principal será o de tentar combater aqueles que se podem considerar, na generalidade, os oito principais desperdícios dos equipamentos (Fernandes, 2007):

- **Falha do equipamento –** paragens por avaria dos equipamentos, perdas de função e/ou deterioração de função;
- ***Setups* e ajustes –** grande parte do tempo é despendido em ajustes e afinações, até sair a primeira peça OK;
- **Troca de ferramentas –** troca de elementos de desgaste rápido, especialmente em equipamentos de maquinação;
- **Arranques –** muito tempo despendido até que se consiga estabilidade no processo;
- **Micro-paragens –** paragens curtas, nem sempre contabilizadas ou registadas, inferiores a 5 minutos;

- **Velocidade –** diferença entre a velocidade planeada e a velocidade real a que o processo está a funcionar;
- **Defeitos e retrabalhos –** produtos que não cumprem as especificações e o tempo utilizado para retrabalhar o produto não conforme;
- **Paragens planeadas –** perdas associadas a paragens planeadas para manutenção periódica e/ou inspecções.

2.1 Estratégias de manutenção

A necessidade de ter sistemas cada vez mais eficazes e seguros levou ao desenvolvimento, no contexto operacional, de estratégias de manutenção que conduzem à melhoria contínua da disponibilidade e segurança operacional dos sistemas, com custos controlados (Ferreira, 2000).

Assim, surgiram várias estratégias de manutenção, salientando-se as seguintes:

- Terotecnologia;
- EUT, The Eindhoven University of Technology model;
- TQMain, Total Quality Maintenance;
- TPM, Total Productive Maintenance;
- RCM, Reliability-Centred Maintenance;
- RAMS, Reliability, Availability, Maintainability and Safety;
- RBI, Risk Based in Inspection.

2.1.1 Terotecnologia

2.1.1.1 Modelo de base da Terotecnologia

A terotecnologia foi apresentada em 1970 no Reino Unido, após o trabalho desenvolvido pelo governo britânico sobre a manutenção. É uma metodologia contextualmente interessante porque introduziu o conceito de *feedback* da informação, conceito este proveniente das teorias da qualidade.

Na Figura 5, está esquematizado o conceito básico desta metodologia, a qual se baseia na recolha de dados, análise e optimização das tarefas de manutenção. Estas funções devem ser efectuadas na fase de operação dos sistemas para permitir o desenvolvimento de novos e melhores sistemas produtivos bem como uma manutenção optimizada dos existentes e dos novos, dando ainda ênfase à necessidade de utilização de FME(C)A´s, à realização de testes aos novos projectos e à formação e treino dos operadores dos sistemas produtivos e seus técnicos de manutenção (Sherwin, 2000).

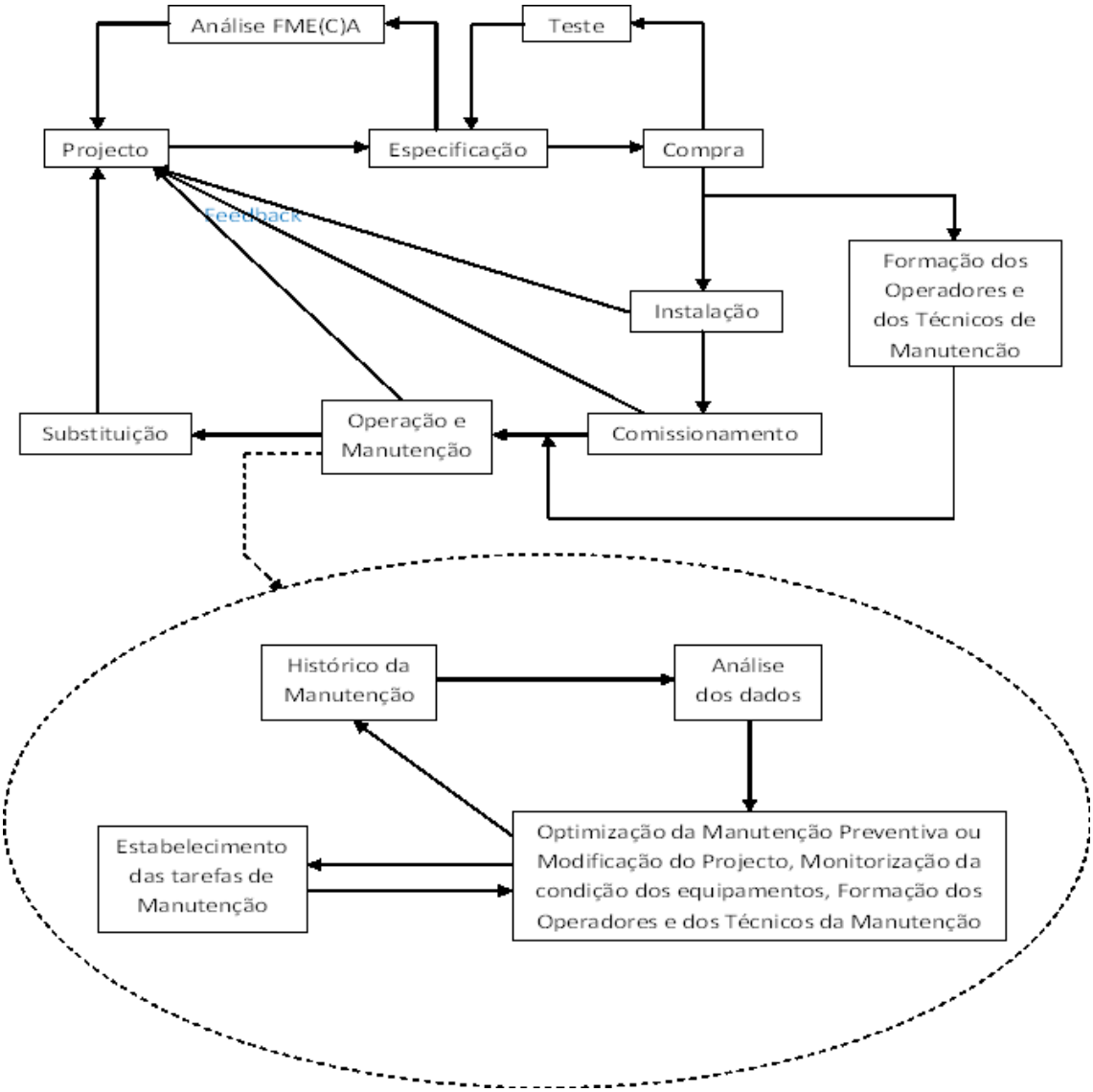


Figura 5 - Terotecnologia - Conceito de Base.

2.1.1.1 *Modelo avançado da Terotecnologia*

Neste modelo, é introduzido como indicador para a avaliação de actividade da manutenção, o LCC. Este permite mostrar que a manutenção pode ser vista como uma contribuição para os lucros da empresa e não só para as despesas. Para evidenciar esta ideia, é importante considerar os efeitos que uma manutenção adequada produz na qualidade do produto e na sua entrega no prazo estabelecido, o que por sua vez possibilita a manutenção da quota de mercado da empresa ou o seu aumento, conduzindo assim a margens de lucro mais elevadas. Este lucro contribui para a actualização das instalações e dos equipamentos da empresa, colocando-a em vantagem comercial (Sherwin, 2000).

2.1.2 EUT (The Eindhoven University of Technology model)

Este modelo foi criado por Geraerds e seus colegas, nomeadamente Gits e Coetzee, em 1997. Foi criado para preencher o vazio deixado pelos modelos da Terotecnologia, que segundo Geraerds, obrigavam os engenheiros e técnicos de manutenção a alargarem demasiado as suas funções, acabando por relegar para segundo plano os processos de organização da manutenção. No entanto, neste modelo considera-se que é necessário alargar as funções dos engenheiros e técnicos da manutenção, mas dando prioridade a que estes realizem as funções "tradicionais", particularmente a programação da manutenção, realizando-a de uma forma mais científica. Para programar melhor uma tarefa de manutenção, é necessário recolher e analisar dados, utilizando os modelos apropriados de investigação operacional para optimizar o tipo de manutenção a efectuar e o cálculo dos intervalos a que deve ser realizada (Sherwin, 2000).

O modelo descreve as subfunções da função manutenção e as suas ligações. Este estabelece que o Departamento de Manutenção deve ser assistido pelos fabricantes dos equipamentos e pelas empresas de manutenção subcontratadas. Assim, a manutenção é vista como conjunto de processos interligados, em que o seu output é afectado pelo planeamento e controlo, sendo uma metodologia essencialmente baseada em conceitos de engenharia (Sherwin, 2000).

Na Figura 6, pode observar-se o modelo EUT com as diferentes inter-relações entre as 14 subfunções que contribuem para a função de gestão da manutenção (Sherwin, 2000).

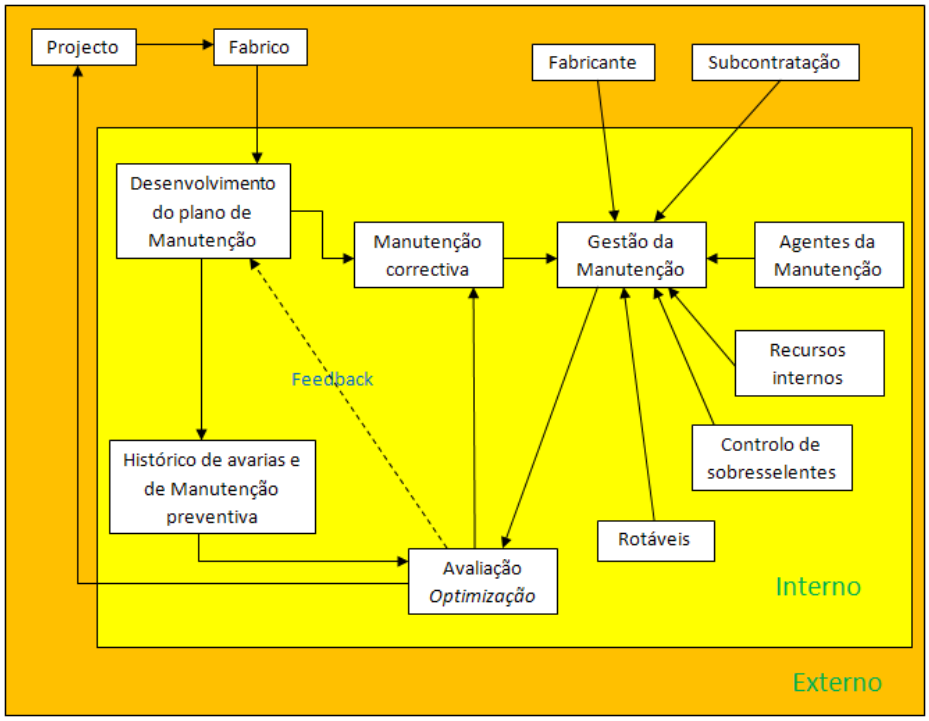


Figura 6 - Modelo EUT.

Este modelo permite, através da análise de contexto e condições operativas dos sistemas produtivos, alterar os planos de PM propostos pelos seus fabricantes (Ferreira, 2000).

2.1.3 TQMain (Total Quality Maintenance)

Este modelo foi desenvolvido por Basim Al-Najjar em 1996. É uma metodologia baseada no ciclo *Deming* para a qualidade, o ciclo PDCA (Plan-Do-Check-Act), podendo ser utilizado para o melhoramento de qualquer sistema técnico ou de gestão (Sherwin, 2000).

O desenvolvimento deste modelo prende-se com o facto dos custos de manutenção sofrerem, nos últimos anos, um aumento superior ao da inflação e terem aumentado na percentagem dos custos globais da empresa. Assim, torna-se desejável utilizar o máximo possível a vida útil dos componentes, maximizando desta forma a disponibilidade e minimizando as perdas de produção e de qualidade devido a paragens, ao invés de basear a política de manutenção em distribuições de falha ao longo do tempo. Como o custo de monitorização tem descido ao longo do período em que os custos de manutenção têm aumentado, este modelo defende o aumento da manutenção condicionada, apostando na monitorização dos equipamentos. Defende ainda que a manutenção deve ser preparada e programada em conjunto com a produção (Sherwin, 2000).

Este modelo aposta assim, na recolha de dados dos diferentes equipamentos, colocando-os numa base de dados comum, apelando assim a tecnologias de informação. Na Figura 7, pode observar-se o funcionamento deste modelo (Sherwin, 2000).

O indicador que avalia o sucesso do TQMain é o *Overall Process Effectiveness* (OPE), que é uma versão modificada do *Overall Equipment Effectiveness* (OEE) utilizado no TPM. Este indicador permite o cálculo da eficiência de todo o processo e não apenas de uma máquina, como acontece com o OEE, reconhecendo ainda que máquinas iguais podem ter OPE´s diferentes. Assim, o OPE não só traduz as propriedades de equipamentos individuais, como também a capacidade que os sistemas produtivos têm de realizar um determinado produto ou de fornecerem um serviço (Sherwin, 2000).

O OPE é definido pela seguinte expressão:

$$OPE = \left(1 - \frac{N_S}{\mu T}\right) \times \left[1 - \frac{\left(\frac{n_m}{\mu_m + t_r}\right)}{t_0}\right] \times \left[1 - \frac{(n_f + n_c + n_s)}{n}\right]$$

Equação 1 - Definição de OPE

em que:

N_S – número de paragens
μ – taxa de reparações
T – tempo de carregamento de sistema
n_m – número de pequenas paragens

μ_m – taxa de pequenas reparações
t_r – tempo perdido devido à redução de velocidade de operação
t_0 – tempo de operação
n_f – número de defeitos que aparecem imediatamente a seguir às paragens
n_c – número de defeitos que aparecem durante o funcionamento normal
n_s – número de defeitos atribuídos a falha no controlo da qualidade
n – número total de peças fabricadas

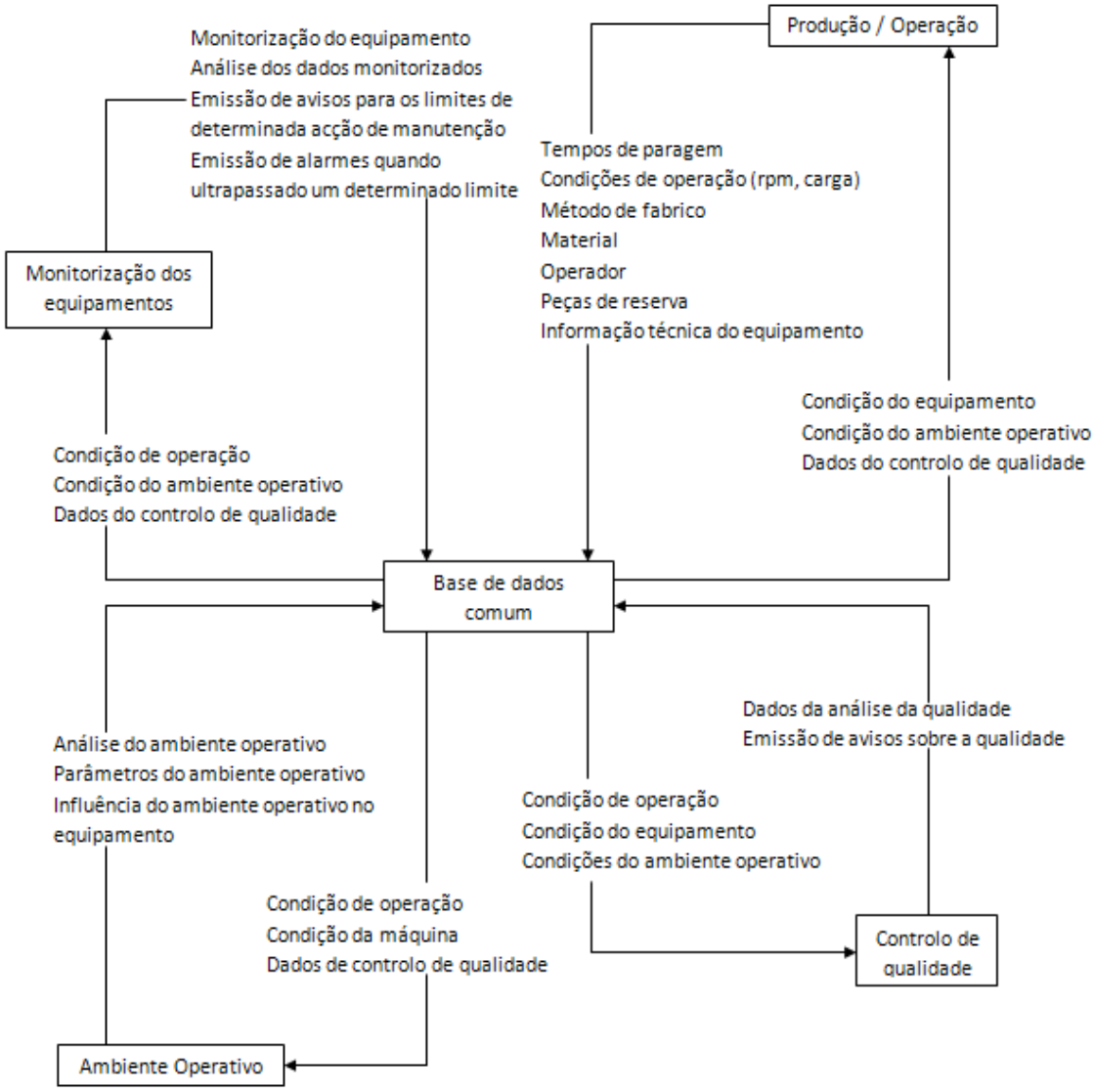


Figura 7 - Modelo TQMain.

2.1.4 TPM (Total Productive Maintenance)

Esta metodologia foi desenvolvida para tentar resolver a maior parte dos problemas colocados pela produção *Just in time* (JIT) e encontra-se documentada no livro de Nakajima (1988). Assenta no pressuposto que os operadores devem ser consciencializados para a

realização de cuidados primários nos equipamentos, tais como limpeza, lubrificação e eliminação de folgas, responsáveis pela degradação acelerada dos equipamentos, para que os equipamentos operem convenientemente,tentando, desta forma, incutir aos operadores a importância da manutenção, principalmente da auto-manutenção. No entanto, o TPM não exclui a PM, embora não defina nenhuma estratégia específica para permitir o seu sentido planeamento (Sherwin, 2000).

O TPM apresenta como indicador o OEE, definido como sendo o produto da disponibilidade com o desempenho da qualidade e com a velocidade de produção. Todavia, não se trata de uma análise completa porque não considera os custos nem os lucros, nem introduz conceitos de fiabilidade dos sistemas, não sendo, por isso, um indicador completo que possa ser utilizado para comparar os diferentes equipamentos e sistemas, ou a deterioração dos sistemas ao longo do tempo (Sherwin, 2000).

O OEE é definido pela seguinte expressão:

$$OEE = A \times PE \times Q$$

Equação 2 - Definição de OEE

em que:

A – disponibilidade da máquina
PE – efeciência do desempenho
Q – refere-se à taxa de qualidade

O TPM é baseado na teoria dos 5 S (Seiri "Organização"; Seiton "Sistematização"; Seiso "Limpeza"; Seiketsu "Standartização"; Shitsuke "Disciplina"). Esta metodologia é apoiada nos seguintes pilares, como se pode constactar na Figura 8.

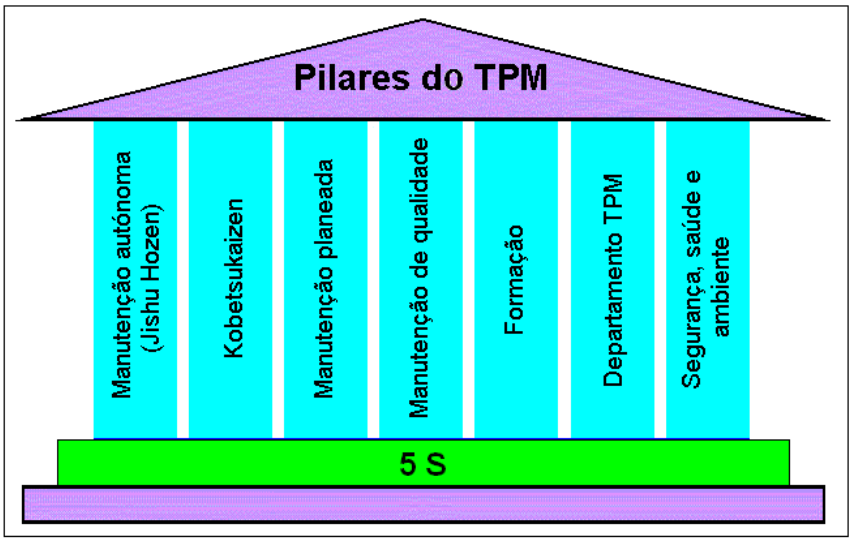


Figura 8 – Os oito pilares do TPM.

2.1.5 RCM (Reliability-Centered Maintenance)

Esta metodologia está bem estabelecida como uma técnica pré-eminente para a manutenção programada. Tem como finalidade estabelecer um calendário de programas de manutenção. Durante anos, foi demonstrado ser eficaz em inúmeras indústrias, como na aviação civil e militar, embarcações militares e armação naval, instalações eléctricas e indústrias químicas. Cada vez mais, o RCM está a ser seleccionado quando a fiabilidade é importante, por razões de segurança ou ambientais, ou simplesmente para manter uma unidade em funcionamento com a sua capacidade máxima. A publicação feita pelo Departamento da Defesa dos Estados Unidos na SAE Standard JA1011 "Evaluation Criteria for Reliability-Centered Maintenance (RCM) Processes", delineia os critérios que se devem reunir para que o processo seja chamado RCM. Esta norma determina, através de sete questões específicas, a qualificação de um processo para a implementação de uma análise RCM, embora não especifique o processo em si (Campbell & Jardine, 2001):

1. Quais são as funções do sistema e os parâmetros de performance a elas associados?
2. De que forma o sistema pode falhar no cumprimento dessas funções?
3. O que causa cada falha funcional?
4. O que acontece quando cada falha ocorre?
5. Quais são as consequências da ocorrência de cada uma dessas falhas?
6. O que pode ser feito para detectar ou evitar a ocorrência de cada falha?
7. O que deve ser feito se não se encontrar uma tarefa de manutenção adequada?

John Moubray define RCM da seguinte forma: "*é um processo utilizado para determinar o que deve ser feito, para assegurar que cada bem físico continue a realizar a função requerida no contexto operativo em que se encontra"* (Moubray, 2004).

É possível apresentar o RCM como um processo que permite analisar sistematicamente um sistema produtivo de forma a compreender as suas funções, os seus modos de falha, a escolha adequada das tarefas de manutenção e a sua programação, para assim evitar a ocorrência desses modos de falha ou detectá-los antes de ocorrerem. É necessário ainda determinar os pressupostos das peças de reserva e optimizar periodicamente a manutenção ao longo do tempo, com o objectivo de modificar e melhorar a aplicação da metologia. Deste modo, o RCM apresenta como principal objectivo atingir uma determinada fiabilidade para todos os modos operativos do sistema (Moubray, 2004).

Se uma parte ou conjunto do tempo subjacente da distribuição da falha é conhecido, então a probabilidade de falha (POF) pode ser prevista em qualquer momento. Em alguns casos, os itens apresentam uma distribuição exponencial, isto é, uma taxa de falha constante. Nesses casos, a substituição de um bem antigo por um novo tem exactamente a mesma POF no próximo instante de tempo como o antigo. Por conseguinte, alterar esse bem em algum dos intervalos prescritos, não tem qualquer efeito sobre a POF, fazendo mais sentido deixar o bem a funcionar até falhar. Se isso não for possível, por exemplo, por motivos de segurança, então

é necessário re-projectá-lo. Conforme é demonstrado na Figura 9, apenas uma pequena percentagem de itens pode ser alvo da PM (Department Of The Army, 2006).

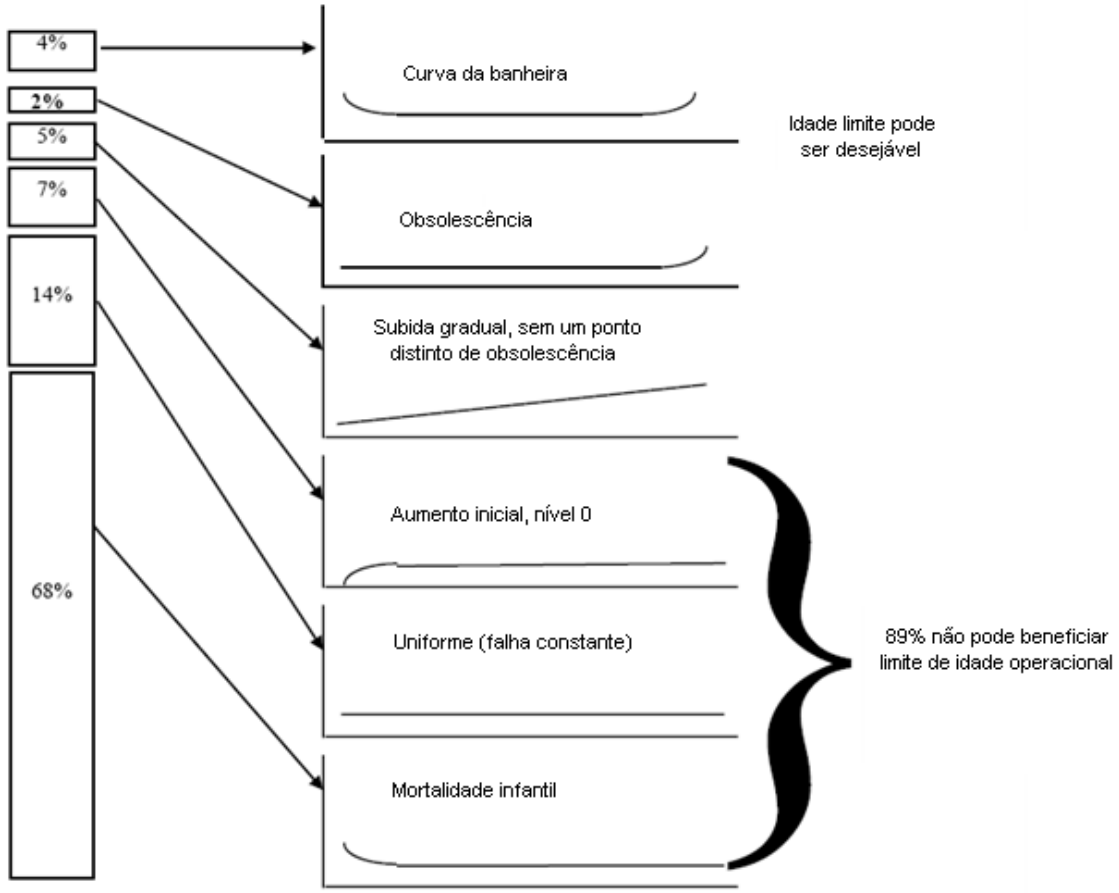


Figura 9 - Distribuições possíveis para os componentes.

Estas conclusões contrariam a ideia de que existe sempre uma relação entre a fiabilidade e a idade de funcionamento. A não ser que exista um modo de avaria dominante relacionado com a idade, comprova-se que tal não é verdade, o que leva a pensar que a PM sistemática não é o melhor método, pois pode introduzir avarias de juventude em sistemas que estavam estáveis anteriormente (Ferreira L. A., 1998).

A implementação do RCM, depois de devidamente documentada, permite de uma forma eficaz e eficiente, assegurar a operação de um sistema produtivo de forma fiável e segura (American Bureau of Shipping, 2004).

2.1.6 RAMS (Reliability, Availability, Maintainability and Safety)

A gestão de manutenção é um processo de melhoria contínua da manutenção e funcionamento, através da utilização de indicadores que permitem medir o nível de desempenho adequado e iniciar a melhoria quando o desempenho especificado não é

cumprido. Este modelo de controlo e melhoria da Fiabilidade, Disponibilidade, Manutibilidade e Segurança é denominado por RAMS. As melhorias são efectuadas em áreas tais como: fiabilidade dos equipamentos, disponibilidade da produção, manutenção do património e segurança das pessoas, ambiente e custos. Na Figura 10, é possível observar a integração do processo RAMS no ciclo de vida dos sistemas.

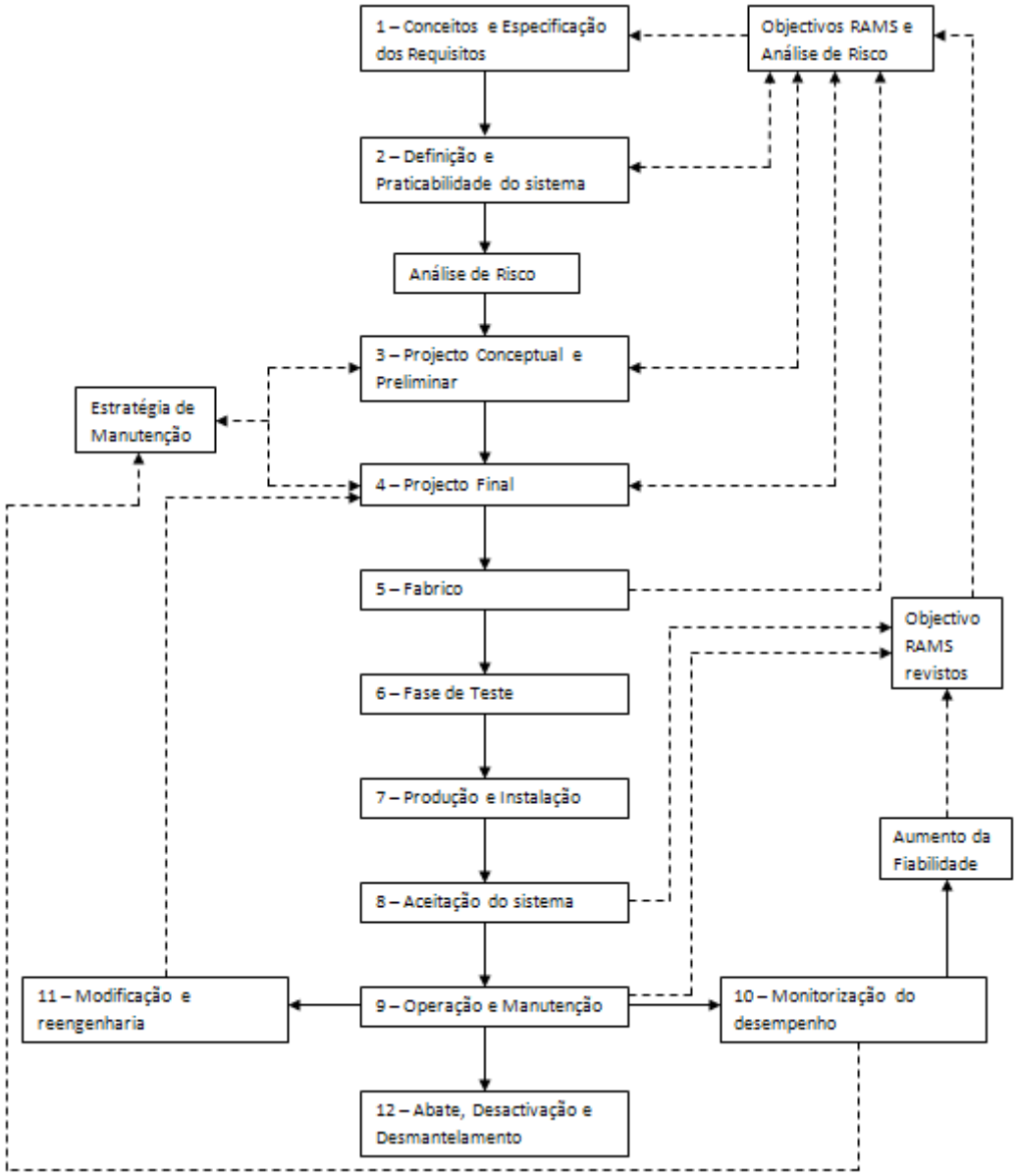


Figura 10 - Diagrama RAMS para o ciclo de vida dos sistemas.

Segundo a NP EN 50126, "*o RAMS pode ser caracterizado como sendo um indicador qualitativo e quantitativo do grau de fiabilidade em que o sistema, ou os subsistemas e componentes que integram o sistema, possam funcionar como requerido, estando ao mesmo tempo disponível e sendo seguro*" (NP EN 50126, 2000).

O objectivo principal do RAMS é fornecer uma ferramenta de gestão com a qual se possa coordenar e assegurar todo o ciclo de vida de um sistema. No entanto, apresenta outros objectivos tais como colocar ao dispor um conjunto de técnicas analíticas para a aferição da performance e da segurança do sistema produtivo (Mann, 2000).

Estes objectivos são atingidos recorrendo a ferramentas: FME(C)A, FTA, análise de árvores de eventos (ETA), entre outros; permitindo assim, definir o sistema produtivo e fornecer posteriormente a assistência necessária, nomeadamente ao nível da manutenção (Markeset & Kumar, 2003).

A integração do processo RAMS no ciclo de vida dos sistemas produtivos possibilita a construção de sistemas mais seguros, quer para o operador e técnicos de manutenção, quer a nível ambiental, mais fiáveis, mais disponíveis e com operações de manutenção mais curtas e mais seguras, contribuindo assim, para que o sistema tenha LCC inferior (Morais, Mota, & Ferreira, 2004).

2.1.7 RBI (Risk-Based Inspection)

O American Petroleum Institute (API) iniciou o projecto RBI em Maio de 1993, com um grupo de indústrias patrocinadoras, com o objectivo de desenvolver métodos práticos para RBI. Este grupo de patrocinadores foi organizado e administrado pela API e inclui os seguintes membros: Amoco; ARCO; Ashland; BP; Chevron; CITGO; Conoco; Dow Chemical; DNO Heather; DSM Services; Equistar Exxon; Fina; Koch; Marathon; Mobil; Petro-Canada; Phillips; Saudi Aramco; Shell; Sun; Texaco; e UNOCAL (API RP 581, 2000).

O RBI é um método de gestão de risco utilizado com o objectivo de prioritizar e gerir os esforços de um programa de inspecção. Numa fábrica em funcionamento, uma percentagem relativamente elevada do risco está associada a uma pequena percentagem de itens do equipamento. O RBI permite alocar os recursos de inspecção e de manutenção para proporcionar um nível de cobertura sobre os itens de alto risco, e adequar o esforço aos equipamentos de menor risco (API RP 581, 2000).

Esta metodologia engloba os seguintes campos (API RP 580, 2002):

A. Introdução aos conceitos e princípios RBI para gestão do risco;
B. Secções individuais que descrevem os passos para aplicar estes princípios no âmbito do processo RBI:
    1. Planear a avaliação do risco;
    2. Recolher dados de informação;
    3. Identificar os mecanismos de deterioração e modos de falha;
    4. Avaliar a probabilidade de falha (POF);
    5. Avaliar as consequências da falha (COF);
    6. Determinar, avaliar e gerir o risco;
    7. Gerir o risco com a actividade de inspecção;

8. Realizar outras actividades de mitigação dos riscos;
9. Reavaliar e actualizar;
10. Atribuir papéis, responsabilidade, formação e qualificação;
11. Documentar e conservar os registos.

O resultado esperado com a aplicação do processo RBI deverá ser a ligação do risco com a inspecção adequada ou outras actividades para mitigar e gerir os riscos. O processo RBI é capaz de gerar (API RP 580, 2002):

A. Classificação do risco de todos os equipamentos analisados;
B. Descrição detalhada do plano de inspecção a ser empregue para cada componente do equipamento, incluindo:
    1. Métodos de inspecção que devem ser utilizados;
    2. Extensão da aplicação do método de inspecção;
    3. Calendário de inspecções/teste;
    4. Gestão dos riscos alcançada com a execução do plano de inspecção.
C. Descrição de outras actividade de mitigação do risco;
D. Níveis de risco esperados de todos os equipamentos após o plano de inspecção e outras actividades de mitigação do risco a serem implementadas.

O processo RBI pode ser demostrado por um simples e simplificado diagrama de blocos, apresentado na Figura 11, descrevendo os elementos essenciais de uma análise do planeamento RBI (API RP 580, 2002).

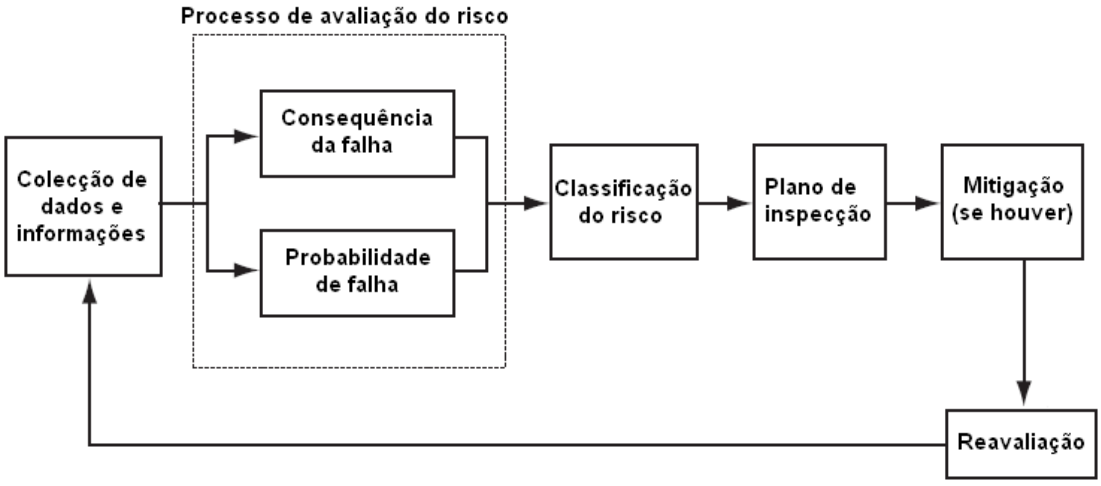


Figura 11 - Planeamento do processo RBI.

2.1.7.1 *Elementos-chave da metodologia*

Os elementos-chave que devem existir em qualquer programa RBI são (API RP 580, 2002):

- Documentos dos sistemas de gestão da manutenção, qualificações do pessoal, actualizações dos requisitos e análise de dados;
- Documentos do método de determinação da POF;
- Documentos do método de determinação das COF;
- Documentos da metodologia de gestão do risco, através de inspecção e outras actividades de mitigação do risco.

2.1.7.2 Benefícios e limitações da metodologia

O principal trabalho de avaliação e gestão da metodologia RBI é criar planos que abordam as formas de gerir o risco de um nível de equipamento. Estes planos visam destacar o risco numa perspectiva de segurança, saúde ou ambiental a partir do ponto de vista económico. Nestes planos, a relação custo/eficácia para as acções de redução do risco são recomendadas, juntamente com o resultado do nível de redução de riscos esperado. A execução desses planos fornece um dos seguintes procedimentos (API RP 580, 2002):

A. Redução global dos riscos para as instalações e equipamentos analisados;
B. Aceitação/compreensão do risco actual.

Esses planos tendem a identificar os equipamentos que "não exigem inspecção" ou qualquer outra forma de actividades de redução do risco, devido ao nível aceitável de risco que lhes é associado. Desta forma, as actividades de inspecção e manutenção podem ser orientadas de modo mais rentável. Isto, muitas vezes, resulta numa redução significativa no valor de dados recolhidos pela inspecção, ajudando a centrar as atenções num conjunto menor de dados, o que resultará numa informação mais precisa. Em alguns casos, para além das reduções dos níveis de risco e melhorias nos processos de segurança, resultará também numa redução de custos, como pode ser visto na Figura 12 (API RP 580, 2002).

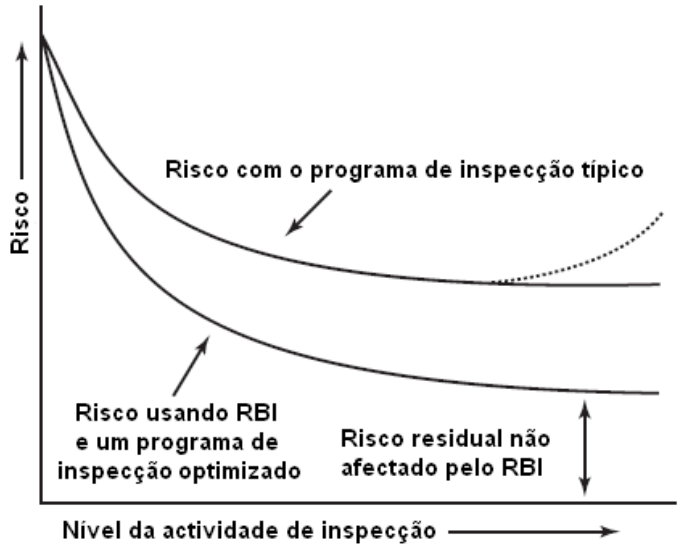


Figura 12 - Gestão do risco utilizando RBI.

A metodologia RBI baseia-se em princípios comprovados de avaliação e gestão de risco. No entanto, não compensa os seguintes aspectos (API RP 580, 2002):

- Informação inexacta ou falta dela;
- Projecto da instalação inadequado ou equipamentos defeituosos na instalação;
- Operação fora dos níveis aceitáveis estabelecidos na concepção;
- Execução não eficaz dos planos;
- Falta de pessoal ou de equipas de trabalho qualificadas;
- Falta de uma boa engenharia ou de boas decisões de operações.

2.2 Tipos de manutenção

Existem dois tipos principais de acção da manutenção. Estes são (Blischke & Murthy, 2003):

- **Manutenção correctiva (CM) –** compreende as acções levadas a cabo para restaurar uma falha de um produto ou sistema para o estado operacional. A acção envolve a reparação ou substituição (por itens novos ou usados) de todas as peças e componentes avariados e necessários para o bom funcionamento do equipamento;
- **Manutenção preventiva (PM) –** estas acções geralmente exigem a paragem do sistema operacional e destinam-se a aumentar a sua duração de vida útil e/ou a sua fiabilidade. Constitui um leque de acções de relativo menor serviço e que exigem uma curta interrupção, como: lubrificação, análises, substituição prevista de peças ou componentes, e assim por diante, até às intervenções de grande porte que exigem uma quantidade significativa de tempo de paragem.

2.2.1 Manutenção correctiva (CM)

As acções da CM são acções não calendarizadas destinadas a restabelecer um sistema que se encontra num estado de falha para o estado operacional. Estas envolvem, quer reparações, quer substituições dos componentes avariados (Blischke & Murthy, 2003).

A CM pode ser dividida em dois grupos:

- Paliativa – aspectos provisórios;
- Curativa – reparações com carácter definitivo.

Na Manutenção Paliativa, a reparação das máquinas é realizada após avaria, sendo sua principal preocupação, recuperar (reparar) as máquinas o mais rápido possível para produzir (reparação efectuada no tempo destinado à produção).

Na Manutenção Curativa, a reparação das máquinas é realizada após avaria. Este método justifica-se quando os custos indirectos da avaria são mínimos e não há problemas de

segurança. Justifica-se ainda quando a empresa adopta uma política de renovação frequente do parque material ou então quando o mesmo é constituído por várias máquinas, em que as eventuais avarias não afectam de forma crítica a produção. Este tipo de manutenção é visto também como complemento residual da PM, pois existem sempre avarias não previsíveis (num sistema normal, pelo menos de 5%) (Ferreira L. A., 1998).

2.2.1.1 Classificação da CM

No caso dos produtos reparáveis, o comportamento de um bem, depois de restabelecido, depende do tipo de reparação efectuada. Vários tipos de acção de reparação podem ser definidos (Blischke & Murthy, 2003):

- **Reparação "Bom-como-novo":** a distribuição do tempo de falha do bem reparado é idêntica à de um novo bem, e é utilizado o modelo para as falhas sucessivas, igual a um processo ordinário de renovação. Na vida real, este tipo de reparação raramente ocorre;
- **Reparação mínima:** o bem que falhou é posto novamente em funcionamento, com a mesma idade que possuía imediatamente antes da falha. Esta ocorre de acordo com a distribuição não homogénea de Poisson, com uma função de intensidade igual à distribuição da taxa de falha do tempo antes da primeira falha. Este tipo de modelo de rectificação é apropriado quando a falha do bem é causada pela avaria de um de vários componentes que poderiam falhar e apenas esse é substituído por um novo;
- **Reparação "Diferente-de-novo" (I):** às vezes, quando um bem falha, não só se substitui o componente que avariou, como também outros que se deterioraram suficientemente. Estas intervenções de grande porte resultam em $F_1(x)$, função da distribuição da POF de todos os itens reparados, sendo diferente de F(x), função da distribuição da POF de um novo bem. O *Mean Time To Failure* (MTTF) de um bem reparado é assumido como menor do que o de um bem novo. Neste caso, os sucessivos fracassos são modelados por um processo de renovação modificado;
- **Reparação "Diferente-de-novo" (II):** a distribuição das falhas de um bem reparado, depende do número de vezes que esse bem já foi reparado. Esta situação pode ser modelada assumindo que a função de distribuição após "n" reparações ($n \geq 1$) é $F_n(x)$ com um MTTF μ_n decrescente com o aumento do valor "n".

2.2.1.2 Evolução da CM

Com a evolução da CM, actualmente é possível (Ferreira L. A., 1998):

- Analisar as causas da avaria;
- Reparar;

- Corrigir de modo a eliminar a causa da avaria ou minimizar as suas consequências;
- Memorizar os dados relativos à intervenção (histórico);
- Evoluir para um Planeamento da Manutenção.

2.2.2 Manutenção preventiva (PM)

Este tipo de manutenção pressupõe a intervenção do serviço de Manutenção num momento devidamente preparado e programado antes da data provável de aparecimento de uma avaria. Objectivos visados pela PM (Ferreira L. A., 1998):

- Aumentar a fiabilidade de um equipamento, reduzindo as avarias em serviço: redução de custo devido a avarias, aumento da disponibilidade;
- Aumentar a duração de vida eficaz de um equipamento;
- Melhorar o planeamento dos trabalhos, e consequentemente a relação com a produção;
- Reduzir e regularizar a carga de trabalho;
- Facilitar a gestão de stocks (consumos previstos);
- Assegurar a segurança das intervenções (menos improviso);
- Globalmente, reduzir os acontecimentos fortuitos, melhorar o clima de relações humanas (uma avaria imprevista é sempre causa de tensões).

A PM pode ser dividida em três grupos:

- Sistemática – planeada;
- Condicional – preditiva;
- Inspecção – ronda.

Na Manutenção Sistemática, assume-se que as falhas ocorrem segundo o padrão da curva da banheira (Anexo I). Portanto, os trabalhos são planeados com periodicidade ou número de unidades de utilização, tais que, os vários constituintes se mantêm a funcionar na parte inferior da curva: a intervalos de tempo "T" substItui-se ou recondiciona-se o componente, independentemente de aparentar um bom estado de funcionamento. O sucesso depende do rigor com que é possível (quando é) prever o período durante o qual o componente trabalhará sem falhar (Cabral, 2004).

Na Manutenção Condicional recorre-se a meios de vigilância sistemáticos para determinar qual a oportunidade certa para intervir num determinado componente, a fim de evitar que falhe. Se ele funcionar bem, "não se mexe", apenas se intervém quando houver indícios de mau funcionamento ou aproximação de avaria. O sucesso depende da eficácia dos recursos e da metodologia para vigiar o estado do equipamento (Cabral, 2004).

Este tipo de manutenção, é mais utilizada para equipamentos dinâmicos. O acompanhamento e monitorização dos parâmetros das variáveis de funcionamento das

máquinas indica, no caso de uma mudança significativa do valor normal, a possibilidade de desenvolvimento de uma falha.

Na Inspecção, é necessário uma vigilância regular dos equipamentos, sob a forma de "rondas" de curta frequência, com execução de pequenos trabalhos. É um tipo de Manutenção entre a preventiva sistemática e/ou curativa e a condicional. Pode ser considerada como Manutenção de 1º nível (Ferreira L. A., 1998).

Esta está mais vocacionada para os equipamentos estáticos sob pressão, tendo sido criadas algumas Práticas Recomendadas (RP) pela API. Pode salientar-se as API RP 580 e API RP 581, baseadas na metodologia RBI, onde são propostos os passos para desenvolver um programa de inspecção baseado no risco, focado na perda do contenção dos equipamentos sob pressão em instalações de processo, devido à deterioração dos materiais.

2.2.2.1 Exemplos de técnicas de inspecção

A existência de equipamentos de diagnóstico tecnologicamente evoluídos permite o recurso a diversas técnicas que podem ser utilizadas na manutenção condicionada, no controlo de condição ou no diagnóstico dos equipamentos. Seguidamente, serão descritas algumas técnicas, sendo as três primeiras utilizadas principalmente nos equipamentos dinâmicos (Cairrão, 2004):

- **Análise de vibrações:** técnica de grande expressão que pode ser executada com equipamentos portáteis ou através de sensores fixos (monitorização em contínuo), em pontos pré-definidos. A informação é enviada para uma unidade de controlo, onde foram introduzidos os valores máximos de alerta ou paragem. A evolução dos valores recolhidos, permite ajustar os limites pré-definidos.
- **Análise do lubrificante:** segundo (Cabral, 2004) e (Mobil Oil Portuguesa, 1980), é uma técnica não destrutiva bastante eficiente, que permite diagnosticar o estado de qualquer componente lubrificado, uma vez que as partículas metálicas geradas pelo processo de desgaste vão sendo incorporadas no lubrificante. O mapa metalográfico possibilita a determinação das zonas ou elementos, que estão com um processo de desgaste acelerado. Permite também acompanhar o estado de condição do lubrificante. As análises devem ser feitas a partir de uma amostra recolhida sob condições bem definidas.
- **Análise de parâmetros:** trata-se de uma técnica muito utilizada por exemplo na verificação da eficiência de motores. A medição da taxa de compressão, das rotações do motor, da corrente absorvida pelo motor de arranque e respectiva rotação, da pressão no colector de admissão, etc., são alguns dos parâmetros que determinam o bom desempenho do motor.

- **Termografia:** é uma técnica de diagnóstico que pela a análise das temperaturas dos componentes permite detectar zonas de aquecimento excessivo.
- **Inspecção visual:** é extremamente importante em qualquer programa de manutenção condicionada. Deve ser feita por técnicos experientes e com uma boa memória histórica dos equipamentos. Permite detectar fugas, desapertos, fissuras, níveis, etc.
- **Ultra-sons:** método expedito na detecção de irregularidades na estrutura ao nível da sub-camada dos metais, como a existência de fissuras, ocos, *spalls*, etc. Permite ainda avaliar em alguns casos a sua profundidade e extensão das indicações/defeitos existentes e a espessura remanescente dos equipamentos.

2.2.2.2 Classificação da PM

A PM pode ser baseada em vários parâmetros e situações. Com a ajuda das técnicas de inspecção e monitorização dos equipamentos, é possível escolher o melhor critério para determinar o parâmetro no qual se baseia a manutenção do equipamento.

As acções da PM podem ser então divididas nas seguintes categorias (Blischke & Murthy, 2003):

- **Manutenção baseada no tempo:** as acções são tomadas após um tempo definido. Um exemplo deste tipo de manutenção é a política de "substituição em bloco".
- **Manutenção baseada na idade:** acções que têm como base a idade do componente. Um exemplo deste tipo de manutenção é a política de "substituição devido à idade".
- **Manutenção baseada no uso:** acções baseadas no uso do produto. Este tipo de manutenção é apropriado para itens como pneus, componentes de um avião, e assim por diante.
- **Manutenção baseada na condição:** acções de manutenção despoletadas na condição dos equipamentos. Esta envolve monitorização de um ou mais parâmetros que caracterizam o processo (desgaste de um vedante, etc.). Algumas vezes, é difícil medir directamente a variável de interesse. Nesses casos, são utilizadas outras variáveis para obter uma estimativa da variável de interesse. No exemplo do desgaste dos rolamentos, este não pode ser medido sem se desmontar o rolamento. Contudo, medindo a sua vibração, ruído ou temperatura, pode obter-se uma estimativa do desgaste do mesmo, porque existe uma forte correlação entre essas variáveis e o desgaste do rolamento.
- **Manutenção baseada na oportunidade:** aplicada em sistemas com múltiplos componentes, onde uma acção (CM ou PM) a um componente, dá a oportunidade de intervir preventivamente sobre um ou mais dos restantes componentes do sistema.

- **Manutenção de melhoria: e**nvolve a execução de qualquer modificação através de um novo projecto do componente, que resulta num outro componente com melhores características de fiabilidade.

Em geral, a PM é efectuada em instantes de tempo definidos. Nos casos onde as acções de PM são executadas com uma frequência aproximadamente constante, pode ser tratada como um acontecimento contínuo no tempo. Existem várias propostas de tipos de modelos formulados para o estudo do efeito da PM, tendo em conta a degradação e ocorrência de falhas dos componente, para conduzir a uma optimização da estratégia da PM a utilizar (Blischke & Murthy, 2003).

2.2.3 Selecção do tipo de Manutenção a utilizar

Pode utilizar-se uma árvore de decisão, como a apresentada na Figura 13, para ajudar na escolha do tipo de Manutenção a utilizar em determinada situação (Lyonnait, 1994).

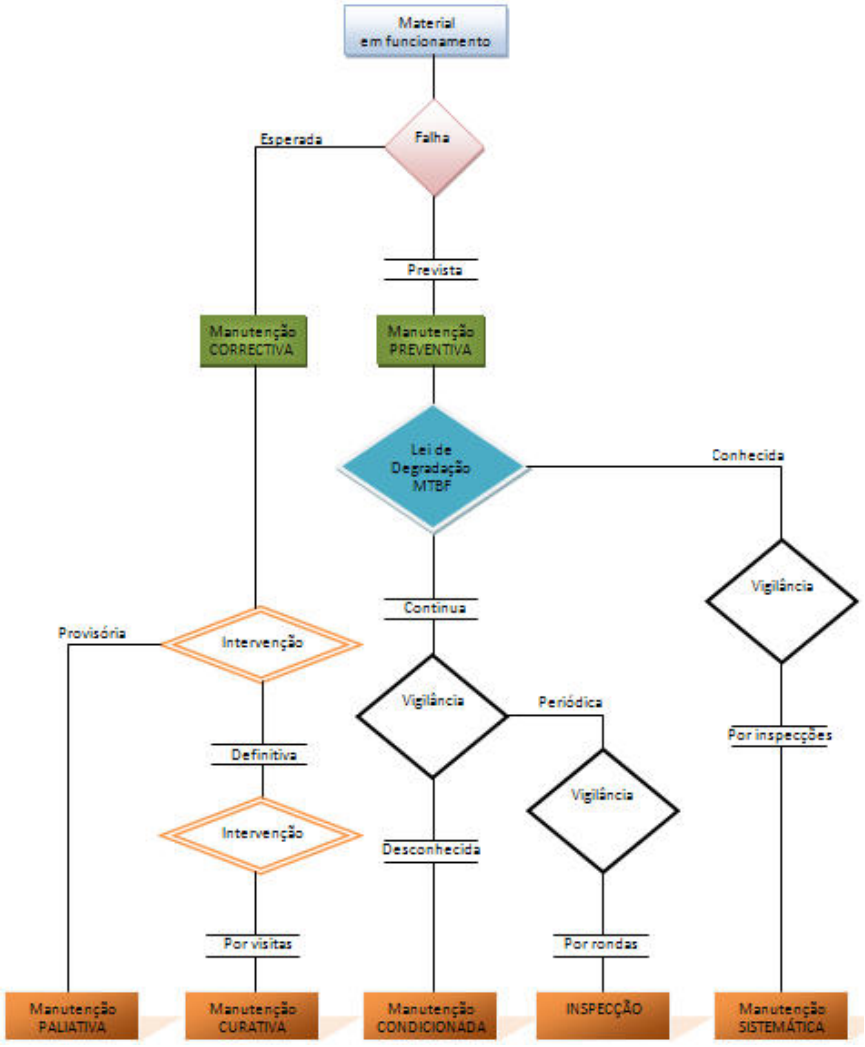


Figura 13 - Árvore de decisão para a escolha do tipo de manutenção.

2.3 Componentes reparáveis e não reparáveis

É importante distinguir os componentes reparáveis dos nãos reparáveis quanto à previsão e medição da fiabilidade.

Um componente reparável é susceptível de ser restabelecido para condição aceitável de funcionamento depois de avaria ou falha, enquanto um componente não reparável, depois de avariado, não pode ser recuperado.

Para um componente não reparável, como uma lâmpada eléctrica, um transistor, um motor de um foguete ou de uma nave espacial não tripulada, a fiabilidade é a probabilidade de sobrevivência ao longo da vida esperada de um componente, ou por um período durante a sua vida, quando apenas uma falha pode ocorrer. Durante a vida de um bem, a probabilidade instantânea de uma primeira e única falha é chamada de taxa de falha. Os valores como o *Mean Time to Failure* (MTTF) ou uma determinada percentagem da vida esperada na qual poderia ter ocorrido uma falha, são outras características de fiabilidade que podem ser utilizadas. Os itens não reparáveis, tanto podem ser peças individuais, como sistemas compostos por muitas partes. Quando uma parte de um sistema não reparável avaria, o sistema falha e a sua fiabilidade é uma função do tempo para a primeira parte a falhar (O´Connor, 1995).

No caso dos componentes que são reparados quando falham, a fiabilidade é a probabilidade de que uma falha não ocorre num período de tempo determinado, quando mais de uma falha ocorre. Pode ainda ser expressa através de taxa de falha ou taxa de ocorrência de falhas. No entanto, a taxa de falha expressa a probabilidade instantânea de falha por unidade de tempo, quando várias falhas podem ocorrer em tempo contínuo. O que realmente significa, é que nos sistemas reparáveis que contém uma parte não reparável, essa parte contribui com esse montante para a taxa de falha. A parte que não pode ser reparada, não pode ter taxa de falha, mas nem sempre tem significado prático (O´Connor, 1995).

A fiabilidade dos sistemas reparáveis podem ser caracterizados pelo *Mean Time Between Failures* (MTBF), mas apenas sob a condição particular de uma taxa de falha constante. Também é necessário ter em conta a disponibilidade dos itens reparáveis, pois a sua reparação demora tempo. A disponibilidade é afectada pela taxa de ocorrência de falha e o tempo de manutenção (O´Connor, 1995).

2.4 Fiabilidade

Existe a necessidade de quantificar o número de avarias no tempo, devido às implicações técnicas, económicas e de segurança que essas avarias podem ter. Essa qualificação pela incerteza que sempre existe relativamente ao momento em que as avarias vão aparecer, envolve sempre métodos estatísticos. São quatro as principais leis (contínuas) utilizadas em fiabilidade (Ferreira L. A., 1998):

- **Lei Exponencial:** com o parâmetro de taxa de avarias (λ);
- **Lei Gamma:** com os parâmetros de escala (θ) e de forma (κ);
- **Lei Normal:** com os parâmetros média (μ) e desvio-padrão (σ);
- **Lei de Weibull:** com os parâmetros de forma (β), de escala (η) e de posição (γ).

Para cada uma das lei, representam-se as funções: densidade de probabilidade (pdf), fiabilidade (R(t)) e taxa de falhas (λ(t)). As expressões matemáticas da fiabilidade e a sua obtenção são apresentadas de seguida (Ferreira L. A., 1998).

Sendo:

- **f(t) – função pdf ou função densidade de probabilidade de avaria** - uma função utilizada para representar a distribuição de probabilidade caso a variável aleatória seja contínua;
- **F(t) – função acumulada de avarias -** descreve completamente a distribuição da probabilidade de uma variável aleatória de valor real *X*;
- **R(t) – função de fiabilidade –** indica a probabilidade de um bem cumprir a função requerida durante um certo intervalo de tempo.

Considerando a variável aleatória (T) até à avaria, temos que a função de repartição desta variável é definida por:

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

A fiabilidade, função complementar de F(t), será:

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

A densidade de probabilidade, f(t), derivada da função F(t), é então:

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

Para um intervalo de tempo dt

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

f(t) exprime a probabilidade de avaria no intervalo de tempo dt. Definindo a taxa de avarias instantânea λ(t) como a probabilidade da existência de avaria no instante t, na condição de que não tenha havido qualquer avaria até esse instante, temos que:

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

em que:

$$R(t) = 1 - \mathrm{F(t)} \;\text{ e }\; \mathrm{F(t = 0)} = 0$$

Então:

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

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

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

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

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

Donde:

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

Equação 3 - Função geral de fiabilidade.

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

Equação 4 - Função probabilidade de avarias geral.

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

Equação 5 - Função geral do pdf.

São estas as expressões mais gerais que ligam as leis da fiabilidade à taxa de avarias instantânea, podendo assim ser definida por:

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

Equação 6 - Função geral da taxa de avarias instantânea.

2.4.1 Lei Exponencial

A distribuição Exponencial é aplicada quando a taxa de avarias é sensivelmente constante, isto é, λ é constante num dado intervalo de tempo, sendo a distribuição Exponencial apenas caracterizada pela taxa de avarias (λ).

2.4.1.1 Função pdf

A função densidade de probabilidade (pdf) da distribuição Exponencial pode ser expressa em termos da função Exponencial:

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

Equação 7 - Função pdf da distribuição Exponencial.

2.4.1.2 Função de fiabilidade

A função fiabilidade é dada pela seguinte expressão:

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

Equação 8 - Função de fiabilidade da distribuição Exponencial.

2.4.1.3 Função taxa de avarias instantânea

A função taxa de avarias instantânea é dada por:

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

Equação 9 - Função da taxa de avarias instantânea da distribuição Exponencial.

2.4.2 Lei Gamma

A distribuição Gamma cobre uma série de situações de variação da taxa de avarias ou da função de risco com o tempo. Cobre situações de taxas de avarias constante, crescente ou decrescente, mas particularmente a situação em que a falha de um componente que ocorra em "n" estágios ou a avaria de um sistema que falha quando tenham ocorrido "n" subavarias independentes (Pereira, 2003).

A distribuição Gamma é caracterizada por dois parâmetros: de forma (κ) e de escala (θ).

2.4.2.1 Função pdf

A pdf da distribuição Gamma pode ser expressa em termos da função Gamma:

$$f(t) = t^{\kappa-1} \frac{e^{-\frac{t}{\theta}}}{\theta^{\kappa} \times \Gamma(\kappa)} \quad para\ \kappa, \theta > 0$$

Equação 10 - Função pdf da distribuição Gamma.

Onde a função Γ(z) representa a função Gamma e é dada pela seguinte função:

$$\Gamma(z) = \int_0^{\infty} t^{z-1} \times e^{-t}\, dt$$

Equação 11 - Função Gamma.

2.4.2.2 Função de fiabilidade

A função fiabilidade é representada por uma expressão muito difícil de trabalhar:

$$R(t) = \int_t^{\infty} \frac{1}{\theta \times \Gamma(\kappa)} \left(\frac{\tau}{\theta}\right)^{\kappa-1} e^{-\frac{\tau}{\theta}} d\tau$$

Equação 12 - Função de fiabilidade da distribuição Gamma.

Esta expressão pode ser simplificada quando κ toma valores inteiros, ficando com o seguinte formato:

$$R(t) = e^{-\frac{t}{\theta}} \sum_{k=0}^{n-1} \frac{\left(\frac{t}{\theta}\right)^{k-1}}{k!}$$

Equação 13 - Função de fiabilidade simplificada da distribuição Gamma.

2.4.2.3 Função taxa de avarias instantânea

A função taxa de avarias instantânea é dada por:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\frac{1}{\theta}\left(\frac{t}{\theta}\right)^{n-1}}{(n-1)! \sum_{k=0}^{n-1} \frac{\left(\frac{t}{\theta}\right)^{k}}{k!}}$$

Equação 14 - Função da taxa de avarias instantânea da distribuição Gamma.

2.4.3 Lei Normal

A distribuição normal, também apelidada de distribuição Laplace-Gauss, é uma importante família das distribuições de probabilidade contínua, aplicáveis em muitos campos. Cada membro da família pode ser definido por dois parâmetros, localização e escala: a média (μ) e o desvio-padrão (σ). É a distribuição de probabilidade mais frequente em estatística.

2.4.3.1 Função pdf

A pdf da distribuição normal com μ e σ é assim definida:

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi \times \sigma^2}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2}$$

Equação 15 - Função pdf da distribuição Normal.

2.4.3.2 Função de fiabilidade

A função fiabilidade é dada pela seguinte expressão:

$$R(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi \times \sigma^2}} \int_t^{\infty} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2} dt$$

Equação 16 - Função de fiabilidade da distribuição Normal.

2.4.3.3 *Função taxa de avarias instantânea*

A função de taxa de avarias instantânea é dada pela expressão:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2}}{\int_t^{\infty} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2} dt}$$

Equação 17 - Função da taxa de avarias instantânea da distribuição Normal.

2.4.4 Lei de Weibull

O modelo de Weibull é muito flexível porque, sendo uma lei a três parâmetros, permite ajustar correctamente todos os tipos de resultados experimentais e operacionais. A distribuição de Weibull é largamente utilizada como distribuição de falhas, principalmente em componentes mecânicos e metalúrgicos. Esta lei é definida por três parâmetros: parâmetro de forma (β), de escala (η) e de posição (γ).

2.4.4.1 *Função pdf*

A pdf da distribuição de Weibull com os três parâmetros é dada pela seguinte expressão:

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

Equação 18 - Função pdf da distribuição Weibull 3 parâmetros.

O parâmetro de posição pode ser igual a 0, isto significa que o produto pode vir a falhar no momento em que colocado em funcionamento. Assim a função de probabilidade de Weibull com dois parâmetros tem a seguinte forma:

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

Equação 19 - Função pdf da distribuição Weibull 2 parâmetros.

2.4.4.2 *Função de fiabilidade*

A função fiabilidade com os três parâmetros é dada pela seguinte expressão:

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

Equação 20 - Função de fiabilidade da distribuição Weibull 3 parâmetros.

Se tivermos apenas em conta os parâmetros β e η, a função fiabilidade tem a seguinte forma:

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

Equação 21 - Função de fiabilidade da distribuição Weibull 2 parâmetros.

2.4.4.3 Função taxa de avarias instantânea

A função de taxa de avarias instantânea com os três parâmetros é dada pela expressão:

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

Equação 22 - Função da taxa de avarias instantânea da distribuição Weibull 3 parâmetros.

Tendo em conta apenas dois parâmetros, a expressão fica com o seguinte formato:

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

Equação 23 - Função da taxa de avarias instantânea da distribuição Weibull 2 parâmetros.

Quando o valor β é inferior a um, os valores das λ(t) diminuem com o tempo, o equipamento encontra-se na fase de rodagem. Quando o valor de β é igual a um, os valores das λ(t) são constantes ao longo do tempo, o equipamento encontra-se na fase de funcionamento normal. Por fim, se o valor de β for superior a um, os valores das λ(t) aumenta com o tempo, o equipamento encontra-se na fase de obsolescência.

2.5 O papel e importância da Fiabilidade, Manutenção, Manutibilidade e Qualidade

Há muitos factores que podem conduzir à falha de um produto ou contribuir para o risco da ocorrência de uma falha. Nesses factores estão incluídos: projecto, materiais, fabrico, controlo de qualidade, transporte e manuseio, armazenamento, utilização, ambiente, idade, ocorrência relacionada à falha anterior, falha de um componente, parte ou sistema interconectado, qualidade de reparação depois de uma falha, etc.. Além disso, devido à natureza dos muitos factores que podem estar envolvidos, o tempo de ocorrência de uma falha, isto é, o tempo de vida de um componente, é imprevisível. A Fiabilidade e a Manutenção lidam com a estimativa e previsão da POF, isto é, a aleatoriedade inerente a este evento, bem como muitas questões relacionadas com a prevenção das falhas, o custo da prevenção, as

políticas de optimização para lidar com as falhas e os efeitos do ambiente sobre as taxas de falha, citando apenas alguns factores (Blischke & Murthy, 2003).

Embora o tempo de falha de um bem seja aleatório, a derradeira falha de um bem que está em serviço, é certa. Cada bem, não importando a qualidade de projecto, fabricação ou manutenção, falhará mais cedo ou mais tarde. Além disso, construir e manter os produtos fiáveis é uma tarefa cada vez mais difícil, devido ao aumento da complexidade dos itens, novas tecnologias e materiais, e aos novos processos de fabrico. Isto resulta que uma abordagem à Fiabilidade, Manutenção e Manutibilidade se tenha tornado indispensável, na maioria das aplicações (Blischke & Murthy, 2003).

As consequências de uma falha são muitas e variadas, dependendo do componente e das partes envolvidas, mas quase todas têm um impacto económico. As partes envolvidas incluem uma ou mais das seguintes: fabrico, comerciante, comprador, seguro, entre outras; em caso extremo, a sociedade como um todo. Se a falha ocorrer com frequência e se se descobrir que a culpa é do fabricante, o custo para ele, pode ser enorme devido a acções judiciais, possível devolução do produto, mudanças no projecto de engenharia, bem como outras consequências menos tangíveis, tais como, a perda de reputação e de vendas daí resultantes. A sociedade pode sentir os efeitos de tudo isto, e pode colocar a empresa em sérios riscos, podendo recorrer ao governo e possiblitando que uma nova legislação seja promulgada, em resultado desses eventos (Blischke & Murthy, 2003).

Desde que a falha não possa ser inteiramente prevenida, é importante minimizar, tanto a probabilidade de ocorrência, como o impacto das falhas quando elas ocorrem. Estes são os principais papéis da análise de fiabilidade e manutenção. Aumentar a fiabilidade ou os esforços de manutenção implica custos para o produtor, para o comprador ou ambos. Existe frequentemente uma solução de compromisso entre os custos, tais como: aumentar a fiabilidade melhorando a concepção, os materiais e antecipando a produção, levando a menos falhas, diminuindo os custos posteriores da manutenção; aumentar a fiabilidade e os esforços de manutenção certamente conduz a um menor número de falhas e, consequentemente, a uma diminuição dos custos. A análise das diferentes soluções de compromisso dos custos, entre a fiabilidade e os esforços de manutenção das futuras potenciais falhas, é um aspecto importante de uma análise global de custos. A optimização das políticas de fiabilidade e da manutenção, de modo a minimizar o custo total para o fabricante e para o comprador, é o objectivo final de qualquer análise, sendo os vários aspectos da mesma discutidos em vários casos (Blischke & Murthy, 2003).

A questão está relacionada com o custo para atribuir uma certa garantia a um produto. Aquele está ainda relacionado com a Fiabilidade, Manutenção e Manutibilidade. A relação dos custos de garantia e a fiabilidade é clara: os primeiros diminuem para o fabricante a fiabilidade do produto aumenta (Blischke & Murthy, 2003).

O custo da atribuição de uma garantia a um produto depende também da política de garantia fornecida pelo fabricante, o que complica consideravelmente as análises. (Blischke & Murthy, 1994).

A relação com a manutenção é igualmente complexa. Algumas das questões envolvidas e as metodologias utilizadas são discutidas, na maioria dos casos, lidando com as questões de garantia do produto (Blischke & Murthy, 2003).

3 Risk-Based Inspection (RBI)

3.1 Definição

A API define RBI como: "O processo de avaliação e gestão dos riscos focado na perda de contenção dos equipamentos sob pressão, em instalações de processo, devido à deterioração dos materiais. Estes riscos são geridos essencialmente através da inspecção dos equipamentos" (API RP 581, 2000).

A filosofia da metodologia RBI pode ser representada pelo diagrama da figura 14.



Figura 14 - Filosofia RBI.

3.2 Sistema RBI

O sistema RBI totalmente integrado deverá conter os passos mostrados na Figura 15. O mesmo inclui actividades de inspecção, recolha de dados, actualização e melhoria contínua do sistema. A análise de risco é um "estado de conhecimento" específico. Uma vez que os processos e sistemas estão sempre a mudar com o tempo, qualquer estudo de risco só pode reflectir a situação na altura em que os dados foram recolhidos. Embora um sistema implementado pela primeira vez possa ter alguma falta de dados, o programa RBI pode ser estabelecido com base nas informações disponíveis, usando pressupostos para as incógnitas. Como o conhecimento é adquirido a partir dos programas de inspecções e ensaios e da melhoria da base de dados, a incerteza no programa será reduzida. Por sua vez, isto resulta na redução da incerteza do risco (API RP 581, 2000).

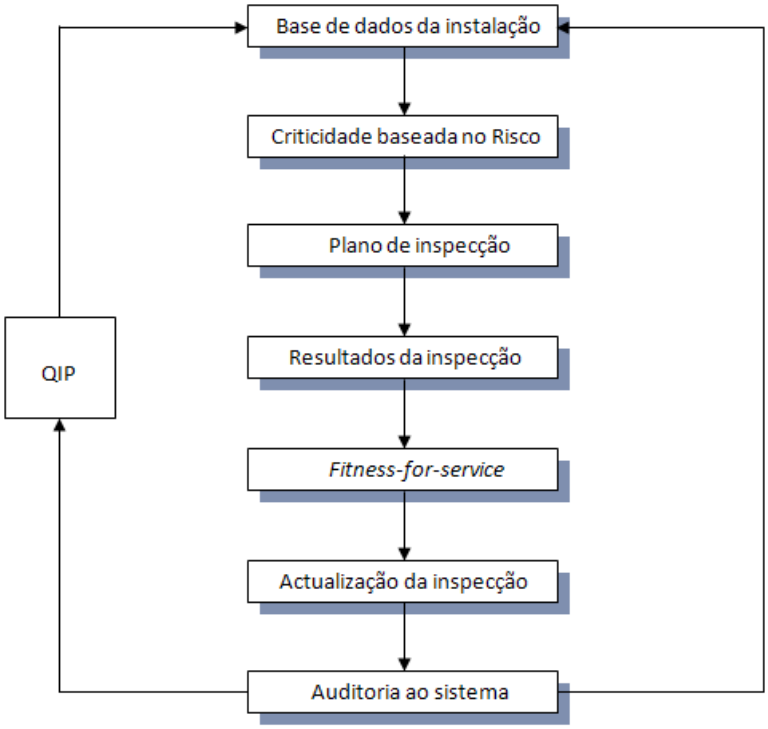


Figura 15 - Programa RBI para equipamentos em serviço.

Quando uma inspecção identifica falhas no equipamento, estas são avaliadas utilizando uma análise de engenharia adequada ou os métodos FFS. Com base nesta análise, as decisões que podem ser tomadas são: manutenção ou continuação do funcionamento. Os conhecimentos adquiridos a partir da inspecção, avaliação de engenharia e manutenção são utilizados para actualizar a base de dados da instalação. Os novos dados afectam o cálculo e classificação do risco no futuro (API RP 581, 2000).

A Figura 15 também incorpora uma auditoria periódica de todo o sistema. Com esse recurso, integrando as recomendações do sistema de auditoria, o RBI é enquadrado no Processo de Melhoria da Qualidade (QIP), e permite o aperfeiçoamento contínuo (API RP 581, 2000).

3.2.1 *Fitness-for-service* (FFS)

Os códigos e RP da ASME e API, respectivamente, para os equipamentos sob pressão prevêem regras para a concepção, fabrico, inspecção e ensaios para novos recipientes sob pressão, sistemas de tubagens e tanques de armazenamento. Estes códigos não abordam o facto dos equipamentos se degradarem durante o serviço, das falhas devido à deterioração ou a partir dos defeitos da fabricação original que podem vir a ser detectadas durantes as inspecções subsequentes. A metodologia FFS são avaliações quantitativas de engenharia que tentam demonstrar a integridade estrutural de um componente em serviço que contenha uma falha ou dano. Esta RP fornecem orientações para a condução da avaliação FFS utilizando metodologias especificamente preparadas para equipamentos na indústria de refinação e

petroquímica. As orientações previstas na presente prática recomendada, podem ser utilizadas para ajudar nas tomadas de decisão "funcionar-reparar-substituir", assegurando que os equipamentos pressurizados, que contenham falhas identificadas pela inspecção e sejam aceites pela FFS, continuem a funcionar de uma forma segura (API RP 579, 2000).

3.3 Utilização do RBI como uma ferramenta de melhoria contínua

A utilização da metodologia RBI constitui um veículo para melhorar continuamente a inspecção das instalações, podendo reduzir sistematicamente o risco associado aos equipamentos analisados. Os novos dados (com os resultados da inspecção) ficam disponíveis, quando as alterações ocorrem, podendo ser feita uma reavaliação do programa RBI, que fornece uma visão actualizada dos riscos. Os planos de gestão do risco devem ser ajustados adequadamente. A metodologia RBI oferece a vantagem de identificar as lacunas ou deficiências nas tecnologias de inspecção utilizadas. Nos casos em que a tecnologia não é adequada e/ou a relação custo/eficácia não reduz o risco, devem ser implementados procedimentos para mitigar o risco. Esta metodologia deve ter como objectivo orientar a direcção do desenvolvimento tecnológico de inspecção, esperando promover uma mais ampla e mais rápida implementação de tecnologias emergentes de inspecção, bem como uma melhor utilização das tecnologias disponíveis, que podem estar a ser subutilizadas (API RP 580, 2002).

3.4 RBI como uma ferramenta de gestão integrada

RBI é uma ferramenta de avaliação e gestão do risco que aborda uma área, que não é completamente abordada em outros processos de gestão de risco, como: RCM e Process Hazards Analysis (PHA). Esta metodologia complementa esses esforços para proporcionar uma avaliação mais exaustiva dos riscos associados às operações nos equipamentos. O RBI produz os planos de inspecção e manutenção para equipamentos, que identificam as acções que devem ser implementadas para proporcionar uma operação segura e fiável. Os resultados dessa metodologia podem contribuir para o planeamento e orçamentação anual, que definem o pessoal e os recursos financeiros necessários para manter um nível de funcionamento aceitável dos equipamentos em termos de desempenho e risco (API RP 580, 2002).

3.5 Risco

O risco pode ser definido como sendo a combinação da probabilidade de ocorrência ou da frequência de ocorrência dum acontecimento, ou combinação de acontecimentos, que podem conduzir a uma situação potencialmente perigosa, com a consequência dessa situação potencialmente perigosa (Morais L. , 2005).

Para que a análise de risco seja possível, define-se, numa primeira fase, em termos qualitativos, as categorias tipo de probabilidade de ocorrência e a descrição de cada categoria para um dado sistema. Seguidamente, as consequências das situações potencialmente

perigosas devem ser analisadas para se estimar o seu impacto provável. Após definição dos níveis de probabilidade de ocorrência e severidade, é possível fazer uma avaliação do risco, quantificando o mesmo para cada caso através do cálculo do produto da frequência de ocorrência do acontecimento ou acontecimentos com a consequência dessa situação perigosa (Morais L. , 2005).

Realizada a avaliação do risco, é necessário aceitá-lo. A aceitação do risco deve assim basear-se num princípio geralmente aceite. Vão ser apresentados de seguida alguns dos princípios de aceitação do risco (NP EN 50126, 2000):

- Princípio *As Low As Reasonably Practible* (ALARP);
- Princípio *Globalement Au Moins Aussi Bon* (GAMAB);
- Princípio *Mindestens Gleiche Sicherheit* (MGS).

3.5.1 Princípio ALARP

O princípio ALARP é praticado no Reino Unido, significando "O mais baixo quanto razoavelmente praticável". Este princípio é geralmente utilizado na alta integridade de sistemas, visando a segurança dos mesmos. Portanto, este princípio considera os riscos provenientes do sistema para as pessoas, bens materiais e ambiente.

Este mesmo princípio baseia-se nos níveis de probabilidade de ocorrência e de severidade. Assim, para cada combinação de um nível de probabilidade de ocorrência com um nível de severidade, é definido um limite máximo admissível de risco, que não deve ser excedido (Morais L. , 2005).

O princípio pode ser representado por três zonas: *Zona inaceitável*, *Zona ALARP ou zona de risco aceitável* e *Zona de aceitação*; definidas por dois limites de nível de risco: o limite máximo admissível de risco e o limite mínimo de risco. A *Zona inaceitável* situa-se acima do limite máximo admissível de risco, a *Zona de aceitação* situa-se abaixo do limite mínimo de risco e a *Zona ALARP* situa-se entre o limite máximo admissível e o limite mínimo admissível de risco. Na Figura 16, estão representadas estas regiões e as medidas a tomar em cada uma delas (NP EN 50126, 2000).

3.5.2 Princípio GAMAB

O princípio GAMAB é praticado em França, significando "Globalmente pelo menos tão bom". Este estabelece que todos os novos sistemas devem ter um nível de risco global pelo menos tão bom como aquele que qualquer sistema equivalente existente possui (NP EN 50126, 2000).

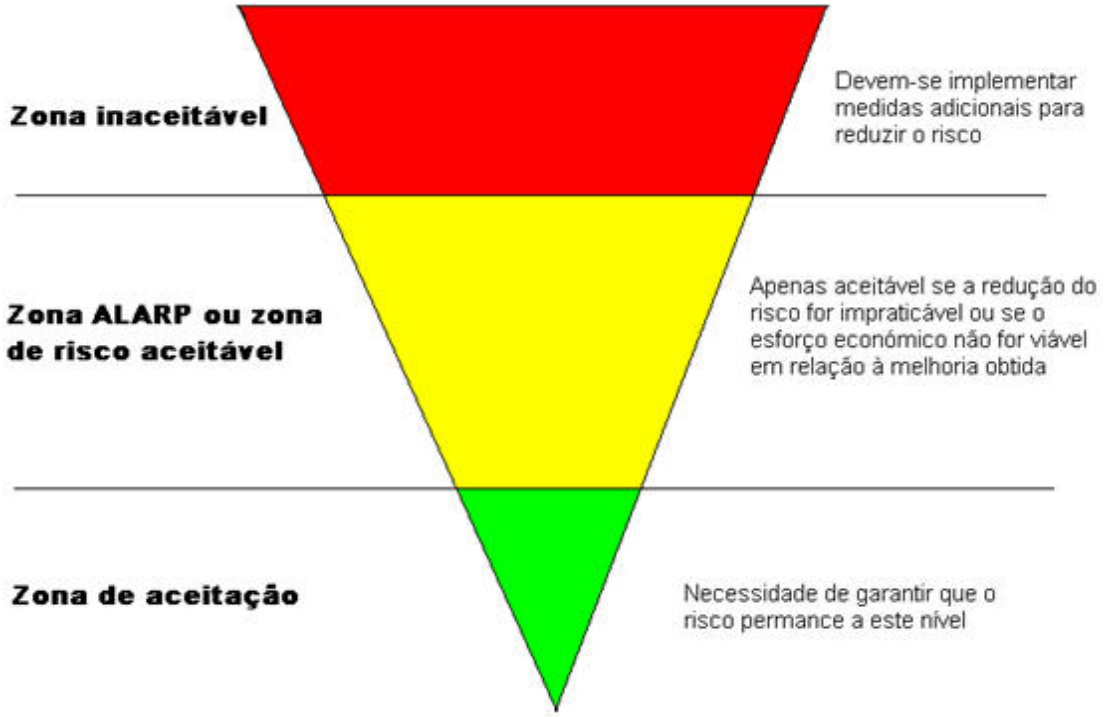


Figura 16 - Representação das zonas ALARP e medidas a adoptar.

3.5.3 Princípio MGS

O princípio MGS é praticado na Alemanha, significando "Mortalidade Endógena Mínima". Este baseia-se no risco individual. Considera a menor taxa de mortalidade de pessoas, para estabelecer a aceitação do risco. Desta forma, e como a taxa mínima de mortalidade, designada neste princípio como mortalidade mínima endógena, é de $2X10^{-4}$ por ano para pessoas com 15 anos de idade nos países desenvolvidos, o princípio estabelece que um sistema não deve contribuir com mais do que 5% para o risco de ocorrência de uma fatalidade a que um indivíduo que utiliza um sistema está sujeito. Assim, pode afirmar-se que um sistema não pode contribuir com mais de $1X10^{-5}$ por ano para a taxa de mortalidade de um indivíduo que utiliza o sistema (NP EN 50126, 2000).

3.6 Flexibilidade na aplicação

Devido à ampla diversidade do tamanho das organizações, cultura, regulamentação local e do país, a API RP 580 oferece a possibilidade de flexibilidade da aplicação da metodologia RBI dentro do contexto das sociedades actuais, fazendo práticas de gestão de risco tendo em conta as circunstâncias locais originais. O documento destina-se a fornecer um quadro que especifica a qualidade esperada dos atributos de uma avaliação do risco, sem impor restrições indevidas ao utilizador. A API RP 580 destina-se a promover a coerência e

qualidade na identificação, avaliação e gestão de riscos relativos à deterioração dos materiais que poderia levar à perda de contenção. Existem muitos métodos RBI que estão a ser aplicados em toda a indústria (API RP 580, 2002).

3.7 Integridade mecânica

O processo RBI pretende manter a integridade mecânica dos itens dos equipamentos sob pressão, minimizando os riscos de perda de contenção devido à deterioração. O RBI não é um substituto para PHA ou HAZOP. Tipicamente, avaliações do risco PHA focam a concepção da unidade de processo, práticas operacionais e a sua adequação, tendo em conta o funcionamento actual ou antecipando as condições de funcionamento. O RBI completa a análise PHA, incidindo sobre a integridade mecânica relacionada com a deterioração dos mecanismos e gestão do risco através da inspecção, complementando ainda o programa RCM, ambos os programas centrados na compreensão dos modos de falha, abordando os mesmos e, portanto, melhorando a fiabilidade dos equipamentos e instalações de processo (API RP 580, 2002).

3.8 Panorâmica do desenvolvimento do programa

A metodologia RBI pode implementar todos os módulos contidos no diagrama representado na Figura 17. Não é necessário implementar todos os sugeridos neste programa. No entanto, cada um deles produz valor e cada informação adicional justifica o esforço que se tem de investir nessa metodologia. Quanto mais alargado for o âmbito da aplicação, maior será o valor de retorno para a empresa. O crescimento na aplicação da metodologia é um processo natural, pois ao investigar situações ou ao analisar situações imediatas verifica-se o aparecimento de novas questões. O sucesso da metodologia motiva ainda a continuação do seu desenvolvimento (ASME, 2003).

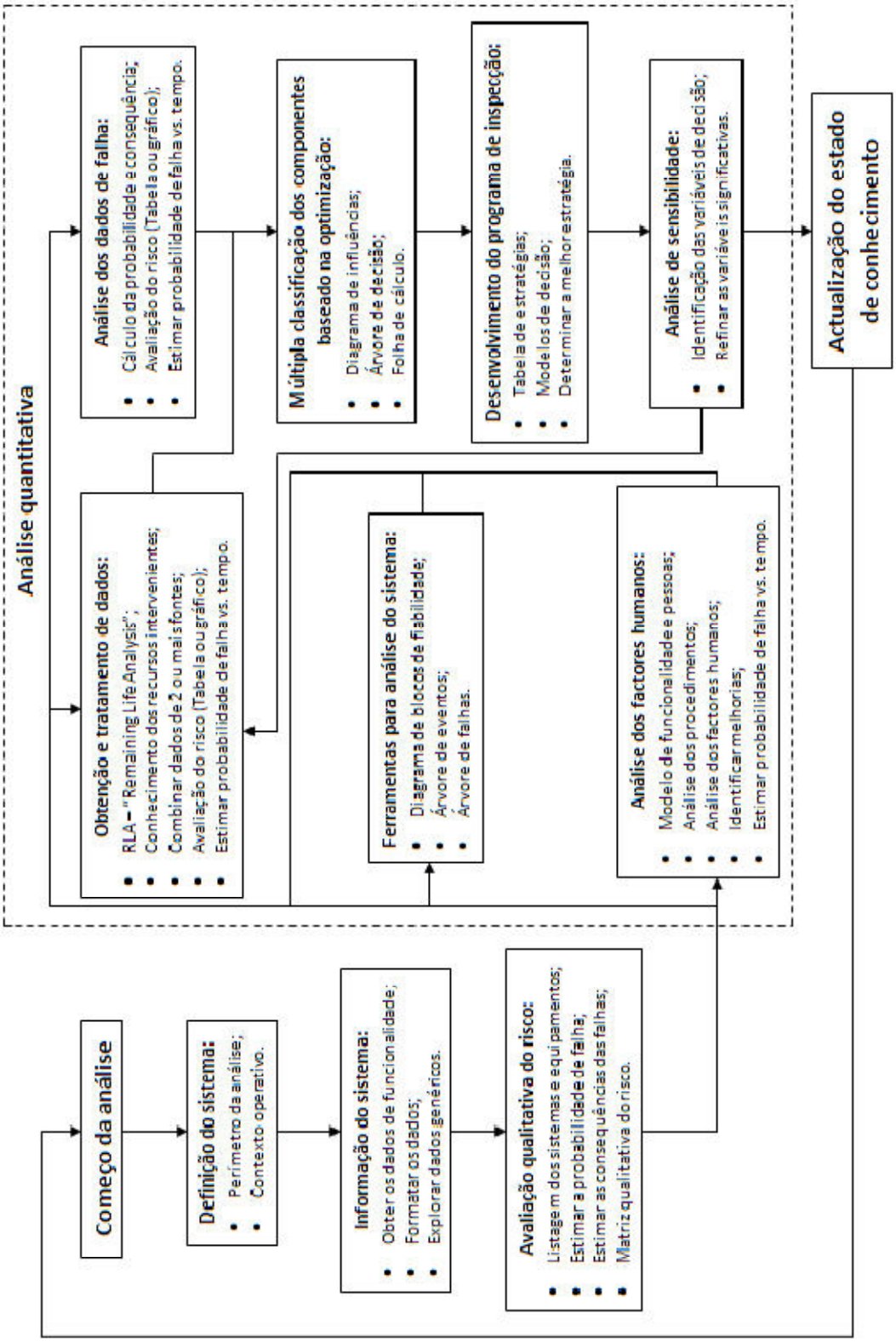


Figura 17 - Diagrama para a aplicação da metodologia RBI.

4 Metodologia da análise desenvolvida

Esta metodologia foi desenvolvida para proceder à análise da manutenção e inspecção de equipamentos industriais de acordo com os pressupostos RBI.

A sua implementação permite identificar os sistemas e respectivos componentes críticos dos equipamentos analisados, bem como definir o tipo de inspecção e manutenção a realizar, onde e com que frequência esta deve ser realizada, permitindo assim organizar e planear melhor a manutenção, reduzindo consequentemente os atrasos e aumentando a produtividade da empresa onde esses equipamentos se encontram.

Com base no diagrama para aplicação da metodologia RBI proposta pela ASME, vamos apenas abordar os seguintes módulos:

- Definição do sistema;
- Informação do sistema;
- Avaliação qualitativa do risco;
- Ferramentas para análise do sistema;
- Análise dos dados de falha;
- Múltipla classificação dos componentes baseado na optimização;
- Desenvolvimento do programa de inspecção;
- Análise de sensibilidade.

A metodologia compreende assim oito etapas e pode ser representada no diagrama da Figura 18. De seguida, apresenta-se detalhadamente cada uma das diferentes etapas.

4.1 Definição do sistema

A metodologia RBI deve ser efectuada com objectivos claros e metas que são inteiramente compreendidas por todos os membros da equipa RBI e pelos gestores. Esta etapa é muito importante, porque através dela compreende-se melhor os riscos envolvidos na operação de uma instalação ou numa unidade de processo, e os efeitos que a inspecção, manutenção e acções de mitigação têm sobre eles. A partir da compreensão dos riscos, um programa de inspecção pode ser concebido de maneira a optimizar os recursos de inspecção e manutenção da instalação (API RP 580, 2002).

Primeiro, identifica-se o alvo da análise de inspecção, o que significa que se deve seleccionar o sistema físico que se pretende investigar e determinar os seus critérios de funcionamento. Depois de se ter definido claramente o objectivo da análise, pode-se então (ASME, 2003):

- Criar os limites no sistema que envolvam o objectivo;
- Limitar a análise às actividades que são necessárias para cumprir esse objectivo;

- Identificar quando o objectivo é atingido;
- Seleccionar racionalmente os componentes intervenientes;
- Criar uma base de dados de falha que fornecerá os dados necessários, sem desperdiçar recursos, através da inclusão de dados irrelevantes.

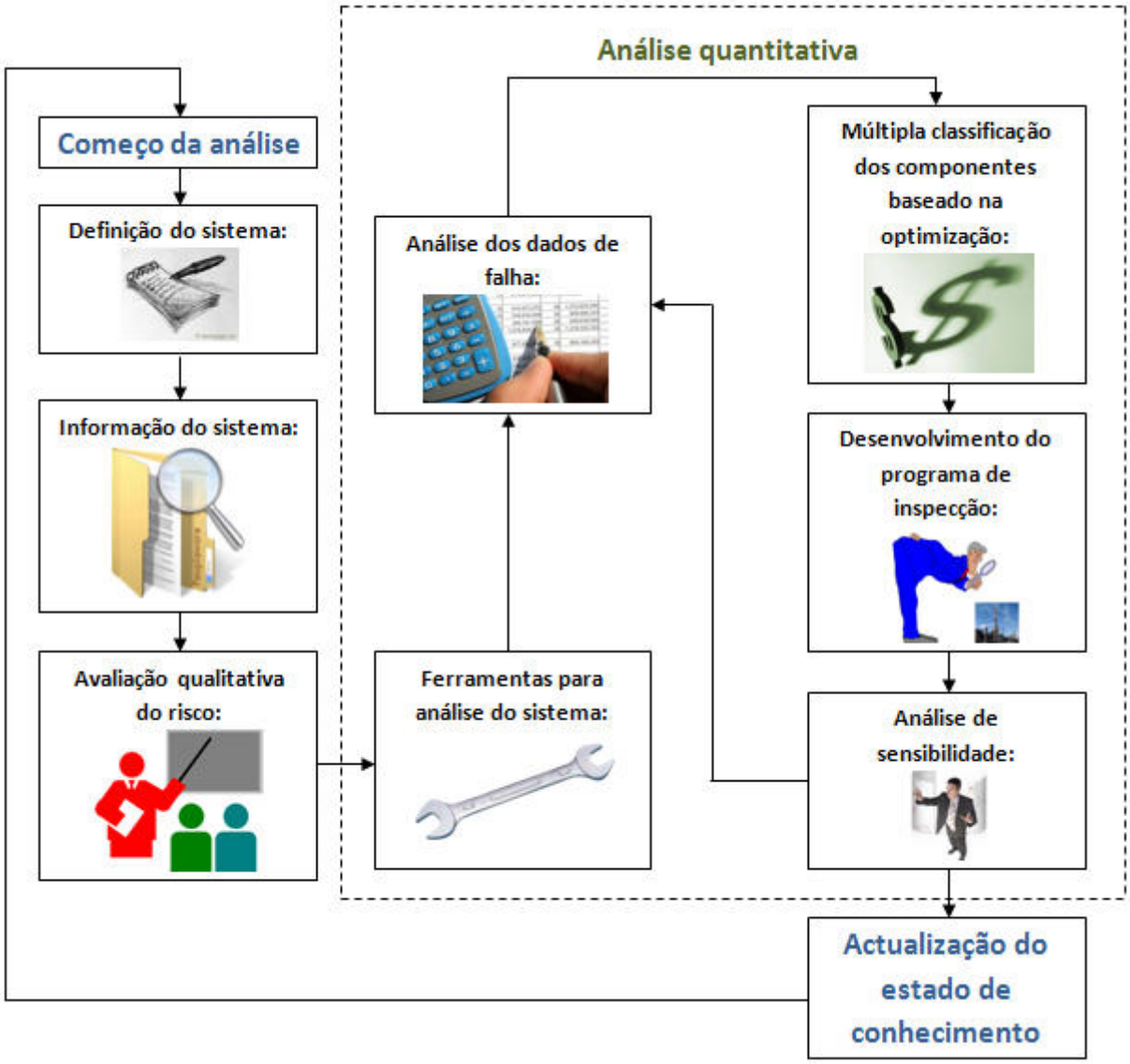


Figura 18 - Diagrama proposto para o desenvolvimento da metodologia RBI.

A definição do sistema numa análise baseada no risco exige uma fronteira e uma medida de sucesso. Essa fronteira identifica claramente o que é parte do sistema e o que não o é (pode-se comparar com um volume de controlo usado em Termodinâmica). A medida de sucesso é normalmente referida como o critério de sucesso, que identifica o que é esperado do sistema (ASME, 2003).

4.1.1 Definição da fronteira do sistema

As fronteiras para um sistema físico, incluídas na avaliação, são estabelecidas em conformidade com os objectivos globais. O nível dos dados deve ser revisto, e os recursos disponíveis para realizar os objectivos com impacto directo no sistema físico devem ser avaliados. O processo de rastreio é importante, pois centra as atenções sobre a parte essencial do sistema, de modo que o tempo e os recursos sejam efectivamente aplicados. O âmbito de uma avaliação RBI pode variar entre toda uma refinaria e um único componente dentro de uma peça do equipamento. Tipicamente, a metodologia é aplicada em vários equipamentos, por exemplo, toda uma unidade de processo, em vez de um único componente (API RP 580, 2002).

É fácil definir a fronteira do sistema, mas é difícil de descrever. Nesta etapa, reúne-se toda a informação relativa ao sistema, que permite ao engenheiro da manutenção entendê-lo, no seu contexto operativo, nas suas funções, e nas dos seus componentes, bem como nas suas ligações funcionais. Apenas com esta informação, é possível implementar esta metodologia e consequentemente, um plano de inspecção adequado para os equipamentos. De seguida, é mostrado o processo de criação da fronteira do sistema (ASME, 2003):

- Identificar e delimitar o sistema principal, incluindo os subsistemas e os sistemas em paralelo;
- Marcar as fronteiras num diagrama de processo simplificado. Identificar os apoios significativos, tais como sistemas eléctricos, ar, controlo, água e lubrificação. No entanto, estes sistemas de apoio e as suas fronteiras podem não ser facilmente definidas. Este sistema de apoio provoca frequentemente causas de falha comuns no mecanismo, como por exemplo, um componente de apoio do sistema, ao falhar, pode causar várias falhas nos sistemas suportados;
- Ao invés de marcar as fronteiras em desenhos complexos, considera-se o uso de frases descritivas para marcar o limite, por exemplo, o grupo de componentes de manuseamento de água ou vapor, etc.. As palavras podem ser mais eficazes do que figuras em áreas onde existe interface de equipamentos, nomeadamente se as bombas incluírem motores eléctricos. De facto, depois de se estar familiarizado com os métodos da análise baseada no risco, desenvolvem-se desenhos simplificados, utilizando códigos de cores para tornar mais simples e rápida a percepção dos mesmos;
- Os sistemas eléctricos fornecem algumas funções de suporte à instalação e outros, a sistemas mecânicos específicos. Desenhar as fronteiras dos sistemas eléctricos de modo a acomodar os interesses e objectivos pretendidos;
- Considerar da mesma forma o sistema de ar, ou então classificar pela pressão ou função, controlo de ar, serviço de ar e seleccionar os seus limites em conformidade;
- Decidir qual a parte dos instrumentos/sistemas de controlo e a quantidade de interface humana que se vai incluir em cada sistema;

- Definidas as fronteiras do sistema e subsistemas, consideram-se tanto os objectivos da metodologia como os dados de falha disponíveis. Evitar o excesso de modelação ou o excesso de recolha de dados de falha. Por exemplo:
  - Se os dados disponíveis não diferenciarem entre os componentes mecânicos dos seus dispositivos e as interligações dos componentes, fazer passar a fronteira entre esses itens aumentaria consideravelmente os custos da recolha dos dados de falha.
  - Se a base de dados de falha não distingue os tubos do equipamento e os seus segmentos, torna-se difícil suportar as fronteiras entre esses segmentos.

Consideram-se as utilizações alternadas e futuras para a sua análise, e as preocupações secundárias que podem ajudar a direccioná-las. É também possível configurar a análise para acomodar as necessidades adicionais com poucos ou nenhuns recursos. O inverso também poderia ser verdade, focando a análise na limitação das fronteiras, pode reduzir-se substancialmente a quantidade dos recursos utilizados (ASME, 2003).

4.1.2 Definição do critério de sucesso

O que constitui sucesso depende do que constitui fracasso. Pode não ser uma relação directa entre a falha do componente e a falha do sistema. Além disso, se um componente falha, causa a falha do sistema, podendo depender do modo de operação no momento da falha (ASME, 2003).

De forma similar às fronteiras físicas, os limites de operação para um estudo RBI são estabelecidos em conformidade com os objectivos do estudo e o nível dos dados analisados. O objectivo de estabelecer limites operacionais consiste em identificar os principais parâmetros que causam impacto no processo. A avaliação RBI normalmente inclui uma revisão da POF e as COF para condições normais de funcionamento. As condições de arranque e paragem, bem como as emergências e condições não rotineiras, também devem ser revistas para os seus efeitos, no que diz respeito à POF e COF. As condições de funcionamento, incluindo qualquer análise de sensibilidade, utilizadas para uma avaliação RBI, devem ser registadas, tal como os limites operacionais para a avaliação. A operação do sistema dentro dos limites é essencial para a validação do RBI, bem como as boas práticas operacionais. Isso pode ser útil para monitorizar os parâmetros fundamentais, para determinar se a operação é mantida dentro dos limites (API RP 580, 2002).

Assim, o critério de sucesso baseia-se geralmente no estado durante a operação, modo ou componente. No entanto, qualquer critério deve incluir uma componente "missão da unidade", tal como manter a energia a 100% ou evitar uma interrupção forçada. Ao identificar a "missão da unidade", devem identificar-se também as falhas específicas ou a combinação das falhas preocupantes. Com uma avaliação qualitativa bem definida, pode ignorar-se a "missão da unidade". A interrupção do processo é quase sempre muito importante para uma análise qualitativa. Ao identificar os critérios de sucesso, tanto a nível do componente como ao nível da operação, verifica-se que a relação é complexa entre os dois. Se assim for, pode ter-se que recorrer a uma

árvore de falhas (FTA) ou uma árvore de eventos (ETA) para estudar a relação entre ambos (ASME, 2003).

4.2 Informação do sistema

Depois de identificado o sistema a analisar, recolhe-se a informação do sistema e os seus componentes. O grau de pormenor dessas informações é que vai definir a profundidade da análise que se deverá realizar (ASME, 2003).

Num estudo RBI, pode realizar-se uma análise qualitativa, semi-quantitativa e/ou abordagem quantitativa. A grande diferença entre estas abordagens é a quantidade de detalhe de entrada, saída e cálculos (API RP 580, 2002).

De seguida, é necessário organizar os dados, sendo possível mais tarde extrair essas informações, se forem precisas. Para a análise qualitativa, será necessário ter, no mínimo, informação suficiente para desenvolver a POF e os custos das consequências para todos os componentes de interesse. Uma plena optimização da manutenção exige o desenho da curva da "probabilidade de falha *vs*. tempo" e também todos os dados técnicos detalhados sobre os componentes importantes (ASME, 2003).

4.2.1 Listagem e recolha de dados

Para encontrar, correlacionar e analisar as informações sobre a concepção, funcionamento e falhas da instalação, sistema e componentes, trabalha-se em conjunto com os engenheiros, operadores e pessoal da manutenção (ASME, 2003).

Para se proceder à análise da metodologia RBI, é necessário criar uma base de dados. Esta deve fornecer, de um modo rápido e fácil, os dados necessários, sem desperdiçar os recursos existentes. No Anexo II são sugeridos os campos para se conseguir criar uma base de dados capaz de realizar um estudo desta envergadura (ASME, 2003).

4.2.2 Dados genéricos

Quando não há, nos locais, instalações específicas, componentes específicos, engenheiros de análise ou pessoas com especialização nesse assunto, os melhores recursos que se podem utilizar são as experiências de outros operadores que utilizam equipamentos similares. Bases de dados construídas sobre essas experiências permitem a possibilidade de aplicar esses desempenhos aos equipamentos existentes (ASME, 2003).

Infelizmente, os dados genéricos reflectem a pior experiência dos outros operadores, isto é, os dados são tendenciosos em direcção ao pior desempenho das unidades e equipamentos existentes. Contudo, se uma base de dados genérica é a única informação disponível, é a melhor maneira de criar um ponto de partida para a análise, podendo mais tarde refinar os dados, com os

dados específicos acumulados relativamente à instalação em causa, ou usar o parecer técnico e/ou análise dos resultados por parte de um engenheiro (ASME, 2003).

4.3 Avaliação qualitativa

É um método que utiliza a experiência e o julgamento dos engenheiros como base para a análise de POF e COF. Os resultados da análise qualitativa do risco são dependentes da profundidade e objectivos da análise e da experiência dos analistas (API RP 580, 2002).

A avaliação qualitativa do risco classifica sistemas e componentes entre eles. Ao realizar uma avaliação qualitativa, atribui-se probabilidades de falhas e severidades das consequências relativas em grupos "Alta", "Média" e "Baixa" (ASME, 2003).

Embora uma avaliação qualitativa forneça informações úteis para uma população limitada, geralmente, neste tipo de avaliação, não é fácil fornecer uma descrição suficiente sobre uma grande população e não pode habitualmente ser utilizada para uma comparação exacta dos riscos associados aos diferentes sistemas ou instalações. Dentro destas limitações, a avaliação qualitativa do risco é uma ferramenta útil para a classificação do risco dos componentes, obtendo-se efectivamente resultados (ASME, 2003).

Os itens analisados só precisam ser categorizados em amplas faixas ou classificados em relação a uma referência. É importante estabelecer um conjunto de regras para assegurar a coerência na categorização e classificação. Geralmente, uma análise qualitativa, utilizando amplas faixas, requer um nível mais elevado do julgamento, habilidade e compreensão para interpretar os resultados dessa mesma análise. Portanto, apesar da sua simplicidade, é importante ter pessoas com conhecimentos e competências para desempenharem a análise RBI qualitativa (API RP 580, 2002).

O primeiro passo para a sua consecução é escolher o método de análise. Se existir uma análise de perigo já realizada, como FME(C)A, HAZOP ou FTA, podem utilizar-se estes resultados na avaliação qualitativa (ASME, 2003).

A metodologia da análise qualitativa baseia-se nos seguintes passos:

1. Listar os sistemas e componentes;
2. Estimar a POF;
3. Estimar a severidade das consequências;
4. Criar a matriz criticidade qualitativa.

4.3.1 Listagem dos sistemas e componentes

Para efectuar esta listagem, é necessário cumprir os seguintes passos (ASME, 2003):

1. Listar os sistemas e componentes e os critérios de sucesso identificados anteriormente;

2. Trabalhar através dos sistemas e componentes que possam afectar os critérios de sucesso anteriormente listados;
3. Através da lista, mais uma vez, eliminar quaiquer itens que não afectem os critérios de sucesso anteriormente listados;
4. Utilizando o sistema de critério de sucesso como guia, determinar os critérios de sucesso para cada componente.

4.3.2 Estimar a probabilidade de falha (POF)

Tratando-se de uma avaliação qualitativa, classifica-se a POF de cada bem, ou de cada modo de falha, mecanismo ou causa, em relação aos outros itens da lista. Isto é muito importante, pois tanto pode tornar o método qualitativo forte como frágil. Pode ser forte, uma vez que reduz o âmbito da aplicação, tornando-a possível. Pode ser frágil, porque todos os itens presentes na lista podem ser prováveis ou improváveis. Na verdade, esta etapa é mais uma classificação das probabilidades do que uma estimativa das mesmas (ASME, 2003).

4.3.3 Estimar a severidade das consequências da falha (COF)

Esta estimativa faz-se da mesma forma como a POF.

Há várias maneiras para lidar com esta questão. Pode fazer-se tanto uma avaliação tendo em conta a segurança, como tendo em conta as consequências económicas (ASME, 2003).

4.3.4 Criação da matriz criticidade qualitativa

O risco é obtido pela seguinte expressão:

$$Risco = POF \times COF$$

Equação 24 - Cálculo do risco.

Estes resultados podem ser apresentados numa variedade de formas com o intuito de comunicar os resultados das análises aos decisores e ao planeamento de inspecção. Esses resultados devem ter um formato para que todas as pessoas o possam compreender (API RP 580, 2002).

Para as metodologias de classificação do risco que utilizam categorias de probabilidade e consequências, a apresentação dos resultados numa matriz de risco é uma forma bastante eficaz de comunicação dos riscos de toda uma unidade de processo sem valores numéricos. Um exemplo da matriz de risco é o da Figura 19 (API RP 580, 2002).

Embora a análise de risco não seja susceptível de provocar grandes supresas, pode ser muito útil na solução de conflitos, com uma apresentação muito lúcida dos resultados. A matriz mostra claramente a sua maior prioridade com os itens no canto superior direito.

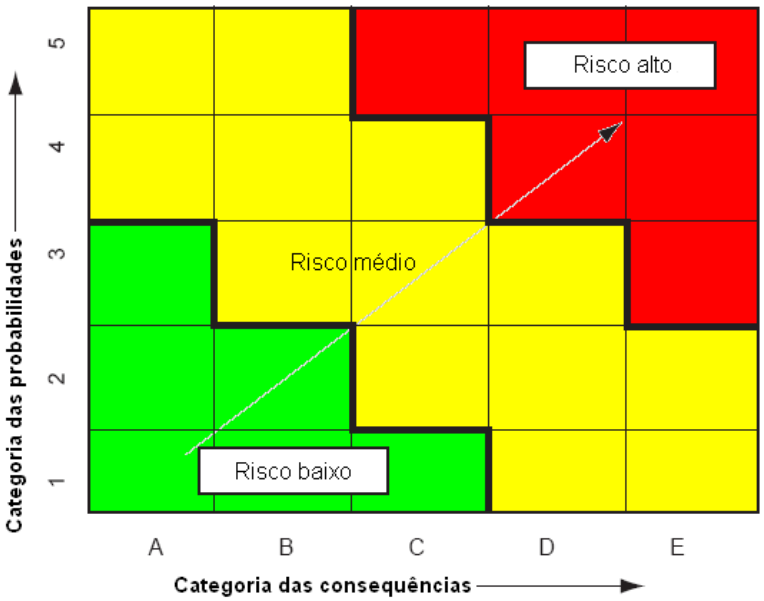


Figura 19 - Exemplo de uma matriz de risco.

4.4 Ferramentas para a análise do sistema

Depois de realizada a avaliação qualitativa, onde o risco é analisado em termos de grandes bandas de POF e COF, estão reunidas as condições para proceder a uma avaliação quantitativa do risco, onde se atribuem valores de custos numéricos para a COF. O primeiro produto chave a ser obtido é a curva "probabilidade de falha *vs*. tempo". Para sistemas complexos, no entanto, os dados sobre um componente podem não ser imediatamente úteis para determinar os efeitos no sistema, podendo-se utilizar ferramentas de análise como FTA ou ETA para explorar as relações entre os componentes e o desempenho do sistema (ASME, 2003).

Primeiramente, antes de se realizar uma análise quantitativa, utiliza-se "Pareto 20%" para definir os principais causadores de problemas para qualquer manutenção do mundo real e para a melhoria do capital tendo em conta o orçamento. "Pareto 20%" refere-se à regra do polegar que se baseia no Princípio de Pareto.

Este princípio preconiza que apenas uma pequena percentagem de factores (20%) são responsáveis pela ocorrência de grande parte dos problemas (80%). Este princípio pode ser aplicado na análise dos modos de falha (Morais, Mota, & Ferreira, 2004).

Outras ferramentas para ajudar e facilitar a aplicação da análise quantitativa e demonstração desses resultados são as seguintes:

- **Diagrama de blocos –** ajuda a compreender as relações dentro do sistema e fornece uma base para comunicação. Este tipo de diagrama é facilmente compreendido pela maioria das pessoas da manutenção, operadores e gestores (ASME, 2003).

- **Árvore de eventos (ETA) –** baseia-se numa lógica binária, na qual um acontecimento só pode ter dois estados: verifica-se ou não. Cada um desses acontecimentos é chamado consequência. Quantificando a ETA, esta fornece um conjunto de probabilidades de ocorrência que conduz a uma probabilidade de sequência, e esta, por sua vez, leva a uma consequência. A ETA também fornece a percepção sobre o evento sugerindo a mudança de equipamentos, controlos, configurações ou acções do operador, de modo a diminuir as POF catastróficas ou a gravidade das consequências (ASME, 2003).
- **Árvore de falha (FTA) –** é a mais poderosa ferramenta. É uma técnica gráfica que fornece uma descrição sistemática da combinação dos modos de falha, dos equipamentos e/ou falhas humanas, que conduzem a um modo de falha particular de um determinado sistema. As FTA pertencem assim aos denominados processos dedutivos, porque partindo do acontecimento principal deduzem-se os acontecimentos que a ele conduzem. As FTA devem ser realizadas a partir das informações dos acontecimentos base, isto é, através das probabilidades ou taxas de avaria dos acontecimentos base. Assim, conhecendo as POF dos acontecimentos base é possível determinar as POF dos acontecimentos dos níveis superiores e consequentemente do acontecimento principal (ASME, 2003).
- **Realização de uma análise HAZOP –** ferramenta altamente estruturada para identificação dos perigos. Pode ser utilizada praticamente em qualquer fase da vida de uma instalação, mas a sua aplicação numa fase mais tardia do projecto é a melhor altura para a análise ser tão completa quanto possível. Esta pode ser utilizada como manual de instruções e procedimentos para que se possa identificar e corrigir as fontes de erros humanos. É extremamente simples na sua abordagem e faz com que praticamente não haja suposições. Portanto, com uma análise HAZOP, consegue-se simular comportamentos anormais considerando desvios e perturbações devido a causas susceptíveis de impacto imediato na envolvente da instalação resultando em consequências, podendo então decidir se o projecto tem recursos suficientes que possam impedir ou limitar a ocorrência consequente desses efeitos. Caso não existam essas garantias, então devem considerar-se que medidas são necessárias tomar para resolver esses problemas (Hyatt, 2003). Para facilitar a aplicação da análise HAZOP, apresenta-se no Anexo III um diagrama que sintetiza o procedimento da aplicação da análise HAZOP.
- **Realização de uma análise FMEA e FME(C)A –** com esta ferramenta FMEA, é possível identificar situações de acidentes especificos, considerar alternativas para melhoria na segurança, obter dados para uma análise quantitativa dos riscos, fazer uma avaliação dos riscos no projecto e nos procedimentos operacionais, melhorar a fiabilidade do processo, cumprir os requisitos regulamentados, realizar um documento para uma avaliação sistemática dos perigos envolvidos no processo, avaliar o processo complexo onde a percepção do risco é significativa e identificar

pontos singulares de falhas. Com uma análise FME(C)A, obtemos todos os resultados de uma análise FMEA, incluindo também uma listagem das prioridades nas acções correctivas a realizar, com base em métodos para avaliar o risco associado às ocorrências identificadas durante a análise. Dois dos métodos mais comuns utilizados nesta análise são (Hyatt, 2003):

- **Procedimento proposto pela norma militar americana (MIL-STD-1629A):**
  Esta análise é possível apenas se tivermos acesso aos dados de fiabilidade dos componentes. Como proposto na referida norma, o cálculo da criticidade dos modos de falha é efectuado pela seguinte expressão:

$$C = \delta \times \alpha \times \lambda \times t$$

Equação 25 – Criticidade calculada através da norma (MIL-STD-1629A).

  Onde:
  δ – Probabilidade de ocorrência do modo de falha
  α – Contribuição do modo de falha para a avaria
  λ – Taxa de avaria ou falha
  t – tempo de operação
- **Método *Risk Priority Number* (RPN):**
  A análise de criticidade pelo método RPN utiliza os critérios de severidade (S), ocorrência (O) e detectibilidade (D) para proceder ao cálculo do valor de criticidade de cada um dos modos de falha. Assim, utiliza-se a seguinte expressão:

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

Equação 26 - Criticidade calculada através do método RPN.

No Anexo IV são representados exemplos de aplicações para cada uma das ferramentas anteriormente descritas.

4.5 Análise dos dados de falha

Não se devem misturar dados de diferentes fontes, mas sim manter os dados, de diferentes fontes, distintos. A combinação dos dados só pode ser realizada depois de se ter obtido a curva "probabilidade de falha *vs*. tempo" de cada uma das fontes (ASME, 2003).

Combinando os resultados de todos os trabalhos realizados até ao momento, procede-se à determinação do risco. Também se vão obter orientações para prioritizar e avaliar a aceitabilidade do risco, no que diz respeito aos critérios de risco. Este processo conduz à criação e implementação de um plano de gestão dos riscos (API RP 580, 2002).

RBI é uma ferramenta para fornecer uma análise dos riscos da perda de confinamento dos equipamentos. Muitas empresas têm definidos níveis aceitáveis e prudentes de critérios de risco de

segurança, ambientais e financeiros. Porque cada empresa pode definir os seus níveis de risco aceitáveis, as decisões de gestão do risco podem variar entre empresas (API RP 580, 2002).

Após a realização da análise de risco, começa-se o seu processo de avaliação. Este pode ser visualizado em formato de gráfico ou tabela, para se ter uma identificação rápida dos componentes de alto, médio ou baixo risco. A redução de alguns dos riscos para um nível aceitável não pode ser prático devido à tecnologia e limitações de custos. Para isso, é utilizado um critério de aceitação do risco referido anteriormente (ALARP; GAMAB; MGS) (API RP 580, 2002).

4.6 Múltipla classificação dos componentes baseado na optimização

Todos os processos anteriores serviram apenas para obter a curva "probabilidade de falha *vs*. tempo", para neste agora estudar-se os componentes com um risco mais significativo (ASME, 2003).

Depois de eliminados alguns dos candidatos para este módulo, que pode ser considerado como "Optimização financeira da classificação do risco dos componentes e do calendário de intervenções" ou "Optimização da manutenção", sendo a segurança um elemento crucial, teria que adicionar-se um limite de segurança. O título não é o melhor, podendo parecer que é focado apenas na optimização de um único componente. O cálculo do tempo que é realizado neste módulo adiciona valor à classificação do risco (ASME, 2003).

Neste módulo, calcula-se a melhor altura para tomar medidas em relação a um ou mais componentes. O melhor tempo será o melhor momento, isto é, o tempo que maximize o *Net Present Value* (NPV), pois esse valor tem em conta a segurança e outros limites impostos. Este módulo tem de ser trabalhado antes de haver alguma preocupação com o programa de inspecção, porque o desenvolvimento do programa de inspecção é um processo intensivo de recursos e não deve ser efectuado antes de saber quais os lucros financeiros que se podem conseguir (ASME, 2003).

Este módulo baseia-se na acção de substituição de componentes, utilizando o custo de substituição em vez do custo de inspecção, pois é bastante inferior quando comparado com os custos de interrupção. Se este cálculo fosse baseado no custo da inspecção, a resposta seria "*Inspeccionar tudo agora!!*", portanto sugere-se a seguinte estratégia (ASME, 2003):

1. Optimizar, tendo em conta a segurança e outros limites, baseado mediante a substituição;
2. Inspeccionar, utilizando uma estratégia optimizada, antes da data de substituição dos componentes;
3. Comparar a actual condição do equipamento com as condições estabelecidas no projecto;
4. Substituir o componente ou calcular uma nova data optimizada de substituição.

4.6.1 Necessidade de optimização

É necessário saber o que inspeccionar e quando inspeccionar o quê. Tendo a lista com os componentes com um risco mais elevado, até agora apenas se considerou os custos relacionados com a substituição do componente, mão-de-obra e perda de produção. De seguida, utiliza-se uma técnica mais sofisticada de análise com base financeira, de maneira a garantir que não se excedem os limites de segurança e ainda as restrições orçamentais. Este processo terá em conta também (ASME, 2003):

- Determinar para cada componente o momento para realizar uma inspecção mais sólida financeiramente;
- Promover uma maneira fácil e sistemática de rever documentos, que evita a aceitação dos pressupostos injustificados;
- Ajudar a detectar o excesso e outras formas erradas de introdução de dados.

Este processo de optimização para vários componentes fornece um maior valor quando é utilizado para planear as grandes reparações ou substituições de componentes, que possam ser alvo de técnicas de PM, elevado custo de substituição e quando se encontram na sua fase de decadência do seu ciclo de vida (ASME, 2003).

4.6.2 Abordagem analítica

Uma das mais importantes características da abordagem analítica para a optimização da manutenção é a utilização do NPV. A chave para uma boa e bem sucedida marcação e decisão do calendário de manutenção e engenharia, na tomada das decisões das empresas, é o cálculo do NPV, incluindo o custo de perda de produção no cálculo do custo das consequências de falhas. Isso acontece porque os critérios da marcação e decisão nas empresas são utilizados para expressar a necessidade dos recursos da manutenção (ASME, 2003).

Devem manter-se todos os elementos de optimização da decisão da manutenção dentro dos modelos mundiais de engenharia, manutenção e operação. Os modelos de decisão financeira, normalmente, incluem as informações dos cálculos do NPV efectuados (ASME, 2003).

Pode usar-se a projecção dos custos de perda (e factores de capacidade de projecto) para garantir que o modelo segue o processo de marcação de decisão pretendido. Utilizando as informações anteriores, adicionam-se as possíveis causas de conflito, acrescentando as complicações que não se pretendem nas primeiras fases do projecto. Os elementos específicos do modelo de optimização são (ASME, 2003):

1. Os custos de substituição ou reparação dos componentes em causa;
2. Restrições realistas tendo em conta o limite do orçamento anual;
3. As consequências da perda de produção se o projecto não for implementado;
4. As consequências da perda de produção se o projecto for implementado;

5. O limite mínimo de segurança imposto à instalação.

Os pontos 1 e 4 são os custos iniciais do projecto. O ponto 3 é a consequência evitada pela implementação do projecto, é o seu grande benefício. O limite do orçamento anual mantém o modelo realista, retirando a hipótese de estratégias com custos exorbitantes. O ponto 5 mantém a análise fundamentalmente realista de maneira a que a estratégia implementada não ponha em risco a segurança da instalação (ASME, 2003).

O raciocínio por trás do modelo é o seguinte (ASME, 2003):

- Se o projecto não for executado, haverá algumas perdas de produção. Este será o factor C_B.
- Se o projecto for executado, espera-se uma baixa nas perdas de produção. Este será o factor C_A.
- Se o projecto for executado, tem que se pagar os custos do projecto. Este será o factor C_P.
  - Se a soma dos custos relativos à execução do projecto (reparações ou substituições) e o custo de perda de produção (se o projecto for executado) for maior do que os custos de perda de produção se o projecto não for executado, tem-se um resultado negativo do valor NPV, decide-se não implementar o projecto.

$$NPV = C_B - (C_A + C_P) < 0$$

Equação 27 - NPV quando não compensa implementar o projecto.

  - Se o contrário for verdade, os custos de perda de produção (se o projecto não for executado) for maior que os custos relativos à execução do projecto mais o custo de perda de produção se o projecto for executado, tem-se um resultado positivo do valor NPV, decide-se implementar o projecto.

$$NPV = C_B - (C_A + C_P) > 0$$

Equação 28 - NPV quando compensa implementar o projecto.

Um modelo de optimização pode executar o processo para vários projectos em simultâneo. O modelo ajuda a escolher os projectos que produzem um maior NPV positivo e agendá-los, a fim de que todo o NPV seja maximizado, este é o objectivo da optimização. A lista resultante das prioridades dos anos de implementação dos projectos, é o tempo que vai fazer com que o valor do NPV seja o mais alto possível. A mudança global no NPV por optimização é o NPV produzido por todo o processo (ASME, 2003).

4.6.2.1 O modelo de desenvolvimento pensando no processo

O modelo de decisão é mais bem ilustrado pelo diagrama de influência da análise de decisão. Um diagrama de influência representa graficamente as relações que ligam a decisão com os seus resultados e as suas consequências (ASME, 2003).

Para a optimização de múltiplos componentes, a finalidade do diagrama de influência é associar o mundo de engenharia, expresso em probabilidade de falhas, ao mundo financeiro, expresso em NPV. O diagrama, só por si, é uma ferramenta de comunicação muito robusta, pois explica a decisão a tomar e as suas consequências. Isto porque o diagrama de influência não contém números ou equações, o que faz com que possa ser utilizado para comunicar em audiências com as pessoas que trabalham nas instalações quer com os executivos para compararem essas decisões (ASME, 2003).

A verdadeira pergunta é "*quais são as magnitudes esperadas devido a estas perdas?*".

Geralmente é possível tomar uma decisão quando se tem uma ideia do que se pode esperar. Para obter o valor esperado de perda, multiplica-se a probabilidade de magnitude de tempo total de perda e a sua consequência. A consequência esperada dá a probabilidade ponderada de perda dando a probabilidade de consequência ou valor esperado. Este último termo é constantemente utilizado em análises financeiras, tendo em engenharia o nome de risco (ASME, 2003).

Para a criação do modelo de decisão, tem que se seguir os passos descritos no Anexo V.

4.6.2.2 Construção da árvore de decisão a partir do diagrama de influência

A conversão do diagrama de influência numa árvore de decisão é descrito como movendo os nós do diagrama de influência ao redor, até esses nós estarem perto no espaço temporal em que cada um é realizado, mantendo as ligações entre os nós, a fim que a informação não seja perdida (ASME, 2003).

4.6.2.3 Como fazer o trabalho de optimização do modelo

O NPV óptimo é determinado para encontrar o ano de implementação do projecto, que irá provocar o maior valor de NPV do que em qualquer outro ano. Cada vez que um ano seleccionado produz um valor de NPV superior ao anteriormente seleccionado, tem que se fazer uma verificação de maneira a garantir-se que nenhum dos limites foi ultrapassado em qualquer um dos anos. O ano que provocar o NPV mais elevado e não exceder nenhum dos limites é o ano óptimo para a implementação do projecto (ASME, 2003).

Esta optimização pode ser expandida a vários projectos. Se o projecto for o mesmo, espera-se que a combinação dos anos para cada elemento produza o valor máximo de NPV sem exceder qualquer dos limites em qualquer um dos anos. Uma vez encontrada essa associação, o grupo de

trabalhos tem que ser priorizado optimamente, e criar-se um calendário com as datas de implementação de cada um dos projectos (ASME, 2003).

4.7 Desenvolvimento do programa de inspecção

Depois de se ter prioritizado os componentes no tempo e seleccionar aqueles que necessitam de uma atenção imediata, foca-se a atenção sobre a estratégia de inspecção para esses componentes.

Tendo encontrado o melhor momento para se intervir no equipamento, constrói-se um modelo de decisão que junta as informações de engenharia dos componentes, expressa na curva "probabilidade de falha *vs*. tempo" com os dados para cada cenário de decisão do programa de inspecção que se deseja analisar (ASME, 2003).

Este é um processo extremamente dispendioso e problemático. É preciso informação como a probabilidade dos testes de detecção não destrutivos, que os inpectores ou fornecedores têm dificuldade em fornecer. Tendo em conta o pior cenário, isto é, pode-se vir a constatar que não se detecta a principal falha com o nível de fiabilidade requerido, portanto é necessário fazer-se a distinção entre as inspecções que nos "fazem sentir bem" e as que realmente "são boas" (ASME, 2003).

4.7.1 Desenvolvimento da tabela de estratégia

A tabela de estratégia é uma ferramenta que ajuda a construir logicamente um diagrama de influência. Trata-se de uma ferramenta que, em conjunto com a árvore de decisão, ajuda a modelar o processo decisório. O diagrama de influência mostra as relações de uma decisão, enquanto a árvore de decisão tem em conta a ordenação no tempo em que as acções devem ser realizadas e a incerteza da decisão (ASME, 2003).

O objectivo é o modelo matemático do processo de decisão utilizado para estudar as diferentes alternativas possíveis. Neste modelo, calcula-se os valores esperados para várias combinações dos parâmetros, tais como as curvas de "probabilidade de falha *vs*. tempo". O cálculo terá em conta as incertezas da entrada e especificará a incerteza no cálculo do valor, para encontrar-se a decisão que maximiza o valor médio, sendo este o objectivo do desenvolvimento do programa de inspecção (ASME, 2003).

A construção da tabela de estratégia é o primeiro passo para o desenvolvimento do modelo de decisão. A tabela de estratégia pode ser vista como uma maneira de apresentar a opinião sobre as informações necessárias a ter em consideração na tomada de decisão. É uma forma estruturada de reflectir as ideias para ser possível estabelecer todas as informações envolvidas na tomada de decisão num formato ordenado. Um dos pontos fortes da análise de decisão é que esta fornece ordem e lógica ao processo de tomada de decisão (ASME, 2003).

Para construir a tabela de estratégias é necessário:

- **Determinar as categorias de estratégia –** o primeiro passo é obter o conteúdo do modelo de decisão que consiste em identificar as informações das categorias que possam influenciar a decisão, a partir de mecanismos de avaria através da informação dos modos e POF. Então as categorias podem ser vistas como:
  - Uma quantidade que é preciso saber antes de poder estimar os critérios económicos de decisão;
  - Um recurso que se pode escolher antes de poder estimar os critérios económicos de decisão;
  - O valor que é necessário calcular.

  Ao desenvolver a estratégia de inspecção, as categorias devem incluir as decisões que servem para tomar e poderão ser precisas para efectuar a inspecção. Consideram-se as categorias como os itens que se podem desdobrar quando a decisão é tomada, e que faz a ligação entre todos para determinar-se a magnitude dos critérios económicos. É necessário apenas uma lista com as informações das categorias ou a sua magnitude, para serem consideradas quando se estiver a tomar a decisão. Então, antes de tudo definem-se as categorias candidatas e os mecanismos de avaria a serem tomados em conta.
- **Definir os tipos de nós de decisão para cada categoria –** atribuir para cada categoria o tipo de modelo de nó de decisão. Existem três tipos de nós:
  - Nó de decisão – envolve a escolha de duas ou várias alternativas que estão relacionadas com o mecanismo seleccionado.
  - Nó de alternativa – representa as categorias com vários resultados possíveis.
  - Nó de valor – contém um único valor ou uma escolha de vários valores que foram introduzidos por dados fora do modelo ou calculados no mesmo.
- **Escolher alternativas para cada categoria de estratégia –** já foram definidos os constituintes da decisão. A próxima etapa será aperfeiçoar esses constituintes como alternativas a ser consideradas como uma informação quantitativa, tendo em conta a forma que cada um destes resultados pode ter na probabilidade de ocorrência.
- **Ligar as alternativas escolhidas a cada categoria para formar estratégias –** começa-se por ligar os dados em conjunto para definir as diferentes estratégias.

4.7.2 Desenvolvimento do diagrama de influência

O diagrama de influência é uma ferramenta de demonstração das relações que levam a decidir por estratégias alternativas, através das incertezas dos resultados, das consequências afins e dos valores das relações para estimar um resultado financeiro. O diagrama é construído através da ordem apresentada na tabela de estratégia, estando nesta os elementos ordenados temporalmente da esquerda para a direita (ASME, 2003).

Depois de os nós e as suas ligações estarem correctamente efectuadas, representa-se os nós da seguinte forma:

- **Nós de valor –** rectângulos com o bordo a verde;
- **Nós de alternativas –** elipses;
- **Nós de decisão –** rectângulos com o bordo a encarnado.

4.7.3 Desenvolvimento da árvore de decisão

O diagrama de influência estabelece as relações entre as categorias e a árvore de decisão clarifica a ordem temporal das decisões e consequências entre as categorias e as suas alternativas (ASME, 2003).

4.7.4 Construção da folha de cálculo

As múltiplas entradas de valores para cada célula no modelo de decisão são representadas na árvore de decisão. O modelo da folha de cálculo deve apenas conter os seguintes elementos (ASME, 2003):

1. A decisão para cada estratégia;
2. A incerteza dentro de cada estratégia;
3. Os cálculos que se referem às decisões e incertezas;
4. Os cálculos dos nós de valor que dizem respeito a outros nós do valor de critério.

Isto permite um cálculo rápido do valor actual das diferentes alternativas com valores diferentes ou combinações de alternativas.

4.7.5 Utilizar o modelo de decisão para determinar a melhor estratégia

O modelo de decisão utiliza os valores de entrada e as relações que foram estabelecidas pelo processo de modelagem da decisão para calcular o valor actual para cada uma das estratégias. Em qualquer análise existe um caso ou a estratégia *status* onde o resultado não sofre qualquer alteração com a esta abordagem (ASME, 2003).

Pode dizer-se que o NPV é o valor para evitar as consequências do caso base e a prossecução dos custos e consequências do caso alternativo. Se o NPV é positivo, então a alternativa é a melhor opção. Se existem várias alternativas com o NPV positivo, a alternativa que produz o NPV mais elevado, em geral, é a melhor opção. O modelo de decisão prevê um rápido método de cálculo para o NPV de cada estratégia de decisão (ASME, 2003).

4.8 Análise de sensibilidade

Uma questão importante que necessita de ser respondida é se a informação colocada em cada nó no modelo de decisão é suficientemente bem definida para apoiar a análise. O grau de

definição da informação está dependente da variação do NPV devido à informação adicionada ao nó em questão. O grau de influência é a sensibilidade do modelo de decisão relativamente ao nó em questão. É preciso determinar qual dos nós tem uma maior sensibilidade e em seguida garantir que temos suficientemente bem definida a informação nesses nós. Este é o objectivo de uma análise de sensibilidade (ASME, 2003).

Nota extremamente importante – este procedimento ajuda a melhorar o modelo. Apenas com "muita sorte" se pode apontar uma falha ou fraqueza no modelo, mas não se pode esperar que este procedimento possa identificar dados em falta, resultados sem lógica, erros e outros erros de modelagem. Na área de informática, existe uma expressão que se tornou um *clichê* e pode ser utilizada neste caso: "*garbage in, garbage out*". Portanto, é necessário ter em conta que este processo não pode identificar a inserção de dados errados, não pode dizer directamente como obter bons resultados a partir de dados errados, e com certeza que não vai identificar se o modelo está a produzir resultados errados a partir de dados correctos (ASME, 2003).

Tendo em conta o que foi descrito, a análise de sensibilidade é sempre uma boa ideia em qualquer análise baseada no risco. Provavelmente, utilizar-se-á ao longo da vida útil dos componentes, tornando a análise de sensibilidade um excelente instrumento de controlo de qualidade. A análise de sensibilidade deve ser considerada absolutamente necessária se os resultados produzidos pelo modelo estão em desacordo com a intuição e experiência do parecer técnico (ASME, 2003).

4.8.1 Métodos de refinação das variáveis importantes

De seguida, descreve-se três métodos de refinação das variáveis para se obter uma nova e melhor informação para inserir no modelo e determinar novamente a melhor estratégia.

4.8.1.1 Múltiplas fontes intervenientes na manutenção da instalação

Se a fonte de uma das mais sensíveis variáveis é uma estimativa grosseira, a melhor solução é falar com o responsável pela área em questão e procurar uma melhor fonte de aproximação. Essa informação é colocada directamente na variável de distribuição aleatória adequada. Se existirem duas fontes credíveis, faz-se uma conjugação de ambas chegando a um consenso (ASME, 2003).

4.8.1.2 Refinar o modelo Remaining Life Assessment (RLA)

Se a análise de sensibilidade mostra que um dos factores mais sensíveis é a POF relacionada com aos danos no mecanismo, então vai ser preciso refinar esses dados de entrada. Se apenas algumas opiniões e o histórico de falhas foram utilizados separadamente ou em conjunto, uma análise RLA detalhada deve ser necessária. Deve-se executar uma análise RLA nova, mais detalhada e rigorosa (ASME, 2003).

4.8.1.3 Avaliar o valor da variável significante

Se uma das mais sensíveis variáveis é uma das que se possam controlar, tal como o "quem realiza a inspecção", deve retirar-se os valores extremos deixando apenas os nominais ou médios. Observa-se a diferença do NPV calculado para cada valor. Se a diferença for maior que o custo da diferença incrementada entre o maior e menor valor, então tem-se uma base para utilizar o valor mais elevado da variável. Poder-se-ia "ir mais longe" e calcular o valor preciso, ou calcular o melhor e o pior caso, e seguidamente calcular ainda a propagação de valor NPV entre ambos (ASME, 2003).

5 Aplicação da metodologia desenvolvida

A metodologia desenvolvida neste trabalho e descrita no capítulo 4 foi aplicada aos equipamentos dinâmicos de uma unidade da FCO da Refinaria do Porto da Petrogal, para se verificar as vantagens da sua aplicabilidade.

A metodologia RBI foi concebida originalmente para aplicação a equipamentos estáticos, pretendendo com este estudo demonstrar-se a sua aplicabilidade aos equipamentos dinâmicos (como bombas, compressores).

Os equipamentos dinâmicos são equipamentos de extrema importância nas fábricas da indústria de processo, pois são estes que provocam a movimentação dos produtos de um processo para outro. Também são considerados equipamentos dinâmicos os de accionamento, como turbinas a vapor e motores eléctricos. Portanto, para conseguir realizar a movimentação do produto em boas condições, é necessário que o conjunto, equipamento de bombagem mais equipamento de accionamento, esteja em plenas condições.

No trabalho anterior "Projecto fim de curso", foi estudada a fiabilidade dos equipamentos dinâmicos das Unidades 1200 "*Unifining*", Unidade 3300 "*Platforming Continuous Catalyst Regeneration*" e a Unidade 4000 "*Central Termoeléctrica*". Como foi visto, a Unidade 1200 era a que possuía mais e melhor informação, apesar de insuficiente para uma análise de fiabilidade. Ambas as unidades são preciosas para o funcionamento do complexo:

- **Unidade 1200 –** a gasolina selvagem (C_nH_m+S+N+O) é enviada para esta Unidade, efectuando-se a remoção por via catalítica em atmosfera de hidrogénio dos compostos orgânicos de Enxofre, Azoto e Oxigénio presentes nesta gasolina, os quais actuariam como veneno permanente ou temporário do catalizador da Unidade de Reformação Catalítica "*Platforming*" situada a jusante na fileira de tratamento.
- **Unidade 3300 –** o propósito desta operação trata de converter os hidrocarbonetos nafténicos e parafínicos em aromáticos (reformação catalítica), que é uma reorganização molecular, libertando Hidrogénio como subproduto de reacção. Este Hidrogénio é essencial a outros processos. Se esta Unidade e a Unidade 1300 pararem, pára o complexo inteiro.
- **Unidade 4000 –** é responsável pela produção de energia do complexo, o que faz com que a sua paragem implique a paragem total da Refinaria. O complexo industrial é autónomo na produção de vapor e energia eléctrica de que necessita para a sua laboração.

Na Unidade 1200 "*Unifining*", que vai ser a unidade analisada, predominam as bombas como equipamentos dinâmicos de bombagem ou transferência e os motores eléctricos como

equipamentos de accionamento. Está representado na Figura 20, um diagrama que mostra as consequências que advêm da paragem da Unidade, sendo ela programada ou não.

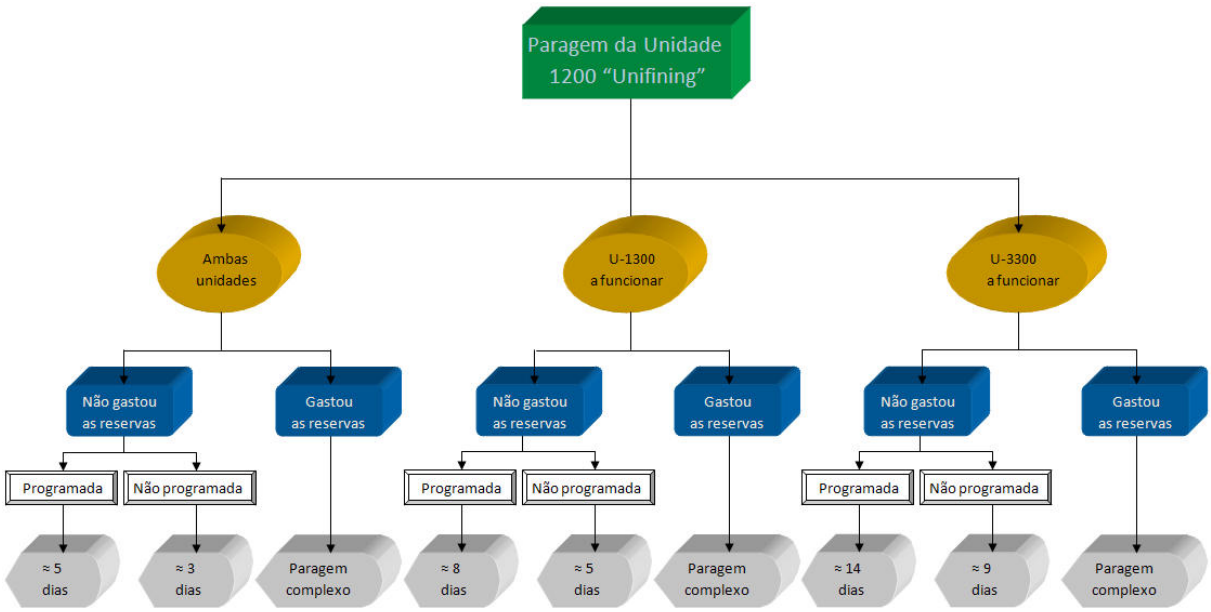


Figura 20 - Consequências da paragem da Unidade 1200.

5.1 Definição do sistema

Foi considerado como sistema de análise a Unidade 1200 "*Unifining*" da FCO. Esta Fábrica é constituída por 14 unidades processuais que, partindo do petróleo bruto, obtêm toda a gama de produtos combustíveis, incluindo grande parte da matéria-prima que alimenta a Fábrica dos Aromáticos, como pode ser visto na Figura 21.

Os produtos combustíveis são obtidos através de operações de separação física, tratamento químico ou ainda por processos de conversão da estrutura molecular de algumas famílias de hidrocarbonetos.

A Unidade 1200 é conhecida por Unidade de Dessulfuração de Gasolina Pesada. A gasolina selvagem (C_nH_m+S+N+O) é transportada para esta unidade, onde são removidos por via catalítica em atmosfera de hidrogénio, os compostos orgânicos de Enxofre, Azoto e Oxigénio presentes na gasolina, os quais actuariam como um veneno permanente ou temporário do catalisador das Unidades de Reformação Catalítica "*Platformings*" situadas a jusante na fileira do tratamento. O produto gasoso da reacção constituído por Hidrogénio e hidrocarbonetos muito leves, gás sulfídrico e o amoníaco, são submetidos a um tratamento de purificação por aminas (tratamento de gases). O gás sulfídrico é separado e enviado para a Unidade de Recuperação de Enxofre e os hidrocarbonetos encaminhados para a rede de fuel-gás.

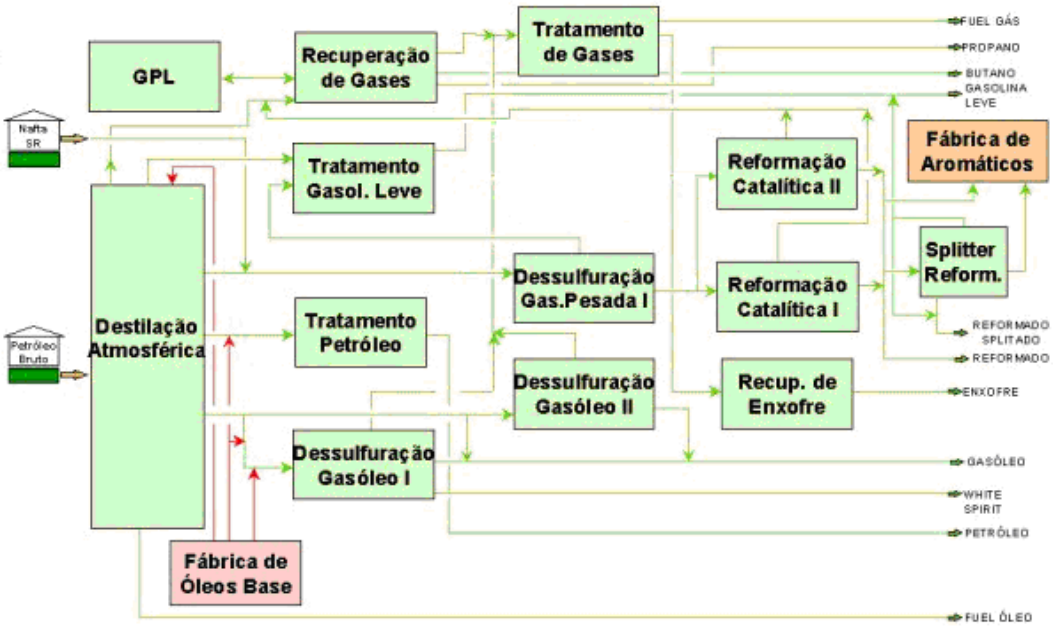


Figura 21 - Organização da FCO.

Após todas as simplificações, que estão descritas no Anexo VI, obtêm-se os seguinte sistema para os equipamentos dinâmicos da Unidade 1200, como se pode observar na Figura 22.

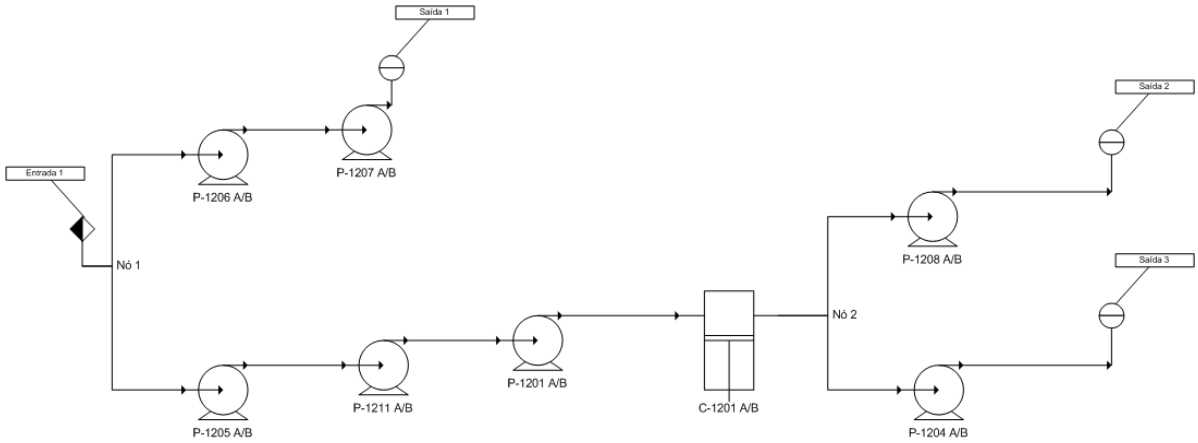


Figura 22 - Fluxograma simplificado dos equipamentos dinâmicos da Unidade 1200.

O critério de sucesso, nesta análise, é definido para a laboração da Unidade a 100%. Assim, o objectivo não é cumprido quando a produção da Unidade baixa dos 100%. Considera-se que o objectivo não é cumprido se algum dos equipamentos essenciais para o funcionamento da Unidade não se encontrar a funcionar a 100%, e como tal, classifica-se a ocorrência como uma falha do sistema a analisar.

5.2 Informação do sistema

O sistema a analisar é constituído pelos seguintes equipamentos: bombas centrífugas, compressores alternativos, turbinas a vapor e motores eléctricos. De seguida, descreve-se cada um dos equipamentos.

5.2.1 Bombas

As bombas podem ser divididas nos seguintes grupos, como se pode observar na Figura 23:



Figura 23 - Divisão das bombas segundo a sua função e construção.

A Figura 24, seguidamente apresentada, é um diagrama funcional das bombas em geral, composto pelas subdivisões onde se encontram os componentes que podem sofrer manutenção.

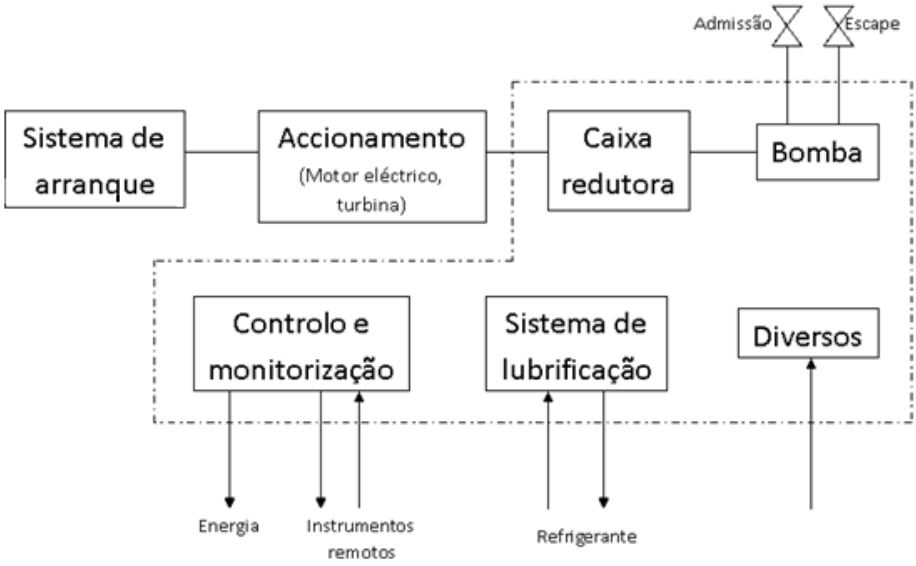


Figura 24 - Diagrama funcional das bombas.

Nas bombas centrífugas, como o próprio nome indica, o impulso do líquido é obtido por acção de uma força centrífuga. Estas bombas são essencialmente constituídas por um impulsor (roda

de palhetas) que gira dentro de uma câmara fechada comunicando ao centro da tubagem da aspiração e pela periferia com a conduta de descarga. Ao girar o impulsor e por efeito da rotação, cria-se uma força centrífuga que obriga o líquido contido entre as palhetas a deslocar-se para a periferia, criando uma depressão no centro. Como consequência, o líquido é admitido pela tubagem de aspiração e impulsionado na conduta de descarga.

Para as bombas centrífugas foram considerados 5 modelos, e são apresentadas as divisões dos subsistemas nos componentes que os constituem, como se pode observar na Figura 25.

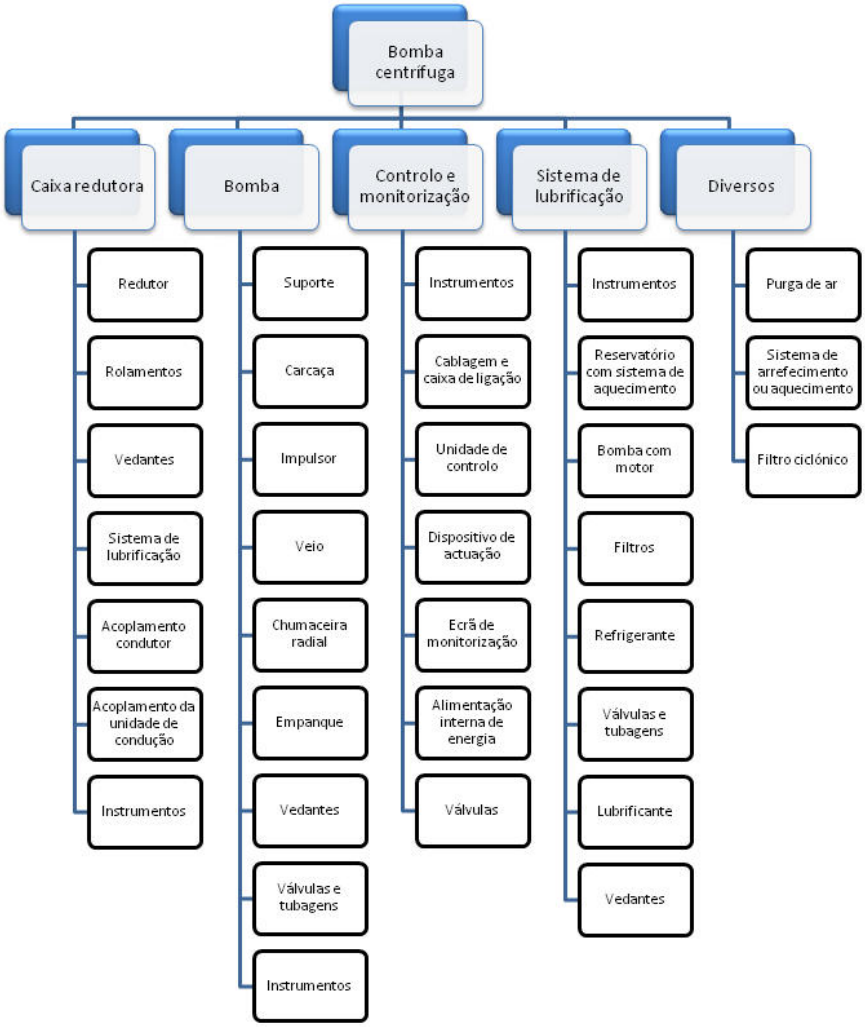


Figura 25 - Bomba e seus subsistemas e componentes.

A maioria das bombas centrífugas utilizadas na Refinaria são designadas por bombas *process*. Estas bombas têm as seguintes características (Marnoco & Sousa, 1965):

- As flanges de aspiração e de descarga são dirigidas para cima e muitas vezes situadas ao mesmo nível;

- São suportadas axialmente e podem ser desmontadas sem remover as tubagens;
- O plano de desmontagem das chumaceiras, isto é, o corpo das chumaceiras é perpendicular ao eixo longitudinal da bomba;
- Possuem uma câmara de arrefecimento da caixa de empanque e eventualmente outra câmara de arrefecimento da caixa de chumaceiras. Os pedestais de suporte do corpo da bomba também podem ser arrefecidos quando necessário;
- Os impulsores e o corpo da bomba possuem anéis de desgaste ou de estanquecidade.

5.2.2 Compressores

Os compressores podem ser divididos nos seguintes grupos, como se pode observar na figura seguinte 26.

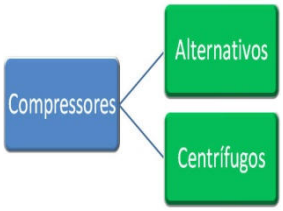


Figura 26 - Divisão dos compressores segundo a sua função e construção.

A Figura 27 apresenta um diagrama funcional dos compressores em geral, composto pelas subdivisões onde se encontram os componentes que podem sofrer manutenção.

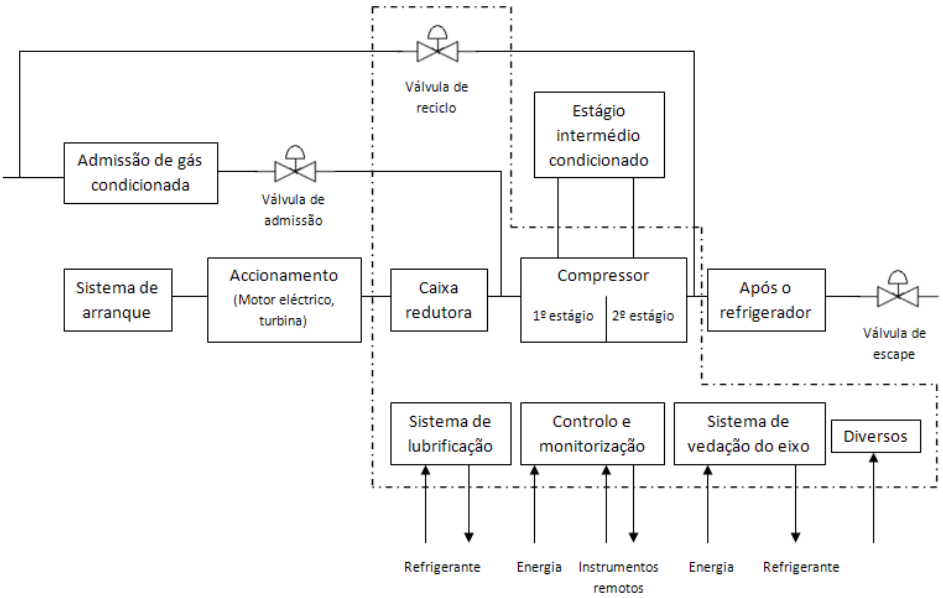


Figura 27 - Diagrama funcional dos compressores.

Os compressores operam com fluidos compressíveis e são utilizados para proporcionar a elevação de pressão de um gás ou escoamento gasoso.

Nas máquinas alternativas, a elevação de pressão é conseguida através de uma redução de volume ocupado pelo gás e pelo movimento linear de um êmbolo ou pistão.

Para os compressores alternativos foram considerados 6 modelos, e são apresentadas as divisões dos subsistemas nos componentes que os constituem, como se pode observar na Figura 28.

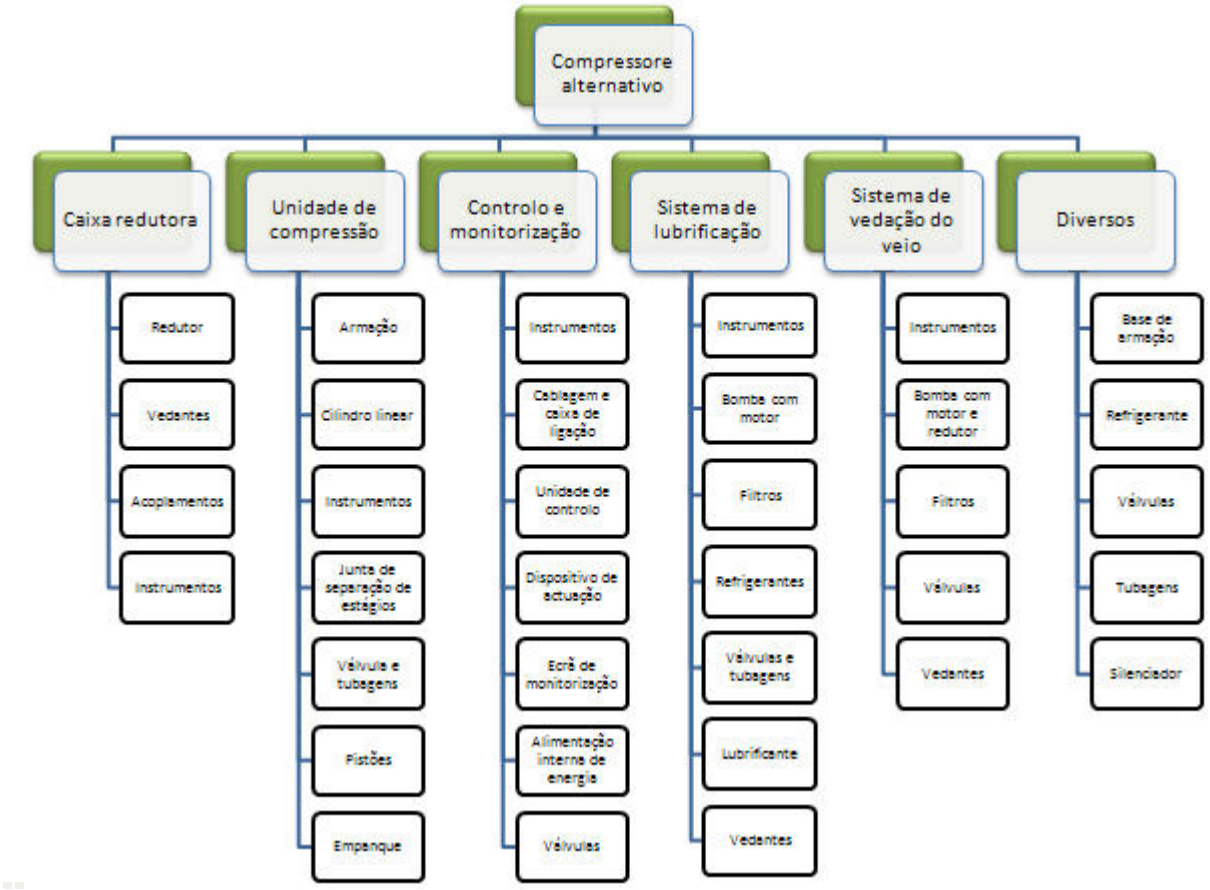


Figura 28 – Compressores e seus subsistemas e componentes.

5.2.3 Turbinas

A Figura 29 apresenta um diagrama funcional das turbinas em geral, composto pelas subdivisões onde se encontram os componentes que podem sofrer manutenção.

Estas máquinas transformam em energia mecânica a energia contida no vapor de água sob a forma de energia térmica e de pressão. As turbinas analisadas servem como forma de accionamento de bombas, compressores e ventiladores. São turbinas de acção com um andar de pressão, dois andares de velocidade e com sistema de regulação mecânico.

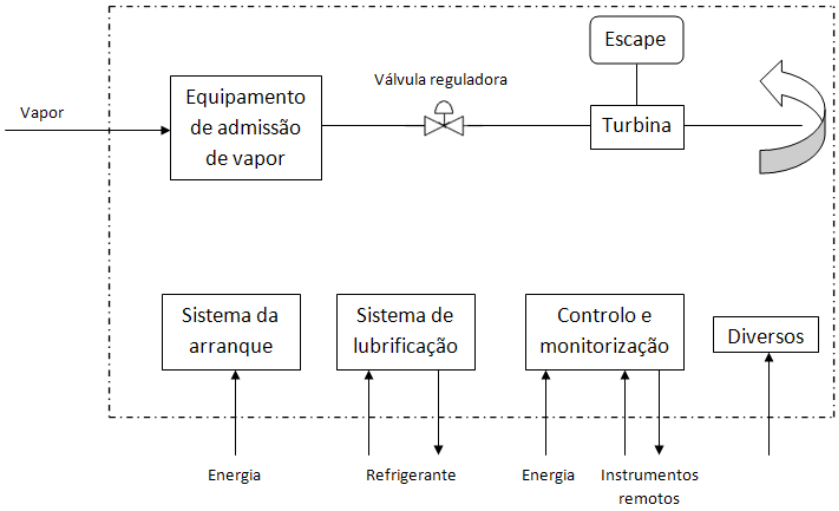


Figura 29 - Diagrama funcional das turbinas.

Para as turbinas foram considerados 6 modelos, e são apresentadas as divisões dos subsistemas nos componentes que os constituem, como se pode observar na Figura 30.

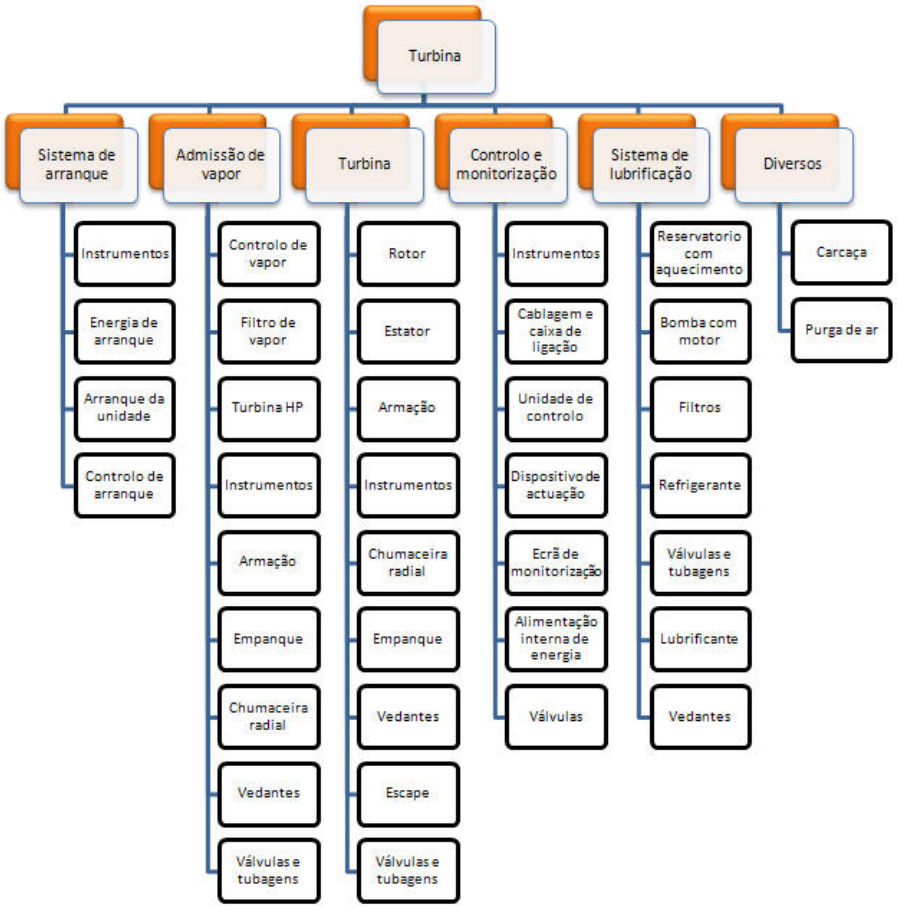


Figura 30 - Turbinas e seus subsistemas e componentes.

5.2.4 Motores eléctricos

A Figura 31 apresenta um diagrama funcional dos motores eléctricos em geral, composto pelas subdivisões onde se encontram os componentes que podem sofrer manutenção.

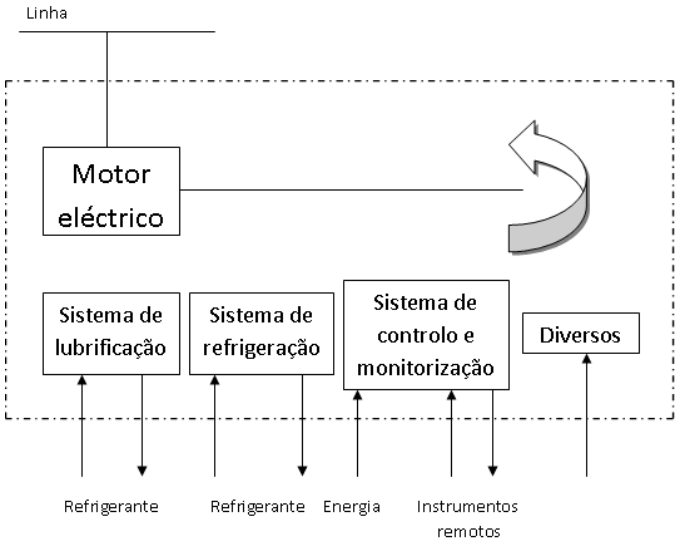


Figura 31 - Diagrama funcional dos motores eléctricos.

Os motores eléctricos transformam energia eléctrica em energia mecânica, sendo uma máquina adequada para o accionamento de bombas, compressores e ventiladores. Uma vez que a maioria das linhas eléctricas transportam corrente alternada, a maior parte dos motores eléctricos funciona com corrente alternada, sendo os mais utilizados os motores de indução. Estes motores são simples, robustos e com um funcionamento relativamente livre de perturbações, além de apresentar um rendimento elevado (≈95%).

Para os motores eléctricos foram considerados 6 modelos, e são apresentadas as divisões dos subsistemas nos componentes que os constituem, como se pode observar na Figura 32.

Os motores da Refinaria são motores de indução trifásicos, que têm uma gama de potências alargadas. As maiores vantagens na aplicação destes motores são (Ribeirinho, 1964):

- Accionamento contínuo, pois mesmo depois de muitas horas de trabalho nunca ficam excessivamente quentes;
- Trabalham a velocidades relativamente constantes sob cargas variáveis;
- Arrancam em condições de segurança em carga.

Realizou-se mais uma pesquisa nos arquivos da Refinaria. Nessa pesquisa, foi possível recolher alguns dados e características de projecto e funcionamento dos equipamentos em questão. No Anexo VII, é apresentada uma lista com todos os dados e características de funcionamento dos equipamentos analisados. Destes, apenas os equipamentos (P-1201 A e C-1201 A) têm dados

suficientes para serem alvo de uma análise. A lista de intervenções dos equipamentos pode ser vista no Anexo VIII.

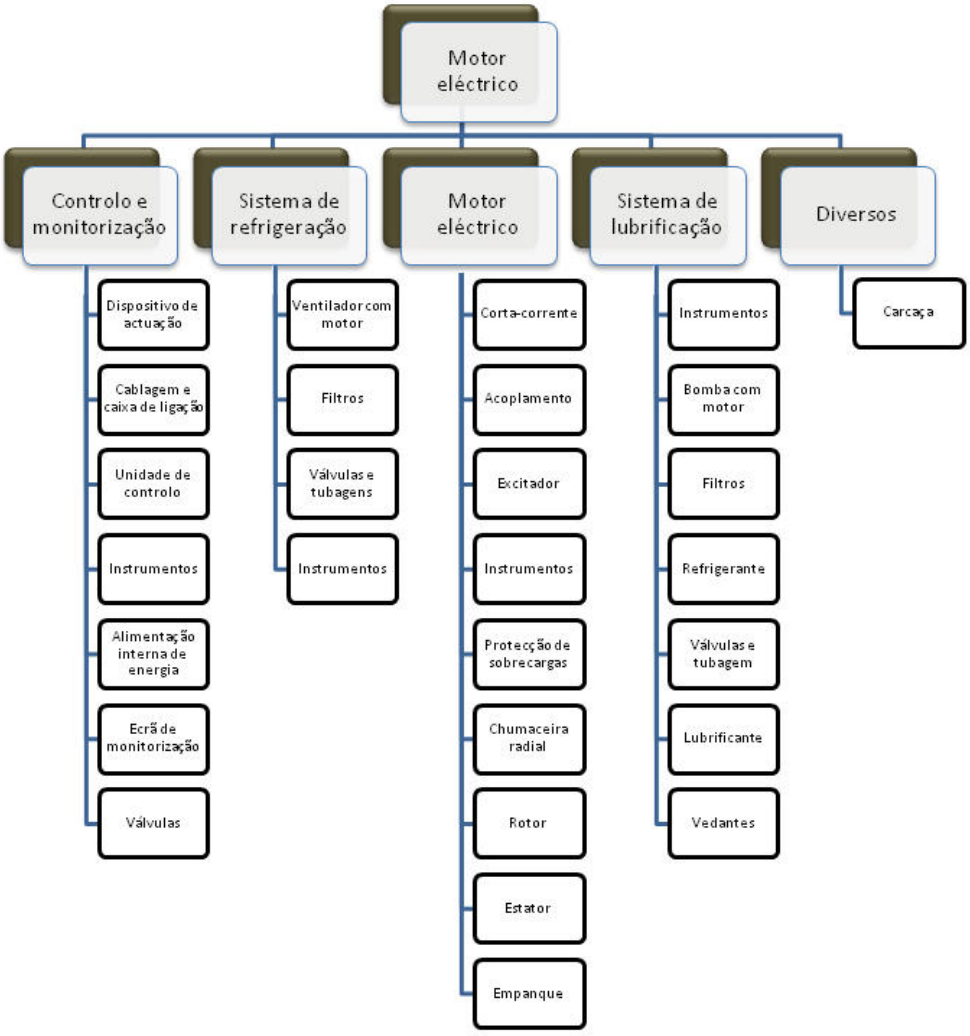


Figura 32 - Motores eléctricos e seus subsistemas e componentes.

Devido à pouca informação existente na Refinaria, para um estudo com estas características, foram utilizados os dados genéricos existentes numa base de dados, a utilizada foi OREDA® (Offshore Reliability Data Handbook), tendo em conta as seguintes características:

- É uma base de dados referente a instalações petrolíferas;
- Tinha como objectivo recolher os dados de fiabilidade, dos equipamentos existentes nas instalações analisadas;
- Elevado número de instalações analisadas, estudo realizado desde 1981;
- Elevada gama de equipamentos analisados.

Com os dados recolhidos sobre os equipamentos e com a ajuda da base de dados OREDA®, procuram-se os equipamentos com o tipo e características de funcionamento mais semelhantes, de modo a retirar os dados de fiabilidade existentes na base de dados e aplicá-los aos equipamentos da Refinaria.

Os tipos de equipamentos existentes na OREDA®, similares aos equipamentos existentes na Refinaria, são os seguintes:

- Bombas centrífugas – Processamento do produto;
- Compressores alternativos – Accionamento eléctrico (100 a 1000 kW);
- Motores eléctricos – Bombas – Processamento do produto;
- Motores eléctricos – Compressores – Processamento de gás;
- Turbinas a gás – Industrial (0 a 1000 kW).

As taxas de falha para cada tipo de equipamento, bem como as taxas de falhas de cada componente em cada modo de falha e a percentagem que cada causa contribui para um modo de falha, estão apresentadas no Anexo IX.

5.3 Avaliação qualitativa

Nesta etapa, começa por definir-se os critérios de severidade, critérios esses que são os mesmos para todos os equipamentos. Para a definição de severidade, o critério de avaliação utilizado teve como objectivo quantificar os efeitos no estado de operação e a perda de produção do sistema. De seguida, são classificados os níveis de severidade considerados:

- **Categoria I "Crítico" –** a falha causa uma imediata e completa perda da capacidade de produção do sistema;
- **Categoria II "Degradação" –** a falha não é crítica, mas implica que o sistema trabalhe fora das suas especificações. Estas falhas costumam ser, mas não necessariamente, graduais ou parciais, e podem tornar-se numa falha crítica em pouco tempo;
- **Categoria III "Insignificante" –** a falha não causa imediatamente perda da capacidade de produção do sistema mas, se não for tida em conta, pode resultar numa falha crítica ou de degradação num futuro próximo.

Para a definição de ocorrência, o critério utilizado foi a taxa de falha porque esta reflecte a frequência com que os modos de falha acontecem, permitindo assim uma classificação clara e objectiva da ocorrência.

As taxas de falha foram retiradas da base de dados OREDA®, tal como os níveis de severidade. No caso das taxas de falha, os níveis de ocorrência têm bases diferentes para cada tipo de equipamento.

Para as Bombas centrífugas – Processamento de produto e Compressores alternativos – Accionamento eléctrico (100 a 1000 kW), tem-se os seguintes níveis de ocorrência:

- **Nível A "Muito alta" –** POF superiores a $75x10^{-6}$;
- **Nível B "Alta" –** POF superiores a $50x10^{-6}$ e inferiores ou iguais a $75x10^{-6}$;
- **Nível C "Moderada" –** POF superiores a $30x10^{-6}$ e inferiores ou iguais a $50x10^{-6}$;
- **Nível D "Baixa" –** POF superiores a $15x10^{-6}$ e inferiores ou iguais a $30x10^{-6}$;
- **Nível E "Muito baixa" –** POF superiores a $5x10^{-6}$ e inferiores ou iguais a $15x10^{-6}$;
- **Nível F "Remota" –** POF inferiores ou iguais a $5x10^{-6}$.

Para os Motores eléctricos – Bombas – Processamento do produto e Motores eléctricos – Compressores – Processamento de gás, tem-se os seguintes níveis de ocorrência:

- **Nível A "Muito alta" –** POF superiores a $16x10^{-6}$;
- **Nível B "Alta" –** POF superiores a $8x10^{-6}$ e inferiores ou iguais a $16x10^{-6}$;
- **Nível C "Moderada" –** POF superiores a $4x10^{-6}$ e inferiores ou iguais a $8x10^{-6}$;
- **Nível D "Baixa" –** POF superiores a $2x10^{-6}$ e inferiores ou iguais a $4x10^{-6}$;
- **Nível E "Muito baixa" –** POF superiores a $1x10^{-6}$ e inferiores ou iguais a $2x10^{-6}$;
- **Nível F "Remota" –** POF inferiores ou iguais a $1x10^{-6}$.

Para as Turbinas a gás – Industrial (0 a 1000 kW), tem-se os seguintes níveis de ocorrência:

- **Nível A "Muito alta" –** POF superiores a $100x10^{-6}$;
- **Nível B "Alta" –** POF superiores a $70x10^{-6}$ e inferiores ou iguais a $100x10^{-6}$;
- **Nível C "Moderada" –** POF superiores a $45x10^{-6}$ e inferiores ou iguais a $70x10^{-6}$;
- **Nível D "Baixa" –** POF superiores a $25x10^{-6}$ e inferiores ou iguais a $45x10^{-6}$;
- **Nível E "Muito baixa" –** POF superiores a $10x10^{-6}$ e inferiores ou iguais a $25x10^{-6}$;
- **Nível F "Remota" –** POF inferiores ou iguais a $10x10^{-6}$.

Após a definição dos níveis de ocorrência e severidade, é possível fazer uma avaliação do risco. Esta é feita pela combinação da frequência de ocorrência, de um acontecimento potencialmente perigoso, com a severidade das suas consequências, determinando assim o nível do risco resultante de um acontecimento potencialmente perigoso.

Para a aceitação do risco, foi considerado o princípio ALARP. Seguidamente, são demonstradas as categorias de risco e as acções aplicáveis em cada categoria para os equipamentos em estudo, tendo em conta a matriz obtida pelo software RCM++ 4.

Tabela 1 - Categorias de risco e acções a aplicar em cada uma.

Categorias de risco	Acções a aplicar em cada categoria
Intolerável [12 a 18]	Deve ser eliminado
Tolerável [8 a 11]	Risco aceitável
Desprezável [1 a 7]	Risco desprezável

Pode agora realizar-se a matriz da criticidade. Para isso, basta apenas cruzar a informação dos níveis de severidade com os níveis de ocorrência, sendo desta forma possível classificar os modos de falha quanto ao seu nível de risco. No caso dos modos de falha que possuam mais do que um nível de severidade, optou-se por colocar sempre a combinação onde o nível de risco fosse superior. No caso do nível de risco ser igual, optou-se por colocar a combinação com maior nível de severidade.

De seguida, apresentam-se as matrizes criticidade para os tipos de equipamentos analisados. No Anexo X, são apresentadas as tabelas onde estão especificadas as classificações da criticidade. As abreviaturas para os modos de falha são as seguintes:

- ✓ **CO –** Colapso;
- ✓ **DE –** Deficiência estrutural;
- ✓ **DES –** Desconhecido;
- ✓ **DIN –** Débito insuficiente;
- ✓ **DIR –** Débito irregular;
- ✓ **DPF –** Desvio dos parâmetros de funcionamento;
- ✓ **FA –** Falha no arranque;
- ✓ **FEPA –** Fuga externa – produto auxiliar;
- ✓ **FEPP –** Fuga externa – produto do processo;
- ✓ **FEV –** Fuga externa – vapor;
- ✓ **FI –** Fuga interna;
- ✓ **FNP –** Falha na paragem;
- ✓ **FP –** Falsa paragem;
- ✓ **LAI –** Leitura anormal dos instrumentos;
- ✓ **OUT –** Outras;
- ✓ **PPDF –** Pequenos problemas durante o funcionamento;
- ✓ **RUI –** Ruído;
- ✓ **SOB –** Sobreaquecimento;
- ✓ **VIB –** Vibração.

Tabela 2 - Matriz criticidade das Bombas centrífugas - Processamento do produto.

PROBABILIDADE DO NÍVEL DE OCORRÊNCIA			
Nivel A Muito alta		**- FEPA**	**- FEPP**
Nível B Alta	**- PPDF**		
Nível C Moderada	**- LAI**		
Nível D Baixa			**- FP**
Nível E Muito baixa		**- FI** **- OUT** **- DPF**	**- CO** **- FA** **- VIB**
Nível F Remota			
	Categoria III Insignificante	Categoria II Degradação	Categoria I Crítica

CLASSIFICAÇÃO DA SEVERIDADE

Tabela 3 - Matriz criticidade das Compressores alternativos - Accionamento eléctrico (100 a 1000 kW).

PROBABILIDADE DO NÍVEL DE OCORRÊNCIA				
	Nivel A Muito alta		**- DIN**	
	Nível B Alta			**- FP**
	Nível C Moderada	**- LAI** **- FEPA**	**- DIR**	**- FA**
	Nível D Baixa	**- FEPP** **- PPDF**	**- SOB** **- DES**	
	Nível E Muito baixa			
	Nível F Remota		**- DPF** **- VIB**	**- FNP** **- RUI** **- OUT** **- DE**
		Categoria III Insignificante	Categoria II Degradação	Categoria I Crítica
		CLASSIFICAÇÃO DA SEVERIDADE		

Tabela 4 - Matriz criticidade das Motores eléctricos - Bombas - Processamento do produto.

PROBABILIDADE DO NÍVEL DE OCORRÊNCIA				
	Nivel A Muito alta	**- DPF**		**- FP** **- DE**
	Nível B Alta			**- CO** **- FA** **- DIN** **- VIB**
	Nível C Moderada			
	Nível D Baixa	**- LAI** **- OUT**		**- RUI** **- DPF**
	Nível E Muito baixa			
	Nível F Remota			
		Categoria III Insignificante	Categoria II Degradação	Categoria I Crítica
		CLASSIFICAÇÃO DA SEVERIDADE		

Tabela 5 - Matriz criticidade das Motores eléctricos - Compressores - Processamento de gás.

PROBABILIDADE DO NÍVEL DE OCORRÊNCIA				
	Nivel A Muito alta		**- DPF**	**- DIN** **- FP**
	Nível B Alta	**- LAI** **- PDF**		**- FA**
	Nível C Moderada	**- DES**		
	Nível D Baixa		**- DIR** **-RUI** **- OUT** **- DE**	**- FEPA** **- FNP**
	Nível E Muito baixa	**- VIB**		**- SOB**
	Nível F Remota			
		Categoria III Insignificante	Categoria II Degradação	Categoria I Crítica
		CLASSIFICAÇÃO DA SEVERIDADE		

Tabela 6 - Matriz criticidade das Turbina a gás - Industrial (0 a 1000 kW).

PROBABILIDADE DO NÍVEL DE OCORRÊNCIA				
	Nível A Muito alta	- PPDF		- FP
	Nível B Alta		- FEPA - OUT	
	Nível C Moderada	- LAI		- FA
	Nível D Baixa			
	Nível E Muito baixa	- VIB	- DIR - FEV - FI - SOB	- FNP
	Nível F Remota			
		Categoria III Insignificante	Categoria II Degradação	Categoria I Crítica
		CLASSIFICAÇÃO DA SEVERIDADE		

5.1 Ferramentas para a análise do sistema

A primeira ferramenta utilizada foi a análise de Pareto, para identificar os componentes responsáveis pela maior parte dos modos de falhas críticos.

O primeiro passo da análise de Pareto é a análise de frequência, que consiste em determinar a contribuição de cada componente para a frequência de ocorrência de cada um dos modos de falha de risco "intolerável". O segundo passo é classificar os componentes responsáveis pela ocorrência dos modos de falha por ordem decrescente de frequência de ocorrência, isto é, começa-se pelo componente com maior percentagem para a contribuição do modo de falha até ao que apresenta a menor percentagem para a contribuição do modo de falha. Sendo assim possível identificar os 20% dos equipamentos que são responsáveis por 80% dos modos de falha, calcula-se a percentagem acumulada dos componentes dos modos de falha de risco "intolerável". O terceiro e último passo é a representação gráfica dos resultados, com os componentes no eixo horizontal, ordenados do mais frequente para o menos frequente, e no eixo vertical a percentagem de criticidade dos componentes.

Este procedimento está realizado no anexo XI.

Aplicando a análise de Pareto aos modos de falha de risco "intolerável", verificou-se que:

- **Bomba centrífuga – Processamento do produto**
  - Fuga externa – Produto do processo:
    - ✓ *Vedantes;*
    - ✓ *Tubagens;*
    - ✓ *Válvula.*

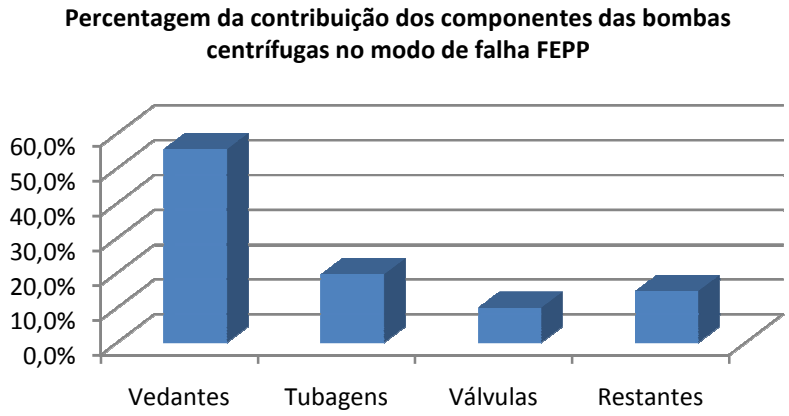


Gráfico 1 – Análise de Pareto aos componentes das bombas centrífugas no modo de falha FEPP.

- Fuga externa – Produto auxiliar:
  - ✓ *Vedantes;*
  - ✓ *Tubagens;*
  - ✓ *Válvulas;*
  - ✓ *Desconhecidos;*
  - ✓ *Outros equipamentos;*
  - ✓ *Bomba com motor.*

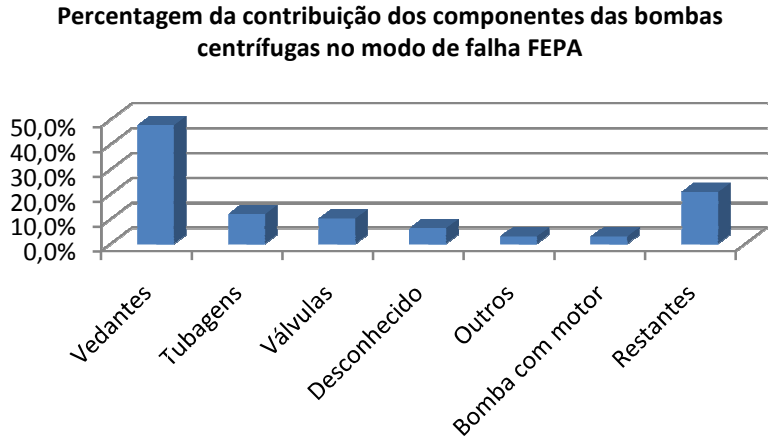


Gráfico 2 – Análise de Pareto aos componentes das bombas centrífugas no modo de falha FEPA.

- **Compressores alternativos – Accionamento eléctrico (100 a 1000 kW)**
  - Falsa paragem:
    - ✓ *Unidade de controlo;*
    - ✓ *Cilindro linear;*
    - ✓ *Instrumentos de temperatura;*

- ✓ *Instrumentos de pressão;*
- ✓ *Líquido lubrificante;*
- ✓ *Tubagens;*
- ✓ *Subunidade.*

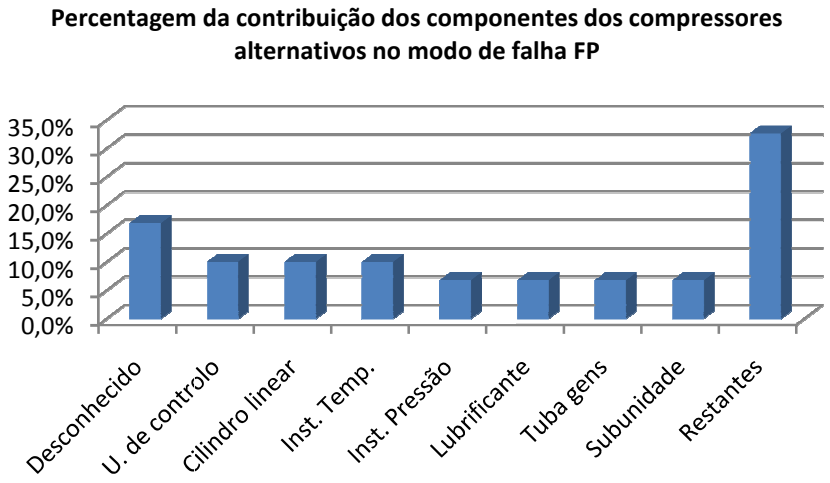


Gráfico 3 – Análise de Pareto aos componentes dos compressores alternativos no modo de falha FP.

- ➢ Débito insuficiente:
  - ✓ *Cilindro linear;*
  - ✓ *Válvulas.*

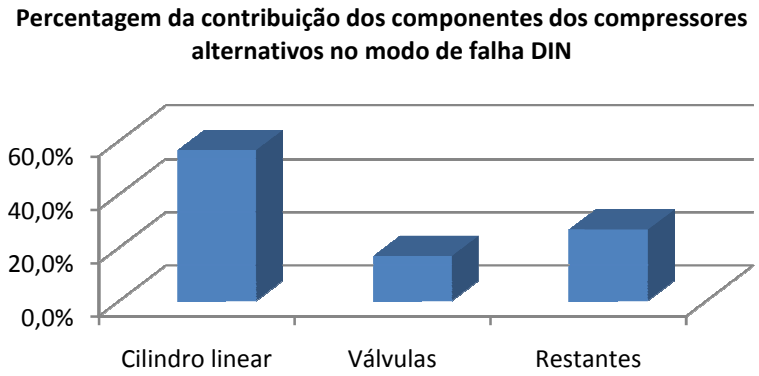


Gráfico 4 – Análise de Pareto aos componentes dos compressores alternativos no modo de falha DIN.

- ➢ Falha no arranque:
  - ✓ *Subunidade;*
  - ✓ *Unidade de controlo;*
  - ✓ *Desconhecido.*

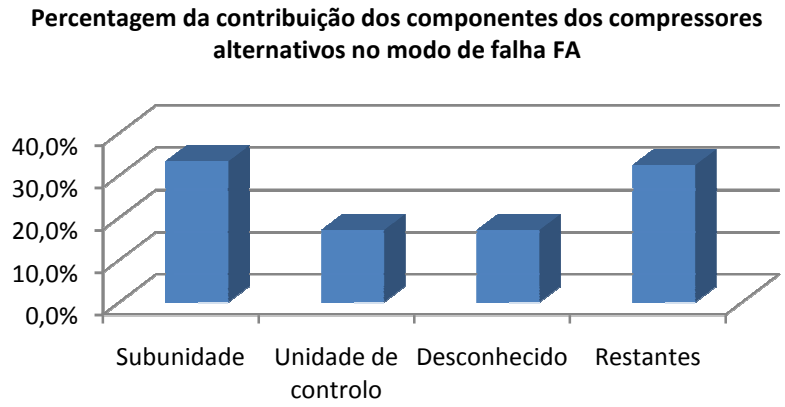


Gráfico 5 – Análise de Pareto aos componentes dos compressores alternativos no modo de falha FA.

- **Motores eléctricos – Bombas – Processamento do produto**
  - Falsa paragem:
    - ✓ *Desconhecido;*
    - ✓ *Unidade de controlo;*
    - ✓ *Outros equipamentos;*
    - ✓ *Subunidade.*

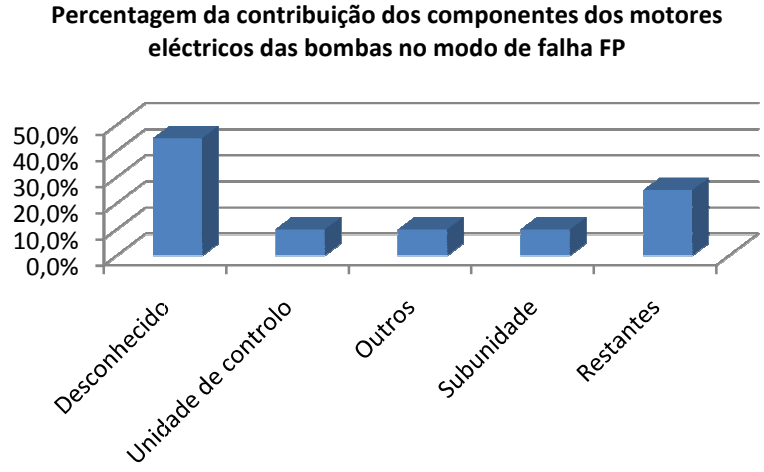


Gráfico 6 – Análise de Pareto aos componentes dos motores eléctricos das bombas no modo de falha FP.

  - Deficiência estrutural:
    - ✓ *Subunidade;*
    - ✓ *Chumaceira radial;*
    - ✓ *Unidade de controlo;*
    - ✓ *Desconhecido.*

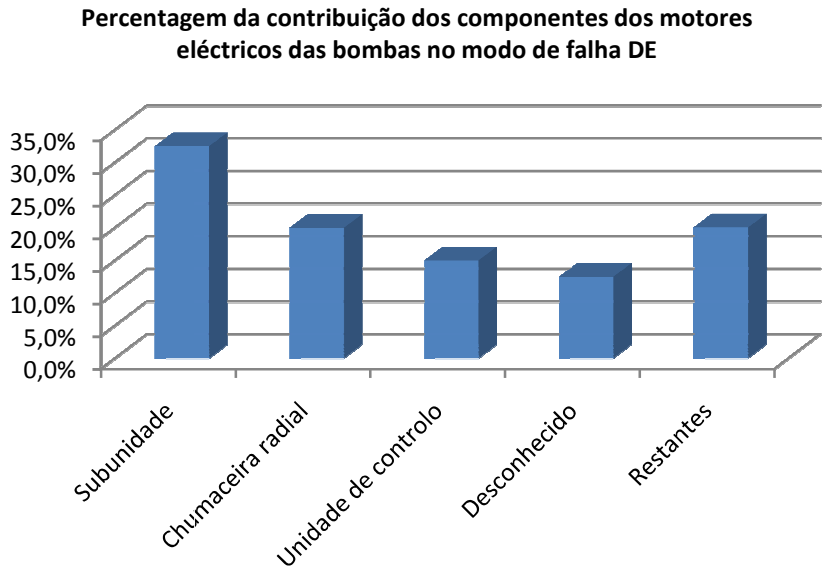


Gráfico 7 – Análise de Pareto aos componentes dos motores eléctricos das bombas no modo de falha DE.

- Colapso:
  - ✓ *Chumaceira radial;*
  - ✓ *Subunidade.*

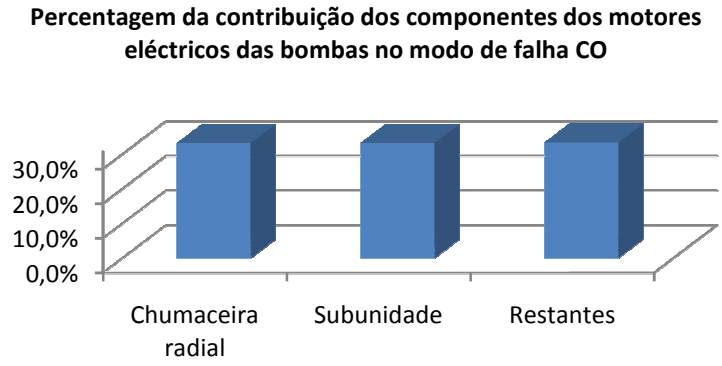


Gráfico 8 – Análise de Pareto aos componentes dos motores eléctricos das bombas no modo de falha CO.

- Falha no arranque:
  - ✓ *Unidade de controlo;*
  - ✓ *Desconhecido.*

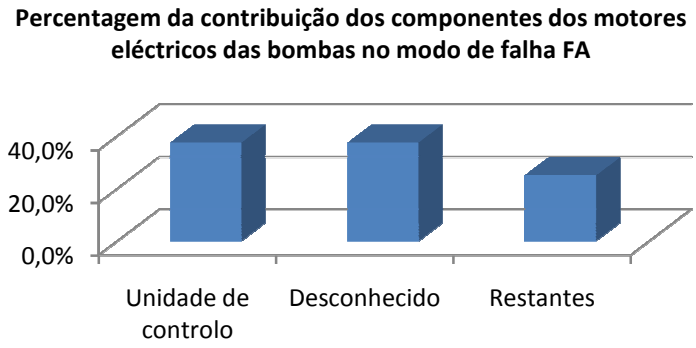


Gráfico 9 – Análise de Pareto aos componentes dos motores eléctricos das bombas no modo de falha FA.

- Débito insuficiente:
  - ✓ *Unidade de controlo.*

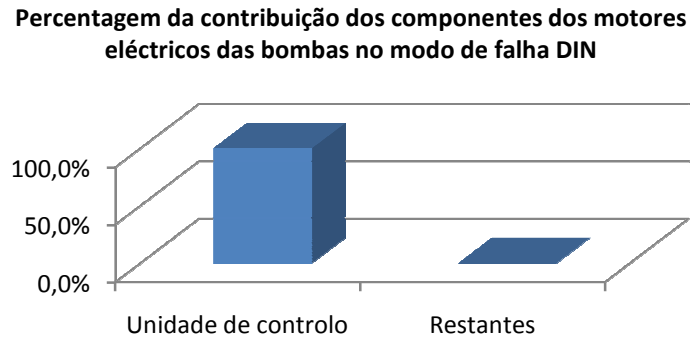


Gráfico 10 – Análise de Pareto aos componentes dos motores eléctricos das bombas no modo de falha DIN.

- Vibração:
  - ✓ *Chumaceira radial;*
  - ✓ *Empanque.*

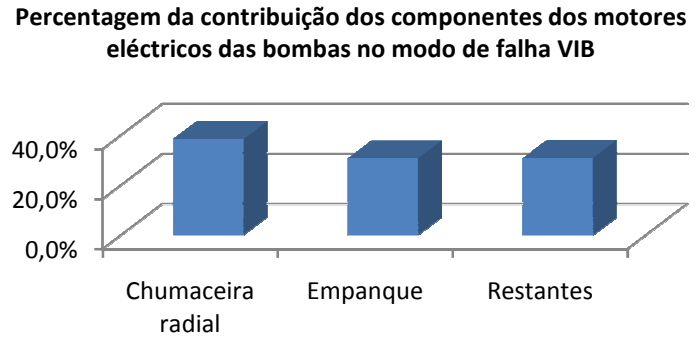


Gráfico 11 – Análise de Pareto aos componentes dos motores eléctricos das bombas no modo de falha VIB.

- **Motores eléctricos – Compressores – Processamento de gás**
  - Débito insuficiente:
    - ✓ *Outros equipamentos;*
    - ✓ *Acoplamento;*
    - ✓ *Subunidade;*
    - ✓ *Desconhecido.*

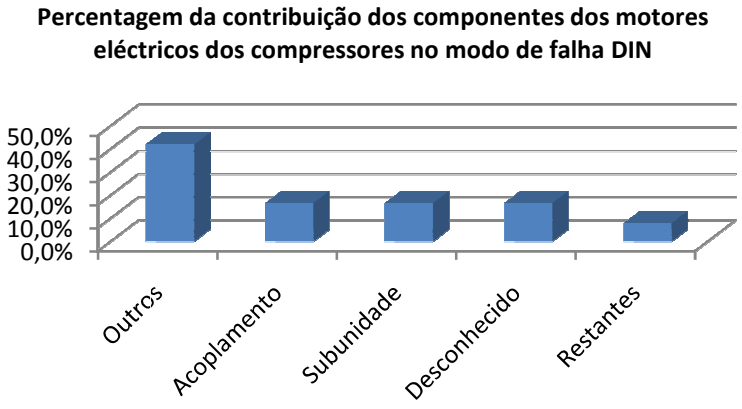


Gráfico 12 – Análise de Pareto aos componentes do motor eléctrico dos compressores no modo de falha DIN.

  - Falsa paragem:
    - ✓ *Desconhecido;*
    - ✓ *Unidade de controlo.*

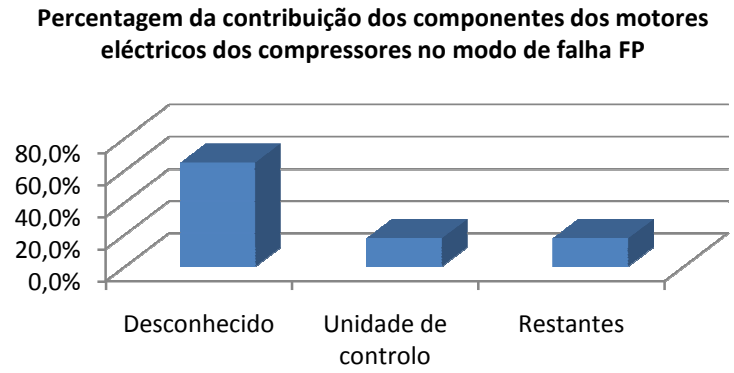


Gráfico 13 – Análise de Pareto aos componentes do motor eléctrico dos compressores no modo de falha FP.

  - Falha no arranque:
    - ✓ *Desconhecido;*
    - ✓ *Dispositivo de actuação;*
    - ✓ *Unidade de controlo;*

- ✓ *Ventilador com motor;*
- ✓ *Estator.*

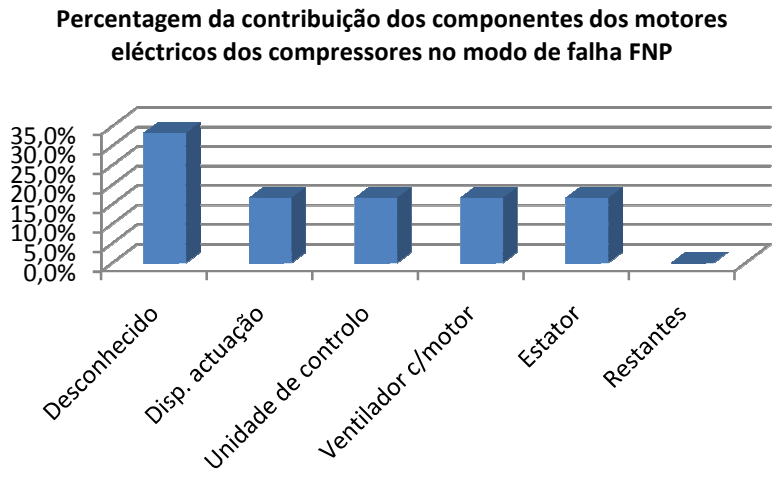


Gráfico 14 – Análise de Pareto aos componentes do motor eléctrico dos compressores no modo de falha FNP.

- ➢ Desvio dos parâmetros de funcionamento:
  - ✓ *Ventilador com motor;*
  - ✓ *Instrumentos gerais;*
  - ✓ *Lubrificante;*
  - ✓ *Outros equipamentos;*
  - ✓ *Desconhecido.*

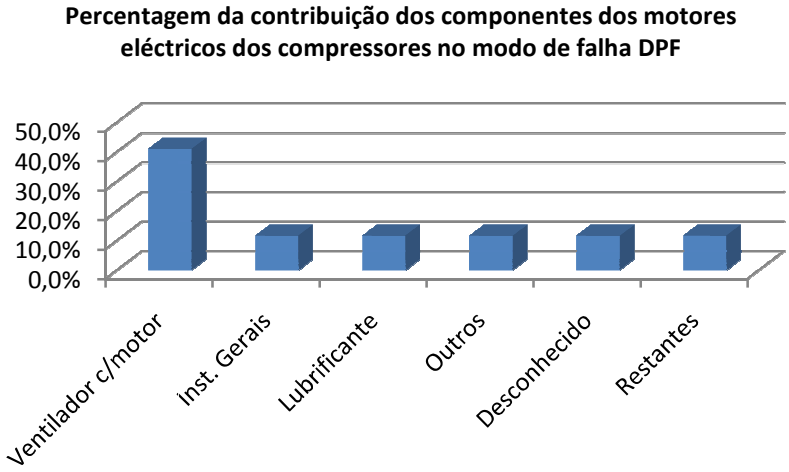


Gráfico 15 – Análise de Pareto aos componentes do motor eléctrico dos compressores no modo de falha DPF.

- **Turbinas a gás – Industrial (0 a 1000 kW)**
  - Falsa paragem:
    - ✓ *Desconhecido;*
    - ✓ *Válvulas;*
    - ✓ *Unidade de controlo;*
    - ✓ *Controlo de vapor;*
    - ✓ *Instrumentos de velocidade;*
    - ✓ *Instrumentos de temperatura;*
    - ✓ *Instrumentos de vibração;*
    - ✓ *Alimentação interna de energia;*
    - ✓ *Subunidade.*

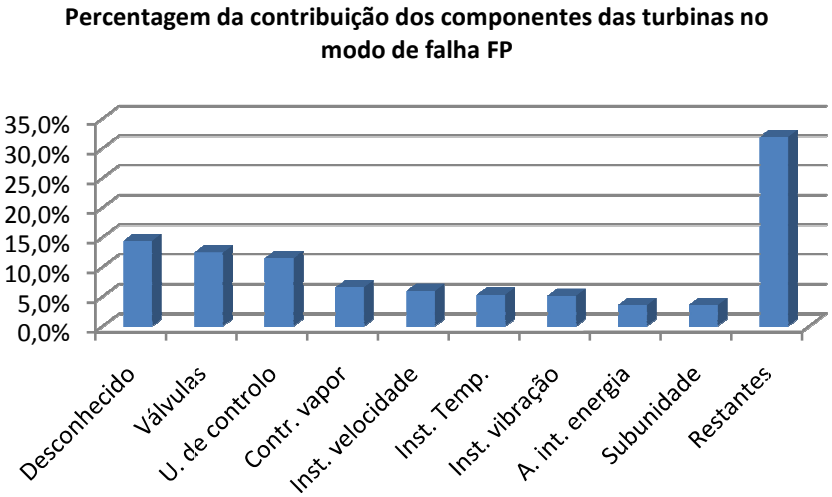


Gráfico 16 – Análise de Pareto aos componentes das turbinas no modo de falha FP.

  - Falha no arranque:
    - ✓ *Desconhecido;*
    - ✓ *Válvulas;*
    - ✓ *Arranque da unidade;*
    - ✓ *Subunidade;*
    - ✓ *Unidade de controlo;*
    - ✓ *Controlo de vapor;*
    - ✓ *Outros equipamentos;*
    - ✓ *Instrumentos de velocidade.*

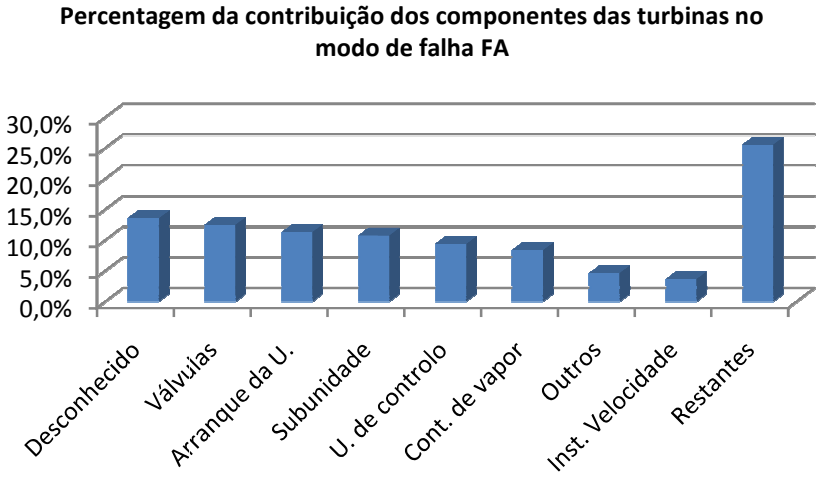


Gráfico 17 – Análise de Pareto aos componentes das turbinas no modo de falha FA.

Na Figura 33, pode observar-se o diagrama de blocos funcional da Unidade 1200. Da análise desta, verificam-se as redundâncias dos equipamentos e os três percursos possíveis que o produto pode realizar dentro desta Unidade. Com a utilização deste diagrama, é demonstrado de uma forma bastante perceptível para qualquer pessoa, a disposição dos equipamentos na Unidade.

Na aplicação desta metodologia não surgiu a necessidade da realização de uma ETA para fazer um estudo dos possíveis cenários de sequência de acontecimentos, que podem conduzir a consequências muito graves resultantes de uma avaria ou de um acontecimento indesejável.

Realizou-se uma árvore de falha para cada equipamento, tendo em conta apenas os modos de falha com risco "intolerável" e uma para a Unidade, tendo em conta os equipamentos que a constituem. No Anexo XII estão apresentadas todas as árvores de falhas realizadas. É constatado que, para se verificar qualquer um dos modos de falha, é necessário apenas que um dos subsistemas do nível inferior tenha uma avaria em qualquer um dos seus componentes.

De seguida, realizou-se uma análise HAZOP que não pretende ser "exaustiva", pretende apenas fazer uma primeira abordagem aos desvios possíveis que se podem verificar nos equipamentos analisados. Estes desvios foram obtidos através de informação recolhida na Refinaria. Esta análise permite economizar tempo e recursos de manutenção e é uma ajuda para um posterior estudo FME(C)A. Para identificar os riscos que podem surgir num determinado sistema ou que resultam das interacções entre um sistema e um processo industrial, é necessário aplicar um conjunto de palavras-chave. As palavras-chave são usadas para qualificar o desvio em relação ao atributo do sistema. Na Tabela 7, está explicado o significado das palavras-chave utilizadas. No Anexo XIII, estão apresentadas as folhas HAZOP realizadas aos equipamentos analisados.

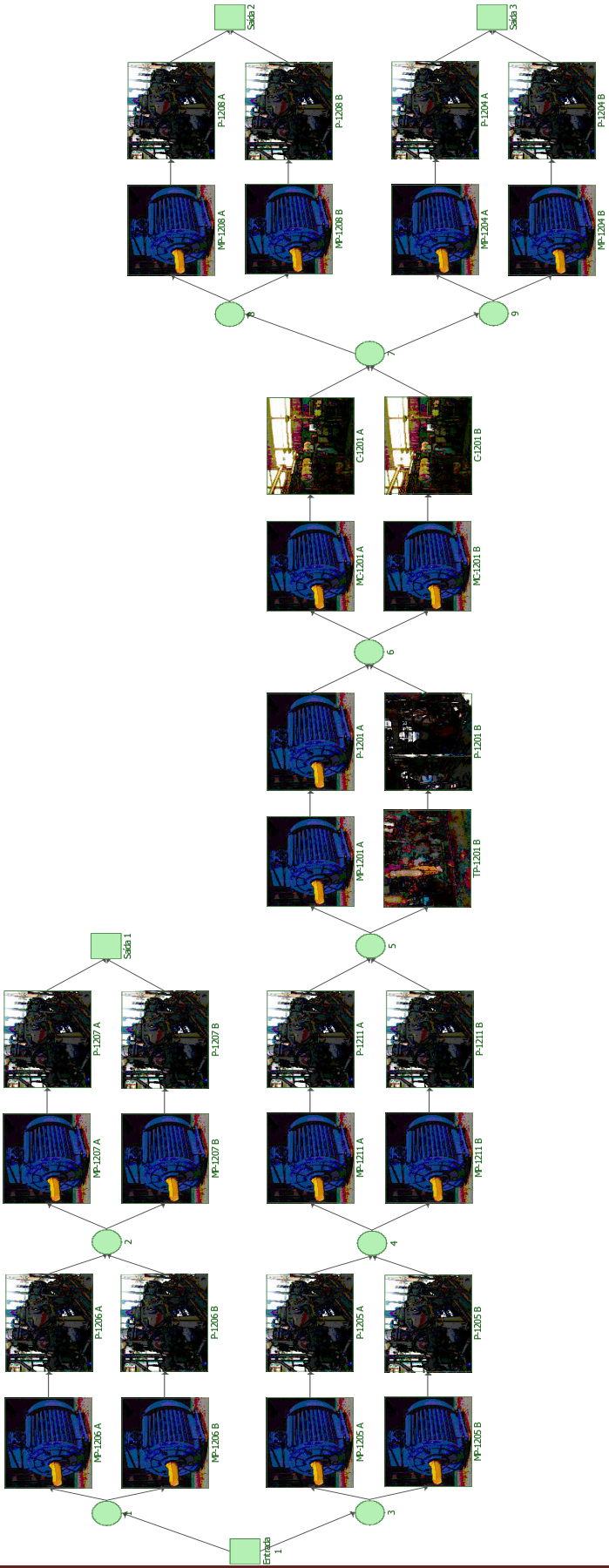


Figura 33 - Diagrama de blocos da Unidade 1200.

Tabela 7 - Lista de palavras-chave e seu significado.

Palavras-chave	Significado
Nenhum	Nenhum dos objectivos do projecto foi atingido e nada mais acontece.
Baixo	Existe uma diminuição quantitativa.
Elevado	Existe um aumento quantitativo.
Outros	Substituição completa. Não foram atingidos os objectivos originais mas acontece algo completamente diferente.

Antes de iniciar uma análise FME(C)A, é preciso definir os critérios de severidade, ocorrência e detectabilidade iguais para todos os equipamentos, para se poder fazer uma comparação directa entre todos os componentes.

Para a definição da severidade, o critério de avaliação utilizado foi o nível das consequências para a instalação e as pessoas que nela trabalham. Assim, apresentam-se na Tabela 8 os níveis de severidade considerados e a sua descrição.

Tabela 8 - Níveis de severidade considerados para a análise FME(C)A e a sua descrição.

Níveis de severidade	Definição	Descrição
4	**Muito grave**	Perigo de incêndio, risco para toda a Unidade e pessoas na área redundante.
3	**Grave**	Risco do equipamento e das pessoas que estejam em contacto com o equipamento.
2	**Aceitável**	Risco de deterioração de alguns componentes do equipamento.
1	**Marginal**	Mau funcionamento do equipamento.

Para a definição da ocorrência, o critério utilizado foi mais uma vez a taxa de falha porque esta reflecte a frequência com que os diferentes componentes avariam, permitindo assim, uma classificação clara e objectiva da ocorrência. Na Tabela 9, apresentam-se os níveis de ocorrência e a sua descrição.

Para a definição da detectabilidade, foi considerada a capacidade de detecção da avaria por parte do controlo da máquina e/ou pelo operador. Apresentam-se, na Tabela 10, os níveis de detectabilidade considerados e a sua descrição.

O valor de β representa a avaliação em relação à probabilidade condicional de ocorrência da avaria. Na Tabela 11, apresentam-se os valores de β propostos pela norma americana (MIL-STD-1629A) para os diferentes efeitos de avaria.

Tabela 9 - Níveis de ocorrência considerados para a análise FME(C)A e a sua descrição.

Níveis de ocorrência	Definição	Descrição
6	**Muito alta**	POF superiores a $75x10^{-6}$.
5	**Alta**	POF superiores a $50x10^{-6}$ e inferiores ou iguais a $75x10^{-6}$.
4	**Moderada**	POF superiores a $30x10^{-6}$ e inferiores ou iguais a $50x10^{-6}$.
3	**Baixa**	POF superiores a $15x10^{-6}$ e inferiores ou iguais a $30x10^{-6}$.
2	**Muito baixa**	POF superiores a $5x10^{-6}$ e inferiores ou iguais a $15x10^{-6}$.
1	**Remota**	POF inferiores ou iguais a $5x10^{-6}$.

Tabela 10 - Níveis de detectabilidade considerados para a análise FME(C)A e a sua descrição.

Níveis de detectabilidade	Definição	Descrição
3	**Não detectável**	A avaria não é detectada pelos intrumentos de controlo contínuo nem pelo operador a uma curta distância do equipamento.
2	**Pouco detectável**	A avaria apenas é detectada pelo operador a uma curta distância do equipamento.
1	**Detectável**	A avaria é detectada automaticamente pelo instrumentos de controlo contínuo do equipamento.

Tabela 11 - Valores de β normalmente considerados.

Efeitos da avaria	Valor de β
Perda actual	1
Perda provável	Maior que 0,01 e menor que 1
Perda possível	Maior que 0 e menor que 0,01
Sem efeito	0

O valor de α é a probabilidade expressa como uma fracção decimal da avaria do componente provocada por um determinado modo de falha. A soma de todos os valores de α de cada um dos modos de falha de um componente deve ser igual a 1.

Depois de definidos os critérios de severidade, ocorrência e detectabilidade, obteve-se os valores de criticidade apresentados na análise FME(C)A presente no Anexo XIV.

5.2 Análise dos dados de falha

Começa-se por fazer uma análise aos dados existente na refinaria, ou seja, dos equipamentos onde foi reportado um número significativo de avarias. Esta análise é realizada aos equipamentos e não aos seus componentes, pois mesmo nos equipamentos com um número significativo de intervenções, os dados não têm suficiente precisão para o estudo ser relativo aos componentes. No Gráfico 18, é representada a percentagem dos equipamentos analisados em relação ao total dos equipamentos dinâmicos presentes na Unidade.

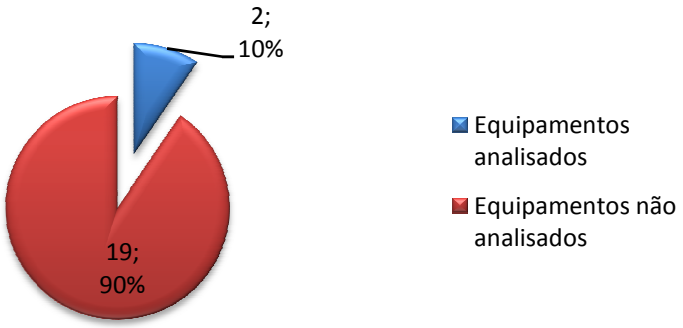


Gráfico 18 - Número de equipamentos analisados e não analisados.

Com a ajuda do *Software Weibull++ 7*, calculam-se os parâmetros de maior relevo para os interesses da Refinaria. Entre outros, vamos retirar a seguinte informação: taxa de falha, MTBF, e fazer uma previsão da garantia dentro de um limite de confiança. Para a determinação desses parâmetros, utiliza-se a distribuição de Weibull.



Figura 34 - Equipamento P-1201 A.

Para o equipamento P-1201 A (Figura 34) das intervenções referidas anteriormente, as que são intervenções devido a falhas que induzem perturbações no funcionamento do sistema são as seguintes:

Tabela 12 - Intervenções devido a falhas que induzem perturbações no funcionamento da P-1201 A e do sistema.

Paragens	Data	Tempo de interrupção		Tempo de funcionamento	
		dias	horas	dias	horas
14	23-02-1999	2	48	119	2836,4
15	26-02-1999	2	48	1	23,8
16	14-05-1999	15	360	75	1787,7
17	25-08-1999	15	360	88	2097,5
18	20-09-1999	2	48	11	262,2
19	02-10-1999	15	360	10	238,4
20	30-03-2000	15	360	165	3932,9
21	27-09-2000	1	24	166	3956,7
25	11-02-2003	15	360	866	20641,6
28	27-10-2003	15	360	243	5792,1
30	16-02-2004	1	24	97	2312,1
33	06-07-2004	0	0	140	3337,0
37	21-04-2005	2	48	289	6888,5
39	23-06-2005	3	72	61	1454,0
40	20-07-2005	5	120	24	572,1
43	03-04-2006	0	0	252	6006,6
45	10-07-2006	0	0	98	2335,9
46	06-11-2006	3	72	119	2836,4
47	21-11-2006	3	72	229	5458,4
49	11-01-2007	0	0	182	4338,1
50	18-01-2007	3	72	7	166,8

No caso do equipamento C-1201 A das intervenções referidas anteriormente, as que são intervenções devido a falhas que induzem perturbações no funcionamento do sistema são as seguintes:

Tabela 13 - Intervenções devido a falhas que induzem perturbações no funcionamento do C-1201 A e do sistema.

Paragens	Datas	Tempo de interrupção		Tempo de funcionamento	
		dias	horas	dias	horas
2	12-01-2004	5	120	260	3098,6
4	07-06-2004	0	0	142	1692,3
7	30-12-2004	0	0	206	2455,1
8	01-08-2005	5	120	214	2550,4
11	15-05-2006	0	0	282	3360,8
13	03-10-2006	5	120	141	1680,4
14	04-12-2006	5	120	57	679,3
15	11-01-2007	5	120	33	393,3

Considera-se que o equipamento P-1201 A está sempre em funcionamento. Apenas quando este se encontra parado, é que o equipamento P-1201 B entra em funcionamento. No caso do equipamento C-1201 A, funciona até avariar, arrancando o equipamento C-1201 B, este só volta a arrancar quando o equipamento C-1201 B avariar. Podemos verificar que as horas de marcha, apresentadas no Anexo XV, destes equipamentos é 50% do tempo para cada um. Portanto, e com base nestes dados, poderemos fazer uma aproximação dizendo que cada um funciona 12 horas/dia.

Assim, as horas de funcionamento deste equipamento vai ser calculada tendo em conta os dias que se encontram a funcionar e a média das horas de funcionamento da Refinaria. Essas médias têm em conta as paragens programadas da Refinaria. No ano 2005, considera-se que a FCO teve em laboração aproximadamente 8.700 horas, o que dá uma média de 23,8 horas/dia.

De seguida é representada uma relação entre as intervenções que causam perturbações no funcionamento e as que não causam, nos equipamentos estudados.

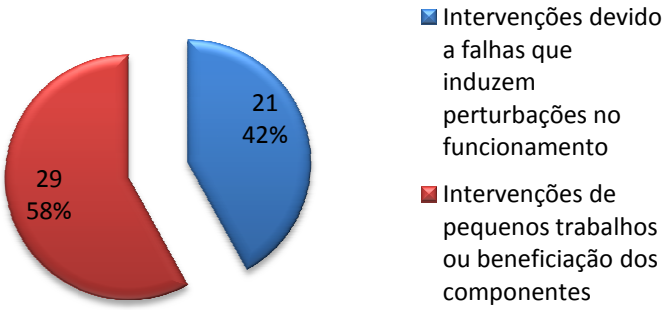


Gráfico 19 - Tipo das intervenções realizadas ao equipamento P-1201 A.

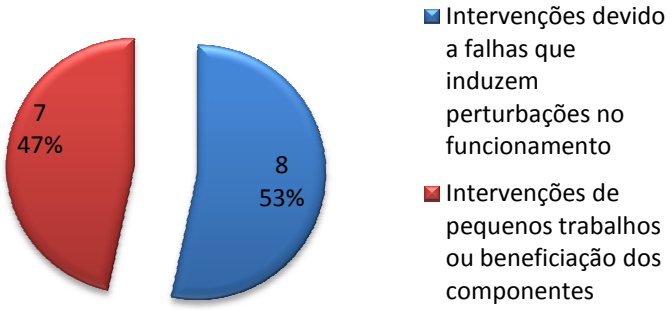


Gráfico 20 - Tipo das intervenções realizadas ao equipamento C-1201 A.

Pode constatar-se que aproximadamente metade das intervenções nestes equipamentos consiste em pequenos trabalhos ou beneficiação dos componentes. Analisando as outras

intervenções, obtêm-se os seguintes parâmetros da distribuição de Weibull, tal como o coeficiente de correlação.

Tabela 14 - Parâmetros de Weibull da P-1201 A e C-1201 A.

P-1201 A		C-1201 A	
β	0,7791	β	1,4814
η	3611	η	2306
ρ	0,9738	ρ	0,9671

Constata-se que os equipamentos estão em tempos de vida diferentes. O equipamento P-1201 A está na fase de juventude (β<1), enquanto o equipamento C-1201 A está na fase de obsolescência (β>1).

Pode-se então criar as curva pdf, POF e a da fiabilidade para os equipamentos analisados, tendo as seguintes curvas:

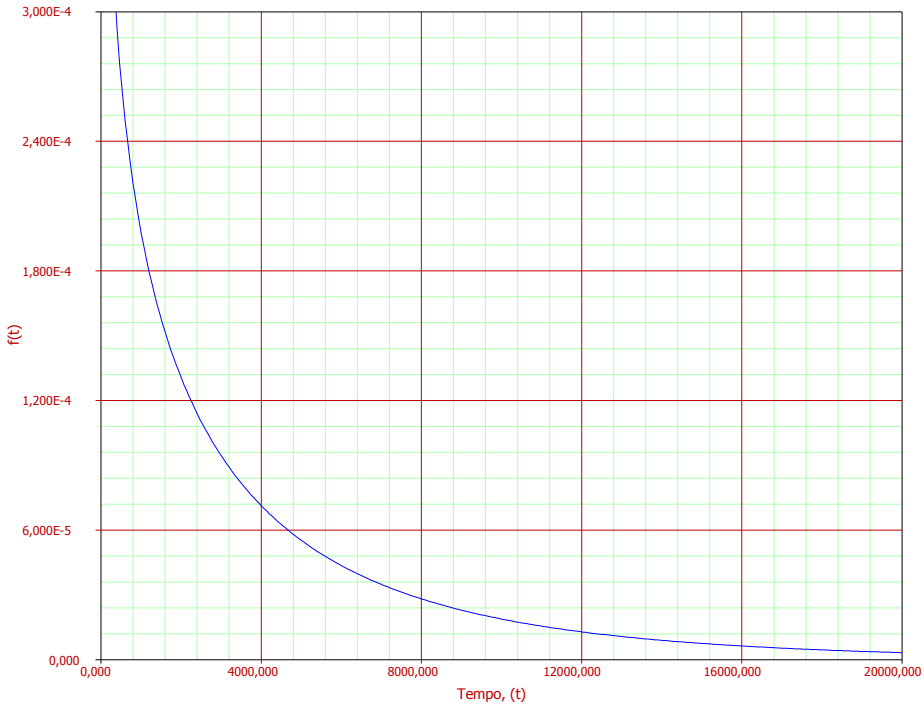


Gráfico 21 - Curva pdf do equipamento P-1201 A.

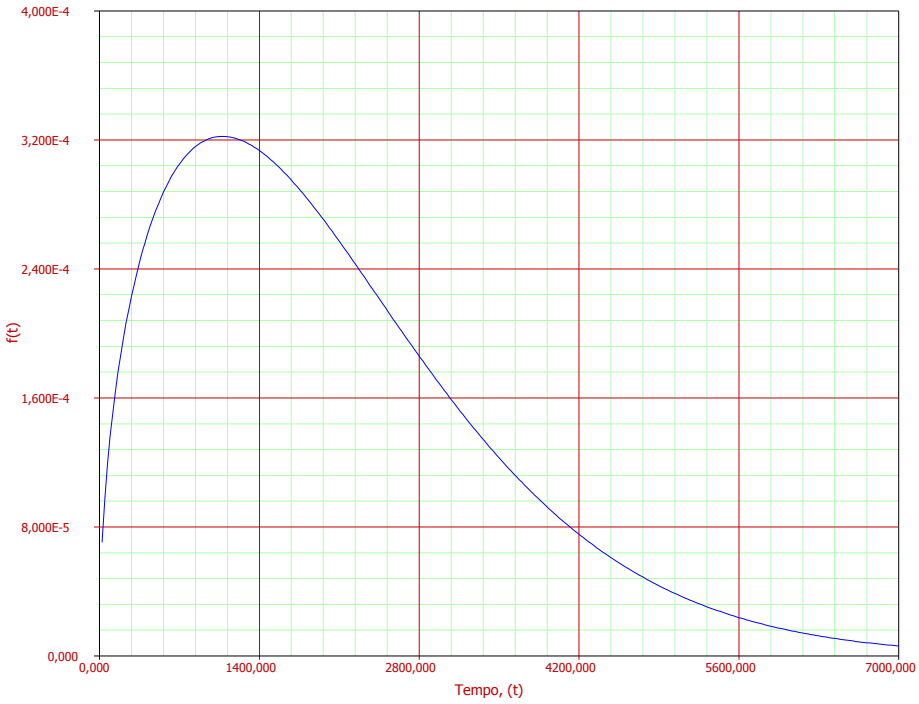


Gráfico 22 - Curva pdf do equipamento C-1201 A.

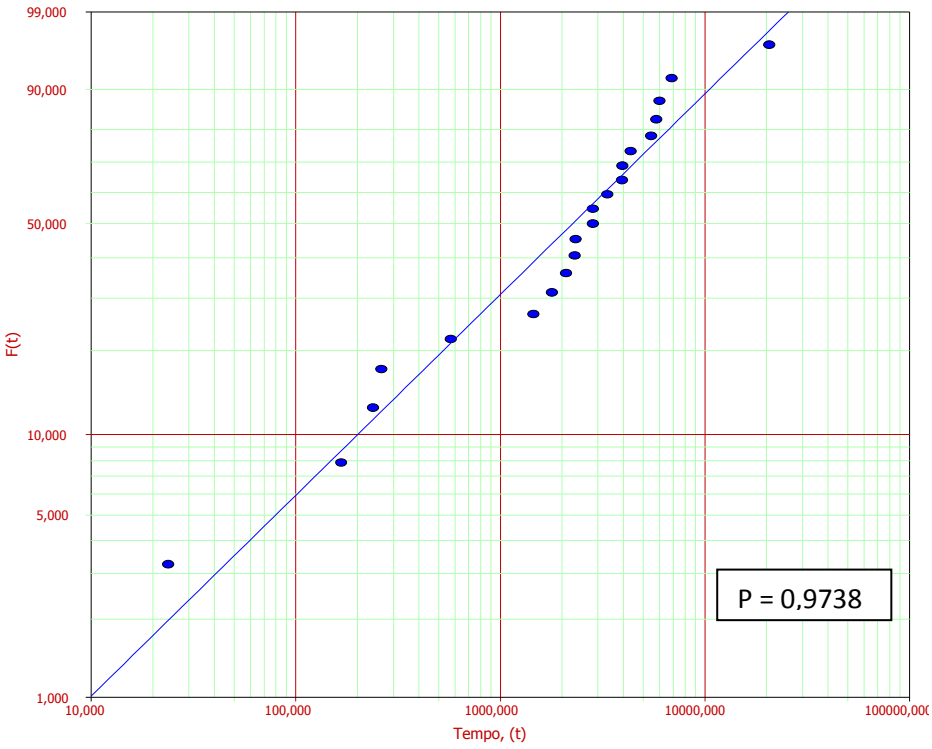


Gráfico 23 - Curva da probabilidade de falha do equipamento P-1201 A.

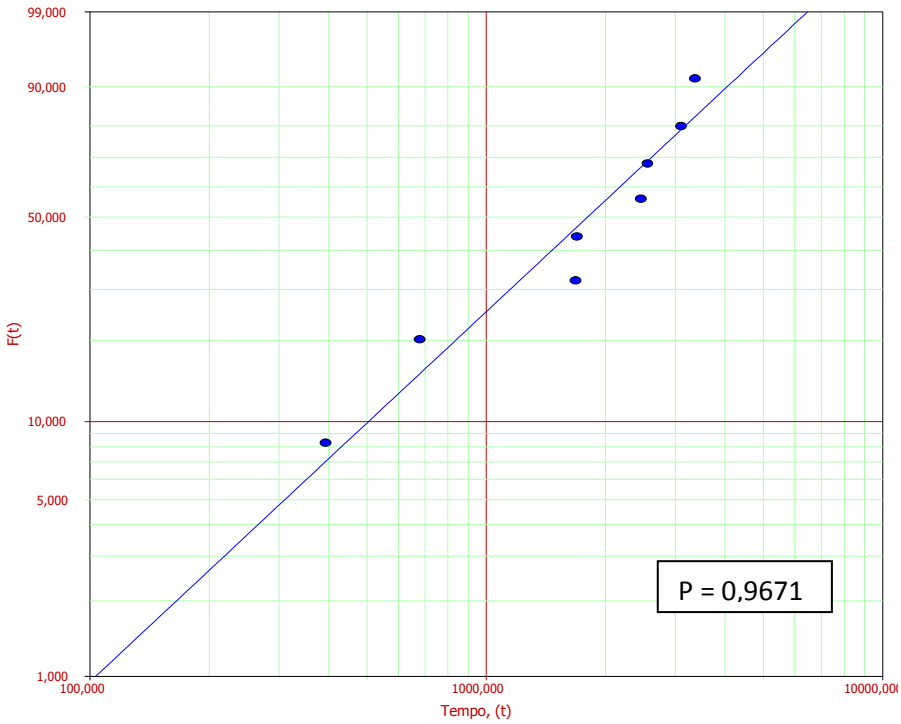


Gráfico 24 - Curva da probabilidade de falha do equipamento C-1201 A.

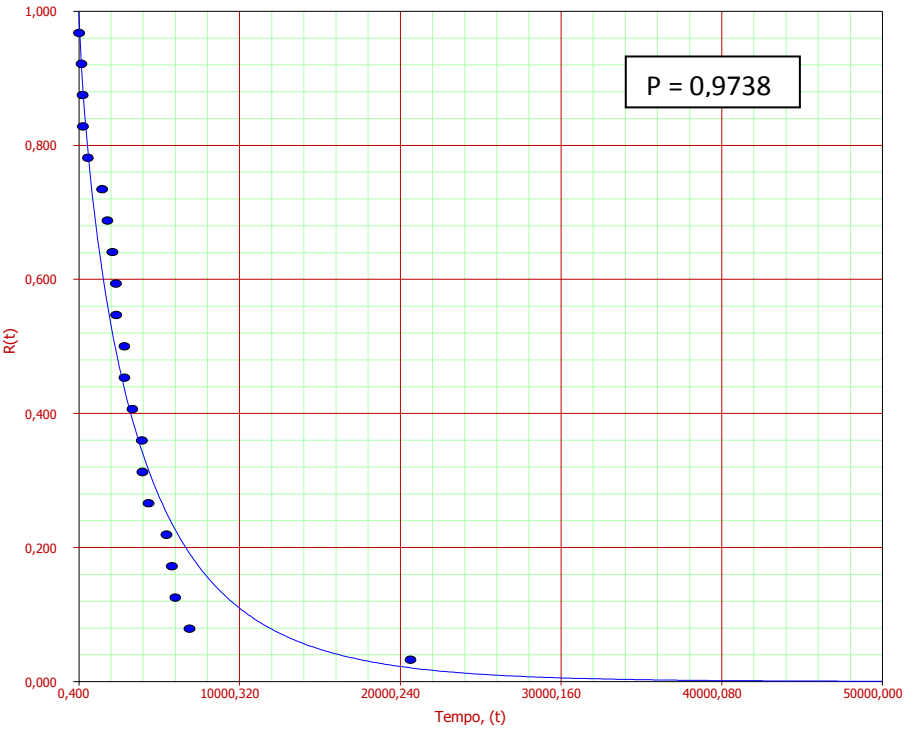


Gráfico 25 - Curva da fiabilidade do equipamento P-1201 A.

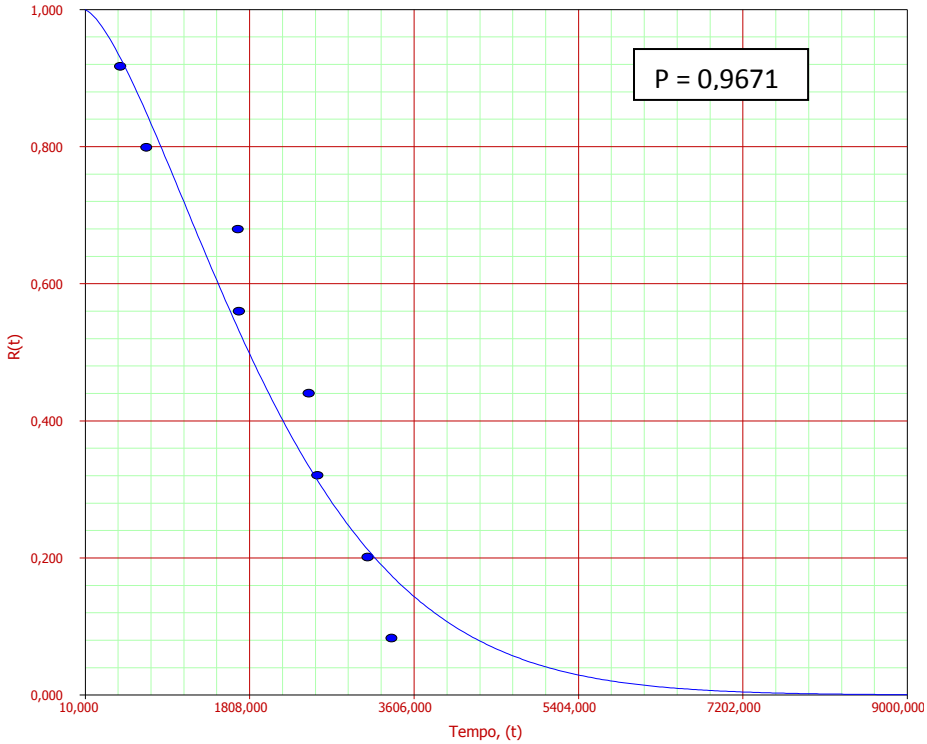


Gráfico 26 - Curva da fiabilidade do equipamento C-1201 A.

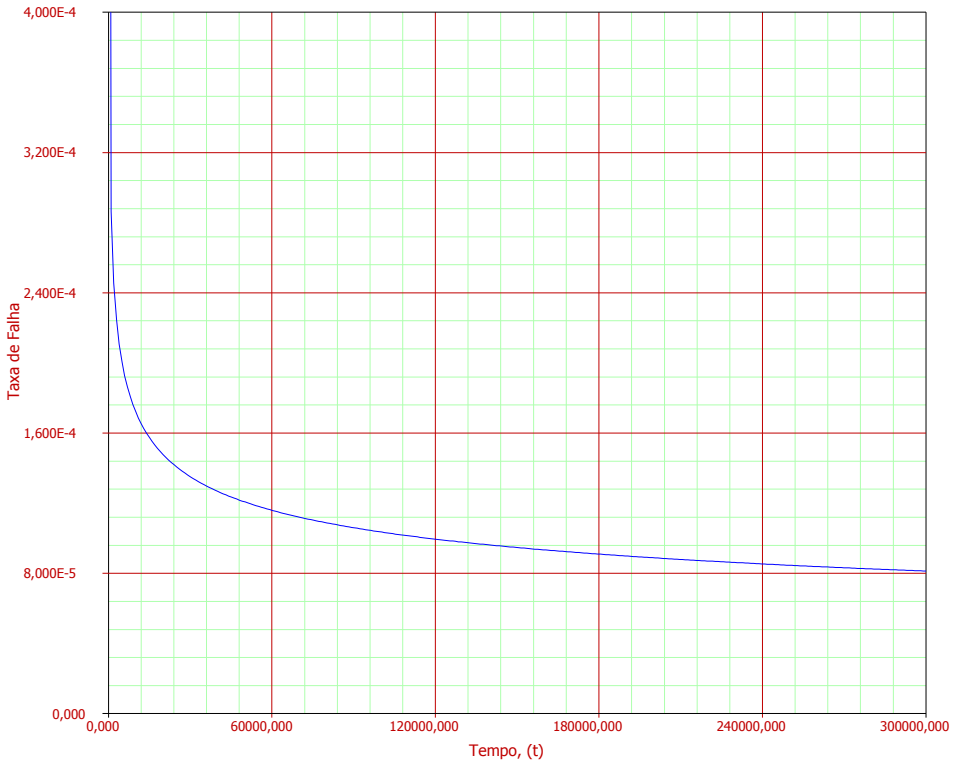


Gráfico 27 - Curva da taxa de falha do equipamento P-1201 A.

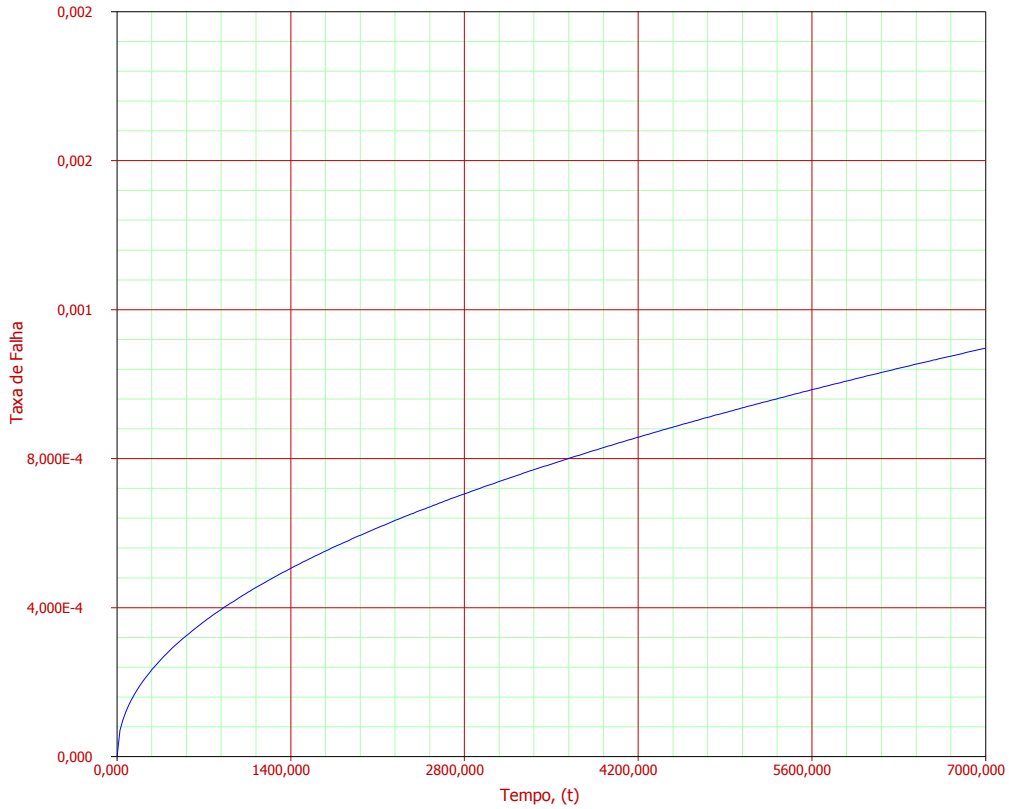


Gráfico 28 - Curva da taxa de falha do equipamento C-1201 A.

Também é possível obter-se a superfície função verosimilhança para ambos os equipamentos. São representados os dois parâmetros da distribuição, com os valores dos parâmetros no eixo x e y e a verosimilhança, que é uma função da probabilidade condicional, no eixo z. Assim o valor do "pico" da superfície da função verosimilhança corresponde aos valores dos parâmetros que maximizam a função verosimilhança.

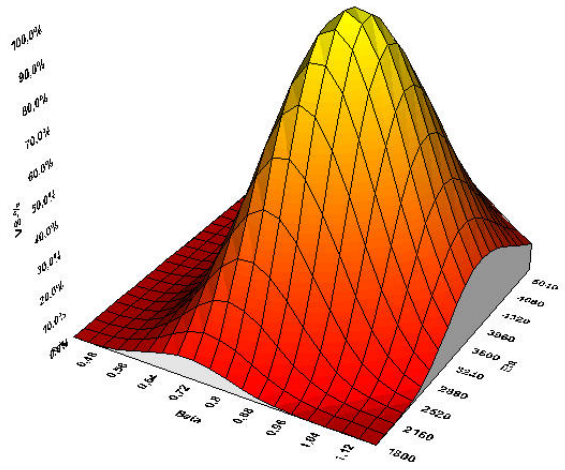


Gráfico 29 - Superfície da função verosimilhança do equipamento P-1201 A.

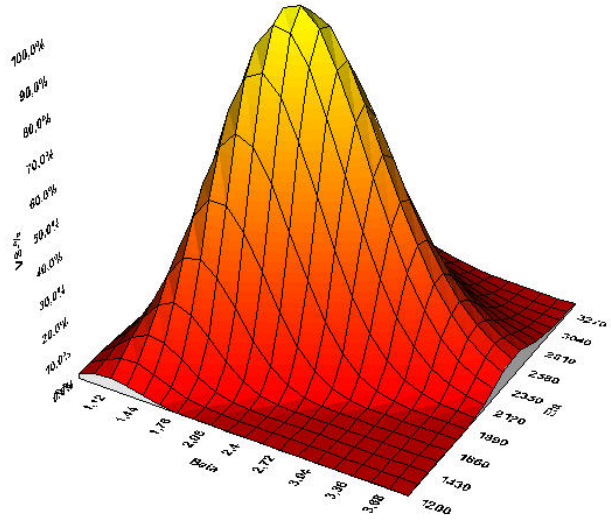


Gráfico 30 - Superfície da função verosimilhança do equipamento C-1201 A.

No Anexo XVI, estão apresentados todos estes gráficos com mais pormenor.

Pode representar-se outros valores como MTBF, Mean Time To Repair (MTTR), Mean Wating Time (MWT) e a disponibilidade (D). Estes valores são obtidos pelas seguintes expressões:

$$MTBF = \frac{\sum tempos\ \ de\ funcionamento}{número\ de\ avarias\ no\ período\ analisado}$$

Equação 29 - Cálculo do MTBF.

$$MTTR = \frac{\sum tempos\ \ de\ reparação}{número\ de\ avarias\ no\ período\ analisado}$$

Equação 30 - Cálculo do MTTR.

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

Equação 31 - Cálculo da disponibilidade.

O valor do MWT tem em conta as paragens programadas da Refinaria. Estas ocorrem de 4 em 4 anos. Os valores obtidos estão representados na tabela seguinte:

Tabela 15 - Valores de MTBF, MTTR, MWT e disponibilidade dos equipamentos P-1201 A e C-1201 A.

P-1201 A		C-1201 A	
MTBF (horas)	3680	MTBF (horas)	1989
MTTR (horas)	134	MTTR (horas)	75
MWT (horas)	567	MWT (horas)	146
D	90,2%	D	90,0%

Para o cálculo do valor do risco, apenas vai ser considerado o custo da reparação, ou seja, o custo de mão-de-obra. O preço da mão-de-obra da oficina da Refinaria é de 15€/hora. O tempo de reparação vai ser considerado igual ao MTTR. Os valores da POF são obtidos através da probabilidade condicional. Para a obtenção deste valor, é necessário conhecer o tempo de funcionamento efectuado pelo equipamento e o tempo da nova missão que se pretende que ele realize. O tempo da missão pretendida no caso da P-1201 A é de 4 anos de funcionamento (34800 horas), pois estas não têm paragem periódica programada, só param na paragem da Refinaria, enquanto o C-1201 A é de 1 ano de funcionamento (4350 horas), que é o tempo de paragem programada para os compressores alternativos. Na tabela seguinte, são apresentados os valores para a obtenção da POF.

Tabela 16 - POF dos equipamentos P-1201 A e C-1201 A.

P-1201 A		C-1201 A	
$t_{inicial\ da\ missão}$ (h)	77275	$t_{inicial\ da\ missão}$ (h)	15910
$t_{adissional\ da\ missão}$ (h)	34800	$t_{adissional\ da\ missão}$ (h)	4350
POF	0,9741	POF	0,9995

$$Risco_{P-1201\ A} = POF_{4\ anos} \times COF = 0{,}9741 \times (134 \times 15) = 1958€$$

Equação 32 - Cálculo do risco para o equipamento P-1201 A sem paragem programada.

$$Risco_{C-1201\ A} = POF_{1\ anos} \times COF = 0{,}9995 \times (75 \times 15) = 1124€$$

Equação 33 - Cálculo do risco para o equipamento C-1201 A com paragem programada (1 em 1 ano).

No caso dos dados obtidos a partir da base de dados, não é possível obter as curvas "probabilidade de falha *vs*. tempo". Para o cálculo do risco, em vez da POF, utilizam-se os valores das taxas de falha. O valor COF é obtido através da combinação do valor do equipamento, em caso de perda completa do equipamento ou do componente, e do tempo de reparação dos mesmos. Os valores apresentados na Tabela 17 foram cedidos pela Refinaria e são valores médios dos equipamentos existentes na Unidade 1200.

A subunidade foi escolhida tendo em conta o componente e o modo de falha em questão. A base de dados não fornece a informação da contribuição da taxa de falha de cada tipo de componente em cada uma das subunidades. Logo, vamos considerar para cada combinação (componente/modo de falha) uma subunidade onde o modo de falha fosse mais plausível para o componente em análise. Esta informação também foi cedida pela Refinaria.

Tabela 17 - Custo dos equipamentos, componentes e reparações.

Equipamento	Custo do equipamento	Subunidade	Componente	Custo do componente	Tempo de reparação (h)	Custo da reparação
Bomba centrífuga	40.000€	Bomba	Tubagens	40€	24	360€
			Válvulas	40€	24	360€
			Vendantes	15€	48	720€
		Sistema de lubrificação	Tubagens	40€	24	360€
			Válvulas	40€	24	360€
			Vedantes	15€	24	360€
Compressor alternativo	200.000€	Controlo e monitorização	Instrumentos de pressão	50€	1	15€
			Instrumentos de temperatura	50€	1	15€
			Unidade de controlo	500€	12	180€
		Sistema de lubrificação	Líquido lubrificante	150€	12	180€
		Unidade de compressão	Cilindro linear	5.000€	72	1.080€
			Tubagens	1.000€	24	360€
			Válvulas	2.000€	24	360€
Motores eléctricos	Não se aplica	Controlo e monitorização	Dispositivo de actuação	Não se aplica	12	180€
			Instrumentos gerais	50€	1	15€
			Unidade de controlo	100€	24	360€
		Motor eléctrico	Acoplamento	1.000€	12	180€
			Chumaceira radial	500€	72	1.080€
			Empanque	50€	12	180€
			Estator	5.000€	120	1.800€
		Sistema de lubrificação	Líquido lubrificante	15€	Não se aplica	0€
Turbina a gás	Não se aplica	Controlo e monitorização	Instrumentos de temperatura	100€	12	180€
			Instrumentos de velocidade	1.000€	12	180€
			Instrumentos de vibração	100€	12	180€
			Unidade de controlo	1.000€	24	360€
		Admissão de vapor	Controlo de vapor	1.000€	24	360€
			Válvulas	1.000€	24	360€
		Sistema de arranque	Arranque da unidade	1.000€	24	360€

Um custo que também deve ter-se em conta é o da perda de produção. A capacidade de armazenagem final da Unidade 1200 é de 20.900m^3. Em funcionamento normal, os tanques de armazenagem do produto final da Unidade 1200 têm apenas 3/5 da sua capacidade, o que dá uma reserva em caso de uma falha não prevista de 12.540m^3. Sabe-se que, a jusante da Unidade 1200, se

encontram as Unidades 1300 e 3300 que consomem respectivamente 110m^3/hora e 60m^3/hora do seu produto. Considera-se que se mantêm as duas unidades a jusante a funcionar, o que dá um consumo do produto da Unidade 1200 de 170m^3/hora, e com uma capacidade de reserva de 12.540m^3, a fábrica consegue laborar durante aproximadamente 74 horas (≈3 dias), depois de verificada a avaria. Considerando que não existe redundância, as avarias superiores a 3 dias causam um impacto económico na produção. Para quantificar esse valor, como não existe o valor acrescentado da produção da Unidade 1200, considera-se a diferença do preço entre a venda dos combustíveis e o preço de compra do crude. O preço de venda vai ser uma média dos preços das gasolinas: Euro-super 95; Gasoil automobile. Estes valores foram baseados nos valores do Anexo XVII. Assim, o valor de venda dos combustíveis é de 575€/m^3 enquanto o preço de compra do crude ronda os 427€/m^3 (100 US Dólar/barril). Deste modo, o preço da perda de produção é estimado em 148€/m^3.

Na tabelas seguintes, são apresentadas a taxa de falha, os custos considerados e o risco para cada combinação (componente/modo de falha).

Tabela 18 - Taxas de falha, custos e risco para as bombas centrífugas – processamento do produto.

Equip.	Comp.	Modo de falha	λ [10^{-6}]	Custos [€]					Risco [€]	Risco do componente [€]
				Equip.	Comp.	Reparação	Perda de produção	Total		
Bomba centrífuga	Tubagens	FEPA	12,852	-	40	360	-	400	0,00514	0,72818
	Tubagens	FEPP	18,076	40.000	-	-	-	40.000	0,72304	
	Válvulas	FEPA	10,949	-	40	360	-	400	0,00438	0,37382
	Válvulas	FEPP	9,236	40.000	-	-	-	40.000	0,36944	
	Vedantes	FEPA	51,335	-	15	360	-	375	0,01925	2,06821
	Vedantes	FEPP	51,224	40.000	-	-	-	40.000	2,04896	

Tabela 19 - Taxas de falha, custos e risco para os compressores alternativos - accionamento eléctrico (100 a 1000 kW).

Equip.	Comp.	Modo de falha	λ [10^{-6}]	Custos [€]					Risco [€]	Risco do componente [€]
				Equip.	Comp.	Reparação	Perda de produção	Total		
Compressores alternativos	Cilindro linear	DIN	102,905	-	5.000	1.080	-	6.080	0,62566	1,18139
		FP	5,941	200.000	-	-	-	200.000	1,18820	
	Instrumentos de pressão	FP	4,034	-	50	15	-	65	0,00026	0,00026
	Instrumentos temperatura	FP	5,941	-	50	15	-	65	0,00039	0,00039
	Líquido lubrificante	FP	4,034	-	150	180	-	330	0,00133	0,00133
	Unidade de controlo	FA	6,237	-	500	180	-	680	0,00424	0,00828
		FP	5,941	-	500	180	-	680	0,00404	
	Tubagens	FP	4,034	-	1.000	360	-	1.360	0,00547	0,00547
	Válvulas	DIN	30,615	-	2.000	360	-	2.360	0,07225	0,07225

Tabela 20 - Taxas de falha, custos e risco para os motores eléctricos.

Equip.		Comp.	Modo de falha	λ [10^{-6}]	Custos [€]					Risco [€]	Risco do componente [€]
					Equip.	Comp.	Reparação	Perda de produção	Total		
Motores eléctricos	Bombas	Chumaceira radial	CO	5,128	-	500	1.080	-	1.580	0,00810	0,02893
			DE	9,238	-	500	1.080	-	1.580	0,01460	
			VIB	3,943	-	500	1.080	-	1.580	0,00623	
		Empanque	VIB	3,152	-	50	180	-	230	0,00072	0,00072
		Unidade de controlo	DE	6,924	-	100	360	-	460	0,00318	0,01150
			DIN	10,260	-	100	360	-	460	0,00472	
			FA	5,770	-	100	360	-	460	0,00265	
			FP	2,059	-	100	360	-	460	0,00095	
	Compressores	Acoplamento	DIN	3,737	-	1.000	180	-	1.180	0,00441	0,00441
		Dispositivo de actuação	FA	1,869	-	-	180	-	180	0,00034	0,00034
		Estator	FA	1,869	-	5.000	1.800	1.207.680	1.214.480	2,26986	2,26986
		Instrumentos gerais	DPF	3,736	-	50	15	-	65	0,00024	0,00024
		Líquido lubrificante	DPF	3,736	-	15	-	-	15	0,00006	0,00006
		Unidade de controlo	FA	1,869	-	100	360	-	460	0,00086	0,00342
			FP	5,606	-	100	360	-	460	0,00258	

Tabela 21 - Taxas de falha, custos e risco para as turbinas a gás - industriais (0 a 1000 kW).

Equip.	Comp.	Modo de falha	λ [10^{-6}]	Custos [€]					Risco [€]	Risco do componente [€]
				Equip.	Comp.	Reparação	Perda de produção	Total		
Turbina a gás	Arranque da unidade	FA	6,963	-	1.000	360	-	1.360	0,00947	0,00947
	Controlo de vapor	FA	5,175	-	1.000	360	-	1.360	0,00704	0,01795
		FP	8,026	-	1.000	360	-	1.360	0,01091	
	Instrumentos temperatura	FP	6,502	-	100	180	-	280	0,00182	0,00182
	Instrumentos velocidade	FA	2,256	-	1.000	180	-	1.180	0,00266	0,01123
		FP	7,264	-	1.000	180	-	1.180	0,00857	
	Instrumentos de vibração	FP	6,281	-	100	180	-	280	0,00176	0,00176
	Unidade de controlo	FA	5,777	-	1.000	360	-	1.360	0,00786	0,02701
		FP	14,085	-	1.000	360	-	1.360	0,01915	
	Válvulas	FA	7,701	-	1.000	360	-	1.360	0,01047	0,03118
		FP	15,229	-	1.000	360	-	1.360	0,02071	

No Gráfico 31, é marcado para cada combinação (componente/modo de falha) o ponto taxa de falha *vs*. custo. Com base no gráfico, escolhe-se as combinações que possuam um risco mais elevado. No Anexo XVIII, estão representados os gráficos de risco para cada tipo de equipamento, para ser possível visualizar a comparação de risco entre as combinações (componente/modo de falha) e entre os componentes.

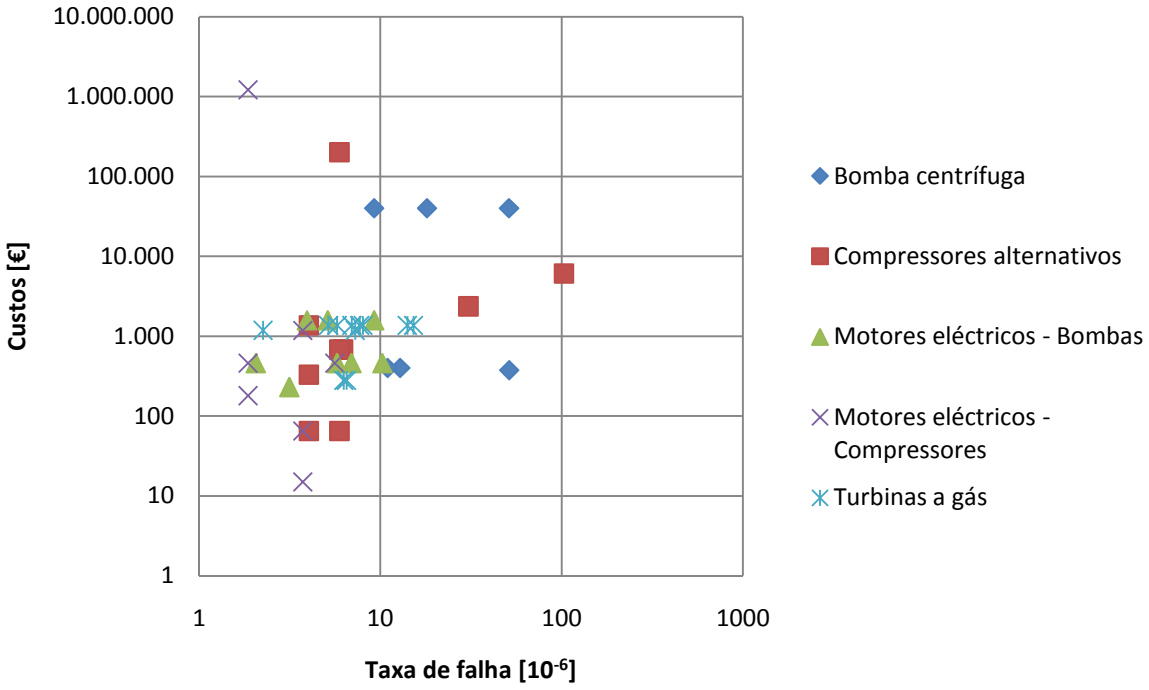


Gráfico 31 - Risco das combinações (componentes/modos de falha) dos equipamentos dinâmicos existentes na Unidade 1200.

Desta análise, verifica-se que os componentes mais críticos na Unidade 1200 são os seguintes:

- Estator – Motores eléctricos – compressores – processamento de gás;
- Vedantes – Bombas centrífugas – processamento do produto;
- Cilindro linear – Compressores alternativos – accionamento eléctrico (100 a 1000 kW);
- Tubagens - Bombas centrífugas – processamento do produto;
- Válvulas - Bombas centrífugas – processamento do produto.

No Gráfico 32, pode ver-se que apenas estes componentes contribuem com 96% do valor de risco dos componentes dos equipamentos analisados.

Através da análise FME(C)A, podemos ver quais os componentes que tinham um valor de criticidade e RPN mais elevados. Estes valores servem apenas para uma verificação se os componentes críticos obtidos pelo cálculo do risco são também componentes críticos no cálculo da criticidade e RPN. No Gráfico 33 é representado os componentes críticos tendo em conta a criticidade.

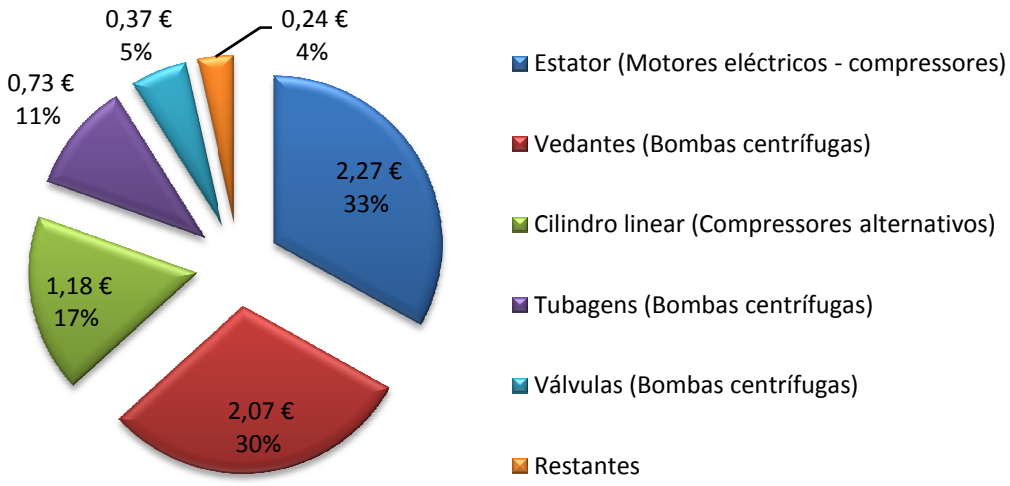


Gráfico 32 - Relação entre os componentes dos equipamentos analisados.

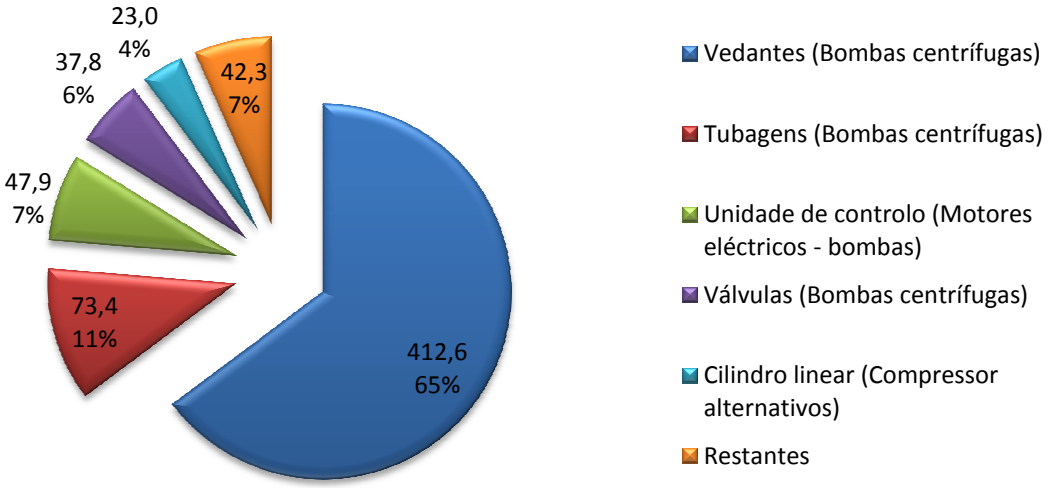


Gráfico 33 - Componentes críticos baseados no cálculo da criticidade.

No gráfico seguinte, apresentamos os resultados para o cálculo do RPN.

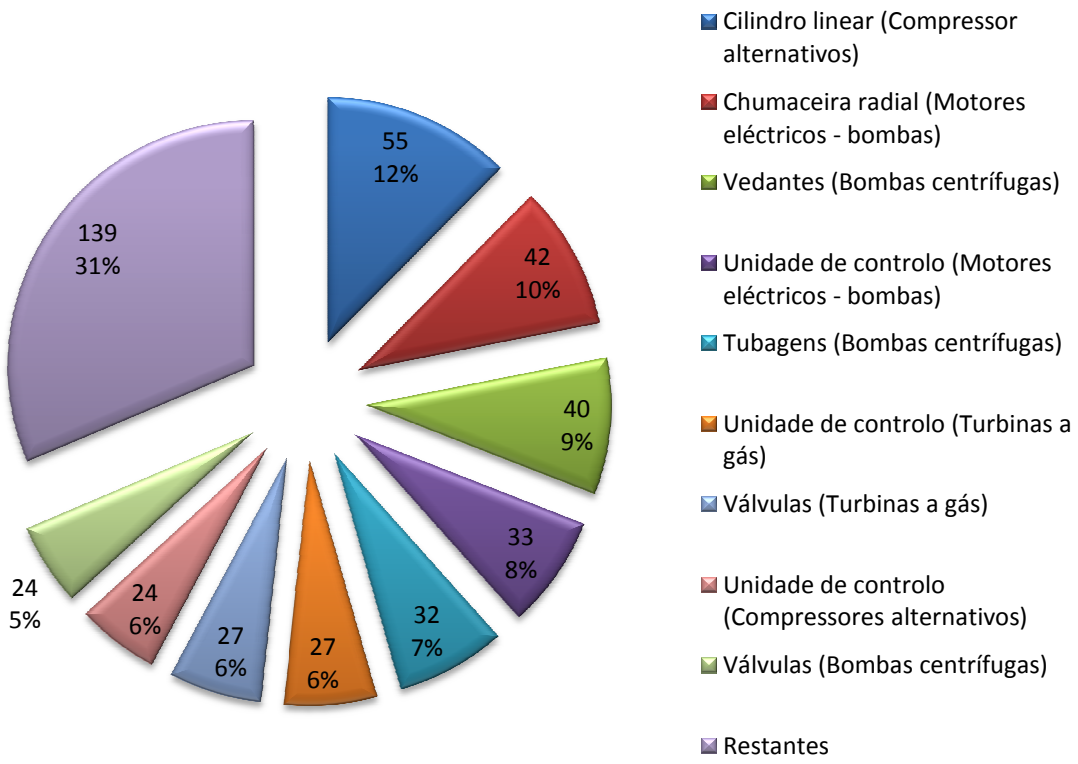


Gráfico 34 - Componentes críticos baseados no cálculo do RPN.

Pode constatar-se que os componentes críticos obtidos através do cálculo do risco também são componentes críticos tanto no cálculo da criticidade como do RPN, apenas o equipamento "Estator – Motor eléctrico – compressores – processamento de gás" é crítico no cálculo do risco. Isto deve-se pois é o único componente que tem um tempo de reparação superior ao tempo da reserva da Unidade, o que faz o custo da sua falha disparar. Se o custo da perda de produção fosse desprezado, o valor do custo para este equipamento descia dos 1.214.480€ para os 6.800€, o que faria o valor do risco passar dos 2,26986€ para os 0,01271€ respectivamente. A tabela seguinte é um resumo dos valores dos equipamentos críticos.

Tabela 22 - Valores de risco, criticidade e RPN dos equipamentos críticos.

Equipamento	Componente	Risco	Criticidade	RPN
Bombas centrifugas – processamento do produto	Vedantes	2,07€	413	40
	Tubagens	0,73€	73	32
	Válvulas	0,37€	38	24
Compressores alternativos – accionamento eléctrico (100 a 1000 kW)	Cilindro linear	1,18€	23	55
Motores eléctricos – compressores – processamento de gás	Estator	2,27€	0,1	3

Então, para estes equipamentos críticos, pode-se calcular os valores de MTBF ou MTTF. Para um período de análise suficientemente longo, pode utilizar-se para a gestão aceitando-se a relação:

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

Equação 34 - Simplificação do cálculo do MTBF ou MTTF.

Na tabela seguinte, encontram-se representados os valores de MTBF ou MTTF para os equipamentos críticos.

Tabela 23 - Valores de MTBF e MTTF dos equipamentos críticos.

Equipamento	Componente	Tipo de indicador	Tempo [horas]
Bombas centrifugas – processamento do produto	Vedantes	MTTF	9750
	Tubagens	MTBF	32333
	Válvulas	MTBF	49542
Compressores alternativos – accionamento eléctrico (100 a 1000 kW)	Cilindro linear	MTTF	9187
Motores eléctricos – compressores – processamento de gás	Estator	MTTF	535045

5.3 Múltipla classificação dos componentes baseado na optimização

Em primeiro lugar, é preciso definir-se um modelo de decisão que vai ser a base da optimização. Este modelo de decisão é representado na árvore de decisão pela Figura 35, tendo como objectivo a representação gráfica das relações entre a decisão com os resultados e consequências. O Diagrama de decisão e árvore de decisão estão representados no Anexo XIX.

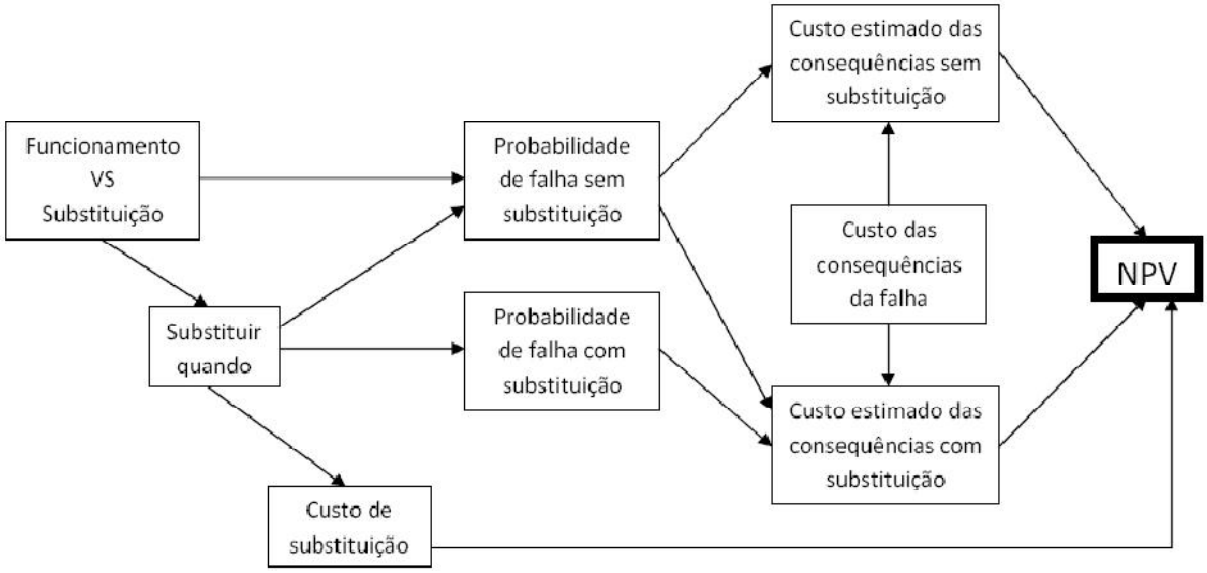


Figura 35 - Árvore de decisão.

Dos equipamentos analisados através dos dados da Refinaria, temos o caso de uma bomba centrífuga (P-1201 A) que não tem nenhuma paragem programada e de um compressor alternativo (C-1201 A) que tem uma paragem anual programada, como reparte o seu funcionamento com o compressor (C-1201 B), o que dá aproximadamente 4350 horas de marcha. No caso do equipamento P-1201 A, aproveita-se a paragem da Refinaria para se verificar o seu estado. Por conseguinte, o objectivo deste equipamento é de tentar cumprir sem avarias 4 anos de funcionamento, o que dá aproximadamente 34800 horas de marcha.

Para o cálculo do NPV, vamos considerar uma análise anual. O equipamento C-1201 A tem uma revisão programada de ano a ano, logo não faz sentido fazer esta análise visto que, depois de um ano de funcionamento, é aberto e procede-se à substituição ou reparação dos componentes que não estejam a 100%. Considerando que a manutenção é a mais aproximada de uma reparação "Bom-como-novo", pois este tipo de reparação é impossível de ser verificado. Enquanto no caso do equipamento P-1201 A, já tem algum interesse fazer este estudo, pois ele só é visionado de 4 em 4 anos, caso não haja nenhuma paragem forçada durante esse tempo. Então, para esta análise, vamos ter em atenção os seguintes aspectos:

- É a bomba de alimentação da Unidade e veicula o produto do processo. Este produto é inflamável, portanto é necessário ter uma especial atenção às fugas pois pode trazer graves problemas para o equipamento e equipamentos circundantes.
- Considera-se como valor de substituição 2.710€, que tem em conta a soma dos valores de todos os componentes e a dos tempos de mão-de-obra apresentados na Tabela 17.

- Considerando que o equipamento foi reparado no ano 0, temos uma POF estimada para o 1º ano de 61%, para o 2º ano de 84,5%, para o 3º ano 93,7 e por fim, no quarto ano, de 97,4%.
- No caso de uma reparação intermédia, considera-se que fica ao nível que estava no ano 0, ou seja, "Reparação Bom-como-novo". No 2º e 3º anos após a reparação, a taxa de falha é de 50% e 75% da taxa que se verificaria, caso não existisse reparação .
- As consequências de uma falha no equipamento têm os seguintes custos:
  - Mão-de-obra: 1 semana ≈ 168 horas dá um valor de 2.520€;
  - Componentes/Subsistemas/Equipamento: considera-se o valor médio de 1/10 do equipamento, o que dá 4.000€;
  - Perda de produção: as reparações não são superiores ao tempo limite do produto em reserva;

  o que dá um valor para as consequências da falha de 6.520€.

De seguida, vão ser comparadas todas as alternativas possíveis, do tempo para realizar-se as reparações, para se constatar se existe uma alternativa viável, logo, que produz um NPV positivo. A solução óptima será a que apresentar o maior valor positivo do NPV. Depois, apresenta-se a melhor solução, Figura 36, estando todas representadas no Anexo XX.

Seguidamente, procede-se à mesma análise para os componentes críticos obtidos através da base de dados. O componente "Cilindro linear" pertence aos compressores alternativos – de accionamento eléctrico (100 a 1000 kW). Este tipo de equipamentos na Refinaria tem um programa de manutenção programada todos os anos logo, como foi referido anteriormente, não é alvo da análise NPV. Os componentes "Válvulas", "Vedantes" e "Tubagens" pertecentes às bombas centrífugas – processamento do produto e "Estator" pertencente aos motores eléctricos – compressores – processamento de gás são apenas visionados de 4 em 4 anos, logo realiza-se o cálculo do NPV.

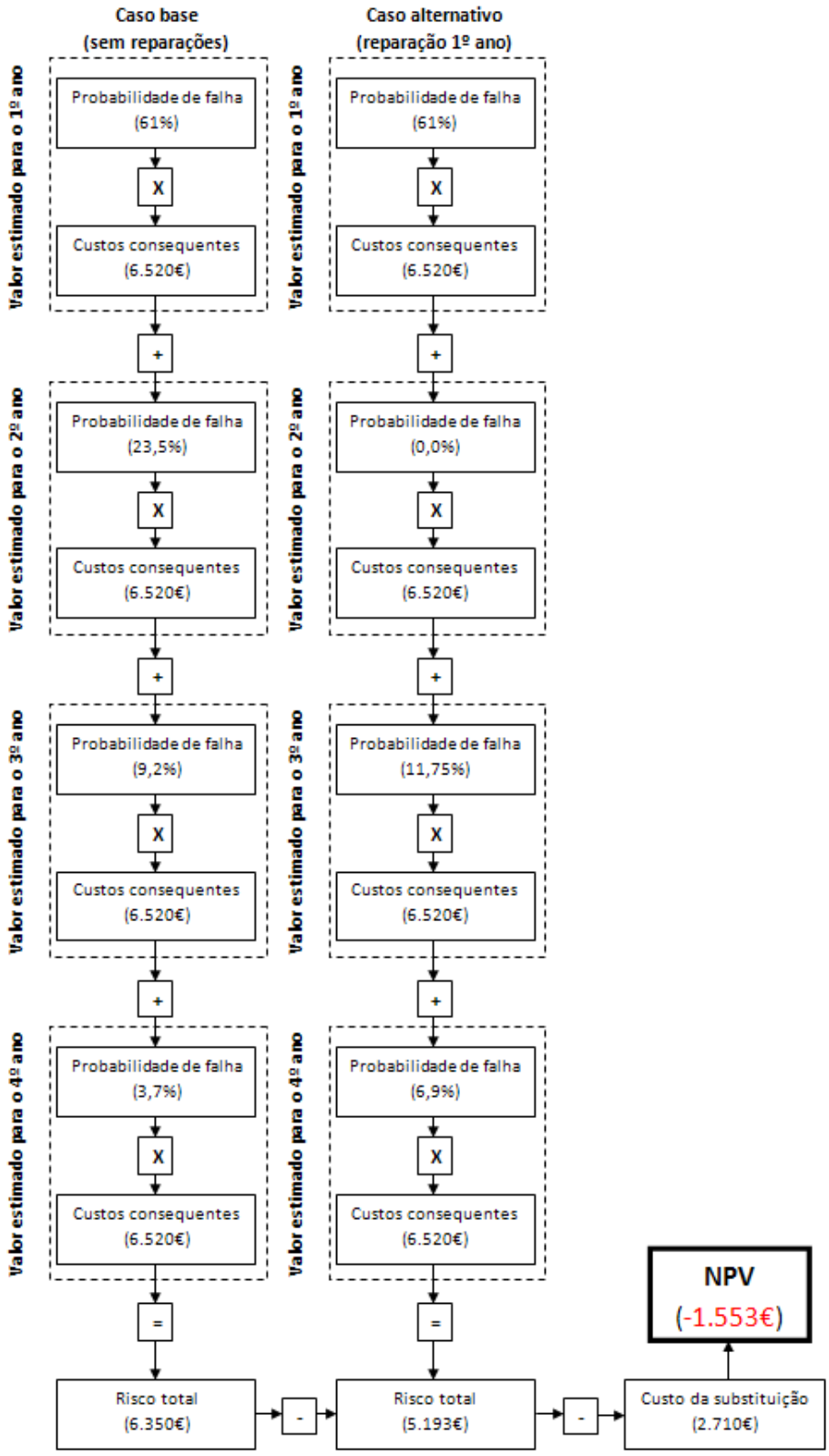


Figura 36 - Cálculo do NPV casa base *vs*. caso alternativo (melhor).

Então, para esta análise, vamos ter em atenção os seguintes aspectos:

- O objectivo dos componentes é o seguinte:
  Estator – formar um campo magnético capaz de induzir no rotor uma corrente. O seu mau funcionamento pode levar ao não arranque do equipamento, mas não traz qualquer perigo para as pessoas ou para os equipamentos circundantes.
  Tubagens – garantir a ligação entre os componentes ou subsistemas, para que o fluido chegue de um ponto ao outro. O seu mau funcionamento pode levar a fugas do fluido. Neste caso, existem dois fluidos possíveis: ou produto do processo ou líquido lubrificante. No caso de ser produto do processo, a sua fuga pode trazer graves problemas para o equipamento e equipamentos circundantes.
  Válvulas – controlar a passagem do líquido, se pode ou não passar ou a sua quantidade. O seu mau funcionamento pode levar a fugas do fluido. Neste caso, existem dois fluidos possíveis: ou produto do processo ou líquido lubrificante. No caso de ser produto do processo, a sua fuga pode trazer graves problemas para o equipamento e equipamentos circundantes.
  Vedantes – vedar as ligações entre componentes do sistema para não haver perda do líquido em questão. O seu mau funcionamento pode levar a fugas do fluido. Neste caso, existem dois fluidos possíveis: ou produto do processo ou líquido lubrificante. No caso de ser produto do processo, a sua fuga pode trazer graves problemas para o equipamento e equipamentos circundantes.
- Considera-se o custo de substituição de:
  Estator - 6.800€.
  Tubagens – 400€.
  Válvulas – 400€.
  Vedantes – 375€.
- Considerando que o equipamento foi reparado no ano 0, temos as seguintes POF estimada:
  Estator – 1º ano 1,19%; 2º ano 2,37%; 3º ano 3,54%; 4º ano 4,70% (Seguindo a distribuição do C-1201 A).
  Tubagens – 1º ano 11,57%; 2º ano 21,76%; 3º ano 30,76%; 4º ano 38,70% (Seguindo a distribuição da P-1201 A).
  Válvulas – 1º ano 7,71%; 2º ano 14,82%; 3º ano 21,36%; 4º ano 27,39 (Seguindo a distribuição da P-1201 A).
  Vedantes – 1º ano 33,38%; 2º ano 55,43%; 3º ano 70,07%; 4º ano 79,82 (Seguindo a distribuição da P-1201 A).
- No caso de uma reparação intermédia, considera-se que fica ao nível que estava no ano 0, ou seja, "Reparação Bom-como-novo". No 2º e 3º anos após a reparação, a taxa de falha de 50% e 75% da taxa que se verificava, caso não existisse reparação .

- As consequências de uma falha no equipamento têm os seguintes custos:

  Estator:

  - Mão-de-obra: 5 dias ≈ 120 horas dá um valor de 1.800€;
  - Componentes: 5.000€;
  - Perda de produção: ultrapassa em dois dias as reservas, logo tem um custo de 1.207.680€;

  o que dá um valor para as consequências da falha de 1.214.480€, contabilizando a perda de produção, ou 6.800€ sem contabilizar a perda de produção.

  Tubagens:

  - Mão-de-obra: 1 dia ≈ 24 horas dá um valor de 360€;
  - Componentes: 2355€;
  - Perda de produção: as reparações não são superiores ao tempo limite do produto em reserva;

  o que dá um valor para as consequências da falha de 2.715€.

  Válvulas:

  - Mão-de-obra: 1 dia ≈ 24 horas dá um valor de 360€;
  - Componentes: 1852€;
  - Perda de produção: as reparações não são superiores ao tempo limite do produto em reserva;

  o que dá um valor para as consequências da falha de 2.212€.

  Vedantes:

  - Mão-de-obra: 1 dia ≈ 24 horas dá um valor de 360€;
  - Componentes: 2006€;
  - Perda de produção: as reparações não são superiores ao tempo limite do produto em reserva;

  o que dá um valor para as consequências da falha de 2.366€.

O custo dos componentes "Tubagens", "Válvulas" e Vedantes é cálculado através da seguinte expressão:

$$Custo\ do\ componente = \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_2} \times custo_1 + \frac{\lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2} \times custo_2$$

Equação 35 - Cálculo do custo dos componentes.

No Anexo XXI, estão os cálculos dos NPV para os componentes analisados.

Na tabela seguinte, é apresentado um resumo dos valores de NPV.

Tabela 24 – Valor NPV dos componentes.

Componente	Uma reparação			Duas reparações	Três reparações
	1º ano	2º ano	3º ano		
Estator (c/ p.p)	17.976€	14.332€	7.288€	21.863€	**22.229€**
Estator (s/ p.p)	-6.661€	-6.681€	-6.721€	-13.401€	-20.161€
Tubagens	**15€**	-62€	-184€	-202€	-463€
Válvulas	-151€	-194€	-266€	-443€	-765€
Vedantes	**203€**	29€	-144€	112€	-26€

Pode constatar-se que, nos componentes "Tubagens" e "Vedantes", o valor óptimo encontra-se sempre no primeiro ano depois do arranque. Era esperado este resultado porque a curva da POF tem uma forma logarítmica, onde o incremento da POF é maior no 1º ano do que no 2º e assim sucessivamente. No caso do "Estator", quando contabilizado o custo da perda de produção, a solução óptima é obtida quando efectuada a substituição do componente todos os anos.

O elevado valor de NPV, no caso do "Estator (c/ p.p.)", está relacionado com a perda de produção, que no caso da Refinaria é muito elevado (148€ por m^3 produzido). No caso de o equipamento redundante estar operacional, este valor baixa significativamente, podendo este equipamento não ser considerado de risco. Os valores de NPV, sem contabilizar a perda de produção, são os apresentados no componente "Estator (s/ p.p.)".

5.4 Desenvolvimento do programa de inspecção

Nesta etapa, apenas se considera os factores económicos. No caso dos componentes relacionados com a segurança do equipamento, o esquema de optimização desenvolvido anteriormente devia ter em conta um limite de segurança. No desenvolvimento do programa de inspecção, o objectivo é encontrar a melhor relação custo/benefício de forma a determinar se as condições do componente satisfazem ou excedem as previsões. Primeiro, é necessário desenvolver uma tabela de estratégia para cada equipamento de maneira a controlar as condições dos componentes críticos.

5.4.1 Desenvolvimento da tabela de estratégia

Desenvolve-se um programa de inspecção para os equipamentos onde foram identificados componentes críticos, que é o caso das bombas centrífugas, dos compressores alternativos e dos motores eléctricos. Os modos de falha analisados e as inspecções propostas para cada tipo de equipamento são os seguintes:

- Bombas centrifugas:
  - Fuga do lubrificante (Sem inspecção):
    - ✓ Análise do lubrificante; Visual.

- Fuga do produto (Monitorização):
  - ✓ Termografia; Visual.
- Vibração (Sem inspecção):
  - ✓ Análise de vibrações.

- Compressores alternativos:
  - Débito insuficiente (Monitorização):
    - ✓ Análise de vibrações.
  - Fuga do produto (Sem inspecção):
    - ✓ Termografia; Visual.
  - Vibração (Sem inspecção):
    - ✓ Análise de vibração.
- Motores eléctricos:
  - Falha no arranque (Monitorização):
    - ✓ Análise de parâmetros.

Tendo assim a lista dos modos de falha para cada equipamento e também as inspecções possíveis para cada tipo de modo de falha, tendo em conta que as inspecções têm como objectivo apenas detectar e medir a extensão do modo de falha no componente, primeiramente identifica-se as categorias do modelo de decisão, desde a POF até ao critério de decisão. A escolha da estratégia final é o que está em causa na análise de decisão. Pensando nas categorias como:

- Uma quantidade que é necessário saber antes de poder estimar os critérios de decisão económicos;
- Um recurso que tem que ser escolhido antes de poder estimar os critérios de decisão económicos;
- Um valor que é necessário calcular.

Onde chegamos à seguinte lista de categorias:

- *Present Value* (PV);
- POF (hoje);
- POF sem o modo de falha ser detectado;
- Número de equipamentos;
- Efectividade e duração da inspecção;
- Inspectores próprios ou de uma empresa subcontratada;
- Custo de reparação.

Ficando então uma tabela com o seguinte formato:

Tabela 25 - Categorias a serem estudadas no desenvolvimento do programa de inspecção.

Estratégias candidatas	**Modo de falha**	**Categorias**							
		Número de elementos	POF (hoje)	Efectividade da inspecção	Duração da inspecção	POF sem o modo de falha ser detectado	Inspectores próprios ou subcontratados	Custo de reparação	PV
Tipo de nós									
Decisão		Valor	Valor	Decisão	Decisão	Valor	Decisão	Valor	Valor

5.4.1.1 Número de elementos

Neste campo, é inserido o número de equipamentos existente na Unidade 1200 do mesmo tipo que o analisado. Tendo-se os seguintes valores:

- **Bombas centrifugas –** 17;
- **Compressores alternativos –** 2;
- **Motores eléctricos –** 20.

5.4.1.2 Probabilidade de falha (hoje)

Neste campo, é inserido o valor da POF que se tem hoje, tendo em conta a tendência. Considerando os dados obtidos através da base de dados e considerando que a POF do equipamento é de 100%, calcula-se a percentagem para cada modo de falha. Obtêm-se os seguintes valores:

- **Bombas centrifugas –** $361{,}04X10^{-6}$:
  - **Fuga do lubrificante –** $107{,}55X10^{-6}$ – 29,79%;
  - **Fuga do produto –** $92{,}18X10^{-6}$ – 25,53%;
  - **Vibração –** $7{,}68X10^{-6}$ – 2,13%.
- **Compressores alternativos –** $683{,}43X10^{-6}$:
  - **Débito insuficiente –** $182{,}23X10^{-6}$ – 26,66%;
  - **Fuga do produto –** $31{,}90X10^{-6}$ – 4,67%;
  - **Vibração –** $9{,}12X10^{-6}$ – 1,33%.
- **Motores eléctricos –** $174{,}38X10^{-6}$:
  - **Falha no arranque –** $13{,}31X10^{-6}$ – 7,63%.

5.4.1.3 Efectividade e duração da inspecção

Neste campo, é definida a efectividade que a inspecção utilizada tem na detecção do modo de falha e a duração para realizar essa inspecção. Para este campo, tem-se os seguintes valores:

- Bombas centrifugas:
  - Fuga do lubrificante:

- ✓ Análise do lubrificante (80% de efectividade – 1 horas);
- ✓ Visual (20% de efectividade – 5 min).

➢ Fuga do produto:
- ✓ Termografia (80% de efectividade – 30 min);
- ✓ Visual (20% de efectividade – 5 min).

➢ Vibração:
- ✓ Análise de vibrações (80% de efectividade – 15 min).

- Compressores alternativos:

➢ Débito insuficiente:
- ✓ Análise de vibrações (50% de efectividade – 15 min).

➢ Fuga do produto:
- ✓ Termografia (50% de efectividade – 30 min);
- ✓ Visual (20% de efectividade – 5 min).

➢ Vibração:
- ✓ Análise de vibrações (70% de efectividade – 15 min).

- Motores eléctricos:

➢ Falha no arranque:
- ✓ Análise de parâmetros (80% de efectividade – 15 min).

5.4.1.4 Probabilidade de falha sem o modo de falha ser detectado

Este é um nó em que é necessário efectuar o cálculo. O seu valor é a POF que o modo de falha terá de acontecer após a inspecção realizada, quando a POF desse modo de falha tem um valor específico. Este valor é calculado através da seguinte expressão:

$$POF_{Insp} = POF \times (1 - E)$$

Equação 36 - Cálculo da probabilidade de falha sem o modo de falha ser detectado.

5.4.1.5 Inspectores da casa ou de uma empresa subcontratada

Neste campo, é inserido o custo se a inspecção for realizada por um inspector da casa ou de uma empresa subcontratada. Considera-se que o custo de um inspector próprio é de 30€/hora. A Refinaria tem um contrato com a empresa, considerando-se que o custo dos seus inspectores para a Refinaria é de 45€/hora.

5.4.1.6 Custo de reparação

Neste nó, é inserido o custo de reparação médio para cada equipamento. Este é o valor considerado, caso o equipamente falhe, servindo como o valor do custo da consequência para o cálculo do risco. Tendo o valor seguinte para cada equipamento:

- Bombas centrifugas – 2.880€;
- Compressores alternativos – 2.190€;

- Motores eléctricos – 3.795€.

5.4.1.7 *Present Value (PV)*

Este nó também é um valor que é calculado. Este valor é a adição do valor do risco caso seja efectuada a inspecção mais o custo de realização da mesma. Este é valor que vai ser considerado para se decidir a estratégia ou combinações de estratégia a implementar. O cálculo deste valor é feito através da seguinte expressão:

$$PV = Custo\ da\ inspecção \times Custo\ da\ consequência\ esperada$$

Equação 37 - Cálculo do PV.

Com todos estes dados, está-se em condição de preencher a tabela de estratégia e obter o valor do PV para cada uma das estratégias. A tabela de estratégia está representada no Anexo XXII.

5.4.2 Desenvolvimento do diagrama de influência

Seguidamente, constrói-se o diagrama de influência com base na regra anteriormente descrita do formato e cor dos nós. Colocam-se os elementos da tabela de estratégia por ordem temporal da esquerda para a direita, depois procede-se à sua ligação para se obter o diagrama de influência. Neste caso, obtem-se o seguinte diagrama:

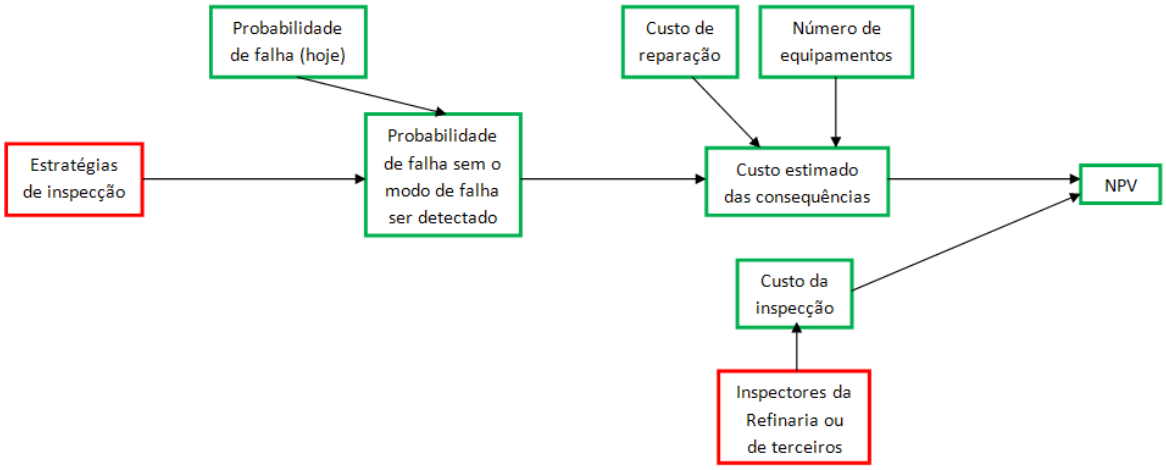


Figura 37 - Diagrama de influência da decisão da estratégia de inspecção.

5.4.3 Determinação da melhor estratégia

Seguidamente, representa-se na Tabela 26 apenas os valores NPV melhores para cada modo de falha da tabela presente no Anexo XXIII.

Tabela 26 - Valores de NPV para a inspecção.

Equipamento	Modo de falha	Inspecção	NPV
Bombas centrífugas	Fuga do lubrificante	Análise do lubrificante	11.158 €
Bombas centrífugas	Fuga do produto	Termografia	5.995 €
Motores eléctricos	Falha no arranque	Análise de parâmetros	4.973 €
Bombas centrífugas	Vibração	Análise de vibrações	707 €
Compressores alternativos	Débito insuficiente	Análise de vibrações	569 €
Compressores alternativos	Fuga do produto	Termografia	72 €
Compressores alternativos	Vibração	Análise de vibrações	26 €

Constata-se que todas as sugestões de estratégias de inspecção são lucrativas em relação ao caso base. Os valores de NPV são muito mais favoráveis nos modos de falha estudados para as bombas centrífugas e os motores eléctricos.

Na tabela em anexo, é possível verificar que é sempre melhor opção a utilização dos inspectores próprios do que os terceiros. Isto deve-se ao facto de não ter sido considerado o custo de aquisição do equipamento para efectuar a inspecção, assim como os custos de envio de análises para laboratório, caso seja necessário. A diferença de valores entre utilizar-se inspectores da Refinaria ou terceiros nos casos estudados varia entre 2,50€ a 255€, decisão essa que poderia ser alterada, numa análise mais rigorosa.

O gráfico a seguir representa, de uma forma rápida, a diferença do NPV entre as opções de inspecção tomadas.

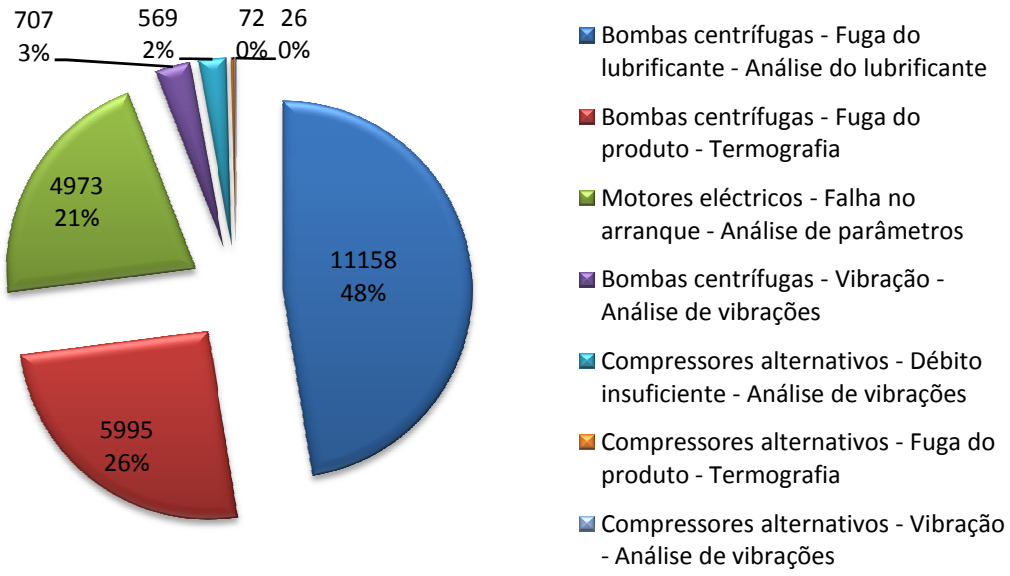


Gráfico 35 - NPV da aplicação da estratégia de inspecção.

Com estes valores, confirma-se a vantagem lucrativa da aplicação das seguintes estratégias da inspecção apresentadas: "análise de lubrificantes – fuga do lubrificante" e "termografia – fuga do produto" nas bombas centrífugas e "análise de parâmetros – falha no arranque" nos motores eléctricos, com o objectivo de mitigação do risco.

6 Discussão dos resultados

Pretende-se aqui demonstrar as vantagens, em termos económicos, da aplicação de uma metodologia baseada no risco aplicada aos equipamentos dinâmicos. Comparando sempre que possível os resultados obtidos com base no histórico da Refinaria com os dados obtidos através de uma base de dados, comparando as taxas de falha dos equipamentos, os modos de falha críticos em cada um dos casos. Esta comparação pretende assim averiguar a fiabilidade da utilização da base de dados OREDA® como ponto de partida neste tipo de análise, ou seja, verificar até que ponto se pode utilizar nesta metodologia desenvolvida e quais os resultados que produz.

A utilização da base de dados deve-se ao número bastante reduzido dos equipamentos que possuem um número significativo de avarias reportadas. No gráfico seguinte, é representada a percentagem dos equipamentos analisados em relação ao total dos equipamentos dinâmicos presentes na Unidade analisada.

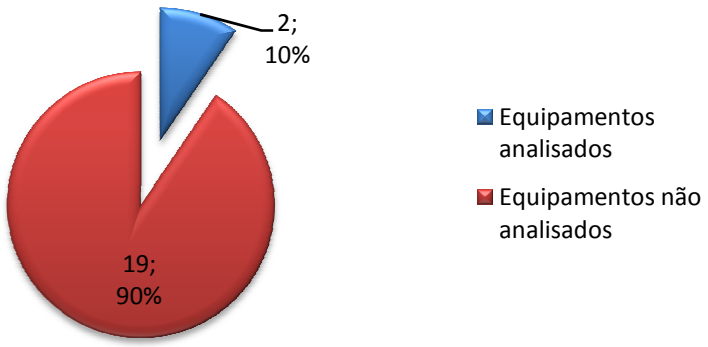


Gráfico 36 - Número de equipamentos analisados e não analisados.

6.1 Fonte de dados – Refinaria *vs.* Base de dados

Os dados utilizados para a análise de fiabilidade dos equipamentos da Refinaria são retirados do software "SAP" e dos arquivos existentes. O maior contratempo que impossibilitou uma análise precisa, apenas com os dados da Refinaria, foi a forma menos precisa ou os elementos em falta na informação introduzida, tais como:

- Recolha de dados de funcionamento;
- Modos de falha;
- Dados do equipamento;
- Folhas de reparação;
- Tempos envolvidos.

Em relação à base de dados OREDA®, existem alguns factores não comuns entre as características verificadas na Refinaria e as características e considerações existentes na base de dados, das quais podemos salientar as seguintes:

- A OREDA® refere-se a instalações petrolíferas offshore;
- A divisão dos equipamentos é feita por função e potência, não tendo em conta as outras características do equipamento;
- Considera o número de avarias homogéneo ao longo do tempo, isto é, β=1.

6.2 Comparação dos valores de taxa de falha no caso da Refinaria e da OREDA®

No caso dos valores da Refinaria, a análise é realizada ao equipamento, no caso P-1201 A, o equipamento considerado é o conjunto bomba + motor eléctrico, enquanto no caso C-1201 A, o equipamento considerado é o conjunto compressor + motor eléctrico. A base de dados fornece os valores da taxa de falha para cada equipamento, bomba, compressor, etc.. Portanto, os valores das taxas de falha em ambos os casos são os seguintes:

Tabela 27 - Comparação dos valores de taxa de falha da Refinaria e da OREDA®.

Conjunto	Fonte dos dados	Taxa de falha do equipamento		
		Principal	Accionamento	Total
Motor+bomba	Refinaria			$100X10^{-6}$
	OREDA®	$361X10^{-6}$	$169X10^{-6}$	$530X10^{-6}$
Motor+compressor	Refinaria			$1.600X10^{-6}$
	OREDA®	$683X10^{-6}$	$179X10^{-6}$	$862X10^{-6}$

Pode-se verificar alguma diferença dos valores entre os dados da Refinaria e os dados obtidos a partir da OREDA®. Os dados genéricos reflectem a pior experiência dos outros operadores, isto é, os dados são tendenciosos em direcção ao pior desempenho das unidades e equipamentos existentes. Com isto, constata-se que o valor da taxa de falha no caso da P-1201 A é um valor positivo. Enquanto o equipamento C-1201 A tem um valor bastante superior ao da base de dados, aproximadamente o dobro, o que significa que algo não está correcto com este equipamento.

Numa primeira análise, verifica-se que o valor de β utilizado na base de dados é considerado 1, enquanto no caso da Refinaria se obteve um valor de β de aproximadamente 1,5. Isto siginifica que, enquanto os equipamentos da base de dados se encontram na fase de "vida útil", o valor de β obtido na Refinaria indica que esse equipamento se encontra na fase "fim de vida" ou "obsolescência". Este valor de β pode estar ligado aos seguintes factores que devem ser investigados o mais rápido possível:

- Realização de uma manutenção deficiente;
- Existência de problemas processuais;

- O equipamento encontra-se em fase de declínio.

Contudo, para os equipamentos onde não existem dados suficientes, a melhor maneira de criar um ponto de partida para a análise é recorrer a uma base de dados, aplicando os desempenhos dos equipamentos analisados na base de dados aos já existentes na Refinaria. Posteriormente, é desejável refinar os dados da base de dados, com os dados específicos acumulados relativamente à instalação analisada.

6.3 Comparação dos modos de falhas críticos da OREDA® e os verificados na Refinaria

No caso da Refinaria, é recolhida uma lista de todas as intervenções reportadas, verificando-se imediatamente que uma grande parte dessas intervenções era apenas de limpeza e beneficiação do equipamento, como é demonstrado no Gráfico 37 e 38.

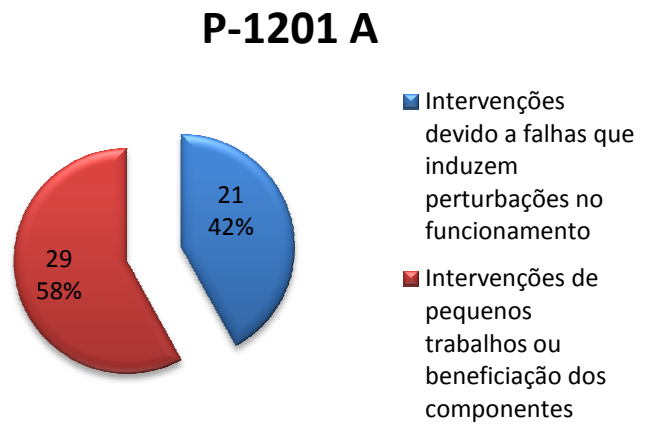


Gráfico 37 - Tipo das intervenções realizadas ao equipamento P-1201 A.

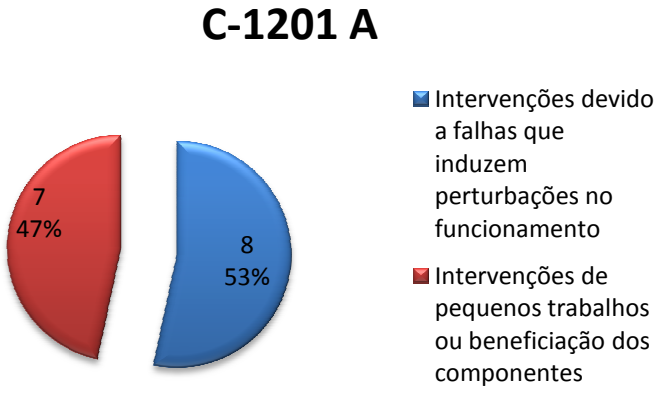


Gráfico 38 - Tipo das intervenções realizadas ao equipamento P-1201 A.

Seguidamente, foram analisadas as intervenções que provocaram perturbações no funcionamento do equipamento e chegou-se aos seguintes modos de falha:

- No caso da P-1201 A:
  - Fuga de lubrificante;
  - Fuga do produto;
  - Vibração.
- No caso do C-1201 A:
  - Débito insuficiente;
  - Fuga do produto;
  - Vibração.

Recorrendo à base de dados, identificou-se os seguintes modos de falha críticos para cada equipamento:

- Bombas centrífugas – Processamento do produto:
  - FEPA; FEPP.
- Compressores alternativos – Accionamento eléctrico (100 a 1000 kW):
  - DIN; FA; FP.
- Motores eléctricos – Bombas – Processamento do produto:
  - CO; DE; DIN; FA; FP; VIB.
- Motores eléctricos – Compressores – Processamento de gás:
  - DIN; DPF; FA; FP.
- Turbinas a gás – industrial (0 a 1000 kW):
  - FA; FP.

Pode-se concluir que a base de dados indica os modos de falha verificados na Refinaria, indicando ainda mais alguns modos de falha que podem ser considerados como modos de falha prováveis de ocorrer e logo, respeitadores da atenção nesta análise.

Com os dados da Refinaria, não poderíamos efectuar uma análise mais profunda pois nas intervenções recolhidas é considerado o conjunto (equipamento principal + equipamento de accionamento) como um componente. Com a base de dados, é possível chegar-se mais longe. Utilizando a análise de Pareto, obtêm-se os componentes principais que provocam os modos de falha críticos e para esses componentes calcula-se o risco, determinando-se assim os possíveis componentes mais críticos existentes na Unidade analisada:

- Bombas centrífugas – Processamento do produto:
  - Tubagens;
  - Válvulas;
  - Vedantes.
- Compressores alternativos – Accionamento eléctrico (100 a 1000 kW):
  - Cilindro linear.

- Motores eléctricos – Compressores – Processamento de gás:
  - Estator.

O equipamento "Estator" é considerado crítico pois o seu tempo de reparação é superior ao tempo que a reserva da Unidade aguenta, o que faz o custo da sua falha ser muito mais elevado. Se o custo da perda de produção fosse desprezado, o valor do custo da consequência para este equipamento desceria dos 1.214.480€ para os 6.800€, aproximadamente 99,5%, passando a não ser um componente crítico. Poder-se-ia desprezar este custo pois existe um equipamento redundante, mas caso já estivesse avariado, a falha deste componente iria parar a produção.

6.4 Optimização do plano de manutenção

Para uma correcta optimização do plano de manutenção, seria necessário ter as curvas "probabilidade de falha *vs*. tempo" para o componente, caso se efectuasse ou não algum tipo de manutenção. Nesta análise, é considerada apenas a possibilidade de fazer intervenções anuais, excluíndo automaticamente o equipamento C-1201 A e os compressores alternativos, já que é metodologia da Refinaria estes equipamentos terem manutenção anual programada.

No caso do equipamento P-1201 A, e com as considerações feitas para os valores da POF, caso houvesse manutenção durantes os 4 anos de funcionamento, chegou-se à conclusão que não se justifica efectuar nenhuma manutenção ao equipamento nesse período.

Se fosse aplicada uma metodologia de PM baseada no MTBF, como por exemplo a metodologia RAMS, durante os 4 anos efectuava-se 9 paragens para manutenção, o que traria um custo de aproximadamente 24.000€. Considerando que os outros 16 equipamentos similares, através da base de dados, seguiam o mesmo método de manutenção, o custo de manutenção para este tipo de equipamentos na Unidade 1200 seria de aproximadamente 408.000€.

Fazendo uma análise ao componente e considerando que os componentes analisados seguem a distribuição do equipamento tipo, P-1201 A ou C-1201 A respectivamente, procedendo a uma comparação em relação ao tipo de manutenção verificado na Refinaria, obtém-se a seguinte tabela:

Tabela 28 - Comparação financeira entre metodologia da manutenção actual da Refinaria e a RBI.

Componente	N.º intervenções actualmente na Refinaria	N.º intervenções através do RBI	Mais valias
Tubagens	0	1	15 €
Válvulas	0	0	0 €
Vedantes	0	1	203 €
Estator	0	0	0 €

As tubagens e os vedantes são os componentes em que é benéfico mudar o programa de manutenção. Considerando que cada bomba centrífuga em média tem 2 tubagens e 4 vedantes e existem 17 equipamentos idênticos, o benefício da implementação da metodologia desenvolvida ao fim de 4 anos é de 14.314€.

Se fosse aplicada uma metodologia de PM (RCM) baseada no MTBF ou MTTF, obtém-se a seguinte tabela:

Tabela 29 - Comparação financeira entre MTBF/MTTF e RBI.

Componente	N.º intervenções através do RCM	N.º intervenções através do RBI	Mais valias
Tubagens	1	1	0 €
Válvulas	0	0	0 €
Vedantes	3	1	750 €
Estator	0	0	0 €

Os vedantes são o único componente que difere entre estes dois métodos. Utilizando as mesmas considerações apresentadas anteriormente, isto traria uma poupança de 51.000€ na utilização da metodologia desenvolvida em relação a uma metodologia baseada no MTBF ou MTTF.

6.5 Vantagem da inspecção a realizar

Com as considerações feitas e com o diagrama de influência utilizado, consegue-se com esta metodologia uma mitigação do risco. Investindo mais 1.100€ ou 1.650€, com recurso aos inspectores da Refinaria ou de terceiros respectivamente, em diferentes estratégias de manutenção "hoje", pode evitar-se um risco de avaria avaliado aproximadamente em 22.500€ para a Unidade. Este é um investimento elevado mas é um procedimento crucial para o bom funcionamento dos equipamentos e dentro das condições de segurança adequadas, podendo evitar custos como é demonstrado com esta análise.

7 Conclusões

Com este trabalho, é possível concluir que a aplicação desta metodologia de análise apresentada no Cap. 4 e aplicada a equipamentos dinâmicos da Unidade 1200 "*Unifining*" da FCO na Refinaria do Porto da Petrogal, permite seleccionar de uma forma objectiva, completamente organizada, os componentes críticos, aqui classificados como de risco "intolerável", que requerem especial atenção aquando da definição das tarefas de manutenção e inspecção a realizar no equipamento, tornando-o assim mais fiável e disponível. O conhecimento destes equipamentos, permite ainda, caso se justifique, realizar um projecto de re-engenharia a um equipamento já existente, ou para que, na aquisição de novos equipamentos, estes possam ser melhorados ou modificados na fase de projecto, diminuindo assim os custos de ciclo de vida do equipamento, tornando-o mais fiável, disponível e com uma melhor manutibilidade, ao longo do seu ciclo de vida.

Esta metodologia permite também concluir que os históricos de avarias da Refinaria são incompletos e pouco precisos, nomeadamente na recolha de dados de funcionamento, definição dos modos de falha, dados do equipamento, folhas de reparação e os tempos envolvidos nas mesmas, para a realização de uma análise deste tipo. Sendo assim, é muito importante que as empresas se consciencializem que, para realizar uma manutenção adequada e "rentável", é necessário ter históricos de avarias correctamente elaborados, organizados e objectivos, permitindo identificar claramente os modos de falha dos equipamentos.

Para a aplicação desta metodologia aos equipamentos da Unidade 1200, teve que se recorrer a uma base de dados, neste caso a OREDA®, para retirar-se a taxa de falha dos modos de falha. Os valores obtidos são um pouco diferentes dos conseguidos através dos equipamentos analisados da Refinaria, o que de alguma forma se esperava, pois os equipamentos da OREDA® pertencem a instalações petrolíferas inseridas noutro ambiente operativo, instalações offshore, o que vai alterar os seus modos de falha e, consequentemente, as suas taxas de falha, visto ser um dado adquirido que o ambiente operativo onde se encontra o sistema é um factor muito importante para a sua fiabilidade, disponibilidade e manutibilidade, logo muito importante para a taxa de falha e para o seu *downtime*. Por estas razões, a base de dados serve apenas em caso de inexistência de informação para um ponto de partida para uma análise deste tipo, sendo depois completada e reajustada com os valores obtidos da Refinaria, como foi sugerido no trabalho anteriormente desenvolvido.

Com a aplicação desta metodologia e considerando os valores inseridos o mais perto possível da realidade da Refinaria, conseguir-se-ia, com uma manutenção e inspecção baseadas no risco, um benefício económico em relação à situação actual.

Considera-se nesta análise um orçamento anual médio que ronda no caso da área de manutenção os 13.000.000€ sendo, neste caso, atribuído 2,5% à manutenção curativa e 1,4% em

manutenção preventiva, e no caso da área de inspecção os 1.200.000€. Estes valores são bastante significativos considerando um lucro líquido anual médio de 20.000.000€ para Refinaria do Porto.

Com a aplicação do programa de manutenção desenvolvido na metodologia apresentada, pode-se obter um benefício económico na ordem dos 14.000€, 1% no orçamento atribuído à manutenção curativa, o que se demonstra no gráfico seguinte:

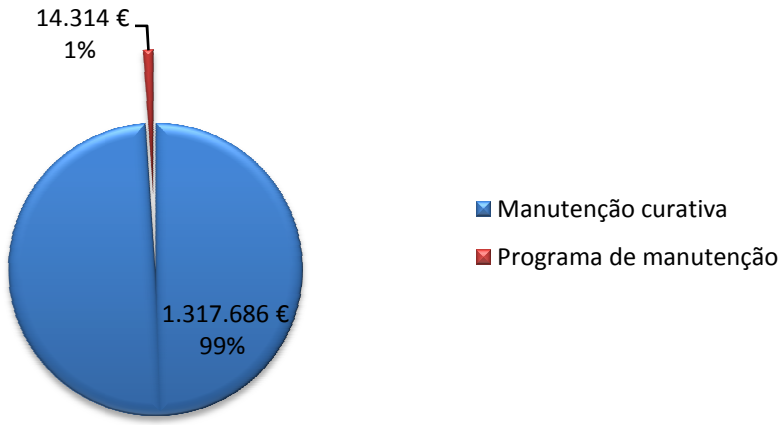


Gráfico 39 - Benefício da aplicação do pograma de manutenção baseada no risco para a Unidade 1200.

A implementação adicional do programa de inspecção baseado no risco obriga a uma despesa, para efectuar todas as inspecções adicionais "hoje", de aproximadamente 1.100€. Com esta despesa, que significa aproximadamente 0,1% do orçamento para a área de inspecção, consegue-se uma mitigação do risco de aproximadamente 22.500€ apenas para os modos de falha críticos para os equipamentos dinâmicos da Unidade 1200, contribuindo assim o programa de inspecção em 2% no orçamento atribuído à manutenção curativa, como se pode observar no gráfico seguinte:

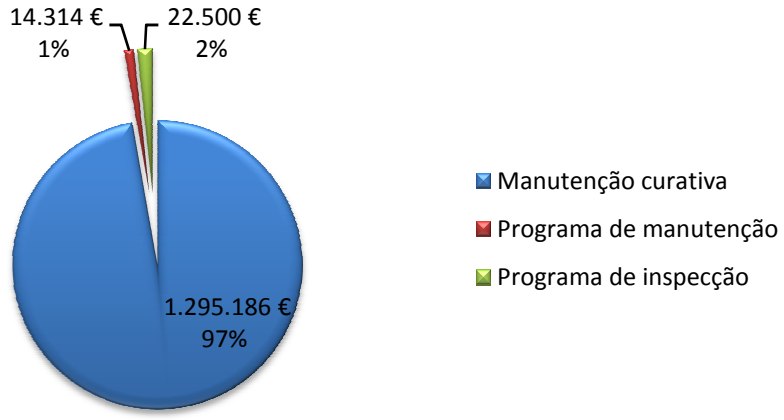


Gráfico 40 – Benefício da aplicação do programa de manutenção e inspecção baseada no risco para a Unidade 1200.

Assim, se esta análise fosse implementada "hoje", traria um benefício de aproximadamente 3% (≈37.000€) no orçamento da manutenção curativa, o que significa um aumento de 0,2% no lucro da Refinaria do Porto.

8 Trabalhos futuros

Como trabalhos futuros propõem-se os seguintes:

- Realização da análise de sensibilidade para se determinar as variáveis mais importantes a ter em conta para se fazer uma refinação dos dados;
- Desenvolver, em conjunto com a empresa, os históricos de avarias convenientemente organizados, objectivos e completos;
- Introduzir os valores dos campos em falta para a realização do programa da manutenção e inspecção, com base nos diagramas de decisão ideais que estão representados no Anexo XXIV, comprovando assim a vantagem da utilização da metodologia desenvolvida nos equipamentos dinâmicos;
- Completar a metodologia de forma a permitir a ligação entre os equipamentos analisados e a Refinaria, com vista à avaliação das implicações nessa instalação, resultantes da realização das tarefas de manutenção e inspecção nos equipamentos analisados;
- Inserir os módulos que não foram analisados e que estão representados na Figura 16, de modo a tornar a análise o mais aproximada possível da realidade da Refinaria.
- Realizar uma metodologia baseada no risco, em conjunto para os equipamentos dinâmicos e estáticos da Unidade, e ver quais são os benefícios daí resultantes. Caso se justifique a implementação desta metodologia, aplicá-la a todas as Unidades da Refinaria do Porto.

Referências

American Bureau of Shipping. (2004). *Guidance Notes on Reliability-Centred Maintenance.* Houston: ABS.

API RP 579. (2000). *Fitness for service.* American Petroleum Institute.

API RP 580. (2002). *Risk-Based Inspection.* American Petroleum Institute.

API RP 581. (2000). *Risk-Based Inspection Base Resource Document.* American Petroleum Institute.

ASME. (2003). *Risk-Based Methods for Equipment Life Management.* New York: ASME INTERNATIONAL.

Barringer, H. P. (1995). *Where Is My Data For Making Reliability Improvements.* Houston, Texas: Gulf Publishing Company.

Blischke, W. R., & Murthy, D. N. (2003). *Case Studies in Reliability and Maintenance.* New Jersey: Wiley-Interscience.

Blischke, W. R., & Murthy, D. N. (1994). *Warranty Cost Analysis.* New York: Dekker.

Cabral, J. P. (2004). *Organização e Gestão da Manutenção.* Lisboa: Lidel - edições técnicas.

Cairrão, A. M. (2004). *Desgaste e Gripagem nas Bombas de Injecção, da Marca Bosch e Modelo CP1, do Sistema "Common Rail" em Motores Diesel.* FEUP-Porto: MMI.

Campbell, J. D., & Jardine, A. K. (2001). *Maintenance Excellence - Optimizing Equipment Life-Cycle Decisions.* New York: Marcel Dekker, Inc.

Center for Chemical Process Safety. (2001). *Layer of Protection Analysis.* New York: An AIChE Industry Technology Alliance.

Department Of The Army. (2006). *Reliabitily-Centered Maintenance (RCM) for command, control, communications, computer, intelligence, Surveillance and Reconnaissanece (C4ISR) Facilities .* Washington DC: Headquartes, Department Of The Army.

Dorf, R. C. (1999). *The Technology Management Handbook.* Davis: CRC Press, Springer & IEEE Press.

Fernandes, L. (2007). O papel da manutenção na implementação do Lean Manufacturing. *9º Congresso de Manutenção.* Porto: Associação Portuguesa de Manutenção Industrial.

Ferreira, L. A. (2000). Engenharia da Manutenção - Actas do 2º Encontro Nacional do Colégio de Engenharia Mecânica da Ordem dos Engenheiros. *2º Encontro Nacional do Colégio de Engenharia Mecânica da Ordem dos Engenheiros.* Coimbra: Ordem dos Engenheiros.

Ferreira, L. A. (1998). *Uma introdução à Manutenção.* Porto: Publindústria.

Henley, E. J. (1992). *Probabilistic risk assessment : reliability engineering, design and analysis.* New York: IEEE Press.

Holst, L. (2007). *Industrial Robotics - Safety, Maintenance, Programming.* Skovde: University of Skovde.

Hyatt, N. (2003). *Guidelines for Process Hazards Analysis, Hazards Identification & Risk Analysis.* Ontario: Dyadem Press.

Junior, P. V. (2006). Manutenção Preditiva de Linhas de Transmissão. *1º Encontro de Tecnologia.* Brazil: Electronorte; nesc; NAI.

Lyonnait, P. (1994). *Méthodes Avanceés d'Analyse des Bases de Donneés du Retur d'Expérience Industriel.* Paris: Editions Eyrolles.

Mann, P. (2000). *Successful Application of System Assurance on Large Scale Railway Projects.* Retrieved from PM Safety Consultants: http://www.pmsafety.com

Markeset, T., & Kumar, U. (2003). Integration of RAMS and risk analysis in product design and development work process - A case study. *Journal of Quality in Maintenance Engineering* .

Markeset, T., & Kumar, U. (2003). Integration of RAMS Information in Design Process. *Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium.* Tampa: Institute of Electrical & Electronics Engineers, Inc.

Marnoco, & Sousa. (1965). *Bombas.* SACOR Divisão da Refinaria do Porto: Publicações técnicas.

Mobil Oil Portuguesa. (1980). *Colecção Técnica 3.* Lisboa.

Morais, L. (2005). *Desenvolvimento de Ferramentas para a aplicação da metodologia RAMS a equipamentos industriais.* Porto: FEUP.

Morais, L., Mota, V., & Ferreira, L. (2004). *Metodologias de Análise.* Porto: Projecto SITEM - FEUP .

Moss, T. R. (2005). *The reliability data handbook.* London: Professional Engineering Publishing.

Moubray, J. (2004). *RCM II: Reliability-centred Maintenance.* Oxford: Elsivier Butterworth-Heinemann.

NF X 60-503. (1985). *Introduction à la disponibilité.* Association Française de Normalisation (AFNOR).

NP EN 13306. (2001). *Terminologia de Manutenção.* Instituto Português da Qualidade.

NP EN 50126. (2000). *Aplicações ferroviárias - Especificação e demonstração de Fiabilidade, Disponibilidade, Manutenibilidade e Segurança (RAMS).* Instituto Português da Qualidade.

O´Connor, P. D. (1995). *Practical Reliability Engineering.* New York: John Wiley and Sons.

Pereira, A., & Poupa, C. (2006). *Como escrever uma tese.* Lisboa: Edições Sílabo.

Pereira, F. D. (2003). *Modelos de Fiabilidade de Disponibilidade.* Instituto Superior de Setubal - Setubal: ISS.

Ribeirinho. (1964). *Accionamento de bombas e compressores.* SACOR Divisão da Refinaria do Porto: Publicações técnicas.

Sherwin, D. (2000). A Review of Past and Current Overall Models for Maintenance Management. *Journal of Quality in Maintenance Engineering* .

Stewart, M. G. (1997). *Probabilistic risk assessment of engineering systems.* London: Chapman & Hall.

Vassiliadis, C. G., & Pistikopoulos, E. N. (2000). Maintenance-based strategies for environmental risk minimization in the process industries. *Journal of Hazardous Materials* .

Referências electrónicas:

http://engenhariamecanica.blogsopt.com

http://pt.wikipedia.org

http://www.eepc.de

http://www.plant.maintenance.com

http://www.pmsafety.com

http://www.rams.de

Base de dados utilizadas:

OREDA® – Offshore Reliability Data 4th Edition (2002). Sintef Industrial Management

Softwares utilizados:

Weibull++ 7 – Life Data Analysis (Weibull Analysis) (2006). Reliability Software from Reliasoft Corporation

BlockSim 7 – System Analysis (RBD or Fault Tree) (2006). Reliability Software from Reliasoft Corporation

RCM++ 4 – Reliability Centered Maintenance (RCM) Analysis (2006). Reliability Software from Reliasoft Corporation

Reliability Workbench 10 – Reliability Analysis Software (2005). Isograph Reliability Software

Anexo I – Curva da banheira "bathtube"

O nome é derivado da forma secção transversal do dispositivo do mesmo nome.

A "curva da banheira" é amplamente utilizada para o cálculo da fiabilidade na engenharia, embora o conceito geral é igualmente aplicável aos seres humanos.

A evolução de um equipamento ao longo da sua vida é normalmente representada pela "curva da banheira", como se pode observar na figura seguinte.

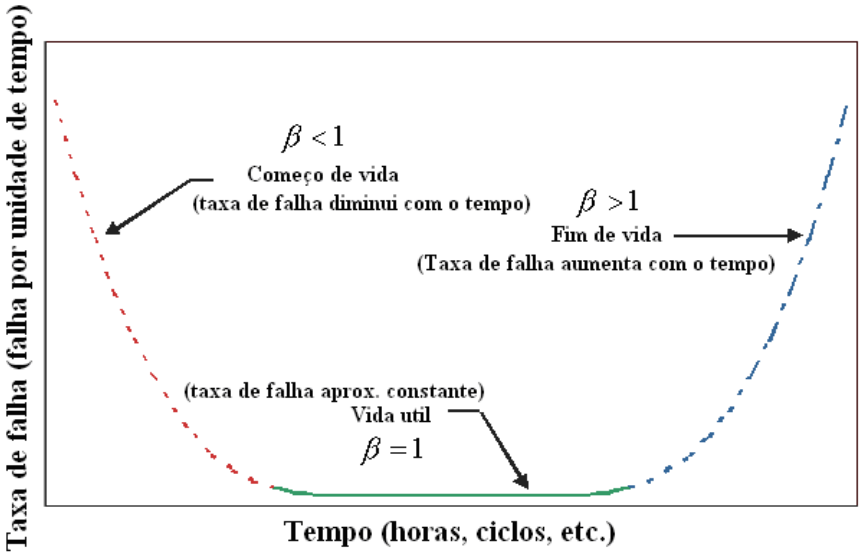


Figura 38 - A "bathtube", a curva função de risco.

Nela podem distinguir-se três períodos de vida:

1. **Juventude do equipamento**
   - ✓ Anomalias devidas à instalação, arranque e rodagem.
2. **Maturidade do equipamento**
   - ✓ Período de rendimento óptimo do equipamento;
   - ✓ Avarias aleatórias;
   - ✓ Taxa de avarias constante.
3. **Obsolescência**
   - ✓ Taxa de avarias crescente;
   - ✓ A partir de um certo valor de λ (t), o equipamento é desclassificado.

A "curva da banheira" é gerada pela sobreposição das curvas das taxas de falhas, precoce "Juventude do equipamento", constante "Maturidade do equipamento" e quando o produto excede o seu tempo de concepção de vida "Obsolescência".

A “curva da banheira” é frequentemente modelada por ramos de funções de perigo:

$$y(t) = \begin{cases} c_0 + c_1 t + \lambda_1 & 0 \leq t \leq \frac{c_0}{c_1} \\ \lambda_1 & \frac{c_0}{c_1} \leq t \leq t_0 \\ c_2(t - t_0) + \lambda_1 & t_0 \leq t \end{cases}$$

Equação 38 - Ramos da "Curva da banheira".

De salientar que este tipo de evolução se aplica apenas para equipamentos simples ou para equipamentos complexo com modos de avarias predominantes.

Anexo II – Campos para uma base de dados

A base de dados deve fornecer, de um modo rápido e fácil, os dados necessários, sem desperdiçar os recursos existentes. É sugerida uma base de dados, a título de exemplo, para se conseguir realizar um estudo desta envergadura, como é demonstrado na tabela seguinte.

Onde:

- **Sistema –** campo onde se insere o sistema na qual a falha é localizada, garantindo que o modelo do sistema e relevante e completo;
- **Data da falha –** campo onde é inserido a data a que a falha ocorre, ajudando a identificar e eliminar entradas duplicadas de uma falha;
- **Número de referência –** campo onde se coloca o número de referência deste acontecimento, permitindo assim uma restreabilidade da fonte de documentos, tornando a base de dados credível;
- **ID componente –** campo onde se insere a identificação do componente, permitindo assim, a conexão desse equipamento a uma Unidade;
- **Tipo de componente –** campo onde se coloca o tipo de componente (P-bomba, TP-turbina de accionamento da bomba, MP-motor eléctrico de accionamento de uma bomba), isto permite, uma procura rápida e fácil comuns existentes para o mesmo tipo de equipamentos;
- **Severidade da falha –** neste campo identifica-se o nível dos efeitos causados pelas falhas (S1-"*Crítico*", S2-"*Degradação*", S3-"*Insignificante*"), ajudando a ter ideia do nível das consequências de cada tipo de falha;
- **Estado de operação –** campo que indica o estado de funcionamento quando é verificada a falha (F-em funcionamento, A-a arranque), ajudando no desenvolvimento de estratégias de inspecção ou ensaios;
- **Causa das falhas –** neste campo, tem-se a precepção do que realmente está a acontecer no equipamento em questão (12-fuga, 25-agarrou);
- **Tempo de paragem –** campo onde se insere o tempo, em horas, que o equipamento está parado, ajudando facilmente a controlar anomalias na reparações;
- **Idade da falha –** neste campo é inserido o número de horas de operação que o equipamento efectuou depois da falha, de modo a obter-se um valor de tempo de operação de cada equipamento e o tempo entre avarias;
- **Perda de produção –** este campo indica o valor de produção perdida, devido à falha em questão, de modo a poder estimar-se o valor de produção perdida durante avarias do mesmo tipo, do mesmo equipamento e até durante o ano em questão.

Tabela 30 - Base de dados proposta.

Sistema	Data da falha	Nº Ref.	ID componente	Tipo de componente	Severidade da falha	Estado de operação	Causa da falha	Tempo de paragem (h)	Idade de falha (h)	Perda de produção (ton)
U-1200	38691	123456	P-1201 A	P	S1	F	12	32	3574	25
U-1200	38791	149275	TP-1201 B	TP	S2	F	12	59	1652	55
U-3300	38923	482953	MP-3303	MP	S3	A	25	125	1433	0,1

Anexo III – Diagrama para aplicação de uma análise HAZOP

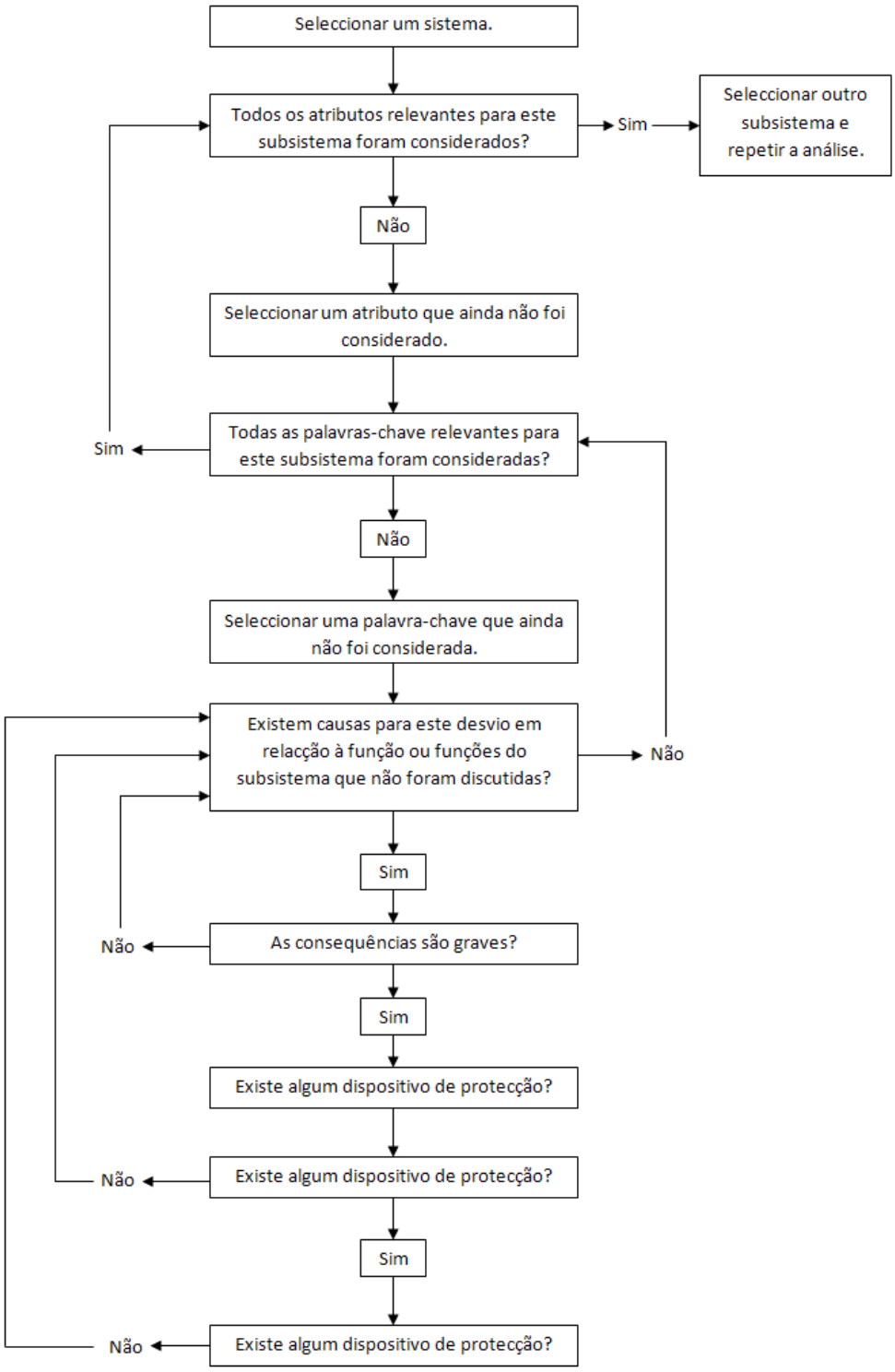


Figura 39 - Procedimento para aplicação da análise HAZOP.

Anexo IV – Exemplo de ferramentas para análise do sistema

Diagrama de blocos

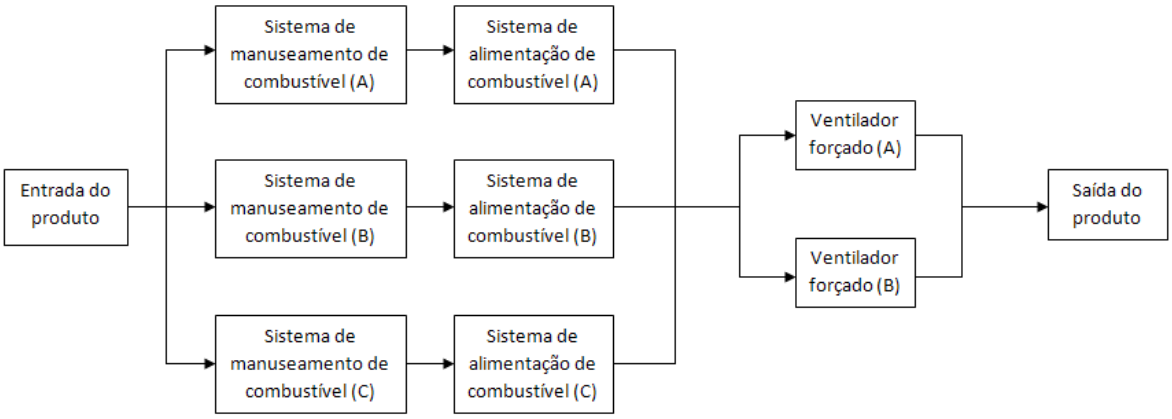


Figura 40 - Exemplo de um diagrama de blocos.

Árvore de eventos

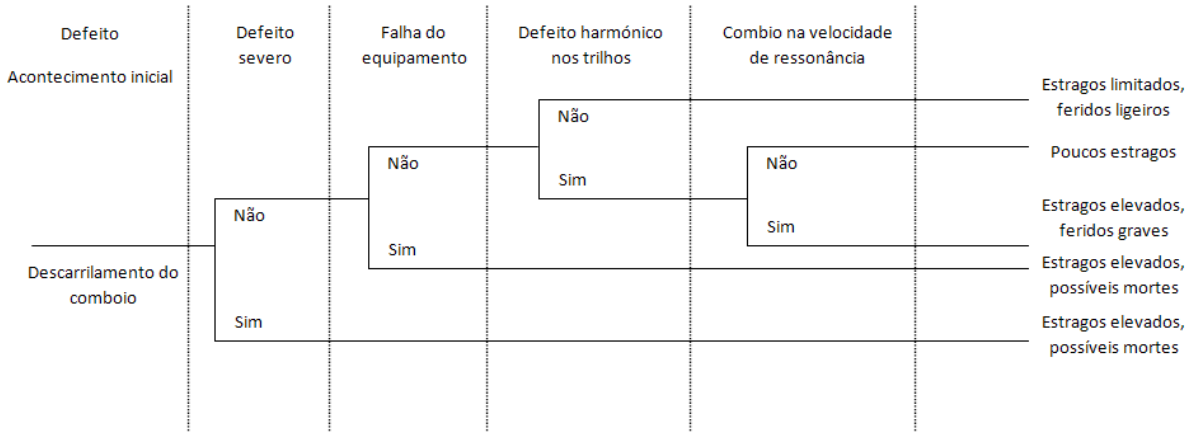


Figura 41 - Exemplo de uma árvore de eventos.

Árvore de falhas

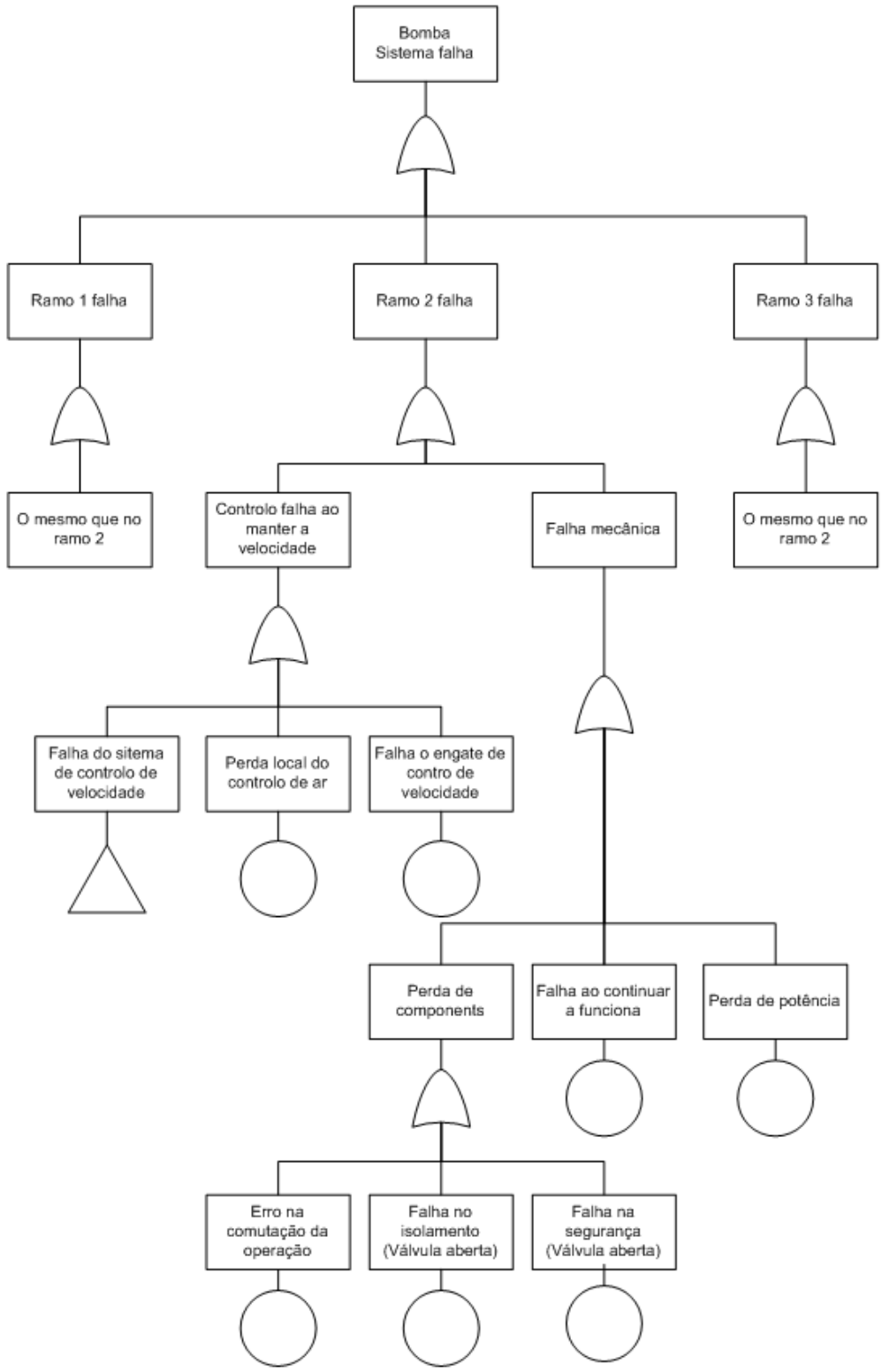


Figura 42 - Exemplo de uma árvore de falha.

HAZOP

Tabela 31 - Exemplo de uma análise HAZOP efectuada na Refinaria.

galp energia

REVISÃO HAZOP
REGISTO

DATA: 05/07/2007
REV.:
PAG.: 2

PROJECTO: Teste de Capacidade à unidade Parex

UNIDADE: FAR - 0300/0400
DOCUMENTAÇÃO: Suporte para a Revisão HAZOP do teste de capacidade P&I's

N.º SISTEMA:
DESCRIÇÃO DO SISTEMA:
INTENÇÃO:

CIRCUITO	VARIÁVEL	DESVIO	CAUSA	CONSEQUÊNCIA	PROTECÇÃO	RECOMENDAÇÃO
2- Circuito do D-471 até às adsorvedoras T 0301/0302, inclusivé	Caudal	↑	---	Perda de recuperação de PX Perda de pureza de PX	---	Os parâmetros das adsorvedoras têm que ser ajustados ao novo caudal, de acordo com recomendação da UOP: ↑ A/Fa. Esta razão deve ser ajustada para o mínimo possível (valor actual=0,0550) - ↑ L_2/A (valor actual=0,77) - L_3/A e L_4/A mantêm os valores A $P_{assentamento}$ aumenta (deve-se manter dentro das janelas de operação)
		= ↓	---	Sem consequências	---	---
	Temperatura	↑ = ↓	---	Sem consequências	---	---
	Pressão	↑	↑ caudal e/ou obstrução do filtro	Perda de recuperação de PX Perda de pureza de PX	PSV do D-0471	Recomendação igual ao ↑ de caudal
		= ↓	---	Sem consequências	---	---
	Composição	↑ PX	---	Perda de recuperação de PX Perda de pureza de PX	---	Recomendação igual ao ↑ de caudal
	Nível no D-0471	↑	Falha da PJ0303	Perda de recuperação de PX Perda de pureza de PX	PSV do D-0471	Recomendação igual ao ↑ de caudal
		=	---	Sem consequências	---	---
		↓		Sem consequências		---

Matriz de escolha do método da análise de risco

galp ARL energia	MATRIZ DE ESCOLHA DO MÉTODO DE ANÁLISE DE RISCO	Pág. 1 de 2

PROJECTO:_____ REF.ª_____

Instruções: Responder sim ou não a cada pergunta. Avaliar as respostas às questões P-1 a P-5 de acordo com as regras de determinação do nível de perigo (ver abaixo). Avaliar as respostas R-1 a R-8 de acordo com as regras de determinação da relevância da modificação introduzida (ver abaixo). Determinar o nível potencial de risco introduzindo os resultados do nível de perigo e da relevância na respectiva matriz (ver abaixo).

Nível de Perigo

P-1 – ENERGIA: pode a modificação introduzir ou afectar uma fonte de energia mecânica, térmica ou eléctrica que, se inadvertidamente libertada pode causar ferimentos ou afectar o processo?

P-2 – VOLUME: pode a modificação provocar um aumento superior a 25% do inventário ou da capacidade de armazenagem de materiais tóxicos, inflamáveis ou reactivos (considerar matérias primas, produtos intermédios, aditivos, catalisadores, produtos finais e subprodutos)?

P-3 – ESTABILIDADE: o sistema modificado contém materiais que têm (ou se suspeita que possam ter) problemas de estabilidade?

P-4 – Pode a modificação aumentar significativamente o potencial para a ocorrência de acidentes pessoais e/ou a exposição a materiais perigosos? Considerar procedimentos de amostragem, novos pontos de libertação de produtos para a atmosfera, operações de carga/descarga, trabalhos em altura, novo tipo de trabalho manual com implicações de carácter ergonómico, etc.

P-5 – A modificação altera ou entra em conflito com os procedimentos de mitigação estabelecidos por algum Padrão Operacional de Segurança?

Níveis de Perigo

MÍNIMO – zero respostas "sim".
BAIXO – só uma resposta "sim" que não à pergunta P-5.
ALTO – resposta "sim" à pergunta P-5 ou duas ou mais respostas "sim".

Relevância da Modificação

R-1 – Pode a modificação levar o processo ou sistema para fora da "janela de operacionalidade" nas condições normais de operação ou em condições transientes?

R-2 – A modificação introduz novos produtos químicos processuais perigosos (considerar matérias primas, produtos intermédios, aditivos, catalisadores, produtos finais e subprodutos)?

R-3 – A modificação reordena ou altera a sequência de processamento (com o mesmo processo e equipamento)? Por exemplo, a adição de reagentes numa ordem diferente, alterar a sequência dos equipamentos numa unidade processual, etc.

R-4 – A modificação aumenta ou diminui significativamente a massa ou energia introduzida ou removida do sistema?

R-5 – A modificação altera, afecta e/ou põe fora de serviço um dispositivo de segurança, um instrumento crítico ou qualquer equipamento crítico?

R-6 – A modificação envolve alterar o serviço de um tanque?

R-7 – A modificação envolve a produção de produtos químicos em equipamentos não desenhado para esse propósito ou cria o potencial para que se excedam os limites de utilização do equipamento?

R-8 – A modificação obriga a formação específica do pessoal de operação ou de manutenção, ou é um sistema que exige muita intervenção do operador tanto em situação nomal como de emergência?

Níveis de Relevância da Manutenção

MÍNIMO – zero respostas "sim".
BAIXO – todos os casos que não são MÍNIMO ou ALTO.
ALTO – resposta "sim" a uma das perguntas R-1, R-2 ou R-8 mais qualquer outra resposta "sim".

Matriz de Escolha do Método da Análise de Risco

A matriz seguinte mostra como converter os resultados anteriores no Nível Potencial de Risco do Projecto.

		Relevância da Modificação		
		Mínimo	Baixo	Alto
Nível de Perigo	Mínimo	1	1	2
	Baixo	1	1	2
	Alto	2	2	2

Significado dos níveis de risco:
Nível 1 – APR.
Nível 2 – APR + HAZOP.

Conclusão

O Projecto_____, ref.ª _____, apresenta um Nível de Risco de ____ pelo que se deverá utilizar o seguinte método de análise de risco: _____.

Análise realizado por _____
Data _____.

galp ARL energia	MATRIZ DE ESCOLHA DO MÉTODO DE ANÁLISE DE RISCO	Pág. 1 de 3

Título do projecto: _____

Unidade: _____

ASSINALAR AQUELES FACTORES QUE SÃO AFECTADOS PELA MODIFICAÇÃO PROPOSTA:

Condições Processuais

- ☐ Temperatura
- ☐ Pressão
- ☐ Caudal
- ☐ Nível
- ☐ Composição
- ☐ Toxicidade
- ☐ Ponto de inflamação
- ☐ Condições de reacção
- ☐ Catalisador
- ☐ Aditivos

Procedimentos Operacionais

- ☐ Arranque
- ☐ Operação de rotina
- ☐ Paragem
- ☐ Preparação para Manutenção
- ☐ Marcha degradada
- ☐ Operações de Emergência
- ☐ Layout e posicionamento da instrumentação

Dados de Design

- ☐ "*Line Diagram*"
- ☐ "*Wire Diagram*"
- ☐ Layout da Unidade
- ☐ Pressão do projecto
- ☐ Temperatura do projecto
- ☐ Materiais de construção
- ☐ Cargas ou resistências de:
  - ☐ Fundações
  - ☐ Estruturas
  - ☐ Vessels
  - ☐ Tubagem/suportes/juntas de dilatação
- ☐ Temporários ou permanentes:
  - ☐ Tubagem/suportes/juntas de dilatação
  - ☐ Válvulas
  - ☐ Bases de deslizamento
  - ☐ Batentes
  - ☐ Filtros
- ☐ Sistemas de controlo e instrumentação
- ☐ Alarmes e *trips*
- ☐ Electricidade estática

Métodos de Engenharia

- ☐ Métodos de teste dos valores de *trip* e de alarme
- ☐ Procedimentos de Manutenção
- ☐ Procedimentos de Inspecção
- ☐ Equipamento portátil

Equipamento de segurança

- ☐ Sistemas de combate e detecção de incêndios
- ☐ Meios de fuga
- ☐ Equipamento de segurança para o pessoal
- ☐ Posicionamento dos equipamentos
- ☐ Circulação
- ☐ Sinalização

Condições ambientais

- ☐ Efluente líquido
- ☐ Resíduos sólidos
- ☐ Efluente gasoso
- ☐ Ruído

Saúde

- ☐ Exposição pessoal (operação/manutenção)
- ☐ Consequência de fugas

- ☐ Pára-raios
- ☐ Radioactividade
- ☐ Velocidade de corrosão
- ☐ Erosão
- ☐ Seccionamento para manutenção
- ☐ Protecção anti-fogo para cabos eléctricos
- ☐ Corrimões
- ☐ Escadas
- ☐ Plataformas
- ☐ Passagens para operadores
- ☐ Risco de *tripping*
- Acessos para:
  - ☐ Operações
  - ☐ Manutenção
  - ☐ Veículos
  - ☐ Outras áreas
  - ☐ Ataque a sinistros
- ☐ Sistema de drenos

Dentro das categorias listadas a baixo, a modificação proposta…	Sim/ Não	Se sim, defenir o problema e determinar a acção necessária à sua minimização ou eliminação	Assinatura/ Data
Descarga para a *flare* e dreno 1. Introduz ou altera qualquer causa potencial de sobre/subpressão (ou de aumentar ou diminuir a temperatura) no sistema ou parte dele? 2. Introduz o risco de fazer vácuo no sistema ou parte dele? 3. Afecta de algum modo a capacidade do sistema existente acomodar sobre/subpressões? **Classificação eléctrica das áreas** 4. Introduz ou altera a localização de potenciais fugas? 5. Altera a composição química ou as propriedades físicas do produto processual? 6. Introduz novo equipamento eléctrico ou altera o existente? **Equipamento de segurança** 7. Exige equipamento de segurança adicional? 8. Afecta o equipamento de segurança existente?			

Dentro das categorias listadas a baixo, a modificação proposta…	Sim/ Não	Se sim, defenir o problema e determinar a acção necessária à sua minimização ou eliminação	Assinatura/ Data
Operação e Projecto 9. Introduz novo *hardware* ou altera o existente? 10. Requer o respeito por códigos de Práticas ou Especificações existentes? 11. Afecta a segurança dos acessos ou o equipamento a montante ou jusante da modificação? 12. Afecta a segurança dos acessos do pessoal, dos locais de trabalho, ou da localização dos equipamentos, instalações? 13. Requer revisão à frequência de inspecção do equipamento? 14. Afecta qualquer sistema de alarme ou de *trip* existente ou exige um sistema de alarme e *trip*? 15. Afecta a estabilidade da reacção ou a controlabilidade do processo? 16. Afecta procedimentos existentes de operação ou de manutenção ou exige novos procedimentos? 17. Afecta a composição do efluente ou a maneira como ele é descartado? 18. Altera o nível de ruído? 19. Altera a "Avaliação de Segurança Ambiental" da instalação? 20. No caso de material armazenado – as fichas de segurança dos materiais e produtos estão acessíveis? São do conhecimento do pessoal do armazém?			

Anexo V – Criação do modelo de decisão

Para ilustrar o modelo de decisão, começa-se pelo objectivo final: maximizar o NPV. Na extremidade direita, desenha-se um nó que representa o cálculo do NPV. De seguida a pergunta a fazer-se é a seguinte: "*O que é preciso conhecer no cenário da PM para calcular o valor do NPV?*". As respostas são:

1. Total de perda de produção sem a implementação do projecto.
2. Total dos custos da implementação do projecto (despesas de substituição e reparação dos componentes).
3. Total de perda de produção com a implementação do projecto.

Cada um destes custos tornam-se nós de cálculo no diagrama de influência. Podendo os desenhar imediatamente à esquerda do nó NPV e fazendo as suas ligações. A palavra projecto pode ser sinónimo de componente, no sentido que estamos a ponderar algumas acções de manutenção, o que se pode chamar um projecto no componente.

Então, para cada um desses nós de custo, faz-se a seguinte pergunta: "*O que é que é preciso saber para calcular este nó?*". Para cada um dos nós é preciso saber os seguintes nós numa base anualizada:

1. Custo de perda anual de produção sem a implementação do projecto.
2. Custo anual da implementação do projecto (despesas de substituição e reparação dos componentes).
3. Custo de perda anual de produção com a implementação do projecto.

Agora tem que se considerar o próximo conjunto de nós à esquerda. Para os custos da consequência de perda de produção é preciso saber:

1. Custo por hora de perda de produção.
2. O número de horas de perda de produção por ano quando o projecto for implementado.
3. O número de horas de perda de produção por ano quando o projecto não for implementado.

Para os custos de projecto precisamos saber, para além dos custo do projecto em si:

1. O ano de implementação do projecto, para ter em conta o valor temporal do dinheiro.
2. O orçamento limite anual para despesas de manutenção.

Cada um destes tornam-se nós do cálculo ou informação nos diagramas de influência. Eles são colocados imediatamente à esquerda e procede-se às ligações.

Então, para cada um desses nós fazemos a seguinte pergunta: "*O que é preciso para saber cálcular esse nó?*". Para o número de horas por ano quando o projecto não é implementado, precisamos de saber:

1. O número de horas que o sistema está em baixo devido a uma falha, no caso de múltiplos elementos do componente, o número de elementos e o número de horas no caso de um elemento falhar.
2. As mudanças da POF em cada ano se o projecto não for implementado.

Em seguida, para cada um desses modos deve-se perguntar: "*O que é preciso saber para calcular esse nó?*". Para o número de horas de produção perdida por ano se o projecto for implementado, é preciso saber:

1. O número de horas que o sistema está em baixo devido a uma falha, no caso de múltiplos elementos do componente, o número de elementos e o número de horas no caso de um elemento falhar.
2. As mudanças de POF em cada ano se o projecto não for implementado.
3. As mudanças de POF de cada ano caso o projecto seja implementado para contabilizar as consequências do atraso da implementação do projecto.
4. Ano em que o projecto é implementado.

O que é muito importante e preciso saber é a curva de "probabilidade de falha *vs*. tempo" com e sem implementação do projecto.

O limite de segurança da POF representa um outro problema para a politica da empresa. Esta limitação é aplicada para se decidir o ano de implementação do projecto. No ano em que esse limite for ultrapassado, o ano anterior marca o limite da data de implementação do projecto.

Sabe-se que se completou o diagrama porque tem-se que ir fora do diagrama para obter a incerteza da POF e o ano de decisão da implementação do projecto, e os limites do orçamento e de interrupção forçada. O diagrama só está completo quando todos os seus nós que não estã calculados, dentro do diagrama, exigirem informações exteriores ao diagrama ou forem decisões.

Anexo VI – Simplificação do sistema a analisar

A Refinaria do Porto é parte integrante do sistema produtivo da GalpEnergia e conjuntamente com a sua instalação de Sines são as duas únicas refinarias existentes no país.

Situada na concelho de Matosinhos, nas freguesias de Leça da Palmeira e Perafita, pussui uma área de 290 hectares e está interligada com um terminal de petroleiros do Porto de Leixões por um pipeline com uma extensão de 2 km.

Os trabalhos de construção iniciaram-se em Setembro de 1967, tendo sido feito o arranque das Unidades dois anos mais tarde e a inauguração oficial em Julho de 1970. A quantidade de produtos produzidos na Refinaria hoje em dia é mostrado na tabela seguinte.

Tabela 32 - Quantidade dos produtos produzidos na Refinaria.

Produção de combustíveis	3.700.000 ton/ano
Produção de aromáticos e solventes	440.000 ton/ano
Produção de óleos base	150.000 ton/ano
Produção de betumes	150.000 ton/ano
Fabricação e moldação de parafinas	10.000 ton/ano
Produção de Enxofre	10.000 ton/ano
Fabricação de massas lubrificantes	1.500 ton/ano

Desde do inicio da construção da Refinaria até aos dias de hoje, a Refinaria tem sofrido alterações no seu aparelho produtivo, através de um desenvolvimento tecnológico, mais protecção do ambiente e segurança de funcionamento, onde anualmente são investidos importantes e avultados capitais de modo a manter uma Refinaria moderna, à altura dos novos desafios e em total cumprimento da legislação.

Para o desenvolvimento das actividades necessárias à obtenção dos produtos comerciais refinados, a Refinaria é constituída, como também se pode ver na figura seguinte, por:

- **Fábrica dos Combustíveis (FCO) –** preparam-se produtos, finais ou componentes, cuja aplicação assenta fundamentalmente na sua utilização térmica, de acordo com as especificações ambientais de exigidas em cada momento.
- **Fábrica dos Aromáticos (FAR) –** Obtêm-se a partir da matéria-prima, gasolina reformada, oriunda da FCO, produtos aromáticos e solventes que constituem matéria-prima de indústria de actividades muito diversificadas, tais como: plásticos, texteis, adubos, borrachas, tintas, detergentes, diluentes, etc..
- **Fábrica de Óleos Base (FOB) –** são preparados os óleos base lubrificantes e outros produtos que resultam do aproveitamento de subprodutos das diversas fases de refinação dos óleos, como: parafinas, betumes, etc..

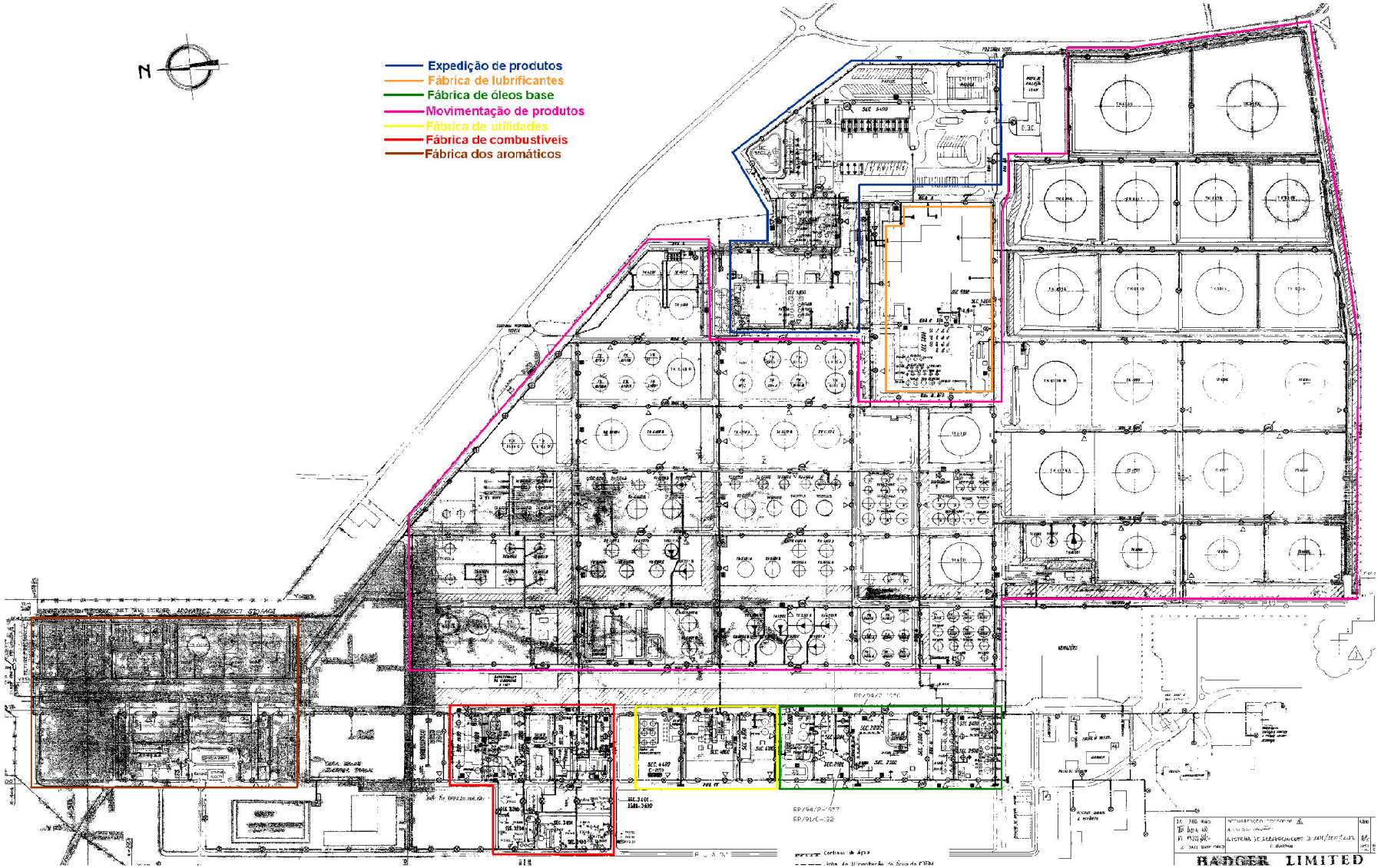


Figura 43 - Complexo da Refinaria do Porto.

- **Fábrica de Lubrificantes (LUB) –** integra duas linhas de produção e de enchimento: uma de óleos lubrificantes e outra de massas lubrificantes. Promove-se a lotação e aditivação de óleos, em grande percentagem produzidos na FOB, conferindo-lhes as características necessárias às diversas utilizações no mercado.
- **Fábrica de Utilidades (FUT) –** é indespensável para o funcionamento de todas as unidades processuais, sendo um serviço de produção e distribuição de utilidades.
- **Movimentação de produtos (MOV) –** está dividida em várias unidades de armazenamento de acordo com as características dos produtos e o seu estádio na cadeia de produção. Estão incumbidas a este departamento as seguintes actividades: recepção de matérias-primas e respectiva armazenagem, alimentação das unidades processuais, armazenagem e controlo da qualidade dos produtos armazenados.
- **Expedição de Produtos –** é composta por estações de bombagem como: estação de enchimento de combustíveis, estação de enchimento de lubrificantes em carros tanques e expedição de lubrificantes a granel, estação de enchimento de solventes em carros tanques, bem como, serviços que asseguram a movimentação, expedição de transportes de produtos destinados a abastecer outras instalações de armazenagem, ou directamente ao mercado consumidor.
- **Tratamento de Efluentes –** está dividida em duas unidades: tratamento de efluentes líquidos (águas residuais) e tratamento de efluentes gasosos. A primeira visa o tratamento dos diversos tipos de efluentes, conforme as suas proveniências e tipo de conspurcações. A segunda fazendo parte do sistema de segurança do processo destina-se a queimar os hidrocarbonetos gasosos e outros gases, não recuperáveis, descarregados pela Refinaria, como por exemplo o gás sulfídrico proveniente das unidades de tratamento.

A Unidade analisada pertence à FCO. A Fábrica é constituída por 14 unidades processuais (Figura 44) que, a partir do petróleo bruto, obtêm toda a gama de produtos combustíveis, incluindo grande parte da matéria-prima que alimenta a FAR.

Os produtos combustíveis são obtidos através de operações de separação física, tratamento químico ou ainda por processo de conversão da estrutura molecular de algumas famílias de hidrocarbonetos.

As unidades processuais existentes podem-se dividir nos seguintes grupos:

- **Destilação Atmosférica –** nesta Unidade realiza-se, por destilação, a separação primária da matéria-prima (petróleo bruto) em quatro grandes fracções como se pode ver na figura seguinte, designadas por: produto de topo (leves), petróleo, gasóleo e resíduo atmosférico. Sendo o produto de topo redestilado, dando origem a gases incondensáveis (fuel-gás), gás de petróleo liquefeito (G.P.L.) e naftas leves e pesadas.

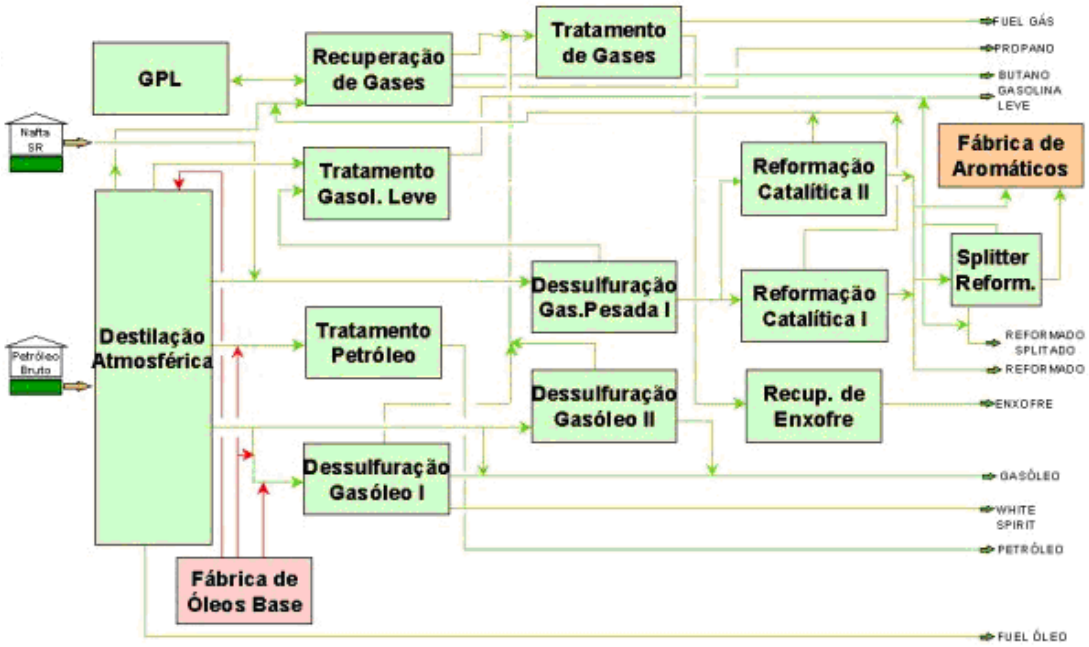


Figura 44 - Organização da FCO.

- **Adoçamento de Petróleo (Jet) –** este produto separado na destilação atmosférica contém vários contaminantes, especialmente sulfuretos orgânicos, designados tióis ou mercaptanos, que corroem os metais e exalam um odor desagradável. Por esta razão, o petróleo é sujeito a um tratamento específico, no qual os sulfuretos são convertidos em dissulfuretos não corrosivos e eventuais traços de gás sulfídrico e ácidos carboxílicos são removidos. A maior parte do petróleo tratado é usado como combustível para a aviação, sob a designação de jet-fuel.
- **Dessulfuração de Gasolina Pesada –** a gasolina selvagem (C_nH_m+S+N+O) é transportada para a Unidade 1200 "*Unifining*". Remove por via catalítica em atmosfera de hidrogénio, os compostos orgânicos de Enxofre, Azoto e Oxigénio presentes na gasolina, os quais actuariam como veneno permanente ou temporário do catalisador da Unidade de Reformação Catalítica "*Platforming*" situada a jusante, na fileira de tratamento. O produto gasoso de reacção, constituído por Hidrogénio e hidrocarbonetes muito leves, gás sulfídrico e amoníaco, é submetido a um tratamento de purificações por aminas (tratamentos de gases), o gás sulfídrico é separado e enviado para a Unidade de Recuperação de Enxofre e os hidrocarbonetos encaminhados para a rede de fuel-gás.
- ***Platforming* semi-regenerativo e de regeneração contínua (CCR) –** o propósito desta operação é converter os hidrocarbonetos nafténicos e parafínicos em aromáticos (reformação catalítica), que é uma reorganização molecular, libertando Hidrogénio como subproduto da reacção. A carga à Unidade é constituída por nafta pesada dessulfurada, o produto líquido obtido, designado "reformado", com elevado teor em hidrocarbonetos aromáticos e um número de octano muito alto, é usado como componente de gasolinas ou

como matéria-prima para a FAR. O Hidrogénio produzido, depois de purificado, *Pressure Swing Adsorptions* (PSA), é usado como co-reagente nos processos catalíticos hidrogenantes, nas Unidades 1200, 3770 por exemplo. Criando um ciclo e aproveitando os recursos existentes na fábrica. Os hidrocarbonetos leves produzidos na reacção são enviados para a recuperação de gases. A Unidade 3300 a regeneração é contínua, *Continuous Catalyst Regeneration* (CCR), o catalisador é regenerado constantemente, circulando em tubos dentro dos reactores e passando no reactor R-3351 onde se dá a sua regeneração, demora cerca de sete dias a dar uma volta completa, enquanto na Unidade 1300 o catalisador encontra-se dentro do reactor e é regenerado apenas quando se encontra exausto, a regeneração é feita por volta de seis a dez meses de funcionamento.

- **Tratamento de G.P.L. e de gasolina leve –** este processo de tratamento, designado Merox, tem como objectivo remover os mercaptanos (toíos) presentes nas correntes de G.P.L. e nafta leve, através de extracção com uma solução aquosa de soda cáustica. Os mercaptitos de sódio formados são depois removidos da solução de soda cáustica (regeneração de soda) por oxidação com ar na presença dum catalisador, convertendo-se em dissulfuretos orgânicos insolúveis na solução aquosa, separando-se por decantação. Os G.P.L. tratados são enviados para a Unidade de Recuperação de Gases. A gasolina leve tratada, segue para a armazenagem.
- **Tratamento de gases I e II e Recuperação de Gases –** o tratamento de gases realiza a extracção do ácido sulfídrico contido nas várias correntes gasosas destinadas a fuel-gás, utilizando uma lavagem, em contra-corrente, com uma solução aquosa de dietanolamina. A recuperação de gases, compreende a separação dos gases incondensáveis contidos nas correntes de G.P.L. (propano e butano) provenientes de diferentes unidades. Os produtos resultantes destas operações são: ácido sulfídrico que é enviado à Unidade de Recuperação de Enxofre, os incondensáveis de petróleo (fuel-gás) e os G.P.L., que depois de sujeitos ao tratamento Merox, são separados em propano e butano comerciais.
- **Dessulfuração de Gasóleo –** trata-se de um processo de hidrodessulfuração do gasóleo (reacção catalítica, realizada a alta pressão parcial de Hidrogénio, na presença dum catalisador apropriado) que reduz drasticamente o seu teor de Enxofre. Em consequência de severidade da operação, forma-se alguns leves por craqueamento de carga, que são separados por *stripping* do gasóleo tratado, antes de este ser enviado para a armazenagem.
- **Produção de Enxofre –** converte de ácido sulfídrico contido na corrente gasosa proveniente do Tratamento de Gases, em Enxofre elementar. Este processo, designado *Claus*, compreende a queima de 1/3 da corrente de ácido sulfídrico para a formação de dióxido de enxofre que, reagindo com os 2/3 remanescentes, na presença de um catalisador, produz Enxofre elementar. É um processo importante da fileira de tratamento na medida em que recupera, como um produto comercial, todo o Enxofre removido dos diferentes produtos pelos respectivos processos de purificação.

A metodologia proposta é aplicada à Unidade 1200 "*Unifining*" da FCO. Para realizar este procedimento, teve que se recorrer aos arquivos da Refinaria, de modo a encontrar o fluxograma da Unidade em questão. Com a ajuda desses diagramas, tentar compreender o funcionamento da Unidade.

A primeira secção a ser analisada, é a *Alimentação do fraccionador*. Nesta secção realização a alimentação da Unidade com gasolina pesada. Essa gasolina é encaminhada para a torre (T-1201), ou fraccionador, provenientes dos tanques (TK-6006, TK-6007, TK-6008, TK-6201 A/B/D e TK-6203) e da unidade (U-3000). Como se pode observar na figura seguinte.

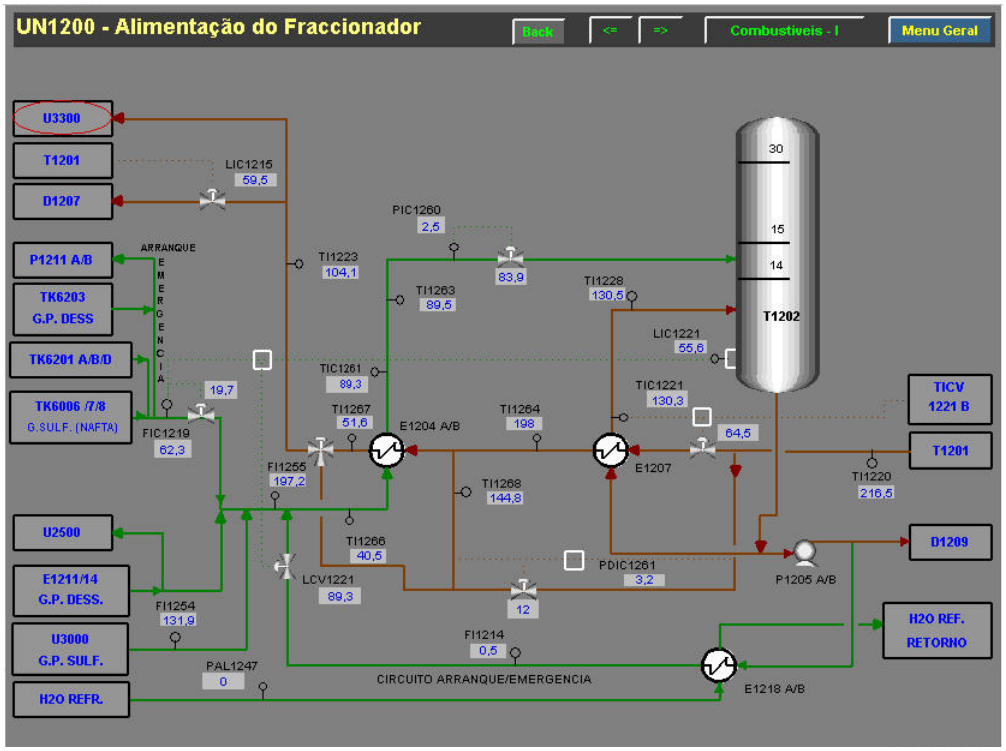


Figura 45 - Fluxograma da *Alimentação do fraccionador*.

Seguidamente, na *Secção de Desexanização*, o fraccionador (T-1202) procede à separação do composto químico Hexano da gasolina pesada. Então, pela parte superior do fraccionador sai o Hexano, sendo este encaminhado para a unidade (U-3400), para *armazenamento* ou para as *slops*. Pela parte inferior do fraccionador sai a gasolina pesada sem Hexano, sendo esta encaminhada para a bomba (P-1212 A/B) que envia o produto para as *slops*, ou é encaminhada para a bomba (P-1211 A/B) que serve de bomba *booster* da bomba de alimentação da Unidade. Como é ilustrada na Figura 46.

A *Secção de reacção* o produto proveniente do acumulador (D-1209) e do compressor (C-1201 A/B), são encaminhadas para a fornalha (H-1201). Esta por sua vez encaminha o produto para o reactor (R-1201). No reactor, procede-se à remoção por via catalítica, em atmosfera de Hidrogénio, dos componentes orgânicos de Enxofre, Azoto e Oxigénio (considerados impurezas) presentes na gasolina. Depois deste procedimento químico, o produto é enviado para o acumulador (D-1251). Do acumulador o produto é enviado para a torre (T-1201). Como pode ser visto na Figura 47.

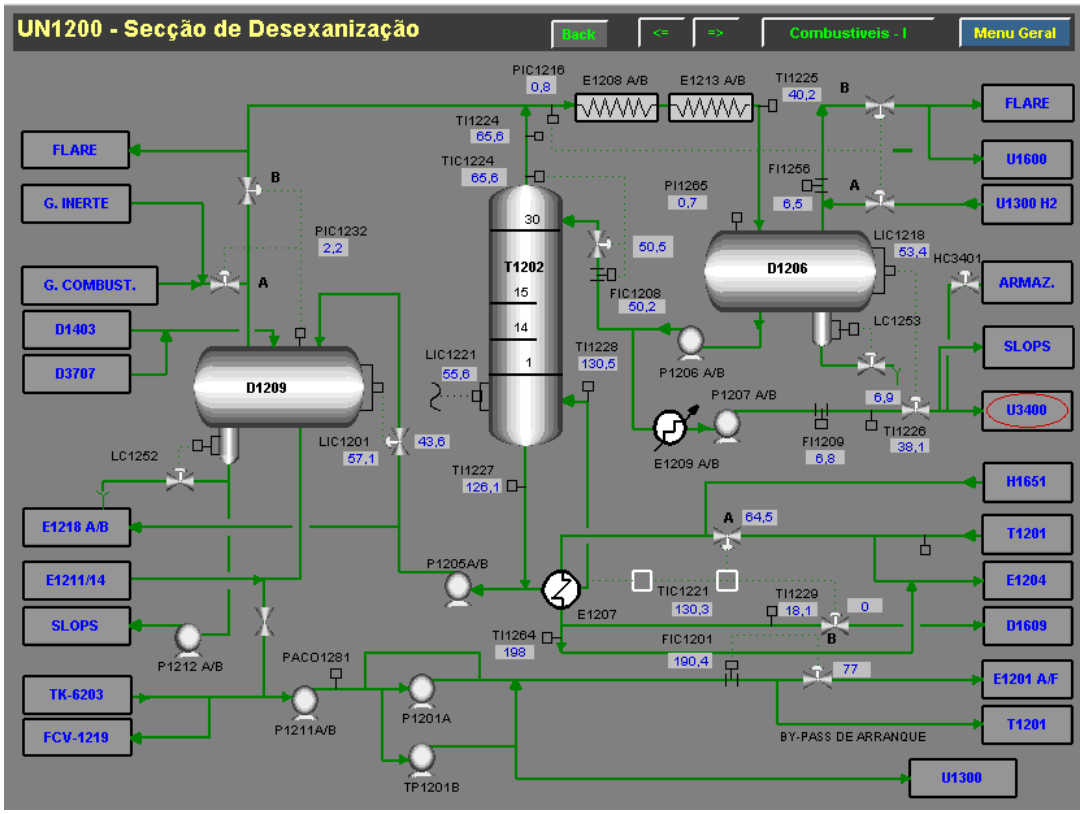


Figura 46 - Fluxograma da *Secção de Desexanização*.

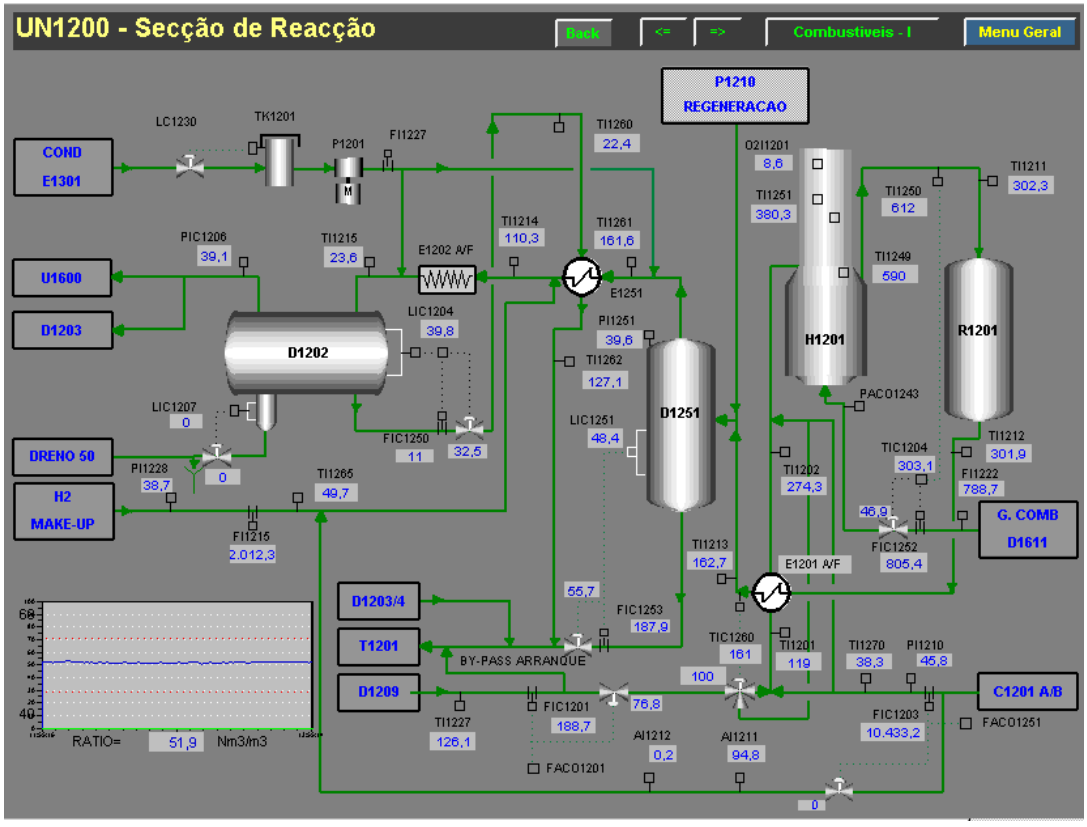


Figura 47 - Fluxograma da *Secção de Reacção*.

No *Circuito H_2 Make-up* o produto presente no acumulador (D-1202) é direccionado tanto para as unidades (U-1600 e U-4700), como para o compressor (C-1201 A/B). Para o mesmo compressor, também é enviado produto proveniente das unidades (U-1300 e U-3300). Depois de comprimido o produto, é enviado de novo para o acumulador (D-1202), ou é encaminhada para um pré-aquecimento realizado no permutador (E-1201 A/F) antes de entrar na formalha (H-1201). Como se pode observar na figura seguinte.

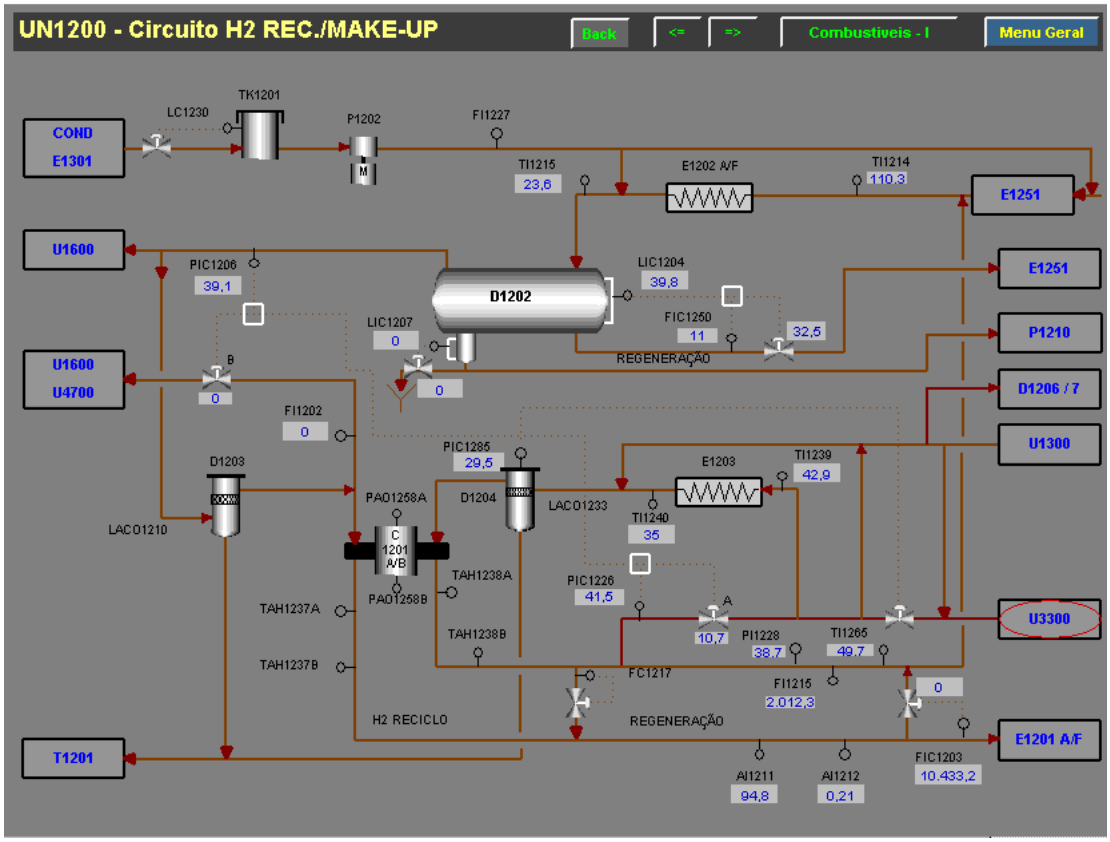


Figura 48 - Fluxograma do *Circuito H2 Make-Up*.

Por fim, na *Secção de Desbutanização*, o produto presente na torre (T-1201), também vai ser fraccionado. Pela parte superior da torre sai Butano, sendo este encaminhado para a unidade (U-1300). Enquanto a gasolina leve sem Butano, que sai pela parte inferior da torre, é direccionado para a unidade (U-3300) ou para o acumulador (D-1207) que depois envia o produto para a *flare*. Como pode ser visto na Figura 49.

A junção de todas as secções descritas anteriormente, dão origem à Unidade 1200, e consequentemente ao seu fluxograma. Como neste estudo se pretende apenas considerar os equipamentos dinâmicos, integrados nesta Unidade, tais como: bombas, compressores, motores eléctricos e turbinas. Tendo em conta apenas os equipamentos dinâmicos, pode-se simplificar-se o fluxograma do seguinte modo, como se pode observar na Figura 50.

Mesmo depois desta simplificação, ainda se pode constatar que alguns dos equipamentos dinâmicos existentes no fluxograma não influencia o funcionamento e produção da Unidade. Como por exemplo:

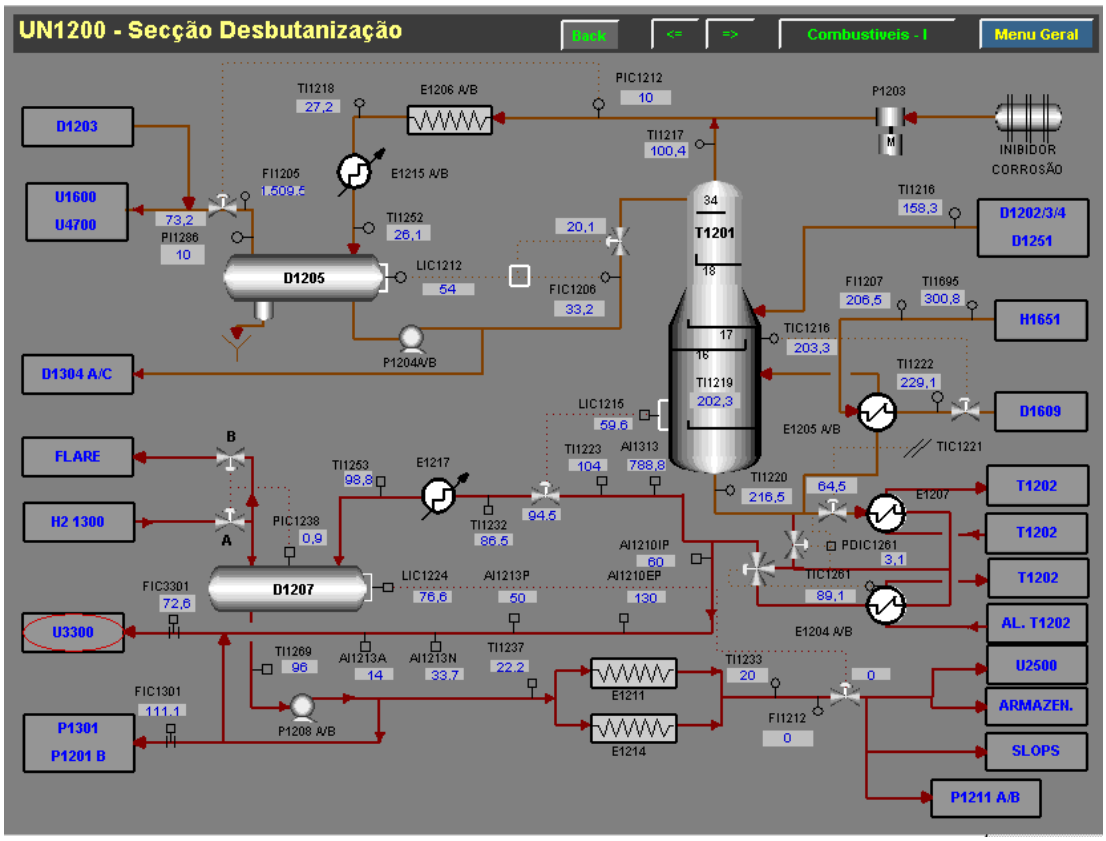


Figura 49 - Fluxograma da *Secção de Desbutanização*.

- **P-1202 –** este equipamento presta serviço de bombagem de Soda para o circuito, é uma boa alternativa e o seu funcionamento pode ser estimado em 1 hora/dia (tempo de funcionamento muito reduzido). A sua paragem, desde que inferior a 4 dias, não causa impacto na Unidade;
- **P-1203 –** este equipamento presta serviço de bombagem do Inibidor de Corrosão para o circuito. É uma boa alternativa, e apesar do seu funcionamento ser um contínuo, a sua paragem, desde inferior a 4 dias, não causa nenhum impacto na Unidade;
- **P-1210 –** este equipamento procede à regeneração do produto que é drenado pelo acumulador (D-1202). Voltando a colocar o produto em circulação juntamente com o produto proveniente do reactor (R-1201) no acumulador (D-1251). Esta bomba só se encontra em serviço quando a unidade (U-1300) se encontra em regeneração;
- P-1212 A/B – estes equipamentos apenas encaminha o produto que é drenado pelo acumulador (D-1209) para as *slops*. A sua paragem, desde que inferior a 4 dias, não causa nenhum impacto na Unidade.

Com mais estas simplificações ficamo com o sistema a analisar definido, obtendo-se o fluxogrma da Figura 51.

Neste fluxograma é possível observar-se a constituição do sistema a analisar, bem como, a localização dos diferentes equipamentos. Seguidamente descreve-se as características das entradas, nós e saídas do mesmo:

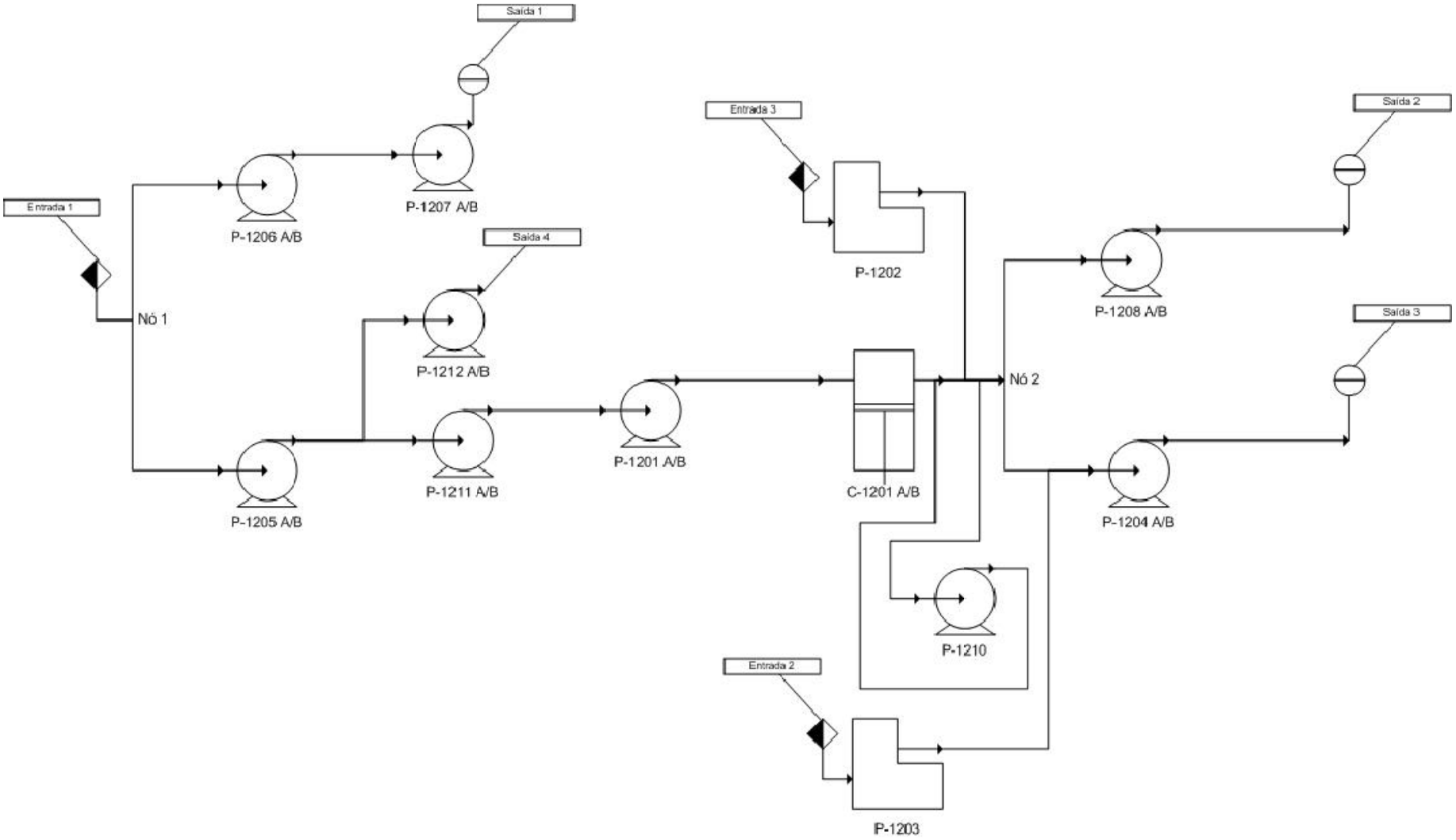


Figura 50 - Fluxograma dos equipamentos dinâmicos da Unidade 1200.

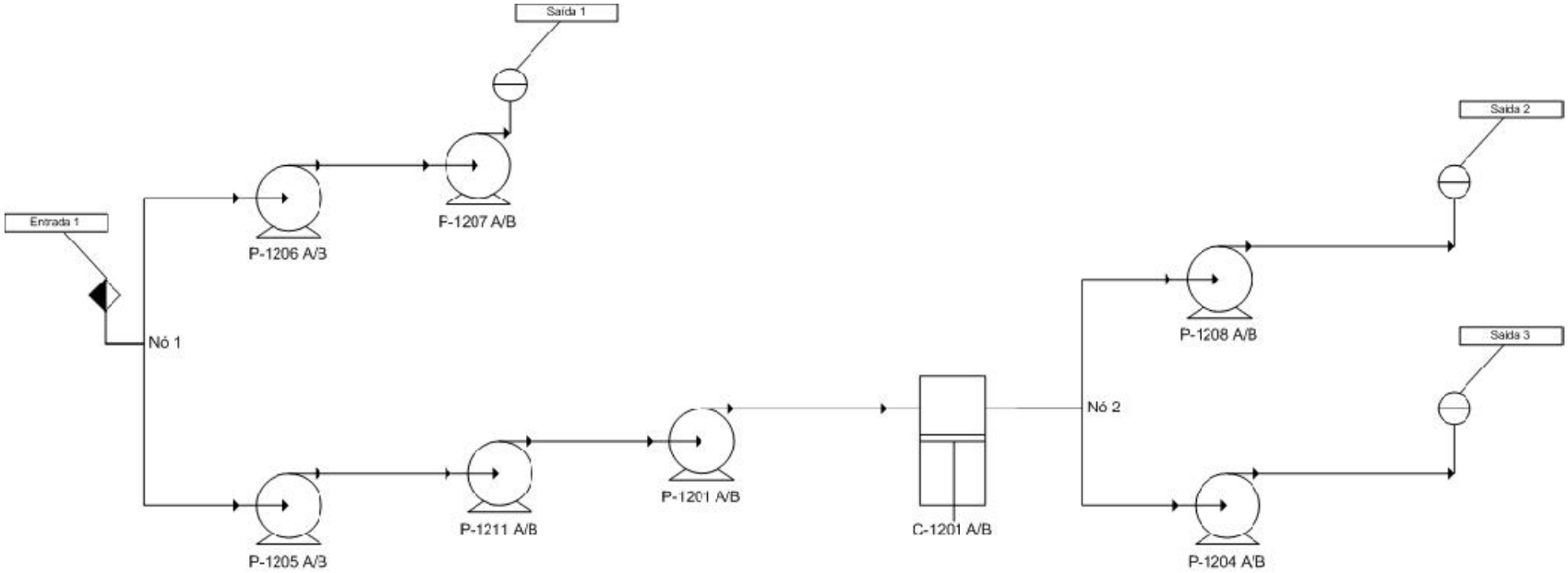


Figura 51 - Fluxograma simplificado dos equipamentos dinâmicos da Unidade 1200.

- **Entrada 1**
  - **Produto:** gasolina pesada.
  - **Proveniente de:** unidade (U-3000) e dos tanques (TK-6006, TK-6007, TK-6008, TK-6201 A/B/D e TK-6203).
- **Nó 1**
  - **Produto:** **Entra:** gasolina pesada.
    Saída topo: Hexano.
    Saída inferior: gasolina pesada sem Hexano.
  - **Equipamento:** torre (T-1202).
  - **Processo:** Desexanização.
- **Nó 2**
  - **Produto:** **Entra:** gasolina leve.
    Saída topo: Butano.
    Saída inferior: gasolina leve sem Butano.
  - **Equipamento:** torre (T-1201).
  - **Processo:** Desbutanização.
- **Saída 1**
  - **Produto:** gasolina leve.
  - **Encaminhado para:** unidade (U-3400), *armazenamento* e *slops*.
- **Saída 2**
  - **Produto:** gasolina pesada.
  - **Encaminhado para:** unidades (U-1300 e U-2500), *armazenamento* e *slops*.
- **Saída 3**
  - **Produto:** gasolina topo do refluxo da torra (T-1201).
  - **Encaminhado para:** unidades (U-1300, U-1600 e U-4700).

Anexo VII – Características dos equipamentos

Equipamento:	Bomba centrífuga	**Nº equipamento:**	P-1201 A/B

Características gerais

Designação:	Bomba de alimentação da Unidade		
Localização:	Dessulfuração de gasolina pesada (Unidade 1200)		
Marca:	Dresser	**Modelo:**	4`` AC - 6 Stage
Horas de marcha:	**A** 188.954 horas **B** 26.253 horas	**Data de entrada em serviço:**	1970

Condições de serviço

Fluido:	H.C.	**Caudal:**	121 m^3/h
Pressão:	61,2 kg/cm^2	**Temperatura:**	37,8 ºC
Densidade:	0,743		

Características técnicas

Velocidade nominal:	2950 rpm	**Nº de estágios:**	6
Potência hidráulica:	226 kW	**Peso:**	3900 kg
Sentido de rotação:	ccw		

Accionamento

Equipamento:	Motor	**Nº equipamento:**	MP-1201 A
Marca:	EFACEC	**Modelo:**	AKG 400L18
Potência:	450 kW	**RPM:**	3000 rpm
Tensão:	6000 V	**Fases:**	3
Frequência:	50 Hz		
Equipamento:	Turbina	**Nº equipamento:**	TP-1201 B
Marca:	Worthington	**Modelo:**	T2RA
Potência:	463 kW	**RPM:**	2950 rpm
Pressão de admissão:	12,98 kg/cm^2	**Pressão de saída:**	1,941 kg/cm^2

Equipamento:	Bomba centrífuga	**Nº equipamento:**	P-1204 A/B

Características gerais

Designação:	Bomba de produto do refluxo T-1201		
Localização:	Dessulfuração de gasolina pesada (Unidade 1200)		
Marca:	Byron Jackson	**Modelo:**	Vertical In-line
Horas de marcha:	**A** 64.593 horas **B** 74.868 horas	**Data de entrada em serviço:**	1970

Condições de serviço

Fluido:	H.C.	**Caudal:**	72,1 m^3/h
Pressão:	17,58 kg/cm^2	**Temperatura:**	37,8 ºC
Densidade:	0,532		

Características técnicas

Velocidade nominal:	2950 rpm	**Nº de estágios:**	1
Potência hidráulica:	9,08 kW	**Peso:**	187 kg
Sentido de rotação:	ccw		

Accionamento

Equipamento:	Motor	**Nº equipamento:**	MP-1204 A/B
Marca:	Cenancy	**Modelo:**	BF 160B
Potência:	18,5 kW	**RPM:**	3000 rpm
Tensão:	380 V	**Fases:**	3
Frequência:	50 Hz		

Equipamento:	Bomba centrífuga	**Nº equipamento:**	P-1205 A/B

Características gerais

Designação:	Bomba de gasolina leve		
Localização:	Dessulfuração de gasolina pesada (Unidade 1200)		
Marca:	Guinard	**Modelo:**	SMK 4x6x10H
Horas de marcha:	**A** 89.109 horas **B** 89.288 horas	**Data de entrada em serviço:**	1970

Condições de serviço

Fluido:	H.C.	**Caudal:**	119 m^3/h
Pressão:	3,52 kg/cm^2	**Temperatura:**	143 ºC
Densidade:	0,655		

Características técnicas

Velocidade nominal:	2900 rpm	**Nº de estágios:**	1
Potência hidráulica:	28 kW	**Peso:**	32 kg
Sentido de rotação:	cw		

Accionamento

Equipamento:	Motor	**Nº equipamento:**	MP-1205 A/B
Marca:	EFACEC	**Modelo:**	BFG 200L42
Potência:	37 kW	**RPM:**	3000 rpm
Tensão:	380 V	**Fases:**	3
Frequência:	50 Hz		

Equipamento:	Bomba centrífuga	**Nº equipamento:**	P-1206 A/B

Características gerais

Designação:	Bomba de gasolina leve		
Localização:	Dessulfuração de gasolina pesada (Unidade 1200)		
Marca:	Brequet KSB	**Modelo:**	Horizontal RPKN 100-32
Horas de marcha:	**A** 102.358 horas **B** 107.221 horas	**Data de entrada em serviço:**	1970

Condições de serviço

Fluido:	H.C.	**Caudal:**	116 m^3/h
Pressão:	7,46 kg/cm^2	**Temperatura:**	46,1 ºC
Densidade:	0,625		

Características técnicas

Velocidade nominal:	2900 rpm	**Nº de estágios:**	1
Potência hidráulica:	26,4 kW	**Peso:**	570 kg
Sentido de rotação:	cw		

Accionamento

Equipamento:	Motor	**Nº equipamento:**	MP-1206 A/B
Marca:	EFACEC	**Modelo:**	BFG 225M42
Potência:	45 kW	**RPM:**	3000 rpm
Tensão:	380 V	**Fases:**	3
Frequência:	50 Hz		

Equipamento:	Bomba centrífuga	**Nº equipamento:**	P-1207 A/B

Características gerais

Designação:	Bomba de gasolina leve		
Localização:	Dessulfuração de gasolina pesada (Unidade 1200)		
Marca:	Dresser	**Modelo:**	SVC 1 1/2``L
Horas de marcha:	**A** 89.576 horas **B** 91.724 horas	**Data de entrada em serviço:**	1970

Condições de serviço

Fluido:	H.C.	**Caudal:**	33,5 m^3/h
Pressão:	8,45 kg/cm^2	**Temperatura:**	227 ºC
Densidade:	0,645		

Características técnicas

Velocidade nominal:	2950 rpm	**Nº de estágios:**	1
Potência hidráulica:	9,1 kW	**Peso:**	580 kg
Sentido de rotação:	ccw		

Accionamento

Equipamento:	Motor	**Nº equipamento:**	MP-1207 A/B
Marca:	EFACEC	**Modelo:**	BFG 180M42
Potência:	22 kW	**RPM:**	3000 rpm
Tensão:	380 V	**Fases:**	3
Frequência:	50 Hz		

Equipamento:	Bomba centrífuga	**Nº equipamento:**	P-1208 A/B

Características gerais

Designação:	Bomba de gasolina pesada		
Localização:	Dessulfuração de gasolina pesada (Unidade 1200)		
Marca:	Guinard	**Modelo:**	Horizontal U4.195.120
Horas de marcha:	**A** 102.611 horas **B** 108.906 horas	**Data de entrada em serviço:**	1970

Condições de serviço

Fluido:	H.C.	**Caudal:**	131 m^3/h
Pressão:	7,74 kg/cm^2	**Temperatura:**	79,4 ºC
Densidade:	0,685		

Características técnicas

Velocidade nominal:	2900 rpm	**Nº de estágios:**	1
Potência hidráulica:	34,85 kW	**Peso:**	730 kg
Sentido de rotação:	cw		

Accionamento

Equipamento:	Motor	**Nº equipamento:**	MP-1208 A/B
Marca:	EFACEC	**Modelo:**	BFG 280S22
Potência:	75 kW	**RPM:**	3000 rpm
Tensão:	380 V	**Fases:**	3
Frequência:	50 Hz		

Equipamento:	Bomba centrífuga	**Nº equipamento:**	P-12011 A/B

Características gerais

Designação:	Bomba booster das P-1201 A / TP-1201 B		
Localização:	Dessulfuração de gasolina pesada (Unidade 1200)		
Marca:	Guinard	**Modelo:**	SMK 4x6x15
Horas de marcha:	**A** 81.569 horas **B** 89.306 horas	**Data de entrada em serviço:**	1970

Condições de serviço

Fluido:	H.C.	**Caudal:**	195 m^3/h
Pressão:	10,6 kg/cm^2	**Temperatura:**	38 ºC
Densidade:	0,715		

Características técnicas

Velocidade nominal:	2900 rpm	**Nº de estágios:**	1
Potência hidráulica:	63,5 kW	**Peso:**	620 kg
Sentido de rotação:	ccw		

Accionamento

Equipamento:	Motor	**Nº equipamento:**	MP-1211 A/B
Marca:	EFACEC	**Modelo:**	BFG 315S22
Potência:	110 kW	**RPM:**	3000 rpm
Tensão:	380 V	**Fases:**	3
Frequência:	50 Hz		

Equipamento:	Compressor alternativo	**Nº equipamento:**	C-1201 A/B

Características gerais

Designação:	Compressor de Hidrogénio		
Localização:	Dessulfuração de gasolina pesada (Unidade 1200)		
Marca:	Worthington	**Modelo:**	BDC 4 $^{3}/_{8}$``x 6$^{3}/_{4}$``x 7``
Horas de marcha:	**A** 145.170 horas **B** 141.267 horas	**Data de entrada em serviço:**	1970

Condições de serviço

			99(Make-up) m^3/h
Fluido:	Hidrogénio (impuro)	**Caudal:**	297,5(Reciclo) m^3/h
Pressão admissão:	28,83(Make-up) kg/cm^2 53,45(Reciclo) kg/cm^2	**Pressão de descarga:**	55,56(Make-up) kg/cm^2 62,24(Reciclo) kg/cm^2
Densidade:	1,01	**Temperatura:**	40,06 ºC

Características técnicas

Velocidade nominal:	1450 rpm	**Nº de cilindros:**	4
Potência hidráulica:	195 kW	**Peso:**	8000 kg
Sentido de rotação:	cw		

Accionamento

Equipamento:	Motor	**Nº equipamento:**	C-1201 A/B
Marca:	EFACEC	**Modelo:**	BFG 160L62
Potência:	225 kW	**RPM:**	1500 rpm
Tensão:	600 V	**Fases:**	3
Frequência:	50 Hz		

Anexo VIII – Lista de intervenções nos equipamentos

Tabela 33 - Intervenções efectuadas na bomba P-1201 A.

MP-1201 A

Paragens	Data	Observações
1	09-06-1971	Desmontagem e substituição de algumas peças
2	08-09-1972	Reparação e verificação de fugas
3	04-01-1973	Estudo sobre as novas condições de funcionamento
4	03-10-1973	Substituição dos rotores
5	21-12-1977	Substituição dos anéis de desgaste
6	09-05-1979	Revisão geral
7	12-11-1989	Revisão geral, avaria grave (tambor de equilíbrio inutilizado; anéis inter andares griparam)
8	15-03-1992	Chumaceira com anomalia, fricção
9	10-06-1992	Rotor com faces axiais gripadas, rosca do veio da bomba deteriorada
10	07-12-1995	Elementos com alguma sujidade
11	20-12-1995	Reparação devido a alta vibração, anel de desgaste partido, fuligem nas superfícies internas da bomba
12	09-04-1998	Detecção de elevada vibração no motor eléctrico
13	27-10-1998	Detecção de elevada vibração no motor eléctrico e ruído na chumaceira
14	23-02-1999	Detecção de elevada vibração e ruído no motor eléctrico, substituição dos rolamentos
15	26-02-1999	Detecção de vibração acima do limite na bomba
16	14-05-1999	Reparação e equilíbrio dinâmico do conjunto rotativo da bomba
17	25-08-1999	Detecção de vibração acima do limite na bomba e equilíbrio dinâmico do conjunto rotativo da bomba
18	20-09-1999	Bomba continua com valores elevados na frequência fundamental de desequilíbrio
19	02-10-1999	Troca dos veios da bomba
20	30-03-2000	Rolamentos destruídos, veios com desgaste nos apoios, tampa interna partida, estator/rotor danificado
21	27-09-2000	Fuga pelos empanques e ruído na bomba
22	04-10-2000	Montagem do motor
23	28-10-2002	Inspecção preventiva média tensão
24	29-01-2003	Inspecção preventiva média tensão
25	11-02-2003	Revisão e detecção de desequilíbrio do conjunto rotativo
26	23-04-2003	Inspecção preventiva média tensão
27	28-07-2003	Inspecção preventiva média tensão
28	27-10-2003	Inspecção preventiva média tensão, detecção de anomalia grave
29	26-01-2004	Inspecção preventiva média tensão
30	16-02-2004	Fuga pelos empanques
31	26-04-2004	Inspecção preventiva média tensão
32	30-06-2004	Limpeza do arrefecedor
33	06-07-2004	Eliminar fuga linha de equilíbrio
34	23-07-2004	Inspecção preventiva média tensão
35	09-11-2004	Inspecção preventiva média tensão
36	24-01-2005	Inspecção preventiva média tensão
37	21-04-2005	Níveis vibrométricos no motor eléctrico muito elevados, devido ao desnivelamento dos apoios
38	31-05-2005	Inspecção preventiva média tensão
39	23-06-2005	Reparação do motor eléctrico

40	20-07-2005	Reparação da tampa do lado de compressão
41	20-07-2005	Inspecção preventiva média tensão
42	24-10-2005	Inspecção preventiva média tensão
43	03-04-2006	Substituição do *grasseur* do motor eléctrico
44	29-06-2006	Inspecção preventiva ao motor eléctrico
45	10-07-2006	Eliminar fuga entre tampa e corpo
46	06-11-2006	Níveis vibrométricos e ruído no motor eléctrico muito elevados, frequências associadas a anomalias no equipamento
47	21-11-2006	Reparação da bomba, irregularidades no enchimento, mau contacto com o veio, substituição da purga, beneficiar motor eléctrico
48	09-01-2007	Ligação do motor
49	11-01-2007	Reparação do motor, agarrou
50	18-01-2007	Reparação do motor eléctrico

Tabela 34 - Intervenções efectuadas no compressor C-1201 A/B.

MC-1201 A

Paragens	Data	Observações
1	22-04-2003	Reparação, falta de rendimento no lado reciclo
2	12-01-2004	Reparação, falta de rendimento no lado reciclo
3	30-04-2004	Ensaios de segurança
4	07-06-2004	Eliminação da fuga de óleo no sistema Quervel
5	21-06-2004	Benefício sistema Quervel
6	06-07-2004	Benefício válvulas
7	30-12-2004	Reapertar empanque da válvula de topo
8	01-08-2005	Eliminação do batimento do cilindro de rec. Nordest
9	12-08-2005	Reparar blindagem do acoplamento
10	06-02-2006	Substituição válvula secc 4 Comp./4 Admiss.
11	15-05-2006	Eliminação da fuga de óleo no sistema Quervel
12	20-09-2006	Verificação do sistema electrónico
13	03-10-2006	Reapertar válvula, batimento
14	04-12-2006	Reapertar válvula m. up., eliminar batimento da válvula de reciclo com et.
15	11-01-2007	Reparação, falta de rendimento no lado reciclo

Anexo IX – Taxas de falhas (OREDA®)

Bombas centrífugas – Processamento do produto

Tabela 35 - Taxa de falha dos modos de falha das bombas centrífugas.

Taxa de falha (10^{-6})	Crítico	Degradação	Insignificante	Total
Colapso	7,68	-	-	7,68
Fuga externa - produto do processo	76,82	-	15,36	92,18
Falha no arranque	7,68	-	-	7,68
Falsa paragem	15,36	-	-	15,36
Vibração	7,68	-	-	7,68
Fuga externa - produto auxiliar	-	84,50	23,05	107,55
Fuga interna	-	7,68	-	7,68
Outras	-	7,68	-	7,68
Desvio dos parâmetros de funcionamento	-	7,68	-	7,68
Leitura anormal dos instrumentos	-	-	38,41	38,41
Pequenos problemas durante o funcionamento	-	-	61,46	61,46
Total	115,22	107,54	138,28	361,04

- ✓ **Colapso –** COL;
- ✓ **Fuga externa – produto do processo –** FEPP;
- ✓ **Falha no arranque –** FA;
- ✓ **Falsa paragem –** FP;
- ✓ **Vibração –** VIB;
- ✓ **Fuga externa – produto auxiliar –** FEPA;
- ✓ **Fuga interna –** FI;
- ✓ **Outras –** OUT;
- ✓ **Desvio dos parâmetros de funcionamento –** DPF;
- ✓ **Leitura anormal dos instrumentos –** LAI;
- ✓ **Pequenos problemas durante o funcionamento –** PPDF.

Tabela 36 - Taxa de falha dos equipamentos em cada modo de falha (Bombas centrífugas).

Taxa de falha de cada componente	COL	FEPP	FA	FP	VIB	FEPA	FI	OUT	DPF	LAI	PPDF	Total
Dispositivo de actuação	0	0	0	0,124	0	0	0	0,378	0	0,841	3,442	4,79
Rolamentos	0	0,498	0,179	0,324	0,170	0,505	0	0	0	0	0,277	1,95
Cablagem e caixa de ligação	0	0	0	0,249	0	0	0	0,073	0,289	1,056	1,444	3,11
Armação	1,910	5,927	0	0	0,170	1,947	0	0	0	0	0,277	10,23
Válvula de retenção	0	0,498	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,50
Unidade de controlo	0	0	0,750	0,897	0,051	0	0	0,218	0,289	1,947	1,444	5,60
Refrigerante	0	0	0	0	0	2,269	0	0,073	0,068	0	0,830	3,24
Sistema de arrefecimento/aquecimento	0	0	0	0	0	1,947	0	0,073	0	0,081	2,827	4,93
Acoplamento da unidade de condução	0	0	0	0,375	0,085	0,946	0	0	0	0,081	0,443	1,93
Acoplamento condutor	0	0	0	0	0,255	0,312	0	0	0	0,081	0,166	0,81
Diafragma	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,277	0,28
Filtros	0	0	0	0	0	1,947	0,326	0,597	0,289	0	2,551	5,71
Filtro ciclónico	0	0	0	0	0	0,946	0	0,073	0	0	0,830	1,85
Redutor	0,202	0	0	0,375	0	0	0	0	0	0	0,277	0,85
Impulsor	0	0	0	0,249	0,255	0	0	0	0	0	0	0,50
Instrumentos de fuxo	0	0	0	0,375	0	0,312	0,521	0,073	1,058	6,514	1,168	10,02
Instrumentos gerais	0	0	0,929	0,375	0	0	0	0,378	0,137	1,863	2,827	6,51
Instrumentos de nível	0	0	0	0,124	0	0	0	0	0,068	0,676	0,553	1,42
Instrumentos de pressão	0	0,304	0	1,147	0	1,323	0	0,145	0,495	8,066	3,104	14,58
Instrumentos de velocidade	0	0	0	0	0	0	0	0,218	0	0,757	0	0,97
Instrumentos de temperatura	0	0	0,179	1,676	0,833	0,602	0	0	0,495	7,486	3,829	15,10
Instrumentos de vibração	0	0	0	1,023	0	0,312	0	0	0,770	3,975	3,104	9,18
Alimentação interna de energia	0	0	0	0,249	0	0	0	0	0	0,246	0,277	0,77
Sistema de lubrificação	0	0	0	0	0	0,312	0	0	0	0	0,553	0,87
Laterna	0	0	0	0,375	0	0	0	0,073	0,137	1,813	0,996	3,39
Lubrificante	0	0	0,179	0	0	1,635	0	0,218	0,068	0	1,444	3,54
Outras	0	0,498	0,179	0	0,085	3,205	0,326	0,145	0,852	0,111	3,995	9,40
Tubagens	0,202	18,076	0	0	0,085	12,852	0	0,451	0,770	0	2,274	34,71
Bomba com motor	0	0	0,179	0	0	3,205	0	0,073	0,137	0	0,277	3,87
Purga de ar	0	0	0	0,124	0	0,312	0	0,145	0	0	0,277	0,86
Chumaceira radial	0,606	0,498	0,179	0,124	1,291	0,194	0	0,145	0,206	0	0,553	3,80
Reservatório	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,277	0,28
Reservatório com sistema de aquecimento	0	0	0	0	0	0,602	0	0	0	0	0,277	0,88
Vedantes	0,404	51,224	0	1,097	0,034	51,355	3,840	0,306	0,137	0	1,997	110,39
Veio	0,849	0	0,179	0,124	0,238	0,312	0	0	0	0,111	0	1,81
Subunidade	2,296	0,802	1,286	1,147	0,866	1,635	0,326	0,815	0,426	0,246	2,551	12,39
Suporte	0	0	0	0	1,835	0	0	0	0	0	0	1,83
Empanque	0,606	0	0	0	0,374	0,817	0	0	0	0	0,277	2,07
Desconhecido	0,606	4,618	3,284	4,682	1,054	6,797	0,975	1,411	0,426	2,458	8,672	34,98
Válvulas	0	9,236	0,179	0	0	10,949	1,367	1,600	0,563	0	7,099	31,12
Total	7,68	92,18	7,68	15,36	7,68	107,55	7,68	7,68	7,68	38,41	61,46	361,04

Tabela 37 - Percentagem de contribuição das causas em cada modo de falha (Bombas centrífugas).

Causas que provocam o modo de falha	COL	FEPP	FA	FP	VIB	FEPA	FI	OUT	DPF	LAI	PPDF
Bloqueio	2,63%	3,38%	2,33%	1,62%	1,11%	2,11%	0%	0,95%	34,12%	6,18%	6,50%
Fractura	2,63%	0,54%	2,33%	0,81%	6,86%	2,69%	0%	0,95%	0,89%	3,31%	2,30%
Explusão	2,63%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Cavitação	7,89%	1,63%	0%	0%	1,11%	1,52%	0%	1,89%	1,79%	0%	0,45%
Desalinhamento	0%	1,63%	2,33%	0%	21,46%	0,88%	0%	0,95%	3,76%	1,12%	0,45%
Conjunto de causas	2,63%	0%	0%	0%	1,11%	0%	0%	0%	0%	0%	0,45%
Contaminação	0%	0%	0%	0%	0%	0,29%	4,24%	3,98%	0%	0%	5,05%
Falha de controlo	0%	0%	4,65%	3,41%	1,11%	0%	0%	1,89%	0%	1,76%	1,35%
Corrosão	2,63%	4,47%	0%	2,43%	0%	2,40%	0%	6,82%	0%	2,19%	6,95%
Deformação	0%	0%	0%	1,62%	1,11%	0,58%	0%	0%	0%	0%	0,90%
Falha do isolamento	0%	0%	2,33%	0,81%	0%	0%	0%	1,89%	0%	1,33%	0,90%
Falha eléctrica - geral	0%	0%	9,77%	8,28%	0%	0%	0%	4,92%	2,68%	2,66%	2,35%
Erosão	5,26%	0%	0%	0%	0%	0,88%	0%	0%	0%	0%	0%
Influência externa - geral	0%	0%	2,33%	0%	1,11%	0%	0%	8,71%	4,65%	0%	1,35%
Fadiga	0%	1,63%	0%	0%	1,11%	0%	0%	0%	0%	0,21%	0%
Falta de potência	0%	0%	0%	0,81%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Falta de sinal, indicação, alarme	0%	0%	2,33%	10,88%	3,32%	0%	0%	1,89%	1,79%	14,34%	1,35%
Falha de instrumentação - geral	0%	1,09%	12,19%	22,86%	2,21%	1,23%	0%	8,71%	22,00%	33,20%	19,05%
Fuga	0%	29,66%	0%	3,41%	1,11%	40,31%	47,46%	0,95%	0%	0,90%	3,25%
Folga	0%	3,92%	0%	0,81%	1,11%	0,88%	0%	0%	0%	0,43%	2,35%
Falha do material - geral	0%	2,83%	2,33%	0,81%	2,21%	3,92%	0%	2,84%	0%	0%	3,25%
Falha mecânica - geral	43,86%	39,21%	21,67%	15,98%	18,54%	31,56%	22,03%	16,78%	9,12%	2,88%	13,55%
Diversas influências externas	16,69%	5,01%	0%	1,62%	11,56%	2,69%	0%	10,69%	3,76%	1,97%	10,30%
Diversos - geral	0%	0%	0%	0,81%	0%	0,58%	0%	1,89%	0%	0%	0,45%
Sem causa aparente	0%	0%	4,65%	2,43%	2,21%	0,29%	0%	0,95%	0%	0,90%	0%
Sem potência	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0,21%	0,45%
Sem sinal, indicação, alarme	0%	0%	0%	0,81%	0%	0%	0%	1,89%	0%	3,74%	0%
Circuito aberto	0%	0%	2,33%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1,76%	0,90%
Outras	0%	0%	0%	1,62%	0%	0,29%	0%	3,98%	0,89%	0,21%	1,35%
Fora do ajuste	0%	0%	4,65%	3,41%	2,21%	0%	0%	0%	10,08%	14,56%	3,25%
Sobreaquecimento	2,63%	0%	0%	0,81%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Curto-circuito	0%	0%	2,33%	0,81%	0%	0%	0%	0%	0%	0,43%	0%
Falha do software	0%	0%	0%	0,81%	0%	0%	0%	0,95%	0%	0,43%	0%
Gripagem	0%	0%	0%	0,81%	0%	0%	0%	4,92%	0%	0,64%	3,70%
Desconhecido	2,63%	0,54%	14,48%	2,43%	3,32%	0,58%	8,47%	6,82%	1,79%	1,33%	2,30%
Vibração	7,89%	0,54%	0%	8,28%	10,36%	0%	0%	0,95%	2,68%	1,55%	0,45%
Desgaste	0%	3,92%	6,97%	0,81%	5,75%	6,32%	17,80%	2,84%	0%	1,76%	5,05%
Total	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%

Compressores alternativos – Accionamento eléctrico (100 a 1000 kW)

Tabela 38 - Taxa de falha dos modos de falha dos compressores alternativos.

Taxa de falha (10^{-6})	Crítico	Degradação	Insignificante	Total
Leitura anormal dos instrumentos	4,56	-	36,45	41,01
Débito irregular	9,11	36,45	9,11	54,67
Falha no arranque	36,45	-	-	36,45
Falha na paragem	4,56	-	-	4,56
Ruído	4,56	-	13,67	18,23
Outras	4,56	4,56	18,22	27,34
Falsa paragem	59,23	-	-	59,23
Deficiência estrutural	4,56	-	-	4,56
Fuga externa - produto do processo	-	4,56	27,34	31,90
Fuga externa - produto auxiliar	-	4,56	41,00	45,56
Débito insuficiente	-	182,23	-	182,23
Sobreaquecimento	-	18,22	9,11	27,33
Desvio dos parâmetros de funcionamento	-	4,56	9,11	13,67
Desconhecido	-	27,34	77,45	104,79
Vibração	-	4,56	4,56	9,12
Pequenos problemas durante o funcionamento	-	-	22,78	22,78
Total	127,59	287,04	268,80	683,43

- ✓ **Leitura anormal dos instrumentos –** LAI;
- ✓ **Débito irregular –** DIR;
- ✓ **Falha no arranque –** FA;
- ✓ **Falha na paragem –** FNP;
- ✓ **Ruído –** RU;
- ✓ **Outras –** OUT;
- ✓ **Falsa paragem –** FP;
- ✓ **Deficiência estrutural –** DE;
- ✓ **Fuga externa – produto do processo –** FEPP;
- ✓ **Fuga externa – produto auxiliar –** FEPA;
- ✓ **Débito insuficiente –** DIN;
- ✓ **Sobreaquecido –** SOB;
- ✓ **Desvio dos parâmetros de funcionamento –** DPF;
- ✓ **Desconhecido –** DES;
- ✓ **Vibração –** VIB;
- ✓ **Pequenos problemas durante o funcionamento –** PPDF.

Tabela 39 - Taxa de falha dos equipamentos em cada modo de falha (Compressores alternativos).

Taxa de falha de cada componente	LAI	DIR	FA	FNP	RU	OUT	FP	DE	FEPP	FEPA	DIN	SOB	DPF	DES	VIB	PPDF	Total
Dispositivo de actuação	0	0	0	1,109	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,109
Base da armação	0	0	0	0	0	0	0	0,581	0	0	0	0	0	0	0,479	1,929	2,990
Cablagem e caixa de ligação	1,251	0	0	0	0	0	1,913	0,275	0	0	0	0	0,100	2,892	0	0,093	6,525
Armação	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Válvula de retenção	0	0	0	0	0	0	1,913	0	0	0	0	0	0,519	0	0	0,093	2,526
Unidade de controlo	3,740	4,395	6,237	2,342	0	0	5,941	0,275	0	0	0	0	0,817	0	0,479	0	24,227
Refrigerante	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2,027	0	0	0	0	0,479	0	2,506
Acoplamento condutor	0	18,063	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,479	0	18,542
Cilindro linear	1,251	0	0	0	0	2,411	5,941	1,439	16,728	13,850	102,905	22,143	1,336	18,003	1,906	0,674	188,587
Filtros	0	0	0	0	0	0	1,913	0	0,370	0,966	1,604	0	0,100	0	0	14,782	19,734
Caixa redutora	0	0	0	0	0	2,411	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,093	2,505
Instrumentos de fuxo	1,649	0	2,956	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,927	0	0	0	5,532
Instrumentos gerais	3,740	0	2,956	0	0	0	1,913	0	0	0	0,765	0	0,618	0	0	0,196	10,188
Instrumentos de nível	1,251	0	0	0	0	0	1,913	0	0	0,966	0	0	0,309	0	0	0,093	4,532
Instrumentos de pressão	9,121	0	0	0	0	0	4,034	0	0	3,941	0	0	1,435	0	0	0,289	18,820
Instrumentos de velocidade	0,406	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,100	0	0	0	0,506
Instrumentos de temperatura	8,895	0	0	0	0	2,411	5,941	0	0,370	0	0,765	0,588	1,237	0	0,479	0	20,686
Instrumentos de vibração	3,515	0	0	0	0	2,411	1,913	0	0	0	0	0	1,435	0	0,980	0	10,255
Tubagem interna	0	0	0	0	0	0	0	0	0,370	0	0	0,279	0	0	0,479	0,487	1,615
Alimentação interna de energia	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,100	0	0	0	0,100
Junta de separação de estagios	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,499	0	0	0	0	0	0	1,499
Laterna	1,649	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,817	0	0	0,289	2,755
Lubrificante	0	0	0	0	0	0	4,034	0	0	0,966	0	0	0	6,109	0	0,093	11,202
Outras	0,406	4,395	0	0	0	12,872	0	0,275	1,917	2,984	1,604	0	0,209	32,778	0,479	0,581	58,501
Empancamento	0	0	0	0	0	0	0	0	1,917	0,961	0	0	0	0	0	0,093	2,972
Tubagens	0	0	0	0	0	0	4,034	0,581	0,370	5,968	0	0	0	0	0	0,289	11,243
Junção e suporte de tubagens	0	0	0	0	0	0	0	0,275	0,370	2,027	0	0,279	0	0	0,479	0,383	3,813
Pistões	0	9,272	0	0	0	0	0	0	0,778	0	0	0	0	2,892	0	0	12,943
Bomba com motor	0	0	2,956	1,109	0	2,411	1,913	0	1,515	2,984	23,544	0	0,309	6,109	0	0,289	43,141
Bomba com motor/engrenagens	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2,369	0	0	0	0	0	2,369
Vedantes	0	0	0	0	0	0	0	0	0,370	0	0,765	0	0	0	0	0,196	1,331
Silenciador	0	0	0	0	2,930	0	0	0	0,370	0	0	0	0	0	0	0	3,300
Subunidade	0	9,272	12,152	0	6,185	0	4,034	0	0,370	0,966	9,458	0,588	0,209	6,109	0,479	0,289	50,111
Desconhecido	0,845	0	6,237	0	6,185	0	9,968	0,857	0,778	0,966	7,836	2,298	0,519	6,109	1,446	0,870	44,915
Válvulas	3,293	9,272	2,956	0	2,930	2,411	1,913	0	5,305	4,488	30,615	1,156	2,573	23,787	0,479	0,674	91,852
Total	41,010	54,670	36,450	4,560	18,230	27,340	59,230	4,560	31,900	45,560	182,230	27,330	13,670	104,790	9,120	22,780	683,430

Tabela 40 - Percentagem de contribuição das causas em cada modo de falha (Compressores alternativos).

Taxa de falha de cada componente	LAI	DIR	FA	FNP	RU	OUT	FP	DE	FEPP	FEPA	DIN	SOB	DPF	DES	VIB	PPDF
Bloqueio	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	5,83%	0%	0,42%
Fractura	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1,15%	0%	0%	0%	0%	2,76%	5,08%	0%
Desalinhamento	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	6,56%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Conjunto de causas	0%	8,10%	0%	24,32%	16,26%	8,83%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Contaminação	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0,73%	5,83%	0%	1,27%
Falha de controlo	0%	8,10%	25,00%	0%	0%	0%	13,46%	6,14%	0%	0%	0%	1,02%	0,73%	0%	0%	0,42%
Corrosão	0%	0%	0%	0%	0%	0%	3,27%	0%	0%	0%	0%	0%	0,73%	0%	0%	1,27%
Deformação	0%	0%	0%	0%	16,26%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Falha eléctrica - geral	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	2,76%	0%	0%
Erosão	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1,15%	0%	0%	0%	0%	5,83%	0%	0%
Influência externa - geral	0,95%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Falta de sinal, indicação, alarme	0,95%	0%	0%	0%	0%	0%	13,46%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Falha de instrumentação - geral	70,72%	0%	25,00%	75,68%	0%	18,63%	0%	6,14%	2,46%	10,98%	4,72%	6,33%	61,71%	0%	5,08%	4,64%
Fuga	0%	17,05%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	3,61%	6,56%	0%	1,02%	0%	0%	0%	1,27%
Folga	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0,42%
Falha do material - geral	0%	0%	0%	0%	16,26%	0%	0%	0%	1,15%	8,66%	0%	0%	0%	8,59%	0%	0,42%
Falha mecânica - geral	6,07%	8,10%	8,04%	0%	0%	36,27%	23,25%	75,44%	85,88%	54,64%	86,25%	83,27%	18,82%	28,68%	52,54%	81,83%
Diversas influências externas	2,06%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	2,10%	1,71%	0%	0,73%	2,76%	10,74%	0%
Diversos - geral	0%	0%	0%	0%	0%	36,27%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	2,76%	0%	0%
Sem causa aparente	0%	0%	0%	0%	16,26%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Circuito aberto	4,01%	0%	0%	0%	0%	0%	3,27%	0%	1,15%	2,10%	0%	0%	5,98%	2,76%	0%	0,86%
Outras	0%	0%	0%	0%	0%	0%	3,27%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	4,64%
Fora do ajuste	3,01%	0%	0%	0%	0%	0%	3,27%	0%	0%	0%	0%	0%	1,53%	0%	0%	0%
Sobreaquecimento	0%	8,10%	0%	0%	0%	0%	20,02%	0%	1,15%	2,10%	0%	4,18%	1,53%	2,76%	0%	0%
Curto-circuito	3,01%	0%	0%	0%	0%	0%	3,27%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Falha do software	2,06%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	5,25%	0%	0%	0%
Desconhecido	5,10%	0%	41,96%	0%	34,96%	0%	0%	6,14%	1,15%	2,10%	6,48%	4,18%	0,73%	28,68%	0%	0,86%
Vibração	2,06%	0%	0%	0%	0%	0%	13,46%	6,14%	0%	2,10%	0,42%	0%	1,53%	0%	15,82%	1,68%
Desgaste	0%	50,55%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1,15%	2,10%	0,42%	0%	0%	0%	10,74%	0%
Total	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%

Motores eléctricos – Bombas – Processamento do produto

Tabela 41 - Taxa de falha dos modos de falha dos motores eléctricos de accionamento de bombas.

Taxa de falha (10^{-6})	Crítico	Degradação	Insignificante	Total
Colapso	15,40	-	-	15,40
Falha no arranque	15,40	-	-	15,40
Débito insuficiente	10,26	-	-	10,26
Ruído	5,13	-	-	5,13
Desvio dos parâmetros de funcionamento	5,13	10,26	-	15,39
Falsa paragem	20,53	-	-	20,53
Deficiência estrutural	20,53	25,66	-	46,19
Vibração	10,26	-	-	10,26
Leitura anormal dos instrumentos	-	-	5,13	5,13
Pequenos problemas durante o funcionamento	-	-	20,53	20,53
Outras	-	-	5,13	5,13
Total	102,64	35,92	30,79	169,35

- ✓ **Colapso –** COL;
- ✓ **Falha no arranque –** FA;
- ✓ **Débito insuficiente –** DIN;
- ✓ **Ruído –** RU;
- ✓ **Desvio dos parâmetros de funcionamento –** DPF;
- ✓ **Falsa paragem –** FP;
- ✓ **Deficiência estrutural –** DE;
- ✓ **Vibração –** VIB;
- ✓ **Leitura anormal dos instrumentos –** LAI;
- ✓ **Pequenos problemas durante o funcionamento –** PPDF;
- ✓ **Outras –** OUT.

Tabela 42 - Taxa de falha dos equipamentos em cada modo de falha (Motores eléctricos de accionamento de bombas).

Taxa de falha de cada componente	COL	FA	DIN	RU	DPF	FP	DE	VIB	LAI	PPDF	OUT	Total
Dispositivo de actuação	0	0,964	0	0	0	0	0	0	0	0,762	0	1,726
Cablagem e caixa de ligação	0	1,931	0	0	0	0	0	0	0,857	2,277	0	5,065
Corta corrente	0	0	0	0	0	1,029	0	0	0	0	0	1,029
Unidade de controlo	0	5,770	10,260	0	3,857	2,059	6,924	0	0,286	1,525	0	30,681
Acoplamento	0	0	0	0	0	1,029	0	0	0	0	0	1,029
Ventilador com motor	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,762	0	0,762
Carcaça	0	0	0	0	0	0	3,473	0	0	0	0	3,473
Instrumentos de corrente	0	0	0	0	0	0	0	0	0,571	0,762	0	1,333
Instrumentos gerais	0	0	0	0	0	0	0	0	0,857	2,277	0	3,133
Instrumentos de velocidade	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,762	0	0,762
Instrumentos de temperatura	0	0	0	0	0	0	0	0	0,857	0	0	0,857
Instrumentos de vibração	0	0	0	0	1,928	1,029	0	0,791	1,132	1,525	0	6,405
Instrumentos de potência	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Alimentação interna de energia	0	0	0	0	0	1,029	0	0	0	0	0	1,029
Lanterna	0	0	0	0	0	0	0	0	0,286	1,525	0	1,811
Lubrificante	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,858	0,858
Outras	0	0	0	0	0	2,059	2,314	0	0	2,277	0	6,650
Protecção de sobrecargas	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,762	0,429	1,191
Chumaceira radial	5,128	0	0	5,130	0	0	9,238	3,943	0	0,762	0	24,201
Rotor	1,714	0	0	0	1,928	0	2,314	0	0	0	0	5,957
Estator	0	0	0	0	0	1,029	0	0	0	0	0	1,029
Subunidade	5,128	0,964	0	0	1,928	2,059	15,003	0,791	0	2,277	1,707	29,857
Empanque	0	0	0	0	0	0	1,159	3,152	0	0	0	4,311
Desconhecido	3,430	5,770	0	0	5,748	9,210	5,765	1,583	0,286	2,277	2,136	36,204
Total	15,400	15,400	10,260	5,130	15,390	20,530	46,190	10,260	5,130	20,530	5,130	169,350

Tabela 43 - Percentagem de contribuição das causas em cada modo de falha (Motores eléctricos de accionamento de bombas).

Causas que provocam o modo de falha	COL	FA	DIN	RU	DPF	FP	DE	VIB	LAI	PPDF	OUT
Bloqueio	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	11,13%	0%	0%
Fractura	11,13%	6,26%	0%	0%	0%	0%	0%	7,71%	0%	3,71%	0%
Cavitação	0%	0%	0%	0%	12,53%	0%	9,92%	0%	0%	3,71%	0%
Desalinhamento	0%	0%	0%	20,07%	0%	0%	5,01%	23,09%	0%	7,42%	0%
Contaminação	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	5,57%	0%	0%
Falha de controlo	0%	18,70%	0%	0%	12,53%	5,01%	0%	0%	0%	3,71%	0%
Corrosão	0%	0%	0%	0%	0%	0%	2,51%	0%	16,49%	7,42%	0%
Falha do isolamento	0%	0%	0%	0%	0%	15,04%	0%	0%	0%	0%	8,36%
Falha eléctrica - geral	0%	50%	100%	0%	37,35%	19,92%	5,01%	0%	11,13%	3,71%	16,72%
Falta de sinal, indicação, alarme	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	3,71%	0%
Falha de instrumentação - geral	0%	6,26%	0%	0%	25,06%	5,01%	0%	0%	11,13%	14,75%	16,72%
Fuga	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	5,57%	3,71%	16,72%
Folga	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	11,13%	3,71%	0%
Falha do material - geral	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	3,71%	0%
Falha mecânica - geral	44,33%	6,26%	0%	79,93%	0%	19,92%	27,52%	7,71%	0%	3,71%	0%
Diversas influências externas	0%	6,26%	0%	0%	0%	0%	20%	0%	5,57%	14,75%	8,36%
Diversos - geral	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	3,71%	0%
Circuito aberto	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	5,57%	0%	0%
Outras	0%	0%	0%	0%	0%	5,01%	0%	0%	0%	0%	0%
Fora do ajuste	0%	6,26%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	5,57%	7,42%	33,12%
Curto-circuito	0%	0%	0%	0%	0%	10,04%	2,51%	0%	0%	0%	0%
Falha do software	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	5,57%	0%	0%
Desconhecido	0%	0%	0%	0%	0%	5,01%	2,51%	15,31%	0%	0%	0%
Vibração	22,27%	0%	0%	0%	12,53%	15,04%	5,01%	23,09%	5,57%	0%	0%
Desgaste	22,27%	0%	0%	0%	0%	0%	20%	23,09%	0%	11,14%	0%
Total	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%

Motores eléctricos – Compressores – Processamento de gás

Tabela 44 - Taxa de falha dos modos de falha dos motores eléctricos de accionamento de compressores.

Taxa de falha (10^{-6})	Crítico	Degradação	Insignificante	Total
Fuga externa - produto auxiliar	3,74	9,34	3,74	16,82
Falha no arranque	11,21	-	-	11,21
Falha na paragem	3,74	-	-	3,74
Débito insuficiente	20,55	1,87	-	22,42
Sobreaquecimento	1,87	3,74	1,87	7,48
Desvio dos parâmetros de funcionamento	3,74	22,42	5,61	31,77
Falsa paragem	31,76	-	-	31,76
Leitura anormal dos instrumentos	-	1,87	11,21	13,08
Débito irregular	-	3,74	-	3,74
Ruído	-	3,74	-	3,74
Outras	-	3,74	3,74	7,48
Deficiência estrutural	-	3,74	-	3,74
Pequenos problemas durante o funcionamento	-	-	11,21	11,21
Desconhecido	-	-	9,35	9,35
Vibração	-	-	1,87	1,87
Total	76,61	54,20	48,60	179,41

- ✓ **Fuga externa – produto auxiliar –** FEPA;
- ✓ **Falha no arranque –** FA;
- ✓ **Falha na paragem –** FNP;
- ✓ **Débito insuficiente –** DIN;
- ✓ **Sobreaquecido –** SOB;
- ✓ **Desvio dos parâmetros de funcionamento –** DPF;
- ✓ **Falsa paragem –** FP;
- ✓ **Leitura anormal dos instrumentos –** LAI;
- ✓ **Débito irregular –** DIR;
- ✓ **Ruído –** RU;
- ✓ **Outras –** OUT;
- ✓ **Deficiência estrutural –** DE;
- ✓ **Pequenos problemas durante o funcionamento –** PPDF;
- ✓ **Desconhecido –** DES;
- ✓ **Vibração –** VIB.

Tabela 45 - Taxa de falha dos equipamentos em cada modo de falha (Motores eléctricos de accionamento de compressores).

Taxa de falha de cada componente	FEPA	FA	FNP	DIN	SOB	DPF	FP	LAI	DIR	RU	OUT	DE	PPDF	DES	VIB	Total
Dispositivo de actuação	0	1,869	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,869
Cablagem e caixa de ligação	0	0	0	0	0	0	1,867	0	0	0	0	1,870	0	0	0	3,737
Corta corrente	0	0	1,870	0	0	0	3,735	0	0	0	0	0	4,484	0	0	10,089
Unidade de controlo	0	1,869	0	0	0	1,868	5,606	1,868	0	0	0	0	0	0	0	11,210
Acoplamento	0	0	0	3,737	1,870	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5,607
Excitador	0	0	0	1,868	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,870	0	3,738
Ventilador com motor	0	1,869	0	0	0	13,089	0	0	0	0	0	0	0	0	0	14,958
Carcaça	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,121	0	0	1,121
Instrumentos de corrente	0	0	0	0	0	0	0	1,868	0	0	0	0	0	0	0	1,868
Instrumentos gerais	0	0	0	0	0	3,736	0	3,738	0	0	0	0	0	0	0	7,474
Instrumentos de velocidade	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,121	0	0	1,121
Instrumentos de temperatura	0	0	0	0	0	0	0	3,738	0	0	0	0	0	0	0	3,738
Instrumentos de vibração	0	0	0	0	0	0	0	1,868	0	0	0	0	0	0	0	1,868
Instrumentos de potência	0	0	0	0	3,740	0	0	0	3,740	0	0	0	1,121	0	0	8,601
Lubrificante	0	0	0	0	0	3,736	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3,736
Outras	1,869	0	0	9,340	0	3,736	0	0	0	0	0	1,870	0	1,870	0	18,685
Protecção de sobrecargas	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,121	0	0	1,121
Tubagens	3,737	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3,737
Bomba com motor	0	0	0	0	0	1,868	0	0	0	0	1,870	0	2,242	0	0	5,980
Chumaceira radial	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,870	0	0	0	0	1,870
Estator	0	1,869	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,869
Subunidade	7,476	0	1,870	3,737	1,870	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,870	16,824
Empanque	1,869	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,870	0	3,739
Desconhecido	0	3,735	0	3,737	0	3,736	20,552	0	0	3,740	3,740	0	0	3,740	0	42,981
Válvulas	1,869	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,869
Total	16,820	11,210	3,740	22,420	7,480	31,770	31,760	13,080	3,740	3,740	7,480	3,740	11,210	9,350	1,870	179,410

Tabela 46 - Percentagem de contribuição das causas em cada modo de falha (Motores eléctricos de accionamento de compressores).

Taxa de falha de cada componente	FEPA	FA	FNP	DIN	SOB	DPF	FP	LAI	DIR	RU	OUT	DE	PPDF	DES	VIB
Fractura	11,11%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Corrosão	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	25,00%	0%	0%	0%	0%
Deformação	11,11%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Falha do isolamento	0%	0%	0%	0%	0%	0%	17,65%	0%	0%	0%	0%	0%	10%	0%	0%
Falha eléctrica - geral	0%	50%	0%	41,67%	50%	17,65%	58,83%	0%	0%	50%	0%	50%	40%	20%	0%
Falta de sinal, indicação, alarme	0%	0%	0%	0%	0%	0%	5,88%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Falha de instrumentação - geral	0%	33,33%	0%	33,33%	0%	58,83%	0%	71,42%	0%	0%	25,00%	0%	20%	40%	100%
Fuga	0%	0%	0%	0%	0%	5,88%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Falha mecânica - geral	33,33%	0%	0%	16,67%	0%	5,88%	11,76%	14,29%	0%	50%	25,00%	50%	20%	40%	0%
Diversas influências externas	0%	0%	0%	8,33%	0%	5,88%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Circuito aberto	0%	0%	50%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Outras	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	10%	0%	0%
Fora do ajuste	0%	0%	0%	0%	0%	5,88%	0%	0%	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Curto-circuito	0%	16,67%	0%	0%	0%	0%	5,88%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Desconhecido	0%	0%	50%	0%	0%	0%	0%	14,29%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Desgaste	44,45%	0%	0%	0%	50%	0%	0%	0%	0%	0%	25,00%	0%	0%	0%	0%
Total	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%

Turbinas a gás – Industrial (0 a 1000 kW)

Tabela 47 - Taxa de falha dos modos de falha das turbinas.

Taxa de falha (10^{-6})	Crítico	Degradação	Insignificante	Total
Falha no arranque	61,46	-	-	61,46
Falha na paragem	15,36	-	-	15,36
Falsa paragem	122,91	-	-	122,91
Débito irregular	-	15,36	-	15,36
Fuga externa - vapor	-	15,36	-	15,36
Fuga externa - produto auxiliar	-	92,18	30,73	122,91
Fuga interna	-	15,36	-	15,36
Outras	-	76,82	-	76,82
Sobreaquecimento	-	15,36	-	15,36
Leitura anormal dos instrumentos	-	-	61,46	61,46
Pequenos problemas durante o funcionamento	-	-	138,27	138,27
Vibração	-	-	15,36	15,36
Total	199,73	230,44	245,82	675,99

- ✓ **Falha no arranque –** FA;
- ✓ **Falha na paragem –** FNP;
- ✓ **Falsa paragem –** FP;
- ✓ **Débito irregular –** DIR;
- ✓ **Fuga externa – vapor –** FEV;
- ✓ **Fuga externa – produto auxiliar –** FEPA;
- ✓ **Fuga interna –** FI;
- ✓ **Outras –** OUT;
- ✓ **Sobreaquecido –** SOB;
- ✓ **Leitura anormal dos instrumentos –** LAI;
- ✓ **Pequenos problemas durante o funcionamento –** PPDF;
- ✓ **Vibração –** VIB.

Tabela 48 - Taxa de falha dos equipamentos em cada modo de falha (Turbinas).

Taxa de falha de cada componente	FA	FNP	FP	DIR	FEV	FEPA	FI	OUT	SOB	LAI	PPDF	VIB	Total
Dispositivo de actuação	2,127	0	0,971	0,164	0	0	0	1,667	0	0,313	0,968	0	6,210
Tomada de ar	0,529	0	2,815	0,164	0,120	2,065	0,492	5,938	0,754	0,860	10,771	0,366	24,873
Queimadores/tubeira	1,395	0	0,873	0,215	0,796	0,442	0,492	0,999	8,780	0	1,286	0	15,277
Cablagem e caixa de ligação	0,928	0	3,146	0,324	0	0,442	0	2,266	0,272	1,862	3,982	0	13,224
Armação	0	0	0	0	0,238	2,348	0	0,599	0,091	0	0,968	0,366	4,609
Câmara de combustão	0,596	0	0,320	0,164	0,478	0,442	0	0,599	0,060	0	0	0,366	3,025
Rotor de compressão	0,197	0	0	0	0	0	0	0	0,060	0	0,318	1,462	2,037
Estator de compressão	0,596	0	0	0	0	0	0	0	0,151	0	0	0,244	0,991
Unidade de controlo	5,777	0	14,085	0,982	0	0,442	0	4,002	0,091	5,279	3,014	0,366	34,039
Refrigerante	0	0	1,303	0	0	7,989	0	0,730	0,362	0	1,286	0,244	11,914
Escape	0	0	1,844	0,164	0,120	5,101	0,492	3,265	0,181	0,104	3,332	0,731	15,334
Filtros	0,399	0	2,274	0,164	0	4,818	0,492	1,667	0,091	0,381	7,964	0	18,250
Controlo de gasolina	5,175	1,997	8,026	2,349	0,676	0	0,492	1,398	0,031	0,313	2,268	0	22,724
Filtro de gasolina	0,399	0	1,303	0,164	0,120	0	0	0,799	0	0,104	12,389	0	15,279
Bomba de gasolina	0	0	0,971	0	1,233	0	0	0,799	0	0	0,318	0	3,321
Coluna de lavagem de gasolina	0	0	0,320	0	0,238	0,442	0	0	0	0,104	0,650	0	1,754
Carcaça	0,799	0	1,303	0	0	0,442	0	3,664	0,453	0,104	5,600	0,366	12,732
Turbina HP	0	0	0,651	0	0	0	0	0,200	0	0	0	0	0,851
Instrumentos de chama	0,399	0	0,971	0	0	0	0	0	0	1,383	0,318	0	3,071
Instrumentos de fuxo	0,197	0	0,320	0,164	0	0	0	0	0	1,211	0,650	0	2,541
Instrumentos gerais	0,332	1,997	3,036	0,164	0	0	0	2,735	0	3,276	0,968	0	12,507
Instrumentos de nível	0	0	0	0,324	0	0,442	0	0	0	1,481	0,650	0	2,898
Instrumentos de pressão	1,727	1,997	3,687	0,324	0,438	1,106	0,492	0,730	0,453	9,078	2,268	0	22,299
Instrumentos de velocidade	2,256	3,686	7,264	0,485	0	0,442	0	0,599	0	2,999	0,650	0	18,382
Instrumentos de temperatura	0,197	0	6,502	0,539	0,120	0	0	2,666	0,453	12,728	1,936	0	25,140
Instrumentos de vibração	0,529	0	6,281	0,164	0	0,442	0	0	0	4,382	0,318	2,803	14,919
Alimentação interna de energia	0,399	0	4,339	0	0	0,823	0	1,198	0	0,965	1,286	0	9,011
Laterna	0	0	0,651	0,164	0	0	0	0,599	0	6,244	1,618	0	9,277
Lubrificante	0,332	0	1,512	0	0	0,823	0	1,467	0,091	0	1,618	0	5,843
Outras	2,852	0	2,815	0,823	0,598	11,431	1,475	4,671	0,453	1,069	21,639	1,097	48,922
Tubagens	0,197	0	0,541	0	2,149	20,243	0,492	2,136	0,060	0	3,982	0,975	30,774
Bomba com motor	0,399	0	3,798	0,269	0	9,919	0,983	4,133	0,181	0,209	1,618	0,244	21,753
Purga de ar	0,197	0	0,971	0	0	0	0	1,667	0,181	0,209	9,264	0	12,489
Chumaceira radial	0,197	0	0,971	0	0	0,823	0	0,599	0	0	0	1,097	3,687
Reservatório com sistema de aquecimento	0,197	0	0	0	0	0,823	0,492	0,399	0	0	1,286	0	3,197
Rotor	0	0	0	0,164	0	0	0	0	0	0	0,650	0,366	1,180
Vedantes	0,135	0	0,221	0,054	1,631	15,437	0,983	0,399	0,091	0	0,318	0	19,270
Controlo de arranque	0,996	0	0,651	0,054	0	0	0	0,399	0	0,104	0	0	2,205
Energia de arranque (bateria, ar)	1,192	0	0	0,324	0	0,442	0	0,799	0	0	1,286	0	4,044
Arranque da unidade	6,963	0	0,320	0,324	0,238	4,683	0	1,667	0	0	0,968	0	15,163
Estator	0,197	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,197
Subunidade	6,367	0	4,339	0,485	0,238	2,483	0,492	4,402	0,181	0,412	5,282	1,828	26,508
Empanque	0,209	0	0,651	0	0	0,442	0	0,200	0,091	0,104	0	0	1,698
Desconhecido	8,377	0	17,638	0,650	1,473	9,231	1,966	7,889	0,935	4,966	18,666	2,196	73,988
Válvulas	7,701	5,683	15,229	5,027	4,457	17,896	5,530	8,873	0,814	1,211	5,918	0,244	78,583
Total	61,460	15,360	122,910	15,360	15,360	122,910	15,360	76,820	15,360	61,460	138,270	15,360	675,990

Tabela 49 - Percentagem de contribuição das causas em cada modo de falha (Turbinas).

Causas que provocam o modo de falha	FA	FNP	FP	DIR	FEV	FEPA	FI	OUT	SOB	LAI	PPDF	VIB
Bloqueio	1,94%	0%	2,79%	2,11%	0%	0,67%	0%	4,25%	2,95%	1,74%	15,12%	0%
Fractura	1,30%	0%	1,85%	2,11%	3,11%	2,35%	0%	3,47%	2,36%	3,93%	4,05%	2,40%
Explusão	0%	0%	0,26%	0%	3,11%	1,34%	3,20%	2,17%	0%	0%	0,23%	0%
Cavitação	0%	0%	0%	0%	0%	2,02%	0%	0,26%	0%	0%	0,23%	0%
Desalinhamento	0,97%	0%	0,26%	0%	2,33%	0,67%	3,20%	1,04%	0,59%	0%	0,47%	7,20%
Conjunto de causas	1,30%	0%	1,06%	1,05%	0,78%	0%	0%	0,26%	45,64%	0%	0,23%	2,40%
Modo de falha comum	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0,23%	0%
Contaminação	0,32%	0%	1,85%	1,05%	0%	0,34%	0%	3,73%	14,05%	0,67%	6,70%	7,20%
Falha de controlo	7,56%	0%	10,26%	12,03%	0%	1,01%	0%	2,43%	0,59%	1,74%	0,70%	2,40%
Corrosão	0,97%	0%	0%	4,21%	3,11%	4,48%	3,20%	2,43%	0,59%	1,57%	5,76%	0%
Deformação	0,97%	26,00%	0,79%	1,05%	5,44%	9,30%	3,20%	0,78%	1,18%	0,17%	1,95%	0%
Falha do isolamento	0,65%	0%	0,26%	0%	0%	0%	0%	2,43%	0,59%	0,34%	0,70%	0%
Falha eléctrica - geral	7,23%	0%	7,05%	12,03%	0%	0%	0%	6,68%	2,36%	4,83%	9,03%	4,76%
Erosão	0,32%	0%	0,26%	0%	3,89%	2,02%	0%	0%	0,59%	0,17%	0,70%	2,40%
Influência externa - geral	0,65%	0%	1,06%	1,05%	0%	0,34%	0%	3,47%	1,18%	0,67%	3,58%	0%
Fadiga	0,32%	0%	0%	0%	0%	0,67%	3,20%	0,26%	0,59%	0,17%	1,17%	2,40%
Falta de potência	0,32%	0%	1,85%	0%	0%	0,34%	0%	0,26%	0%	0,17%	0,23%	0%
Falta de sinal, indicação, alarme	4,97%	0%	11,88%	6,32%	0%	0,67%	0%	3,73%	3,54%	28,34%	0,93%	7,20%
Falha de instrumentação - geral	11,42%	26,00%	11,61%	8,77%	2,33%	0,34%	3,20%	7,20%	0,59%	21,79%	4,52%	2,40%
Fuga	2,70%	0%	1,59%	1,05%	11,92%	24,14%	18,95%	4,25%	1,18%	0,51%	1,64%	2,40%
Folga	1,30%	0%	1,85%	0%	7,25%	6,50%	3,20%	1,56%	0%	1,18%	4,28%	2,40%
Falha do material - geral	0,32%	0%	1,06%	2,11%	17,47%	15,23%	3,20%	1,82%	0,59%	0,51%	1,95%	2,40%
Falha mecânica - geral	26,50%	36,00%	12,14%	21,90%	24,23%	15,23%	26,74%	14,12%	9,04%	1,18%	9,35%	15,21%
Diversas influências externas	0,65%	0%	2,79%	4,21%	0,78%	0,67%	3,20%	3,73%	3,54%	1,18%	2,18%	7,20%
Diversos - geral	1,62%	0%	0,26%	0%	0%	0%	0%	0,52%	0%	0,17%	2,65%	0%
Sem causa aparente	0,97%	12,00%	1,59%	0%	1,55%	0,67%	3,20%	0,52%	0,59%	0,84%	0%	4,76%
Sem potência	0,65%	0%	0,79%	1,05%	0%	0%	0%	0,26%	0%	0,67%	0%	0%
Sem sinal, indicação, alarme	0,65%	0%	1,06%	0%	0%	0%	0%	1,30%	0%	3,93%	0,70%	0%
Circuito aberto	2,27%	0%	2,47%	1,05%	0%	0%	0%	0,78%	0,59%	1,57%	0,70%	0%
Outras	3,35%	0%	2,20%	2,11%	0,78%	0,34%	0%	9,29%	1,77%	0,51%	1,17%	0%
Fora do ajuste	5,29%	0%	5,68%	0%	0%	0,34%	6,42%	2,95%	1,18%	13,42%	3,12%	0%
Sobreaquecimento	0,97%	0%	1,85%	0%	0%	0,34%	0%	0,52%	1,77%	0,34%	0,47%	0%
Curto-circuito	0,65%	0%	1,85%	1,05%	0%	0%	0%	1,30%	0%	0,51%	0,23%	0%
Falha do software	1,62%	0%	0%	1,05%	0%	0%	0%	0%	0%	1,01%	0%	0%
Gripagem	3,02%	0%	1,06%	4,21%	0%	0%	6,42%	3,73%	0%	0,67%	4,05%	0%
Desconhecido	4,64%	0%	2,73%	2,11%	1,55%	1,34%	0%	3,73%	1,18%	1,01%	1,17%	4,76%
Vibração	0,97%	0%	5,15%	2,11%	0,78%	0,34%	0%	0,78%	0%	1,40%	2,18%	12,91%
Desgaste	0,65%	0%	0,79%	4,21%	9,59%	8,30%	9,47%	3,99%	1,18%	3,09%	7,63%	7,20%
Total	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%

Anexo X – Análise qualitativa

Tabela 50 - Classificação de severidade e probabilidade para Bombas centrífugas - Processamento do produto.

Bem	Função	Modo de falha	Estado de operação	Classificaçaõ da severidade	Classificaçaõ da probabilidade
Bomba de processo (OREDA)	Bombagem do produto do processo.	CO	Funcionamento	Categoria I - Crítica	Nível E - Muito baixa
		FEPP	Funcionamento	Categoria I - Crítica	Nível A - Muito alta
		FA	Arranque	Categoria I - Crítica	Nível E - Muito baixa
		FP	Funcionamento	Categoria I - Crítica	Nível D - Baixa
		VIB	Funcionamento	Categoria I - Crítica	Nível E - Muito baixa
		FEPA	Funcionamento	Categoria II - Degradação	Nível A - Muito alta
		FI	Funcionamento	Categoria II - Degradação	Nível E - Muito baixa
		OUT	Arranque / Funcionamento	Categoria II - Degradação	Nível E - Muito baixa
		DPF	Funcionamento	Categoria II - Degradação	Nível E - Muito baixa
		LAI	Funcionamento	Categoria III - Insignificante	Nível C - Moderada
		PPDF	Funcionamento	Categoria III - Insignificante	Nível B - Alta

Tabela 51 - Matriz criticidade das Bombas centrífugas - Processamento do produto.

CRITICIDADE CRESCENTE

(ALTO)

PROBABILIDADE DO NÍVEL DE OCORRÊNCIA

(AUMENTANDO NÍVEL DE PROBABILIDADE ---------->)

Nivel A Muito alta		**- FEPA**	**- FEPP**
Nível B Alta	**- PPDF**		
Nível C Moderada	**- LAI**		
Nível D Baixa			**- FP**
Nível E Muito baixa		**- FI** **- OUT** **- DPF**	**- CO** **- FA** **- VIB**
Nível F Remota			
(BAIXO)	Categoria III Insignificante	Categoria II Degradação	Categoria I Crítica

CLASSIFICAÇÃO DA SEVERIDADE

(AUMENTANDO O NÍVEL DA SEVERIDADE ------>)

Tabela 52 - Classificação de severidade e probabilidade para Compressores alternativos - Accionamento eléctrico (100 a 1000 kW).

Bem	Função	Modo de falha	Estado de operação	Classificaçaõ da severidade	Classificaçaõ da probabilidade
Compressor alternativo (OREDA)	Aumentar a pressão do fluido.	LAI	Funcionamento	Categoria III - Insignificante	Nível C - Moderada
		DIR	Funcionamento	Categoria II - Degradação	Nível C - Moderada
		FA	Arranque	Categoria I - Crítica	Nível C - Moderada
		FNP	Paragem	Categoria I - Crítica	Nível F - Remota
		RUI	Funcionamento	Categoria I - Crítica	Nível F - Remota
		OUT	Funcionamento	Categoria I - Crítica	Nível F - Remota
		FP	Funcionamento	Categoria I - Crítica	Nível B - Alta
		DE	Funcionamento	Categoria I - Crítica	Nível F - Remota
		FEPP	Funcionamento	Categoria III - Insignificante	Nível D - Baixa
		FEPA	Funcionamento	Categoria III - Insignificante	Nível C - Moderada
		DIN	Funcionamento	Categoria II - Degradação	Nível A - Muito alta
		SOB	Funcionamento	Categoria II - Degradação	Nível D - Baixa
		DPF	Funcionamento	Categoria II - Degradação	Nível F - Remota
		DES	Funcionamento	Categoria II - Degradação	Nível D - Baixa
		VIB	Funcionamento	Categoria II - Degradação	Nível F - Remota
		PPDF	Funcionamento	Categoria III - Insignificante	Nível D - Baixa

Tabela 53 - Matriz criticidade dos Compressores alternativos - Accionamento eléctrico (100 a 1000 kW).

CRITICIDADE CRESCENTE

(ALTO)

PROBABILIDADE DO NÍVEL DE OCORRÊNCIA

(AUMENTANDO NÍVEL DE PROBABILIDADE ---------->)

Nivel A Muito alta		**- DIN**	
Nível B Alta			**- FP**
Nível C Moderada	**- LAI** **- FEPA**	**- DIR**	**- FA**
Nível D Baixa	**- FEPP** **- PPDF**	**- SOB** **- DES**	
Nível E Muito baixa			
Nível F Remota		**- DPF** **- VIB**	**- FNP** **- RUI** **- OUT** **- DE**
	Categoria III Insignificante	Categoria II Degradação	Categoria I Crítica

(BAIXO)

CLASSIFICAÇÃO DA SEVERIDADE

(AUMENTANDO O NÍVEL DA SEVERIDADE ------>)

Tabela 54 - Classificação de severidade e probabilidade para Motores eléctricos - Bombas - Processamento do produto.

Bem	Função	Modo de falha	Estado de operação	Classificaçaõ da severidade	Classificaçaõ da probabilidade
Motor eléctrico de accionamento de bombas (OREDA)	Accionamento das bombas de processamento do produto.	CO	Funcionamento	Categoria I - Crítica	Nível B - Alta
		FA	Arranque	Categoria I - Crítica	Nível B - Alta
		DIN	Funcionamento	Categoria I - Crítica	Nível B - Alta
		RUI	Funcionamento	Categoria I - Crítica	Nível D - Baixa
		DPF	Funcionamento	Categoria I - Crítica	Nível D - Baixa
		FP	Funcionamento	Categoria I - Crítica	Nível A - Muito alta
		DE	Funcionamento	Categoria I - Crítica	Nível A - Muito alta
		VIB	Funcionamento	Categoria I - Crítica	Nível B - Alta
		LAI	Funcionamento	Categoria IV - Insignificante	Nível D - Baixa
		PPDF	Funcionamento	Categoria IV - Insignificante	Nível A - Muito alta
		OUT	Funcionamento	Categoria IV - Insignificante	Nível D - Baixa

Tabela 55 - Matriz criticidade dos Motores eléctricos - Bombas - Processamento do produto.

CRITICIDADE CRESCENTE

(ALTO)

PROBABILIDADE DO NÍVEL DE OCORRÊNCIA

(AUMENTANDO NÍVEL DE PROBABILIDADE ---------->)

Nivel A Muito alta	**- PPDF**		**- FP** **- DE**
Nível B Alta			**- CO** **- FA** **- DIN** **- VIB**
Nível C Moderada			
Nível D Baixa	**- LAI** **- OUT**		**- RUI** **- DPF**
Nível E Muito baixa			
Nível F Remota			
	Categoria III Insignificante	Categoria II Degradação	Categoria I Crítica

(BAIXO)

CLASSIFICAÇÃO DA SEVERIDADE

(AUMENTANDO O NÍVEL DA SEVERIDADE ------>)

Tabela 56 - Classificação de severidade e probabilidade para Motores eléctricos - Compressores - Processamento de gás.

Bem	Função	Modo de falha	Estado de operação	Classificaçaõ da severidade	Classificaçaõ da probabilidade
Motor eléctrico de accionamento de compressores (OREDA)	Accionamento dos compressores de gás.	FEPA	Funcionamento	Categoria I - Crítica	Nível D - Baixa
		FA	Arranque	Categoria I - Crítica	Nível B - Alta
		FNP	Paragem	Categoria I - Crítica	Nível D - Baixa
		DIN	Funcionamento	Categoria I - Crítica	Nível A - Muito alta
		SOB	Funcionamento	Categoria I - Crítica	Nível E - Muito baixa
		DPF	Funcionamento	Categoria II - Degradação	Nível A - Muito alta
		FP	Funcionamento	Categoria I - Crítica	Nível A - Muito alta
		LAI	Funcionamento	Categoria III - Insignificante	Nível B - Alta
		DIR	Funcionamento	Categoria II - Degradação	Nível D - Baixa
		RUI	Funcionamento	Categoria II - Degradação	Nível D - Baixa
		OUT	Funcionamento	Categoria II - Degradação	Nível D - Baixa
		DE	Funcionamento	Categoria II - Degradação	Nível D - Baixa
		PPDF	Funcionamento	Categoria III - Insignificante	Nível B - Alta
		DES	Funcionamento	Categoria III - Insignificante	Nível C - Moderada
		VIB	Funcionamento	Categoria III - Insignificante	Nível E - Muito baixa

Tabela 57 - Matriz criticidade dos Motores eléctricos - Compressores - Processamento de gás.

CRITICIDADE CRESCENTE

(ALTO)

PROBABILIDADE DO NÍVEL DE OCORRÊNCIA

(AUMENTANDO NÍVEL DE PROBABILIDADE ---------->)

Nivel A Muito alta		**- DPF**	**- DIN - FP**
Nível B Alta	**- LAI - PPDF**		**- FA**
Nível C Moderada	**- DES**		
Nível D Baixa		**- DIR - RUI - OUT - DE**	**- FEPA - FP**
Nível E Muito baixa	**- VIB**		**- SOB**
Nível F Remota			
(BAIXO)	Categoria III Insignificante	Categoria II Degradação	Categoria I Crítica

CLASSIFICAÇÃO DA SEVERIDADE

(AUMENTANDO O NÍVEL DA SEVERIDADE ------>)

Tabela 58 - Classificação de severidade e probabilidade para Turbina a gás - Industrial (0 a 1000 kW).

Bem	Função	Modo de falha	Estado de operação	Classificaçaõ da severidade	Classificaçaõ da probabilidade
Turbina industrial (OREDA)	Accionamento de bombas ou compressores.	FA	Arranque	Categoria I - Crítica	Nível C - Moderada
		FNP	Paragem	Categoria I - Crítica	Nível E - Muito baixa
		FP	Funcionamento	Categoria I - Crítica	Nível A - Muito alta
		DIR	Funcionamento	Categoria II - Degradação	Nível E - Muito baixa
		FEV	Funcionamento	Categoria II - Degradação	Nível E - Muito baixa
		FEPA	Funcionamento	Categoria II - Degradação	Nível B - Alta
		FI	Funcionamento	Categoria II - Degradação	Nível E - Muito baixa
		OUT	Funcionamento	Categoria II - Degradação	Nível B - Alta
		SOB	Funcionamento	Categoria II - Degradação	Nível E - Muito baixa
		LAI	Funcionamento	Categoria III - Insignificante	Nível C - Moderada
		PPDF	Funcionamento	Categoria III - Insignificante	Nível A - Muito alta
		VIB	Funcionamento	Categoria III - Insignificante	Nível E - Muito baixa

Tabela 59 - Matriz criticidade dos Turbina a gás - Industrial (0 a 1000 kW).

CRITICIDADE CRESCENTE

(ALTO)

PROBABILIDADE DO NÍVEL DE OCORRÊNCIA

(AUMENTANDO NÍVEL DE PROBABILIDADE ---------->)

Nivel A Muito alta	**- PPDF**		**- FP**
Nível B Alta		**- FEPA** **- OUT**	
Nível C Moderada	**- LAI**		**- FA**
Nível D Baixa			
Nível E Muito baixa	**- VIB**	**- DIR** **- FEV** **- FI** **- SOB**	**- FNP**
Nível F Remota			
	Categoria III Insignificante	Categoria II Degradação	Categoria I Crítica

(BAIXO)

CLASSIFICAÇÃO DA SEVERIDADE

(AUMENTANDO O NÍVEL DA SEVERIDADE ------>)

Anexo XI – Análise de Pareto aos modos de falha de risco "intolerável"

Bombas centrífugas – Processamento do produto

Modo de falha: FEPP

1. Vedantes $\lambda=51,224x10^{-6}$;
2. Tubagens $\lambda=18,076x10^{-6}$;
3. Válvulas $\lambda=9,236x10^{-6}$;
4. Armação $\lambda=5,927x10^{-6}$;
5. Desconhecido $\lambda=4,618x10^{-6}$;
6. Subunidade $\lambda=0,802x10^{-6}$;
7. Rolamentos $\lambda=0,498x10^{-6}$;
8. Válvula de retenção $\lambda=0,498x10^{-6}$;
9. Outros equipamentos $\lambda=0,498x10^{-6}$;
10. Chumaceira radial $\lambda=0,498x10^{-6}$;
11. Instrumentos de pressão $\lambda=0,304x10^{-6}$.

Vedantes + Tubagens + Válvulas = 85,2%

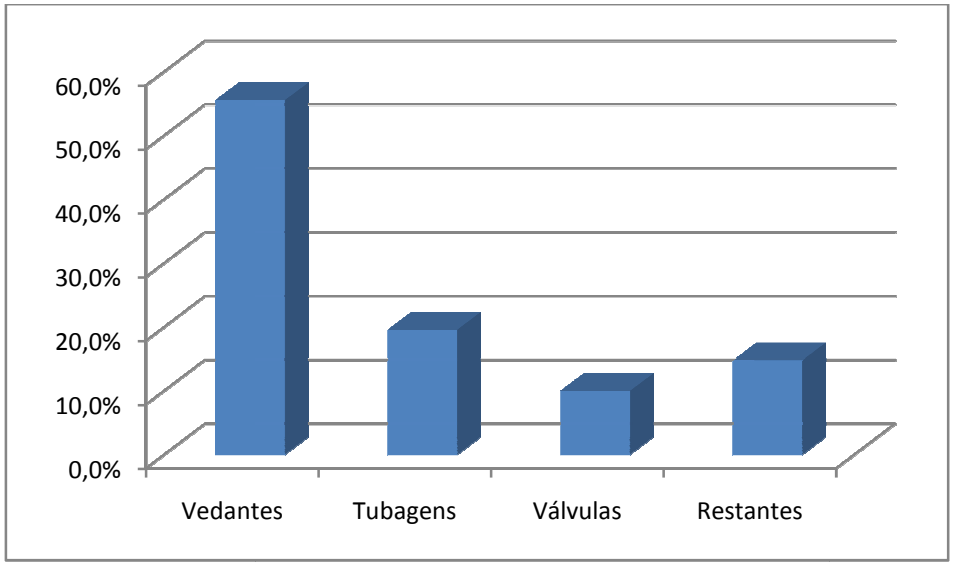


Gráfico 41 – Análise de Pareto aos componentes das bombas centrífugas no modo de falha FEPP.

Modo de falha: FEPA

1. Vedantes $\lambda=51,355x10^{-6}$;
2. Tubagens $\lambda=12,852x10^{-6}$;
3. Válvulas $\lambda=10,949x10^{-6}$;
4. Desconhecido $\lambda=6,797x10^{-6}$;
5. Outros equipamentos $\lambda=3,205x10^{-6}$;
6. Bomba com motor $\lambda=3,205x10^{-6}$;

7. Líquido refrigerante $\lambda=2,269x10^{-6}$;
8. Armação $\lambda=1,947x10^{-6}$;
9. Sistema de aquecimento/arrefecimento $\lambda=1,947x10^{-6}$;
10. Filtros $\lambda=1,947x10^{-6}$;
11. Líquido lubrificante $\lambda=1,635x10^{-6}$;
12. Subunidade $\lambda=1,635x10^{-6}$;
13. Instrumentos de pressão $\lambda=1,323x10^{-6}$;
14. Acoplamento da unidade de condução $\lambda=0,946x10^{-6}$;
15. Filtro ciclónico $\lambda=0,946x10^{-6}$;
16. Empanque $\lambda=0,817x10^{-6}$;
17. Instrumentos de temperatura $\lambda=0,602x10^{-6}$;
18. Reservatório com sistema de aquecimento $\lambda=0,602x10^{-6}$;
19. Rolamentos $\lambda=0,505x10^{-6}$;
20. Acoplamento condutor $\lambda=0,312x10^{-6}$;
21. Instrumentos de fluxo $\lambda=0,312x10^{-6}$;
22. Instrumentos de vibração $\lambda=0,312x10^{-6}$;
23. Sistema de lubrificação $\lambda=0,312x10^{-6}$;
24. Purga de ar $\lambda=0,312x10^{-6}$;
25. Veio $\lambda=0,312x10^{-6}$;
26. Chumaceira radial $\lambda=0,194x10^{-6}$.

Vedantes + Tubagens + Válvulas + Desconhecido + Outros equipamentos + Bomba com motor = 79,2%

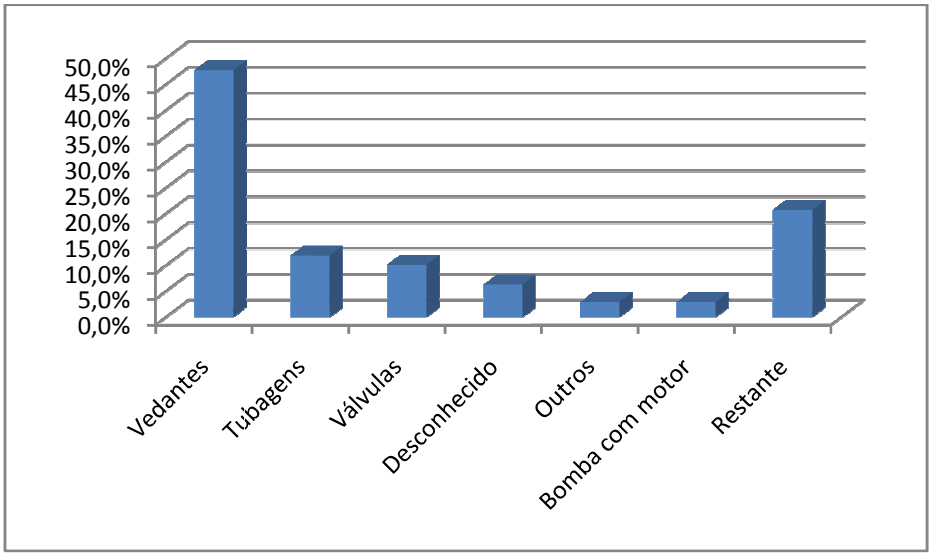


Gráfico 42 – Análise de Pareto aos componentes das bombas centrífugas no modo de falha FEPA.

Compressores alternativos – Accionamento eléctrico (100 a 1000 kW)

Modo de falha: FP

1. Desconhecido $\lambda=9,968x10^{-6}$;
2. Unidade de controlo $\lambda=5,941x10^{-6}$;
3. Cilindro linear $\lambda=5,941x10^{-6}$;

4. Instrumentos de temperatura $\lambda=5,941x10^{-6}$;
5. Instrumentos de pressão $\lambda=4,034x10^{-6}$;
6. Líquido lubrificante $\lambda=4,034x10^{-6}$;
7. Tubagens $\lambda=4,034x10^{-6}$;
8. Subunidade $\lambda=4,034x10^{-6}$;
9. Cablagem e caixa de ligação $\lambda=1,913x10^{-6}$;
10. Válvula de retenção $\lambda=1,913x10^{-6}$;
11. Filtros $\lambda=1,913x10^{-6}$;
12. Instrumentos gerais $\lambda=1,913x10^{-6}$;
13. Instrumentos de nível $\lambda=1,913x10^{-6}$;
14. Instrumentos de vibração $\lambda=1,913x10^{-6}$;
15. Bomba com motor $\lambda=1,913x10^{-6}$;
16. Válvulas $\lambda=1,913x10^{-6}$.

Desconhecido + Unidade de controlo + Cilindro linear + Instrumentos de temperatura + Instrumentos de pressão + Líquido lubrificante + Tubagens + Subunidade = 74,2%

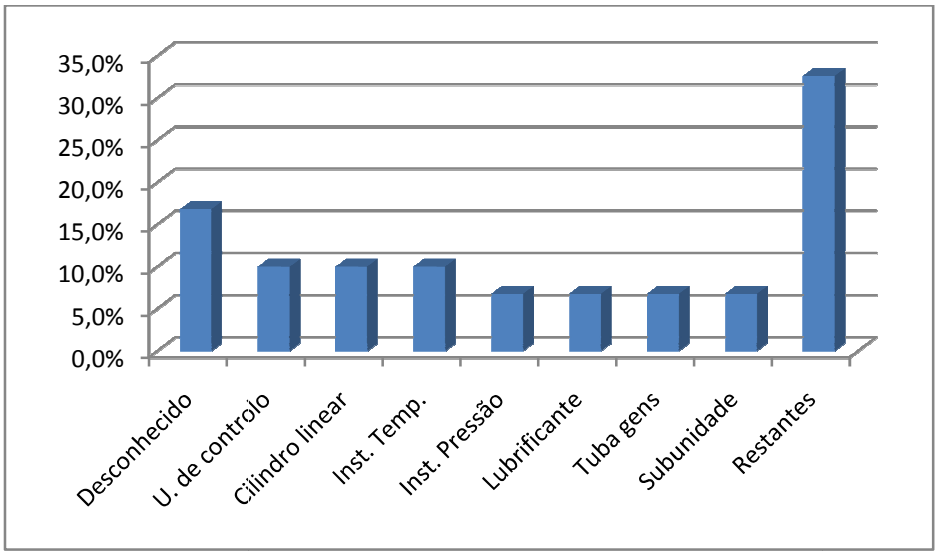


Gráfico 43 – Análise de Pareto aos componentes dos compressores alternativos no modo de falha FP.

Modo de falha: DIN

1. Cilindro linear $\lambda=102,905x10^{-6}$;
2. Válvulas $\lambda=30,615x10^{-6}$;
3. Bomba com motor $\lambda=23,544x10^{-6}$;
4. Subunidade $\lambda=9,458x10^{-6}$;
5. Desconhecido $\lambda=7,836x10^{-6}$;
6. Bomba com motor/engrenagem $\lambda=2,369x10^{-6}$;
7. Filtros $\lambda=1,604x10^{-6}$;
8. Outros equipamentos $\lambda=1,604x10^{-6}$;
9. Instrumentos gerais $\lambda=0,765x10^{-6}$;
10. Instrumentos de temperatura $\lambda=0,765x10^{-6}$;
11. Vedantes $\lambda=0,765x10^{-6}$.

Cilindro linear + Válvulas = 73,3%

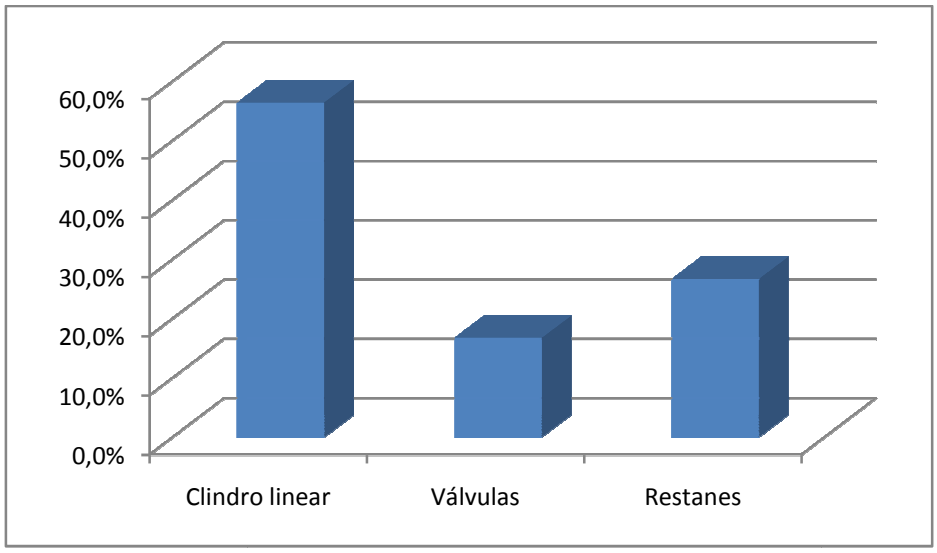


Gráfico 44 – Análise de Pareto aos componentes dos compressores alternativos no modo de falha DIN.

Modo de falha: FA

1. Subunidade $\lambda=12,152x10^{-6}$;
2. Unidade de controlo $\lambda=6,237x10^{-6}$;
3. Desconhecido $\lambda=6,237x10^{-6}$;
4. Instrumentos de fluxo $\lambda=2,956x10^{-6}$;
5. Instrumentos gerais $\lambda=2,956x10^{-6}$;
6. Bomba com motor $\lambda=2,956x10^{-6}$;
7. Válvulas $\lambda=2,956x10^{-6}$.

Subunidade + Unidade de controlo + Desconhecido = 67,6%

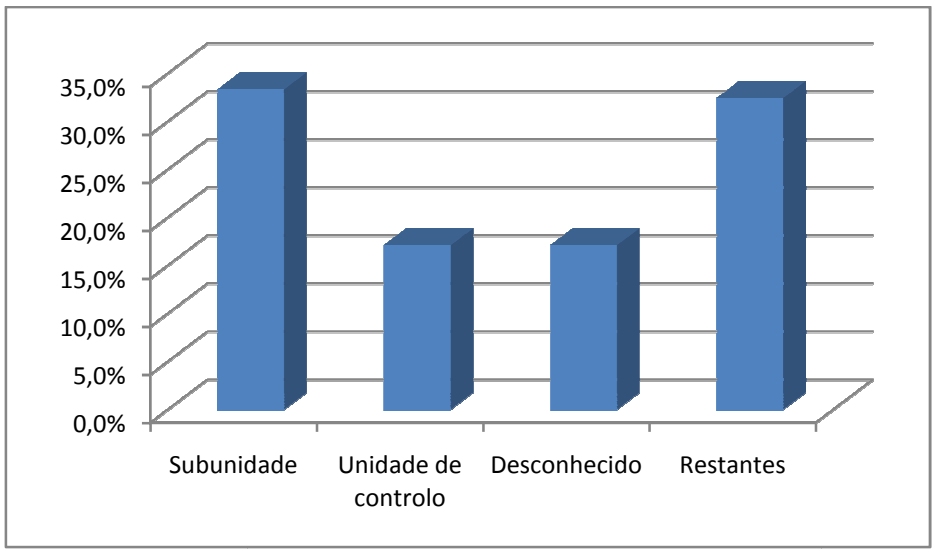


Gráfico 45 – Análise de Pareto aos componentes dos compressores alternativos no modo de falha FA.

Motores eléctricos – Bombas – Processamento do produto

Modo de falha: FP

1. Desconhecido $\lambda=9,210x10^{-6}$;
2. Unidade de controlo $\lambda=2,059x10^{-6}$;
3. Outros equipamentos $\lambda=2,059x10^{-6}$;
4. Subunidade $\lambda=2,059x10^{-6}$;
5. Corta corrente $\lambda=1,029x10^{-6}$;
6. Acoplamento $\lambda=1,029x10^{-6}$;
7. Instrumentos de vibração $\lambda=1,029x10^{-6}$;
8. Alimentação de energia $\lambda=1,029x10^{-6}$;
9. Estator $\lambda=1,029x10^{-6}$.

Desconhecido + Unidade de controlo + Outros equipamentos + Subunidade = 74,9%

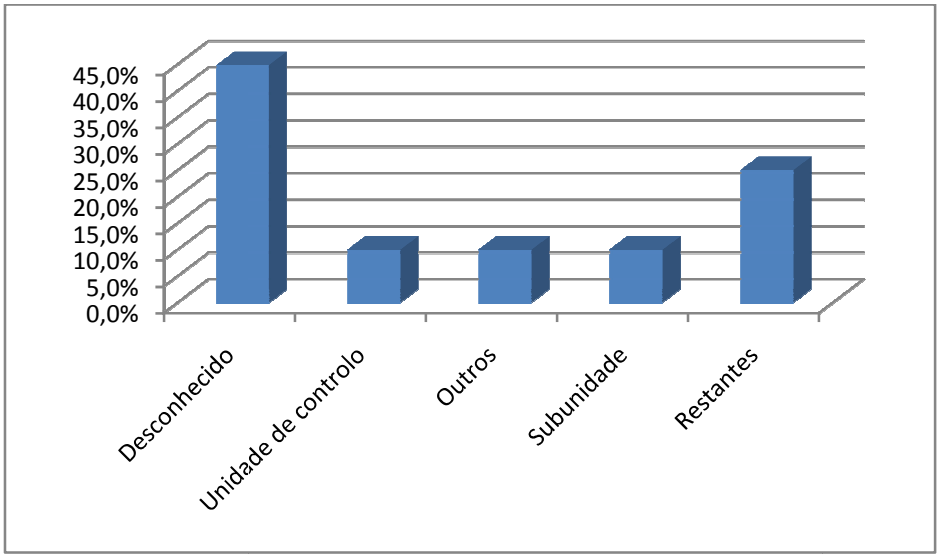


Gráfico 46 – Análise de Pareto aos componentes dos motores eléctricos das bombas no modo de falha FP.

Modo de falha: DE

1. Subunidade $\lambda=15,003x10^{-6}$;
2. Chumaceira radial $\lambda=9,238x10^{-6}$;
3. Unidade de controlo $\lambda=6,924x10^{-6}$;
4. Desconhecido $\lambda=5,765x10^{-6}$;
5. Carcaça $\lambda=3,473x10^{-6}$;
6. Outros equipamentos $\lambda=2,314x10^{-6}$;
7. Rotor $\lambda=2,314x10^{-6}$;
8. Empanque $\lambda=1,159x10^{-6}$.

Subunidade + Chumaceira radial + Unidade de controlo + Desconhecido = 80,0%

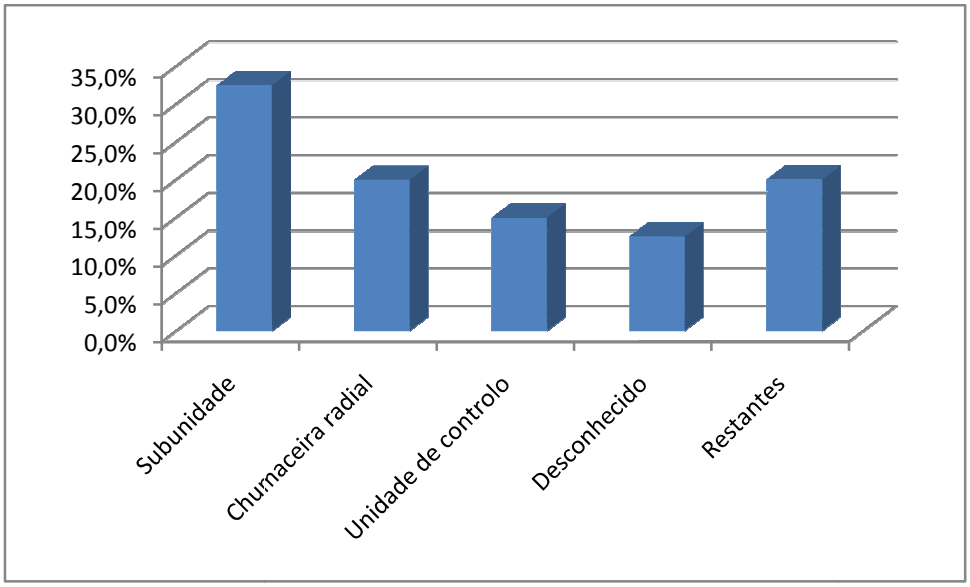


Gráfico 47 - Análise de Pareto aos componentes dos motores eléctricos das bombas no modo de falha DE.

Modo de falha: CO

1. Chumaceira radial $\lambda=5{,}128\text{x}10^{-6}$;
2. Subunidade $\lambda=5{,}128\text{x}10^{-6}$;
3. Desconhecido $\lambda=3{,}430\text{x}10^{-6}$;
4. Rotor $\lambda=1{,}714\text{x}10^{-6}$.

Chumaceira radial + Subunidade = 66,7 %

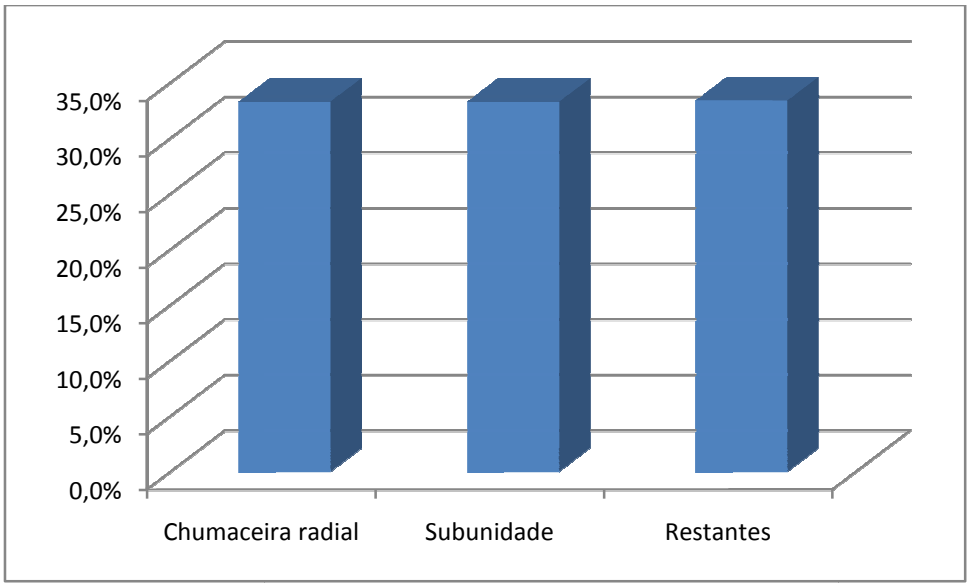


Gráfico 48 - Análise de Pareto aos componentes dos motores eléctricos das bombas no modo de falha CO.

Modo de falha: FA

1. Unidade de controlo $\lambda=5{,}770\text{x}10^{-6}$;
2. Desconhecido $\lambda=5{,}770\text{x}10^{-6}$;
3. Cablagem e caixa de ligação $\lambda=1{,}931\text{x}10^{-6}$;

4. Dispositivo de actuação $\lambda=0,964x10^{-6}$;
5. Subunidade $\lambda=0,964x10^{-6}$.

Unidade de controlo + Desconhecido = 74,9%

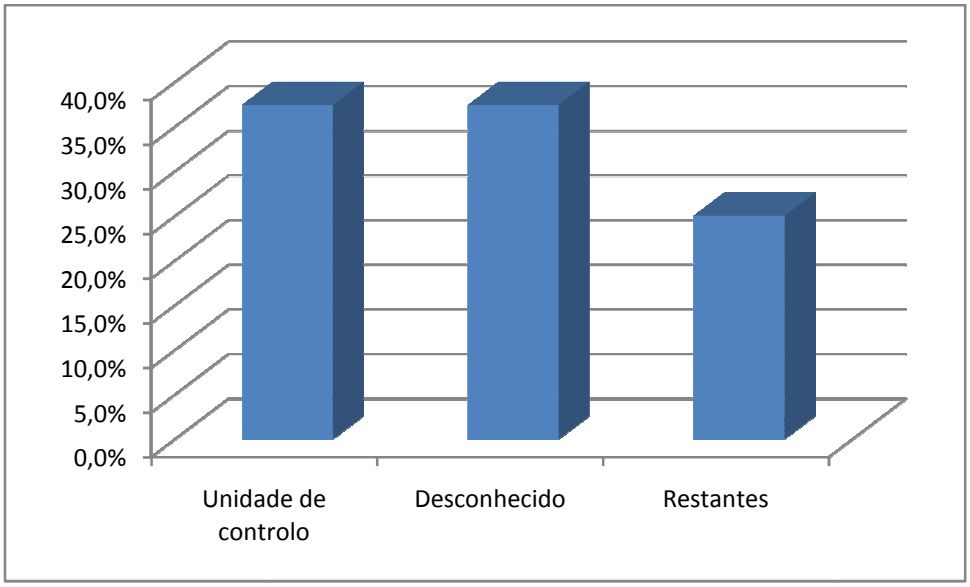


Gráfico 49- Análise de Pareto aos componentes dos motores eléctricos das bombas no modo de falha FA.

Modo de falha: DIN

1. Unidade de controlo $\lambda=0,964x10^{-6}$.

Unidade de controlo = 100%

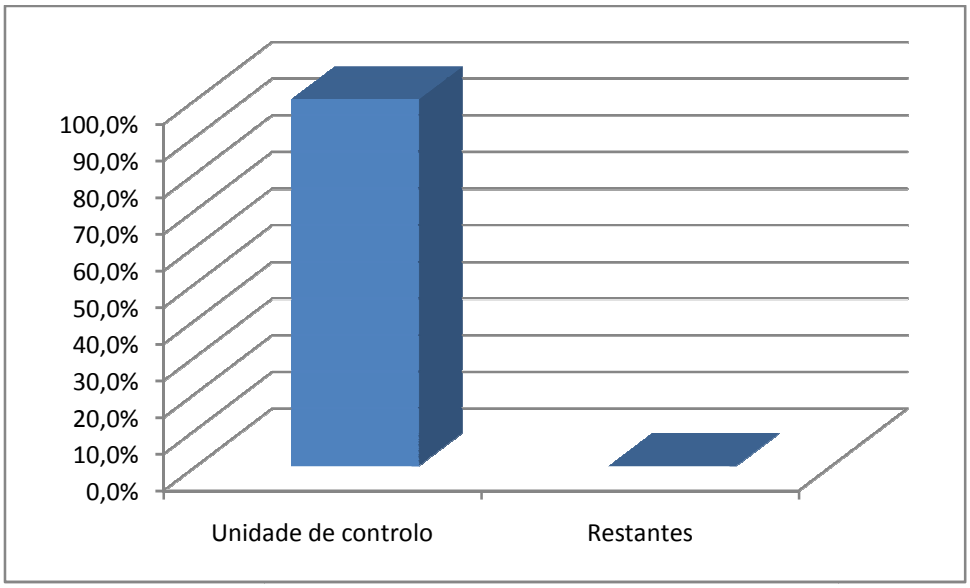


Gráfico 50 - Análise de Pareto aos componentes dos motores eléctricos das bombas no modo de falha DIN.

Modo de falha: VIB

1. Chumaceira radial $\lambda=3,943x10^{-6}$;
2. Empanque $\lambda=3,152x10^{-6}$;

3. Desconhecido $\lambda=1,583x10^{-6}$;
4. Instrumentos de vibração $\lambda=0,791x10^{-6}$;
5. Subunidade $\lambda=0,791x10^{-6}$.

Chumaceira radial + Empanque = 69,2%

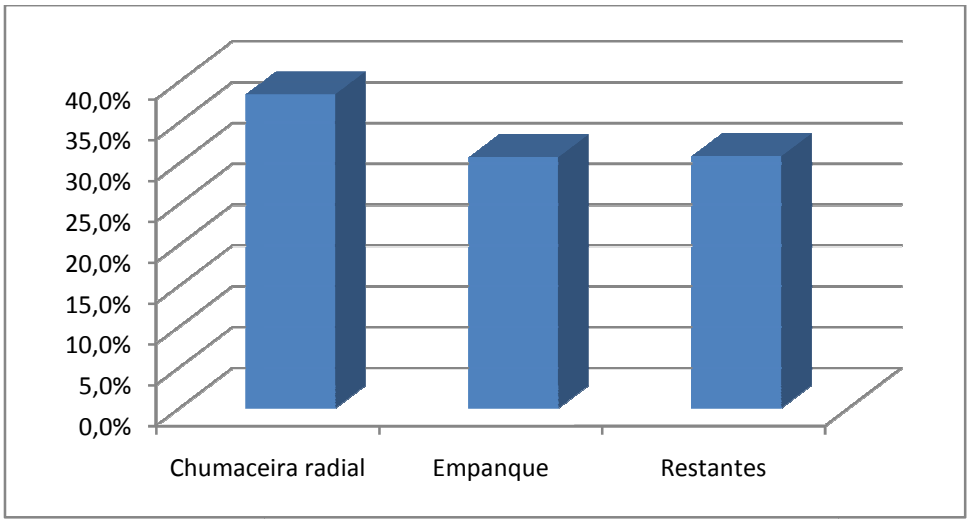


Gráfico 51 - Análise de Pareto aos componentes dos motores eléctricos das bombas no modo de falha VIB.

Motores eléctricos – Compressores – Processamento de gás

Modo de falha: DIN

1. Outros equipamentos $\lambda=9,340x10^{-6}$;
2. Acoplamento $\lambda=3,737x10^{-6}$;
3. Subunidade $\lambda=3,737x10^{-6}$;
4. Desconhecido $\lambda=3,737x10^{-6}$;
5. Excitador $\lambda=1,868x10^{-6}$.

Outros equipamentos + Acoplamento + Subunidade + Desconhecido = 92,1%

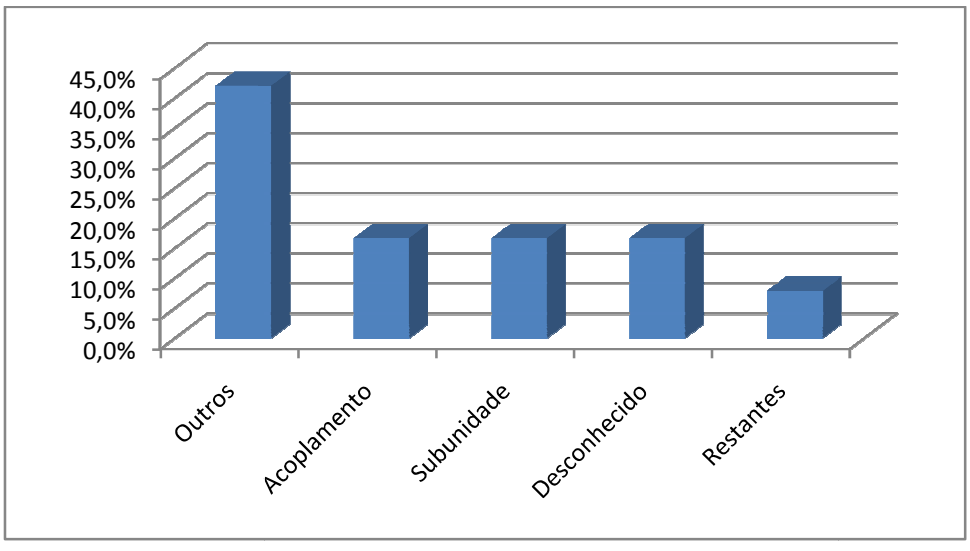


Gráfico 52 - Análise de Pareto aos componentes dos motores eléctricos dos compressores no modo de falha DIN.

Modo de falha: FP

1. Desconhecido $\lambda=20,552x10^{-6}$;
2. Unidade de controlo $\lambda=5,606x10^{-6}$;
3. Corta corrente $\lambda=3,735x10^{-6}$;
4. Cablagem e caixa de ligação $\lambda=1,867x10^{-6}$.

Desconhecido + Unidade de controlo = 82,4%

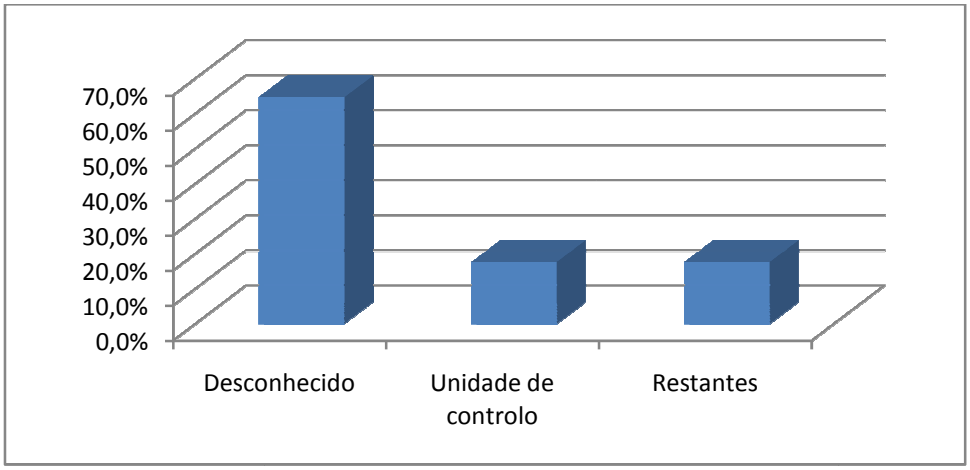


Gráfico 53 - Análise de Pareto aos componentes dos motores eléctricos dos compressores no modo de falha FP.

Modo de falha: FA

1. Desconhecido $\lambda=3,735x10^{-6}$;
2. Dispositivo de actuação $\lambda=1,869x10^{-6}$;
3. Unidade de controlo $\lambda=1,869x10^{-6}$;
4. Ventilador com motor $\lambda=1,869x10^{-6}$;
5. Estator $\lambda=1,869x10^{-6}$.

Desconhecido + Dispositivo de actuação + Unidade de controlo + Ventilador com motor + Estator = 100%

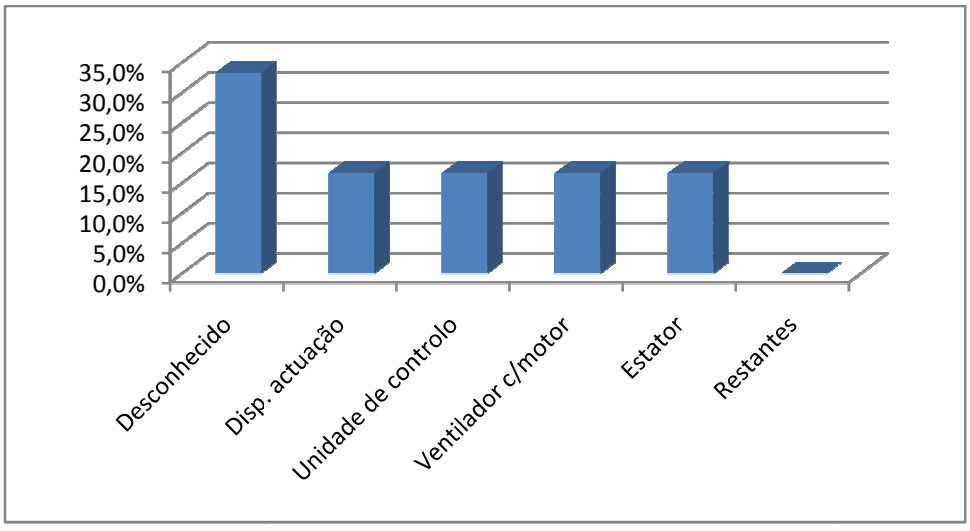


Gráfico 54 - Análise de Pareto aos componentes dos motores eléctricos dos compressores no modo de falha FA.

Modo de falha: DPF

1. Ventilador com motor $\lambda=13,089x10^{-6}$;
2. Instrumentos gerais $\lambda=3,736x10^{-6}$;
3. Líquido lubrificante $\lambda=3,736x10^{-6}$;
4. Outros equipamentos $\lambda=3,736x10^{-6}$;
5. Desconhecido $\lambda=3,736x10^{-6}$;
6. Unidade de controlo $\lambda=1,868x10^{-6}$;
7. Bomba com motor $\lambda=1,868x10^{-6}$.

Ventilador com motor + Instrumentos gerais + Líquido lubrificante + Outros equipamentos + Desconhecido = 88,2%

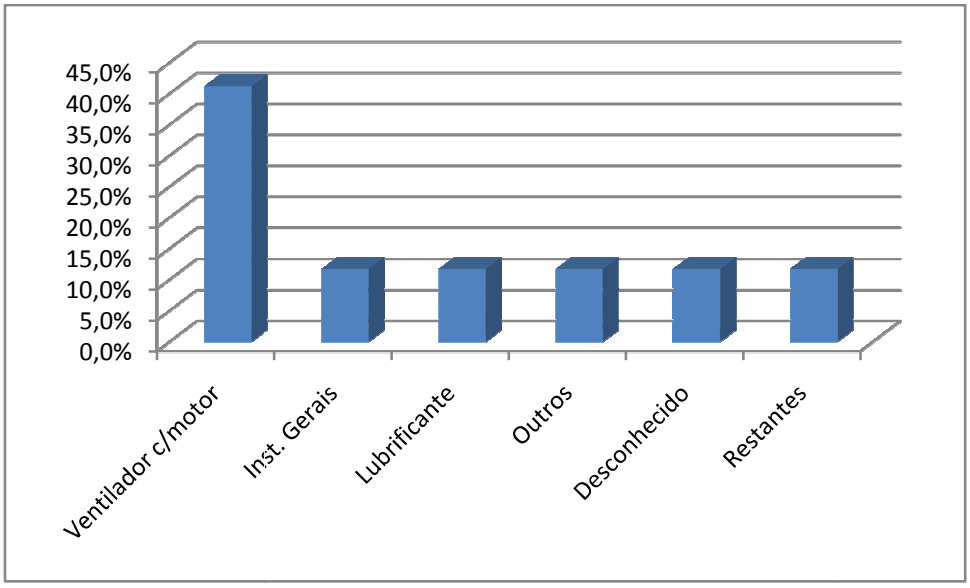


Gráfico 55 - Análise de Pareto aos componentes dos motores eléctricos dos compressores no modo de falha DPF.

Turbina a gás – Industrial (0 a 1000 kW)

Modo de falha: FP

1. Desconhecido $\lambda=17,638 X 10^{-6}$;
2. Válvulas $\lambda=15,229 X 10^{-6}$;
3. Unidade de controlo $\lambda=14,085 X 10^{-6}$;
4. Controlo de vapor $\lambda=8,026 X 10^{-6}$;
5. Instrumentos de velocidade $\lambda=7,264 X 10^{-6}$;
6. Instrumentos de temperatura $\lambda=6,502 X 10^{-6}$;
7. Instrumentos de vibração $\lambda=6, 281 X 10^{-6}$;
8. Alimentação interna de energia $\lambda=4,339 X 10^{-6}$;
9. Subunidade $\lambda=4,339 X 10^{-6}$;
10. Bomba com motor $\lambda=3,798 X 10^{-6}$;
11. Instrumentação de pressão $\lambda=3,687 X 10^{-6}$;
12. Cablagem e caixa de ligação $\lambda=3,146 X 10^{-6}$;
13. Instrumentos gerais $\lambda=3,036 X 10^{-6}$;

14. Tomada de ar $\lambda=2,815 \times 10^{-6}$;
15. Outros equipamentos $\lambda=2,815 \times 10^{-6}$;
16. Filtros $\lambda=2,274 \times 10^{-6}$;
17. Escape $\lambda=1,844 \times 10^{-6}$;
18. Líquido lubrificante $\lambda=1,512 \times 10^{-6}$;
19. Líquido refrigerante $\lambda=1,303 \times 10^{-6}$;
20. Filtro de vapor $\lambda=1,303 \times 10^{-6}$;
21. Carcaça $\lambda=1,303 \times 10^{-6}$;
22. Dispositivo de actuação $\lambda=0,971 \times 10^{-6}$;
23. Bomba de vapor $\lambda=0,971 \times 10^{-6}$;
24. Instrumentos de chama $\lambda=0,971 \times 10^{-6}$;
25. Purga de ar $\lambda=0,971 \times 10^{-6}$;
26. Chumaceira radial $\lambda=0,971 \times 10^{-6}$;
27. Queimadores/Tubeira $\lambda=0,873 \times 10^{-6}$;
28. Turbina HP $\lambda=0,651 \times 10^{-6}$;
29. Lanterna $\lambda=0,651 \times 10^{-6}$;
30. Controlo de arranque $\lambda=0,651 \times 10^{-6}$;
31. Empanque $\lambda=0,651 \times 10^{-6}$;
32. Tubagens $\lambda=0,541 \times 10^{-6}$;
33. Câmara de combustão $\lambda=0,320 \times 10^{-6}$;
34. Coluna da lavagem de vapor $\lambda=0,320 \times 10^{-6}$;
35. Instrumentos de fluxo $\lambda=0,320 \times 10^{-6}$;
36. Arranque da unidade $\lambda=0,320 \times 10^{-6}$;
37. Vedantes $\lambda=0,221 \times 10^{-6}$.

Desconhecido + Válvulas + Unidade de controlo + Controlo de vapor + Instrumentos de velocidade + Instrumentos de temperatura + Instrumentos de vibração + Alimentação interna de energia + Subunidade = 68,1%

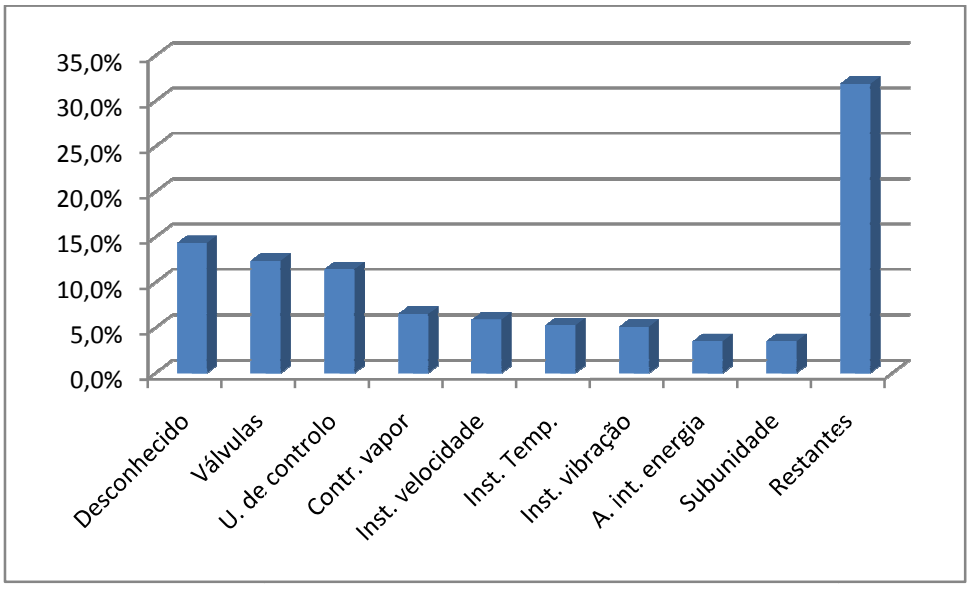


Gráfico 56 - Análise de Pareto aos componentes das turbinas no modo de falha FP.

Modo de falha: FA

1. Desconhecido $\lambda=8,377 \times 10^{-6}$;
2. Válvulas $\lambda=7,701 \times 10^{-6}$;
3. Arranque da unidade $\lambda=6,963 \times 10^{-6}$;
4. Subunidade $\lambda=6,367 \times 10^{-6}$;
5. Unidade de controlo $\lambda=5,777 \times 10^{-6}$;
6. Controlo de vapor $\lambda=5,175 \times 10^{-6}$;
7. Outros equipamentos $\lambda=2,852 \times 10^{-6}$;
8. Instrumentos de velocidade $\lambda=2,256 \times 10^{-6}$;
9. Dispositivo de actuação $\lambda=2,127 \times 10^{-6}$;
10. Instrumentos de pressão $\lambda=1,727 \times 10^{-6}$;
11. Queimadores / Tubeira $\lambda=1,395 \times 10^{-6}$;
12. Energia de arranque (Bateria, ar) $\lambda=1,192 \times 10^{-6}$;
13. Controlo de arranque $\lambda=0,996 \times 10^{-6}$;
14. Cablagem e caixa de ligação $\lambda=0,928 \times 10^{-6}$;
15. Carcaça $\lambda=0,799 \times 10^{-6}$;
16. Câmara de combustão $\lambda=0,596 \times 10^{-6}$;
17. Estator de compressor $\lambda=0,596 \times 10^{-6}$;
18. Tomada de ar $\lambda=0,529 \times 10^{-6}$;
19. Instrumentos de vibração $\lambda=0,529 \times 10^{-6}$;
20. Filtros $\lambda=0,399 \times 10^{-6}$;
21. Filtro de vapor $\lambda=0,399 \times 10^{-6}$;
22. Instrumentos de chama $\lambda=0,399 \times 10^{-6}$;
23. Alimentação interna de energia $\lambda=0,399 \times 10^{-6}$;
24. Bomba com motor $\lambda=0,399 \times 10^{-6}$;
25. Instrumentos gerais $\lambda=0,332 \times 10^{-6}$;
26. Líquido lubrificante $\lambda=0,332 \times 10^{-6}$;
27. Empanque $\lambda=0,209 \times 10^{-6}$;
28. Rotor de compressão $\lambda=0,197 \times 10^{-6}$;
29. Instrumentos de fluxo $\lambda=0,197 \times 10^{-6}$;
30. Instrumentos de temperatura $\lambda=0,197 \times 10^{-6}$;
31. Tubagens $\lambda=0,197 \times 10^{-6}$;
32. Purga de ar $\lambda=0,197 \times 10^{-6}$;
33. Chumaceira radial $\lambda=0,197 \times 10^{-6}$;
34. Reservatório com sistema de aquecimento $\lambda=0,197 \times 10^{-6}$;
35. Estator $\lambda=0,197 \times 10^{-6}$;
36. Vedantes $\lambda=0,135 \times 10^{-6}$.

Desconhecidos + Válvulas + Arranque da unidade + Subunidade + Unidade de controlo + Controlo de vapor + Outros equipamentos + Instrumentos de velocidade = 74,4%

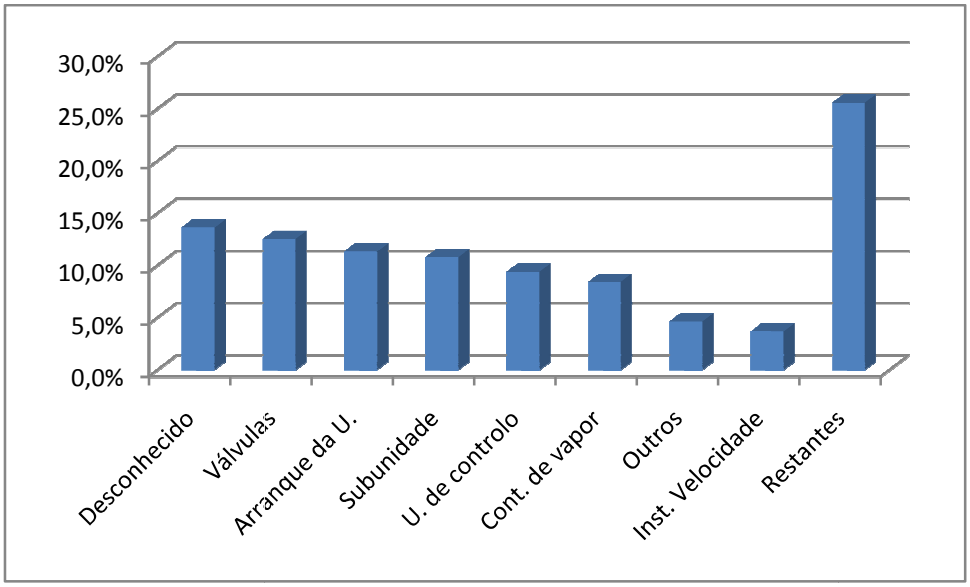


Gráfico 57 - Análise de Pareto aos componentes das turbinas no modo de falha FA.

Anexo XII – Árvores de falha

Bombas centrífugas – Processamento do produto

Todos os equipamentos

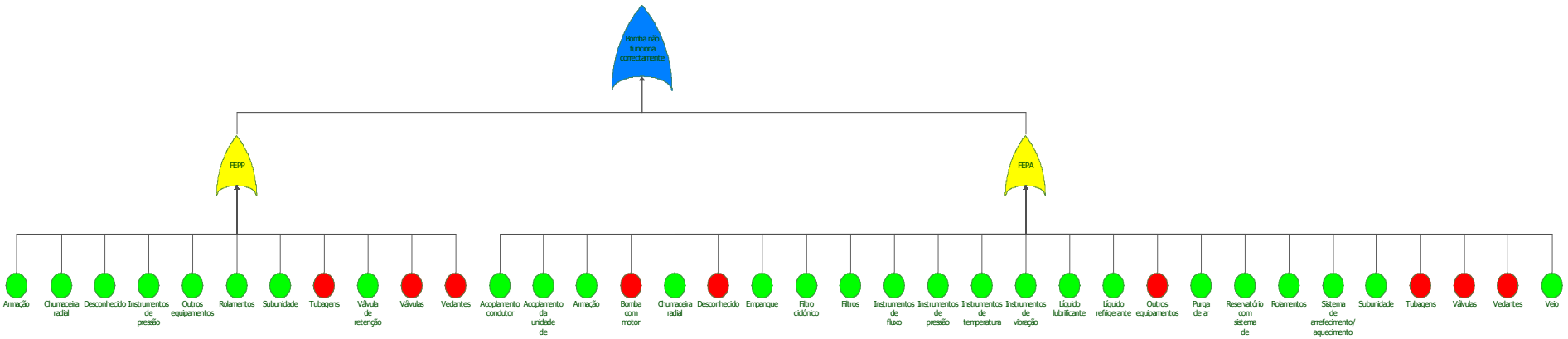


Figura 52 - Árvore de falha das Bombas centrífugas - Processamento do produto.

Com os equipamentos críticos

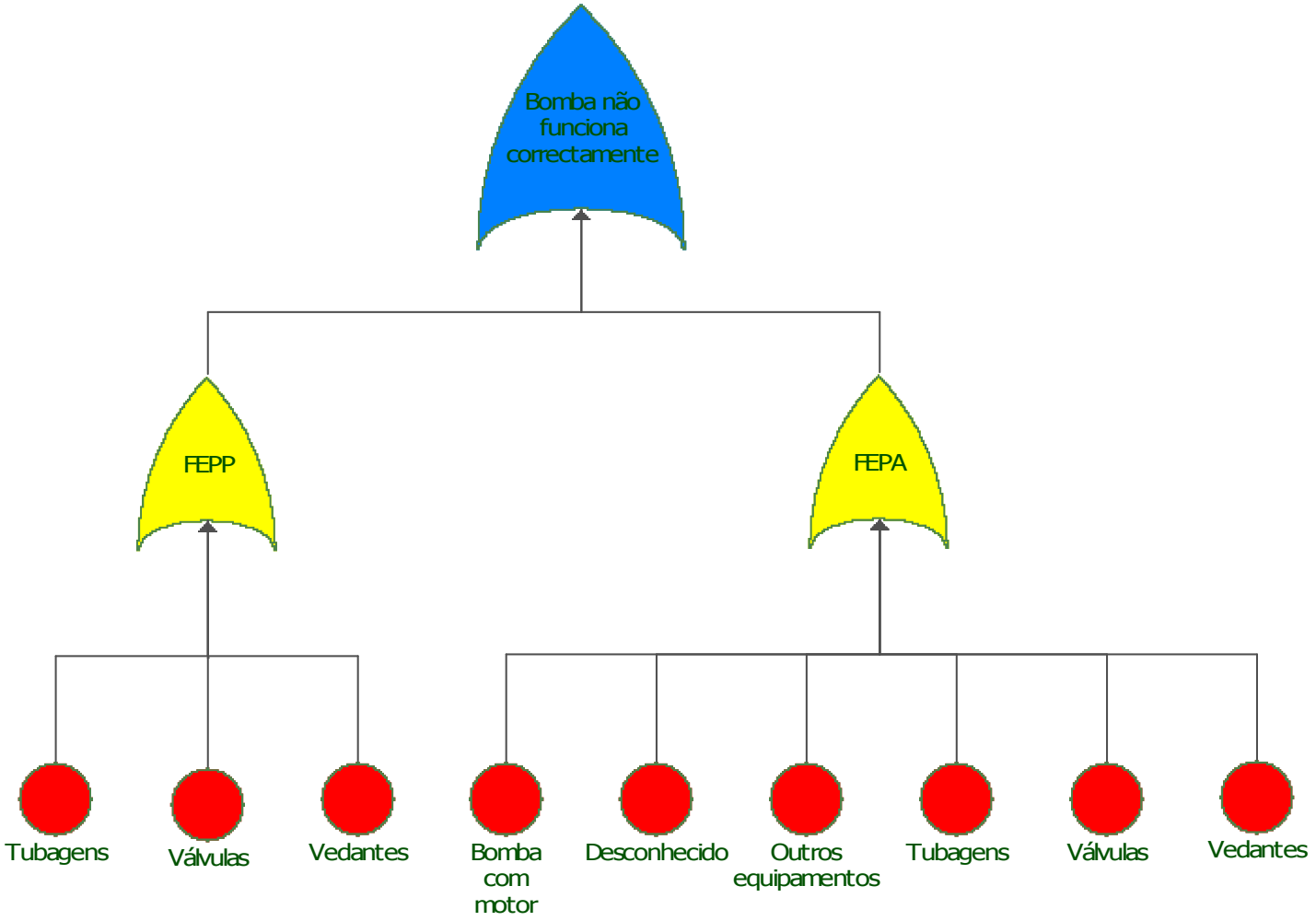


Figura 53 - Árvore de falha das Bombas centrífugas - Processamento do produto (componentes críticos).

Compressores alternativos – Accionamento eléctrico (100 a 1000 kW)

Todos os equipamentos

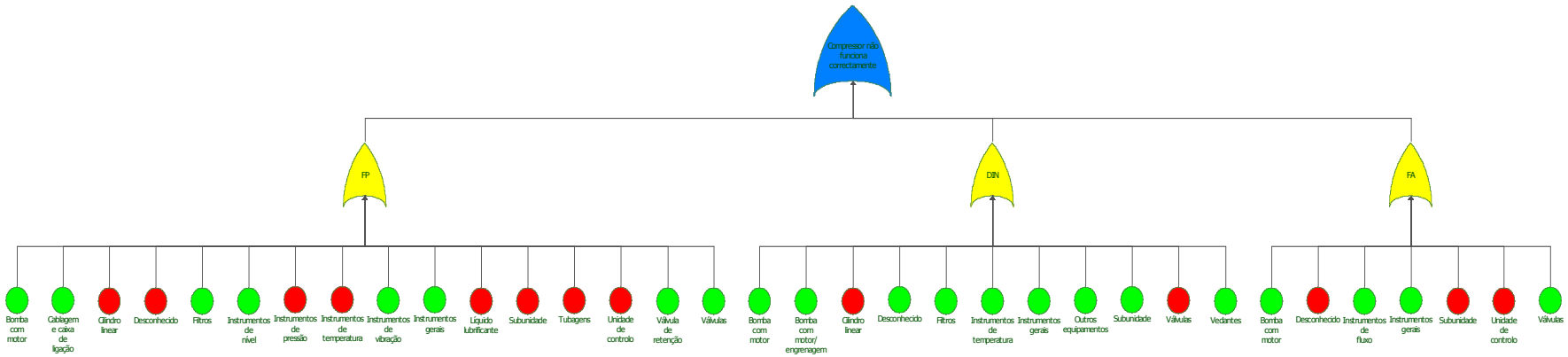


Figura 54 - Árvore de falha das Compressores alternativos - Accionamento eléctrico (100 a 1000 kW).

Com os equipamentos críticos

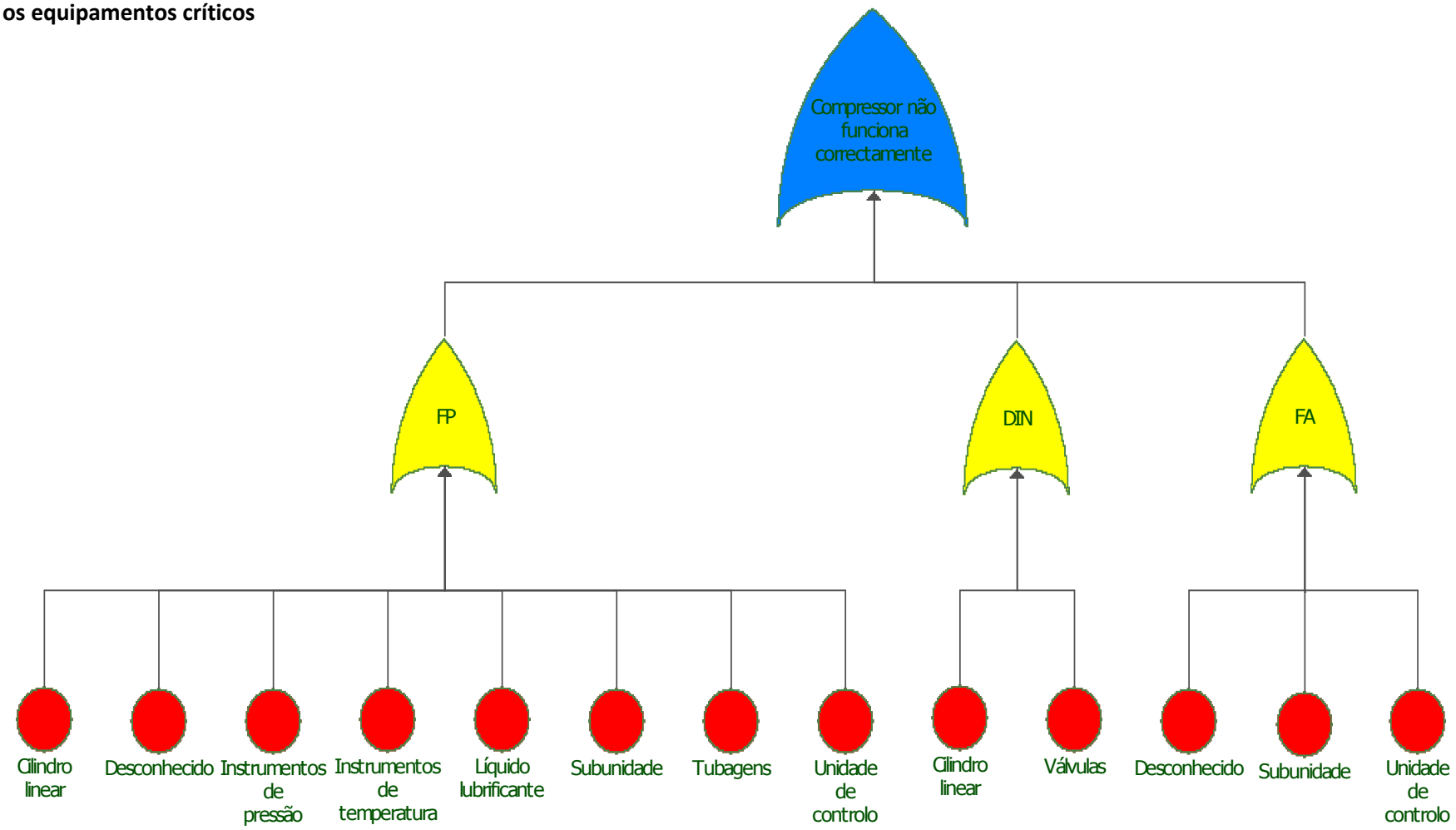


Figura 55 - Árvore de falha das Compressores alternativos - Accionamento eléctrico (100 a 1000 kW) (componentes críticos).

Motores eléctricos – Bombas – Processamento do produto

Todos os equipamentos

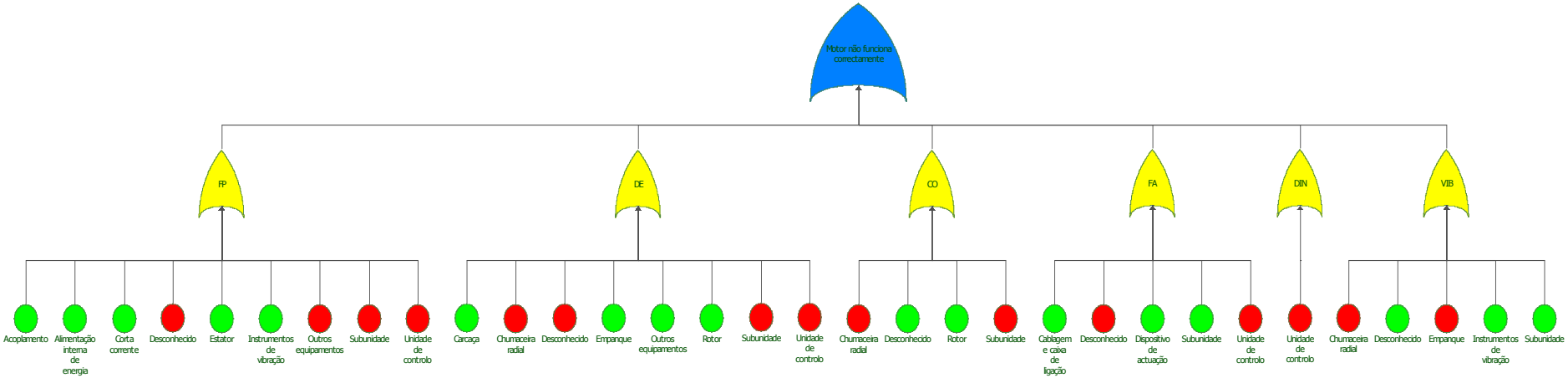


Figura 56 - Árvore de falha das Motores eléctricos - Bombas - Processamento do produto.

Com os equipamentos críticos

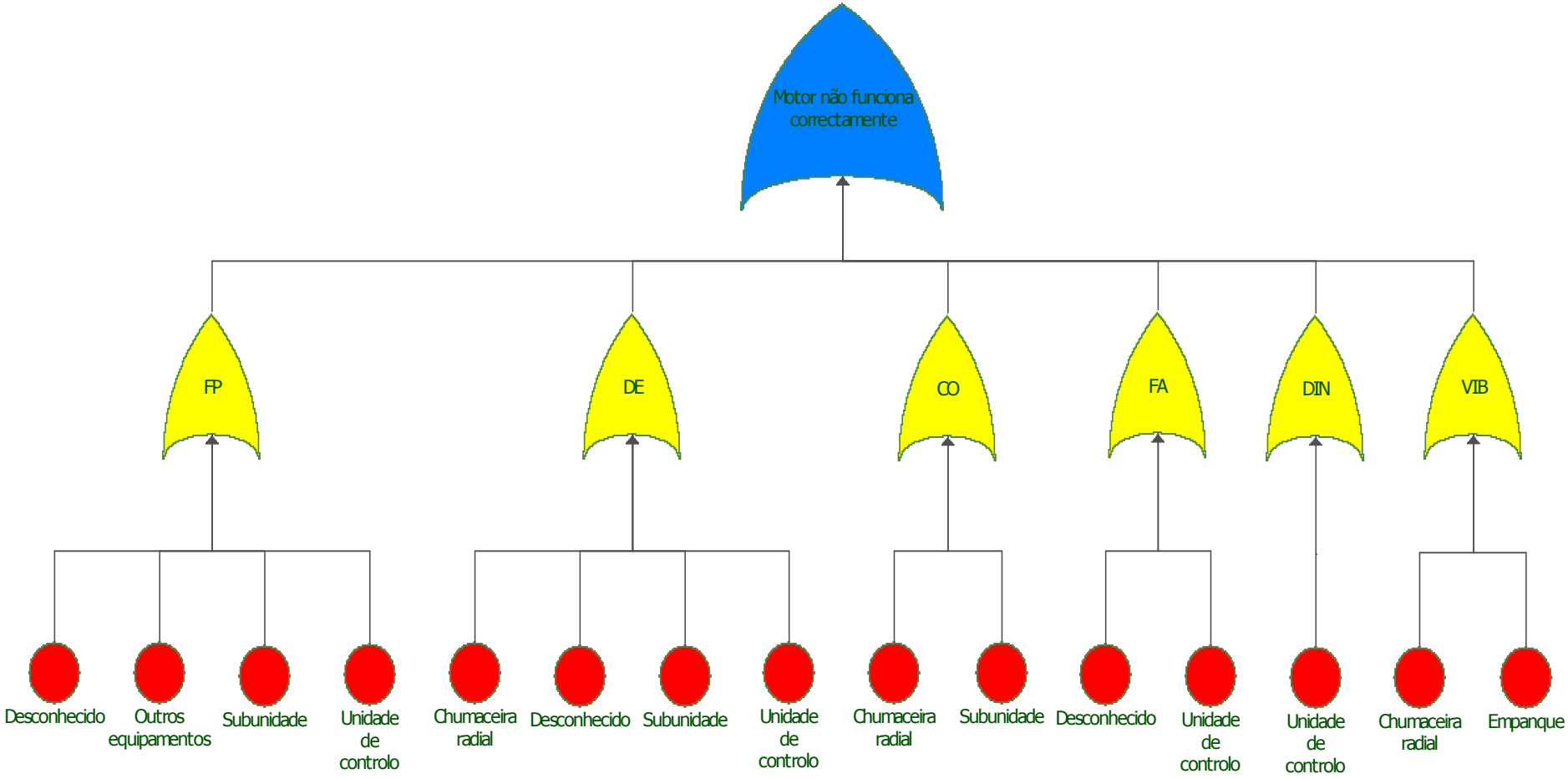


Figura 57 - Árvore de falha das Motores eléctricos - Bombas - Processamento do produto (componente crítico).

Motores eléctricos – Compressores – Processamento de gás

Todos os equipamentos

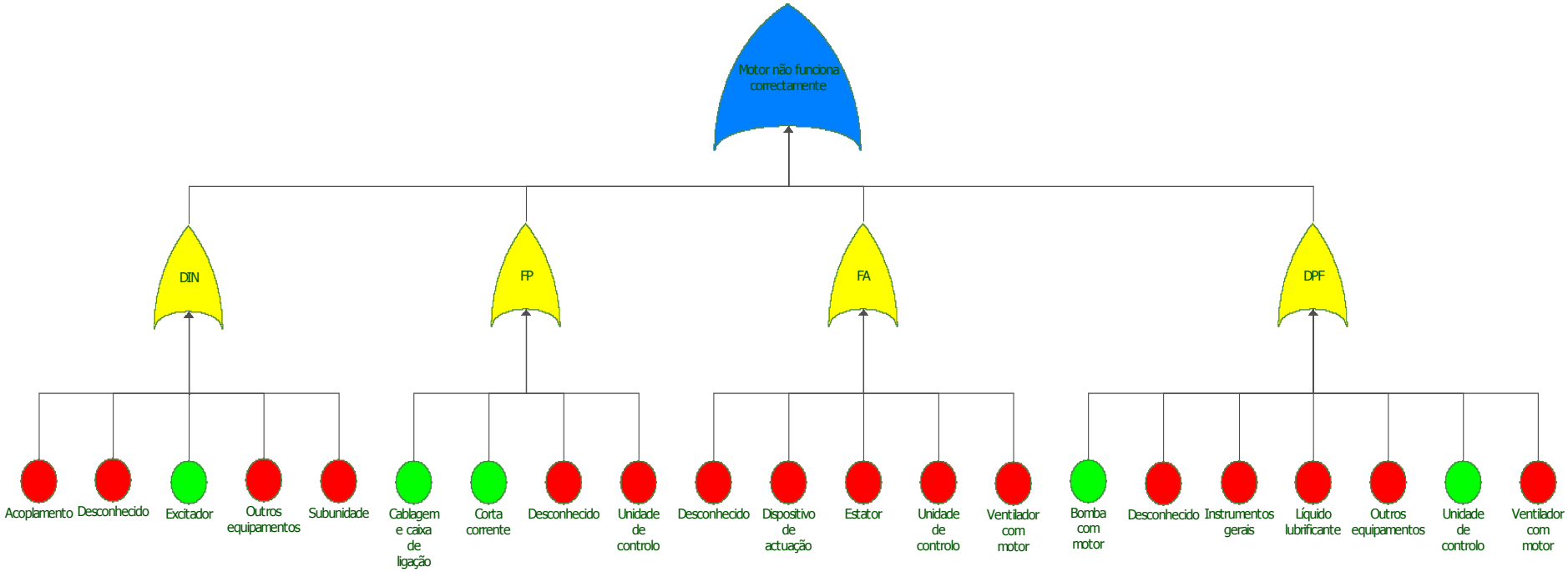


Figura 58 - Árvore de falha das Motores eléctricos - Compressores - Processamento de gás.

Com os equipamentos críticos

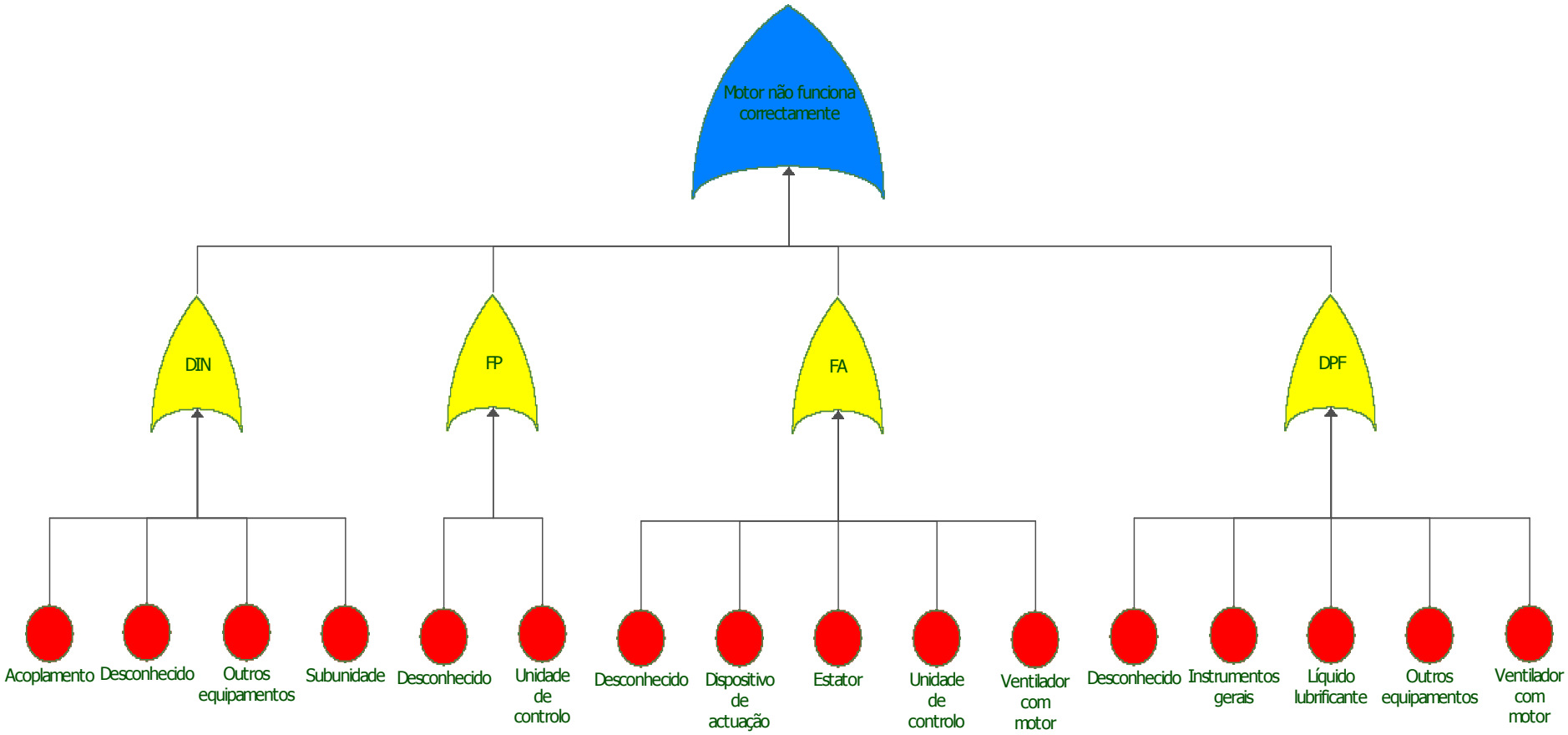


Figura 59 - Árvore de falha das Motores eléctricos - Compressores - Processamento de gás (componentes críticos).

Turbinas a gás – Industrial (0 a 1000 kW)

Todos os equipamentos

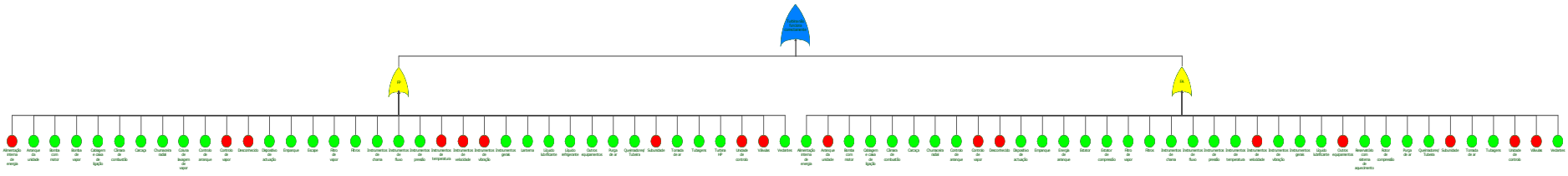


Figura 60 - Árvore de falha das Turbina a gás - Industrial (0 a 1000 kW).

Com os equipamentos críticos

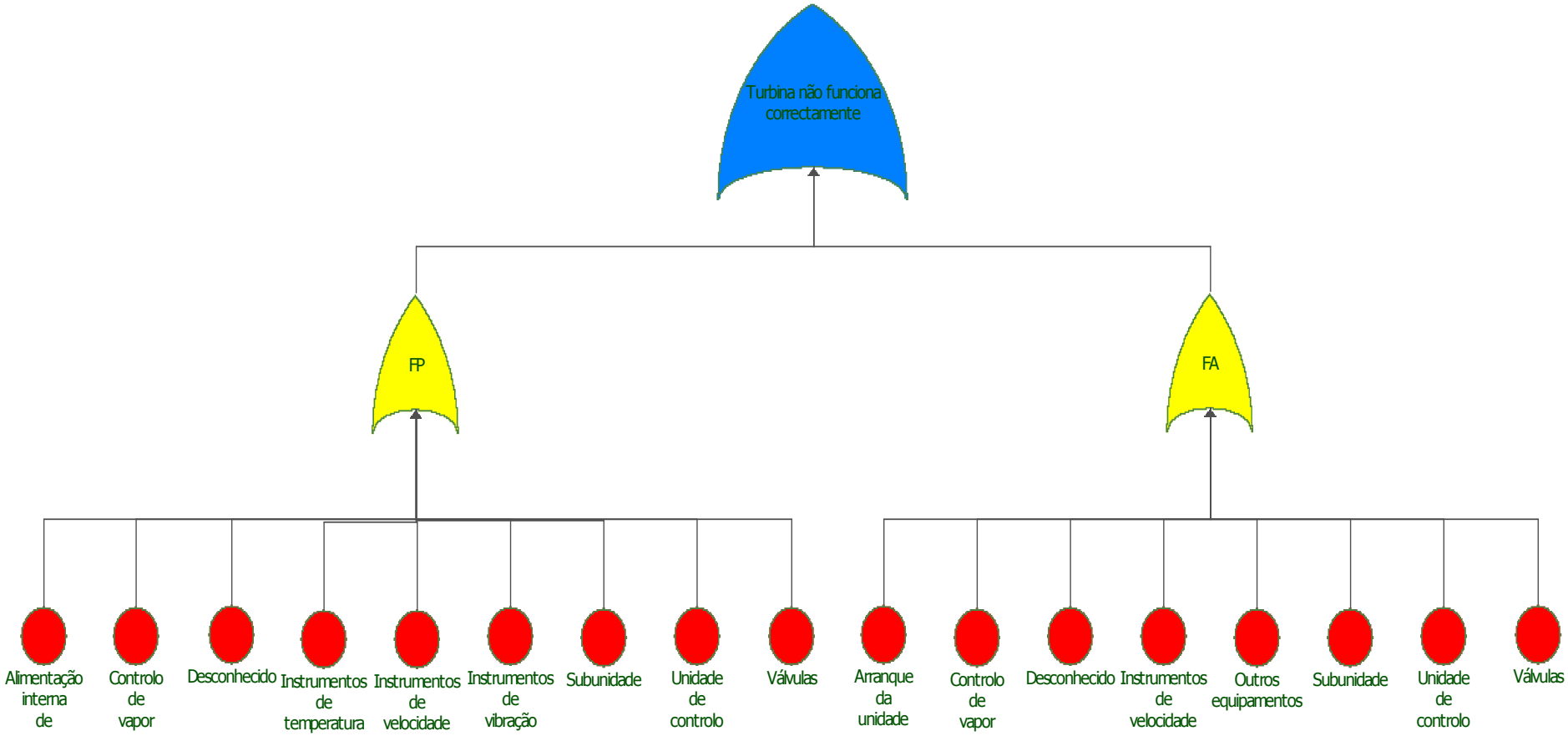


Figura 61 - Árvore de falha das Turbina a gás - Industrial (0 a 1000 kW) (componentes críticos).

Anexo XIII – Folhas HAZOP

Tabela 60 - Folha HAZOP das bombas centrífugas.

Equipamento	Variável	Palavra chave	Consequência	Causa	Recomendações
Bomba centrífuga	Débito	Baixo	A bomba debita pouco caudal, logo a produção diminui	Bomba e tubagens completamente cheias de ar	Encher de líquido a tubagem de aspiração acima da válvula de pé
					Abrir os *vents* da purga de ar no lado de descarga da bomba e deixá-los abertos até que todo o ar tenha sido expulso da tubagem
					Eliminar todos os pontos altos situados na zona de aspiração
				Altura de aspiração demasiada elevada	Utilizar um hidroejector auxiliar
					Verificar essa altura montando um manómetro de vácuo sobre a aspiração da bomba se ela ultrapassar essa medida é aconselhável aproximar mais a bomba do nível do líquido ou elevar mais este último
				NHSP requerido demasiado elevado	Elevar o reservatório de alimentação ou baixar a posição da bomba
					Arrefecer o líquido antes de ser aspirado pela bomba
					Pressurizar o reservatório ou a câmara intermédia
					Usar uma bomba auxiliar que aumente a pressão do líquido
				Bolsas de ar na tubagem de aspiração	Seguir os passos a realizar quando a bomba não está ferrada
					Instalar uma câmara de separação de gases
				Entrada de ar na tubagem de aspiração	Desligar a linha de aspiração e ensaiar para investigar fugas
					Todas as juntas serão examinadas e reapertadas para evitar a entrada de ar
					Utilizar um bom produto de vedação nas ligações
					Comprovar todas as uniões estão bem atarrachadas
				Entrada de ar pelos empanques	Substituir os empanques
					Utilizar líquido de selagem se necessário
				Válvula de pé origina demasiada perda de carga	Desmontar, inspeccionar e limpar convenientemente
				Velocidade de rotação insuficiente	Baixar se possível a extremidade do tubo dentro do líquido
					Aumentar a profundidade do reservatório de aspiração
				Viscosidade do líquido diferente do que era previsto	Pode ser corrigida com aquecimento do tubo de aspiração
					Aumentar o diâmetro da tubagem da descarga para reduzir a perda de pressão
					Mudar o tipo de bomba
					Abrandar a bomba

Equipamento	Variável	Palavra chave	Consequência	Causa	Recomendações
Bomba centrífuga	Débito	Baixo	A bomba debita pouco caudal, logo a produção diminui	Canais do impulsor entupido	Efectuar a limpeza dos canais, desembaraçando-a da ferrugem, deposições sólidas e outras obstruções
				Anéis de desgaste demasiado usados e gastos	Proceder à sua substituição
				Roda ou impulsor danificados	Desmontar, inspeccionar e substituir se necessário
				Juntas do corpo deterioradas	Proceder à sua substituição
				Fugas internas entre a aspiração e a descarga	Reapertar as flanges das tubagens
					Substituir as juntas defeituosas
		Nenhum	A bomba não funciona	Não está ferrada	Encher de líquido a tubagem de aspiração acima da válvula de pé
					Abrir os *vents* da purga de ar no lado de descarga da bomba e deixá-los abertos até que todo o ar tenha sido expulso da tubagem
					Eliminar todos os pontos altos situados na zona de aspiração
				Altura de aspiração demasiada elevada	Utilizar um hidroejector auxiliar
					Verificar essa altura montando um manómetro de vácuo sobre a aspiração da bomba se ela ultrapassar essa medida é aconselhável aproximar mais a bomba do nível do líquido ou elevar mais este último
				NHSP requerido demasiado elevado	Elevar o reservatório de alimentação ou baixar a posição da bomba
					Arrefecer o líquido antes de ser aspirado pela bomba
					Pressurizar o reservatório ou a câmara intermédia
					Usar uma bomba auxiliar que aumente a pressão do líquido
				Bolsas de ar na tubagem de aspiração	Seguir os passos a realizar quando a bomba não está ferrada
					Instalar uma câmara de separação de gases
				Velocidade de rotação insuficiente	Baixar se possível a extremidade do tubo dentro do líquido
					Aumentar a profundidade do reservatório de aspiração
				Roda em sentido contrário	Refazer as ligações eléctricas do motor
				Canais do impulsor entupido	Efectuar a limpeza dos canais, desembaraçando-a da ferrugem, deposições sólidas e outras obstruções
				Válvulas de pé suja ou avariada	Desmontar, inspeccionar e limpar convenientemente

Equipamento	Variável	Palavra chave	Consequência	Causa	Recomendações
Bomba centrífuga	Potência	Elevada	A bomba absorve potência excessiva	Velocidade de rotação demasiado elevada	Verificar a frequência e a tensão de corrente
					Se a máquina de accionamento for uma turbina verificar o sistema de regulação de velocidade e as características do vapor
					Se a bomba é ligada a uma caixa de engrenagens verificar que a desmultiplicação é a correcta
					Verificar o cálculo dos diâmetros dos tambores para o caso da bomba ser associada por uma transmissão de correia
				Roda em sentido contrário	Refazer as ligações eléctricas do motor
				NHSP requerido demasiado elevado	Elevar o reservatório de alimentação ou baixar a posição da bomba
					Arrefecer o líquido antes de ser aspirado pela bomba
					Pressurizar o reservatório ou a câmara intermédia
					Usar uma bomba auxiliar que aumente a pressão do líquido
				O peso específico do líquido diferente do previsto	Mudar o líquido ou mudar as componentes que não se adaptam ao líquido
				Viscosidade do líquido diferente do que era previsto	Pode ser corrigida com aquecimento do tubo de aspiração
					Aumentar o diâmetro da tubagem da descarga para reduzir a perda de pressão
					Mudar o tipo de bomba
					Abrandar a bomba
				Canais do impulsor entupido	Efectuar a limpeza dos canais, desembaraçando-a da ferrugem, deposições sólidas e outras obstruções
				Alinhamento no acoplamento deficiente	Verificar o alinhamento da bomba de forma recomendável pelo fabricante
					Se as tubagens transmitirem esforços ao corpo da bomba desapertar e desligar as flanges
					Dispor e suportar os tubos de forma que não sejam transmitidos esforços
					Em último caso utilizar juntas de dilatação entre a tubagem e a bomba
				Veio empenado ou caixa de empanque mal montada	Desmontar, inspeccionar e substituir se necessário
				Anéis de desgaste demasiado pesados	Substituir por uns mais leves, mas que satisfaçam os requisitos
				Os materiais do empanque não correspondem às condições de utilização	Substituir por materiais que correspondam às condições de utilização previstas
				Empanques demasiado apertados	Desapertar por igual os bucins
					Se os cursos se mantiverem curtos verificar os segmentos do êmbolo do produto

Equipamento	Variável	Palavra chave	Consequência	Causa	Recomendações
Bomba centrífuga	Fuga	Elevada	Fuga em excesso através do empanque	Veio empenado ou caixa de empanque mal montada	Desmontar, inspeccionar e substituir se necessário
				Alinhamento no acoplamento deficiente	Verificar o alinhamento da bomba de forma recomendável pelo fabricante
					Se as tubagens transmitirem esforços ao corpo da bomba desapertar e desligar as flanges
					Dispor e suportar os tubos de forma que não sejam transmitidos esforços
					Em último caso utilizar juntas de dilatação entre a tubagem e a bomba
				Veio, camisas do veio ou empanques desgastados	Desmontar, inspeccionar e substituir se necessário
				Empanques demasiado apertados	Desapertar por igual os bucins
					Se os cursos se mantiverem curtos verificar os segmentos do êmbolo do produto
				Os materiais dos elementos de vedação não correspondem às condições de utilização	Substituir por materiais que correspondam às condições de utilização previstas
				Veio descentrado devido ao desgaste irregular dos bronzes das chumaceiras ou por defeito do alinhamento	Desmontar, inspeccionar e substituir se necessário
					Verificar o alinhamento da bomba de forma recomendável pelo fabricante
					Se as tubagens transmitirem esforços ao corpo da bomba desapertar e desligar as flanges
					Dispor e suportar os tubos de forma que não sejam transmitidos esforços
					Em último caso utilizar juntas de dilatação entre a tubagem e a bomba
				Rotor mal equilibrado	Proceder à equilibragem do conjunto rotativo
				Diminuição ou interrupção da alimentação da água de arrefecimento das caixas de empanque	Substituição do anel de vedação
				Corpos ou substâncias abrasivas desgastando os bronzes ou rolamentos	Desmontar, inspeccionar, limpar e substituir se necessário
				Lubrificação deficiente	Examinar os níveis de óleo
					Assegurar-se que o líquido penetra bem em todas as peças a lubrificar
					Verificar que um programa de lubrificação regular tem sido seguido e que todas as peças estão sempre bem lubrificadas
					Assegurar-se que a qualidade do óleo é a apropriada

Equipamento	Variável	Palavra chave	Consequência	Causa	Recomendações
Bomba centrífuga	Desgaste	Elevado	Elementos de vedação do empanque com desgaste excessivo, desgaste exagerado nas chumaceiras	Entrada de água de um empanque sob pressão entupido	Substituição do anel de vedação
				Entrada de água no líquido de lubrificação	Desmontar, inspeccionar e substituir se necessário as juntas de vedação
				Veio empenado ou caixa de empanque mal montada	Desmontar, inspeccionar e substituir se necessário
				Alinhamento no acoplamento deficiente	Verificar o alinhamento da bomba de forma recomendável pelo fabricante
					Se as tubagens transmitirem esforços ao corpo da bomba desapertar e desligar as flanges
					Dispor e suportar os tubos de forma que não sejam transmitidos esforços
					Em último caso utilizar juntas de dilatação entre a tubagem e a bomba
				Corpos ou substâncias abrasivas desgastando os bronzes ou rolamentos	Desmontar, inspeccionar e substituir se necessário
				Vedação dos empanques demasiado apertados	Desapertar por igual os bucins
					Se os cursos se mantiverem curtos verificar os segmentos do êmbolo do produto
				O tipo de vedantes do empanque não correspondem às condições de utilização	Substituir por materiais que correspondam às condições de utilização previstas
				Veio descentrado devido ao desgaste irregular dos bronzes das chumaceiras ou por defeito do alinhamento	Desmontar, inspeccionar e substituir se necessário
					Verificar o alinhamento da bomba de forma recomendável pelo fabricante
					Se as tubagens transmitirem esforços ao corpo da bomba desapertar e desligar as flanges
					Dispor e suportar os tubos de forma que não sejam transmitidos esforços
					Em último caso utilizar juntas de dilatação entre a tubagem e a bomba
				Rotor mal equilibrado	Proceder à equilibragem do conjunto rotativo
				Empanques demasiado apertados	Desapertar por igual os bucins
					Se os cursos se mantiverem curtos verificar os segmentos do êmbolo do produto
				Diminuição ou interrupção da alimentação da água de arrefecimento das caixas de empanque	Substituição do anel de vedação
				Desgaste excessivo na caixa de empanque	Desmontar, inspeccionar e substituir se necessário

Equipamento	Variável	Palavra chave	Consequência	Causa	Recomendações
Bomba centrífuga	Desgaste	Elevado	Elementos de vedação do empanque com desgaste excessivo, desgaste exagerado nas chumaceiras	Impulso axial excessivo	Desmontar, inspeccionar e substituir as peças necessárias
					Verificar o dispositivo de equilibragem
				Excesso de massa de óleo nas chumaceiras ou ausência de arrefecimento provocando aquecimento excessivo	Examinar os níveis de óleo
					Assegurar-se que o líquido penetra bem em todas as peças a lubrificar
					Verificar que um programa de lubrificação regular tem sido seguido e que todas as peças estão sempre bem lubrificadas
					Assegurar-se que a qualidade do óleo é a apropriada
					Substituição do anel de vedação
				Oxidação dos bronzes	Desmontar, inspeccionar e substituir se necessário
				Arrefecimento excessivo do corpo das chumaceiras	
	Vibração e Ruído	Elevado	A bomba vibra ou é ruidosa	Bomba e tubagens completamente cheias de ar	Encher de líquido a tubagem de aspiração acima da válvula de pé
					Abrir os *vents* da purga de ar no lado de descarga da bomba e deixá-los abertos até que todo o ar tenha sido expulso da tubagem
					Eliminar todos os pontos altos situados na zona de aspiração
				Altura de aspiração demasiada elevada	Utilizar um hidroejector auxiliar
					Verificar essa altura montando um manómetro de vácuo sobre a aspiração da bomba se ela ultrapassar essa medida é aconselhável aproximar mais a bomba do nível do líquido ou elevar mais este último
				NHSP requerido demasiado elevado	Elevar o reservatório de alimentação ou baixar a posição da bomba
					Arrefecer o líquido antes de ser aspirado pela bomba
					Pressurizar o reservatório ou a câmara intermédia
					Usar uma bomba auxiliar que aumente a pressão do líquido
				Válvula de pé muito pequena ou originando demasiada perda de carga	Substituir por uma conveniente
					Desmontar, inspeccionar e limpar convenientemente
				Válvulas de pé suja ou avariada	Desmontar, inspeccionar e limpar convenientemente
				Orifício da tubagem de aspiração insuficientemente submerso	Desligar a linha de aspiração e ensaiar para investigar fugas
					Todas as juntas serão examinadas e reapertadas para evitar a entrada de ar
					Utilizar um bom produto de vedação nas ligações
					Comprovar todas as uniões estão bem atarrachadas
				O débito pedido à bomba é demasiado baixo	
				Canais do impulsor entupido	Efectuar a limpeza dos canais, desembaraçando-a da ferrugem, deposições sólidas e outras obstruções

Equipamento	Variável	Palavra chave	Consequência	Causa	Recomendações
Bomba centrífuga	Vibração e Ruído	Elevado	A bomba vibra ou é ruidosa	Alinhamento no acoplamento deficiente	Verificar o alinhamento da bomba de forma recomendável pelo fabricante
					Se as tubagens transmitirem esforços ao corpo da bomba desapertar e desligar as flanges
					Dispor e suportar os tubos de forma que não sejam transmitidos esforços
					Em último caso utilizar juntas de dilatação entre a tubagem e a bomba
				Base ou maciço insuficientemente rígido	Substituir por um com rigidez suficiente
				Corpos ou substâncias abrasivas desgastando os bronzes ou rolamentos	Desmontar, inspeccionar e substituir se necessário
				Impulsor danificados	Desmontar, inspeccionar e substituir se necessário
				Veio descentrado devido ao desgaste irregular dos bronzes das chumaceiras ou por defeito do alinhamento	Desmontar, inspeccionar e substituir se necessário
					Verificar o alinhamento da bomba de forma recomendável pelo fabricante
					Se as tubagens transmitirem esforços ao corpo da bomba desapertar e desligar as flanges
					Dispor e suportar os tubos de forma que não sejam transmitidos esforços
					Em último caso utilizar juntas de dilatação entre a tubagem e a bomba
				Rotor mal equilibrado	Proceder à equilibragem do conjunto rotativo
				Impulso axial excessivo	Desmontar, inspeccionar e substituir as peças necessárias
					Verificar o dispositivo de equilibragem
				Excesso de massa de óleo nas chumaceiras ou ausência de arrefecimento provocando aquecimento excessivo	Examinar os níveis de óleo
					Assegurar-se que o líquido penetra bem em todas as peças a lubrificar
					Verificar que um programa de lubrificação regular tem sido seguido e que todas as peças estão sempre bem lubrificadas
					Assegurar-se que a qualidade do óleo é a apropriada
					Substituição do anel de vedação
				Oxidação dos bronzes	Desmontar, inspeccionar e substituir se necessário
				Arrefecimento excessivo do corpo das chumaceiras	

Equipamento	Variável	Palavra chave	Consequência	Causa	Recomendações
Bomba centrífuga	Temperatura	Elevada	Aquecimento exagerado da bomba	Não está ferrada	Encher de líquido a tubagem de aspiração acima da válvula de pé
					Abrir os *vents* da purga de ar no lado de descarga da bomba e deixá-los abertos até que todo o ar tenha sido expulso da tubagem
					Eliminar todos os pontos altos situados na zona de aspiração
				NHSP requerido demasiado elevado	Elevar o reservatório de alimentação ou baixar a posição da bomba
					Arrefecer o líquido antes de ser aspirado pela bomba
					Pressurizar o reservatório ou a câmara intermédia
					Usar uma bomba auxiliar que aumente a pressão do líquido
				O débito pedido à bomba é demasiado baixo	
				Alinhamento no acoplamento deficiente	Verificar o alinhamento da bomba de forma recomendável pelo fabricante
					Se as tubagens transmitirem esforços ao corpo da bomba desapertar e desligar as flanges
					Dispor e suportar os tubos de forma que não sejam transmitidos esforços
					Em último caso utilizar juntas de dilatação entre a tubagem e a bomba
				Bronzes muito gastos ou rolamentos gripados	Desmontar, inspeccionar e substituir se necessário
				Veio descentrado devido ao desgaste irregular dos bronzes das chumaceiras ou por defeito do alinhamento	Desmontar, inspeccionar e substituir se necessário
					Verificar o alinhamento da bomba de forma recomendável pelo fabricante
					Se as tubagens transmitirem esforços ao corpo da bomba desapertar e desligar as flanges
					Dispor e suportar os tubos de forma que não sejam transmitidos esforços
					Em último caso utilizar juntas de dilatação entre a tubagem e a bomba
				Rotor mal equilibrado	Proceder à equilibragem do conjunto rotativo
				Impulso axial excessivo	Desmontar, inspeccionar e substituir as peças necessárias
					Verificar o dispositivo de equilibragem

Equipamento	Variável	Palavra chave	Consequência	Causa		Recomendações
Bomba centrífuga	Arranque	Outro	A bomba recusa-se a arrancar	Defeitos nas ligações eléctricas		Refazer as ligações eléctricas
				Atrito excecivo no empanque	Óleo demasiado viscoso	Mudar o óleo utilizado
					Empeno do tubo de protecção do veio	Desmontar, inspeccionar e substituir se necessário
					Chumaceiras secas	Examinar os níveis de óleo
						Verificar que um programa de lubrificação regular tem sido seguido e que todas as peças estão sempre bem lubrificadas
					Veio empenado	Desmontar, inspeccionar e substituir se necessário
					Chumaceiras mal alinhadas	Inspeccionar, corrigir e substituir se necessário
				Montagem deficiente dos impulsores		Desmontar, inspeccionar e substituir se necessário
				Rotor gripado	Bloqueio do impulsor por areia	Efectuar a limpeza, desembaraçando-a de ferrugem, deposições sólidas e outras obstruções
					Bloqueio do rotor por oxidação ou por desenvolvimento de aglomerados de depósitos estranhos	Desmontar, inspeccionar, limpar e substituir as peças necessárias
					Obstrução de corpos estranhos	Desmontar, inspeccionar e substituir se necessário
				Empanques demasiado apertados		Desapertar por igual os bucins
						Se os cursos se mantiverem curtos verificar os segmentos do êmbolo do produto
				Outras causas	Líquido congelado	Mudar o líquido se possível
						Fazer um aquecimento nas zonas críticas
					O poço sofreu um deslocamento de terras	Inspeccionar, limpar e reparar reforçando o poço

Tabela 61 - Folha HAZOP dos compressores alternativos.

Equipamento	Variável	Palavra chave	Consequência	Causa	
Compressores alternativos	Ruído e vibração	Elevado	Barulhos e vibração no compressor	Pancadas	Perda da porca da haste do pistão
					Perda do pistão
					Folga da cabeça muito pequena
					Folga no rolamento muito elevada
					Perda do volante ou polia
					Folga na cabeça da haste muito elevada
					Lubrificação inadequada do cilindro
					Lubrificação inadequada da armação
					Especificações incorrectas do óleo lubrificante
					Ligação à base inadequada
					Pressão de descarga muito elevada
				Vibração	Sistema de descarga de baixa pressão defeituosao
					Perda do volante ou polia
					Lubrificação inadequada do cilindro
					Ligação à base inadequada
					Suporte das tubagens inadequado
					Pressão de descarga muito elevada
					Velocidade incorrecta
	Pressão	Elevada	Pressão muito elevada	Descarga	Sistema de descarga de baixa pressão defeituoso
					Pressão de descarga muito elevada
				Inter-Cooler	Válvulas de alta pressão desgastadas ou partidas
					Sistema de descarga de alta pressão defeituoso
					Anel do segmento de alta pressão desgastado
					Inter-Cooler incrustado
		Baixa	Pressão insuficiente	Descarga	Válvulas de baixa pressão desgastadas ou partidas
					Sistema de descarga de baixa pressão defeituoso
					Anel do segmento de baixa pressão desgastado
					Sistema de fuga excessivo
					Sistema de comando excede a capacidade do compressor
					Velocidade incorrecta
				Inter-Cooler	Válvulas de baixa pressão desgastadas ou partidas
					Sistema de descarga de baixa pressão defeituoso
					Anel do segmento de baixa pressão desgastado
					Filtro de sucção sujo ou defeituoso
					Linha de sucção restrita

Equipamento	Variável	Palavra chave	Consequência	Causa	
Compressores alternativos	Temperatura	Elevada	Sobreaquecimento	Descarga	Válvulas de baixa pressão desgastadas ou partidas
					Sistema de descarga de baixa pressão defeituoso
					Quantidade de água de arrefecimento insuficiente
					Lubrificação inadequada do cilindro
					Especificações incorrectas do óleo lubrificante
					Pressão de descarga muito elevada
					Inter-Cooler incrustado
					Camisa de arrefecimento do cilindro incrustada
				Água do refrigerador	Válvulas de baixa pressão desgastadas ou partidas
					Sistema de descarga de baixa pressão defeituoso
					Quantidade de água de arrefecimento insuficiente
					Pressão de descarga muito elevada
					Inter-Cooler incrustado
					Camisa de arrefecimento do cilindro incrustada
				Válvulas	Válvulas de baixa pressão desgastadas ou partidas
					Sistema de descarga de baixa pressão defeituoso
					Pressão de descarga muito elevada
					Tempo de descarga demasiado longo
				Cilindro	Válvulas de baixa pressão desgastadas ou partidas
					Sistema de descarga de baixa pressão defeituoso
					Quantidade de água de arrefecimento insuficiente
					Lubrificação inadequada do cilindro
					Especificações incorrectas do óleo lubrificante
					Pressão de descarga muito elevada
					Camisa de arrefecimento do cilindro incrustada
					Velocidade incorrecta
				Armação	Lubrificação inadequada da armação
					Pressão de descarga muito elevada
					Velocidade incorrecta
	Escoamento	Baixo	Perda de capicidade	Válvulas de baixa pressão desgastadas ou partidas	
				Sistema de descarga de baixa pressão defeituoso	
				Anel do segmento de baixa pressão desgastado	
				Filtro de sucção sujo ou defeituoso	
				Linha de sucção restrita	
				Sistema de fuga excessivo	
				Velocidade incorrecta	

Equipamento	Variável	Palavra chave	Consequência	Causa
Compressores alternativos	Inspecção	Outras	Deposito de carbono anormal	Válvulas de baixa pressão desgastadas ou partidas
				Sistema de descarga de baixa pressão defeituoso
				Anel do segmento de baixa pressão desgastado
				Lubrificação excessiva no cilindro
				Especificações incorrectas do óleo lubrificante
				Filtro de sucção sujo ou defeituoso
				Pressão de descarga muito elevada
				Temperatura de descarga muito elevada
				Inter-Cooler incrustado
				Camisa de arrefecimento do cilindro incrustada
				Velocidade incorrecta
			Anel do segmento do cilindro desgastado	Anel do segmento de baixa pressão desgastado
				Lubrificação inadequada do cilindro
				Especificações incorrectas do óleo lubrificante
				Filtro de sucção sujo ou defeituoso
				Líquido arrastado
				Produtos dentro do cilindro criam sujidade ou corrosão
			Válvulas gastas ou partidas	Válvulas de baixa pressão desgastadas ou partidas
				Sistema de descarga de baixa pressão defeituoso
				Lubrificação inadequada do cilindro
				Lubrificação excessiva no cilindro
				Especificações incorrectas do óleo lubrificante
				Pulsassões ressonantes na sucção e descarga
				Filtro de sucção sujo ou defeituoso
				Líquido arrastado
				Produtos dentro do cilindro criam sujidade ou corrosão

Tabela 62 - Folha HAZOP dos motores eléctricos.

Equipamento	Variável	Palavra chave	Consequência	Causa	Recomendações
Motores eléctricos	Arranque	Outros	Não arranca	Problemas na linha, desengate da descarga, perda das conexões	Verificar saída do alimentador de potência
				Circuito aberto, cuto-circuito ou perda da bobinagem	Procurar circuitos abertos e a terra
				Pouca potência, linha imprópria de potência	Verificar nome na chapa do motor
					Verificar tamanho do fio de cobre
				Curto-circuito na bombagem do estator	Verificar o isolamento na resistência
				Terra na bobinagem do estator	Procurar a terra
				Entravancamento	Desligar o motor de carga
					Verificar o movimento solitário do motor
				Sobrecarga	Reduzir a carga
					Utilizar um motor mais potente
			Arranque em sentido contrário	Sequencia de fase invertida	Trocar duas linhas de ligação ao motor
	Ruído	Elevado	Barulho excessivo	Motor monofásico para uma máquina trifásica	Parar
					Arrancar de novo
					Não arrancar
				Descompensação da carga entre as fases	Verificar apenas com uma fase
					Verificar novamente com as três fases
				Desigual passagem de ar	Centragem do motor
					Substituir rolamentos se necessário
				Perda de partes ou perda do rotor no veio	Reparar
				Borracha do rotor colou no estator ou veio encurvado	Verificar o alinhamento do veio
					Substituir rolamentos
				Motor inclinado	Verificar o nivelamento e alinhar se necessário
				Perda do acoplamento	Verificar alinhamento
					Refazer o acoplamento
				Motor perdeu a base	Verificar os parafusos de ligação à base
					Verificar a base
				Rolamentos de esfera barulhentos	Verificar a lubrificação
					Substituir rolamentos
				Colocação incorrecta do rolamento de esferas	Substituir
				Desgaste do rolamento de esferas	Substituir

Equipamento	Variável	Palavra chave	Consequência	Causa	Recomendações
Motores eléctricos	Ruído	Elevado	Pancadas rápidas	Motor inclinado	Verificar o nivelamento e alinhar se necessário
				Desalinhamento ou excessiva vibração	Alinhar
					Verificar a flutuação limite do acoplamento
	Tensão	Nenhuma	Falha de tensão – sincronismo do motor	Não há excitação do campo eléctrico	Verificar o campo do contactor
					Conectar a saída
				Sobrecarga	Reduzir a carga
					Utilizar um motor mais potente
				Motor perdeu a base	Verificar os parafusos de ligação à base
					Verificar a base
				Óleo insuficiente	Verificar nível
					Repor a quantidade do óleo aceitável
	Velocidade	Baixa	Não aumenta a velocidade - sincronismo do motor	Problemas na linha, desengate da descarga, perda das conexões	Verificar saída do alimentador de potência
				Circuito aberto, cuto-circuito ou perda da bobinagem	Procurar circuitos abertos e a terra
				Sobrecarga	Reduzir a carga
					Utilizar um motor mais potente
	Temperatura	Elevada	Sobreaquecimento	Descompensação da carga entre as fases	Verificar apenas com uma fase
					Verificar novamente com as três fases
				Pouca potência, linha imprópria de potência	Verificar nome na chapa do motor
					Verificar tamanho do fio de cobre
				Curto-circuito na bombagem do estator	Verificar o isolamento na resistência
				Terra na bobinagem do estator	Procurar a terra
				Materias estranhas na passagem de ar	Limpar motor
				Borracha do rotor colou no estator ou veio encurvado	Verificar o alinhamento do veio
					Substituir rolamentos
				Ventilação restrita	Inspeccionar interior do motor à procura de sujidade
				Entravancamento	Desligar o motor de carga
					Verificar o movimento solitário do motor
				Sobrecarga	Reduzir a carga
					Utilizar um motor mais potente

Equipamento	Variável	Palavra chave	Consequência	Causa	Recomendações
Motores eléctricos	Temperatura	Elevada	Aquecimento do empanque	Motor inclinado	Verificar o nivelamento e alinhar se necessário
				Desalinhamento ou excessiva vibração	Alinhar
					Verificar a flutuação limite do acoplamento
				Óleo insuficiente	Verificar nível
					Repor a quantidade do óleo aceitável
				Qualidade do óleo errada	Usar o óleo recomendado
				Óleo contaminado	Drenar óleo
					Lubrificar novamente
					Assegurar que o novo óleo está limpo
				Anel do óleo não roda	Óleo demasiado espesso
					Procurar por rebarbas
			Aquecimento dos rolamentos anti-fricção	Borracha do rotor colou no estator ou veio encurvado	Verificar o alinhamento do veio
					Substituir rolamentos
				Desalinhamento ou excessiva vibração	Alinhar
					Verificar a flutuação limite do acoplamento
				Colocação incorrecta do rolamento de esferas	Substituir
				Desgaste do rolamento de esferas	Substituir
				Óleo insuficiente	Verificar nível
					Repor a quantidade do óleo aceitável
				Qualidade do óleo errada	Usar o óleo recomendado
				Óleo contaminado	Drenar óleo
					Lubrificar novamente
					Assegurar que o novo óleo está limpo
				Demasiado massa de óleo	Remover excesso de massa de óleo
				Insuficiente massa de óleo	Adicionar a quantidade de massa de óleo desejada
				Qualidade da massa de óleo errada	Usar a massa óleo recomendado
				Massa de óleo contaminada	Lubrificar novamente
					Assegurar que a nova massa de óleo está limpar
			Aquecimento dos rolamentos em geral	Colocação incorrecta do rolamento de esferas	Substituir
				Desgaste do rolamento de esferas	Substituir
				Óleo insuficiente	Verificar nível
					Repor a quantidade do óleo aceitável
				Qualidade do óleo errada	Usar o óleo recomendado
				Óleo contaminado	Drenar óleo
					Lubrificar novamente
					Assegurar que o novo óleo está limpo

Equipamento	Variável	Palavra chave	Consequência	Causa	Recomendações
Motores eléctricos	Temperatura	Elevada	Aquecimento dos rolamentos em geral	Anel do óleo não roda	Óleo demasiado espesso
					Procurar por rebarbas
				Demasiado massa de óleo	Remover excesso de massa de óleo
				Insuficiente massa de óleo	Adicionar a quantidade de massa de óleo desejada
				Qualidade da massa de óleo errada	Usar a massa óleo recomendado
				Massa de óleo contaminada	Lubrificar novamente
					Assegurar que a nova massa de óleo está limpar
	Vibração	Elevada	Vibrações	Descompensação no rotor	Verificar elementos mecânicos
					Equilibragem do conjunto rotativo
				Perda de partes ou perda do rotor no veio	Reparar

Tabela 63 - Folha HAZOP das turbinas a gás.

Equipamento	Variável	Palavra chave	Consequência	Causa
Turbina a gás	Potência	Baixa	Potência insuficiente	Pressão ou temperatura de admissão demasiado baixa
				Contra-pressão de escape demasiado elevada
				Alavancas de regulação mal ajustadas ou frouxas
				Regulador regulado demasiado baixo
				Guia da válvula de regulação defeituosa
				Alhetas corroídas ou entupidas com deposição de partículas estranhas
	Velocidade	Baixa	Velocidade deficiente	Pressão ou temperatura de admissão demasiado baixa
				Contra-pressão de escape demasiado elevada
				Alavancas de regulação mal ajustadas ou frouxas
				Guia da válvula de regulação defeituosa
				Alhetas corroídas ou entupidas com deposição de partículas estranhas
		Elevada	Dispositivos de sobrevelocidade	Alavancas de regulação mal ajustadas ou frouxas
				Regulador mal ajustado
				Limitador de sobrevelocidade mal ajustado
				Golpe de ariete no vapor
				Fuga na válvula de regulação
				Regulador mal regulado (não deixa fechar bem)
				Válvulas de regulação coladas
				Vibrações
				Pulsassão ou bombagem do regulador
	Vibração	Elevada	Pulsações do regulador	Alavancas de regulação mal ajustadas ou frouxas
				Guia da válvula de regulação defeituosa
				Fuga na válvula de regulação
				Válvulas de regulação coladas
				Alavancas e hastes do regulador desgastadas
			Vibrações anormais	Acoplamento desalinhado
				Acoplamento desgastado ou com falta de óleo
				Alhetas corroídas ou entupidas com deposição de partículas estranhas
				Lubrificação deficiente
				Rotor empenado
				Rodas soltas por sobrevelocidade

Equipamento	Variável	Palavra chave	Consequência	Causa
Turbina a gás	Vibração	Elevada	Vibrações anormais	Rotor desequilibrado (sujidade ou corrosão)
				Contusão ou mossas na chumaceira
				Empanques de carbono demasiado apertados
				Choques internos
				Entupimentos por água no vapor
				Esforços excessivos provocados pela tubagem
				Veio do regulador desalinhado
				Chumaceira ou rolamento do impulso desgastado
	Temperatura	Elevada	Temperatura excessiva nas chumaceiras	Lubrificação deficiente
				Óleo sujo
				Água de arrefecimento insuficiente ou quente
				Perda ou falta de óleo nas chumaceiras
				Vibrações
	Fuga	Elevada	Fuga nos empanques	Pressão ou temperatura de admissão demasiado baixa
				Contra-pressão de escape demasiado elevada
				Tubagens de purga entupidas
				Tubagens de purga ligadas a um colector comum
				Empanques desgastados
	Rendimento	Baixo	Fraco rendimento	Pressão ou temperatura de admissão demasiado baixa
				Contra-pressão de escape demasiado elevada
				Guia da válvula de regulação defeituosa
				Alhetas corroídas ou entupidas com deposição de partículas estranhas

Anexo XIV – Análise FME(C)A

Tabela 64 - Análise FME(C)A.

Equipamento	Componente	Função	Subunidade do equipamento	Modo de falha (Modo como o componente falha)	Causa da falha (Processos que conduzem à falha)	Efeitos da falha: Subunidade do equipamento	Efeitos da falha: Equipamento	Efeitos da falha: Unidade	λ [10^{-6}] (Taxa de falha)	β (Probabilidade de ocorrência do modo de falha)	α (Contribuição do modo de falha para a falha do componente)	t [horas] (Tempo de operação)	C (Criticidade)	Ocorrência	Severidade	Detectabilidade	RPN	Observações
Bomba centrífuga - Processamento do produto	Vedantes	Vedar as ligações entre componentes do sistema para não haver perda do líquido em questão.	Bomba	Fuga externa - Produto do processo	Falha mecânica; Fuga; Diversas influências externas; Corrosão.	Perda do produto do processo.	Bomba uma quantidade de produto menor, perigo de incêndio.	Diminuição da capacidade de produção, perigo de incêndio.	102,559	0,70	0,5	5745500	206.015.244	5	4	1	20	
			Sistema de lubrificação	Fuga externa - Produto auxiliar	Fuga; Falha mecânica; Desgaste; Falha do material.	Perda do líquido de lubrificação.	Lubrificação deficiente dos componentes, deterioração dos componentes.	Não afecta instantaneamente a produção.	102,559	0,01	0,5	5745500	2.950.602	5	2	2	20	
	Tubagens	Garante a ligação entre os componentes ou subsistemas, para que o fluido chegue de um ponto ao outro.	Bomba	Fuga externa - Produto do processo	Falha mecânica; Fuga; Diversas influências externas; Corrosão.	Perda do produto do processo.	Bomba uma quantidade de produto menor, perigo de incêndio.	Diminuição da capacidade de produção, perigo de incêndio.	30,928	0,70	0,6	5745500	72.698.961	4	4	1	16	
			Sistema de lubrificação	Fuga externa - Produto auxiliar	Fuga; Falha mecânica; Desgaste; Falha do material.	Perda do líquido de lubrificação.	Lubrificação deficiente dos componentes, deterioração dos componentes.	Não afecta instantaneamente a produção.	30,928	0,01	0,4	5745500	738.412	4	2	2	16	
	Válvulas	Controla a passagem do líquido, se pode ou não passar ou a sua quantidade.	Bomba	Fuga externa - Produto do processo	Falha mecânica; Fuga; Diversas influências externas; Corrosão.	Perda do produto do processo.	Bomba uma quantidade de produto menor, perigo de incêndio.	Diminuição da capacidade de produção, perigo de incêndio.	20,185	0,70	0,5	5745500	37.145.807	3	4	1	12	
			Sistema de lubrificação	Fuga externa - Produto auxiliar	Fuga; Falha mecânica; Desgaste; Falha do material.	Perda do líquido de lubrificação.	Lubrificação deficiente dos componentes, deterioração dos componentes.	Não afecta instantaneamente a produção.	20,185	0,01	0,5	5745500	629.075	3	2	2	12	
	Bomba com motor	Bomba o líquido de lubrificação para as componentes a lubrificar	Sistema de lubrificação	Fuga externa - Produto do processo	Fuga; Falha mecânica; Desgaste; Falha do material.	Não bomba o líquido de lubrificação.	Lubrificação deficiente dos componentes, deterioração dos componentes.	Não afecta instantaneamente a produção.	3,205	0,01	1,0	5745500	184.143	1	2	3	6	
Compressor alternativo - Accionamento eléctrico (100 a 1000 kW)	Cilindro linear	Efectua a compressão do vapor presente na câmara.	Unidade de compressão	Falsa paragem	Falha de instrumentação; Falha mecânica; Falta de sinal, indicação ou alarme; Falha eléctrica; Vibração; Falha de controlo; Fuga; Fora de ajuste.	Pagem brusca.	Paragem do equipamento podendo provocar o seu colapso.	Pargem da produção, perigo para as pessoas em contacto com o equipamento.	108,846	0,50	0,1	5745500	17.067.008	5	3	3	45	
				Débito insuficiente	Falha mecânica; Sobreaquecimento; Falha de controlo; Falta de sinal, indicação ou alarme; Vibração.	Não comprime o fluido à pressão desejada.	Não efectua a função com os requisitos especificados.	Afecta a produção.	108,846	0,01	0,9	5745500	5.912.407	5	2	1	10	
	Válvulas	Controla a passagem do vapor, se pode ou não passar ou a sua quantidade.	Unidade de compressão	Débito insuficiente	Falha mecânica; Sobreaquecimento; Falha de controlo; Falta de sinal, indicação ou alarme; Vibração.	Perda de vapor na compressão.	Não efectua a função com os requisitos especificados.	Afecta a produção.	30,615	0,01	1,0	5745500	1.758.985	4	1	1	4	
	Unidade de controlo	Equipamento que controla todas as variáveis de relevo do sistema.	Controlo e monitorização	Falsa paragem	Falha de instrumentação; Falha mecânica; Falta de sinal, indicação ou alarme; Falha eléctrica; Vibração; Falha de controlo; Fuga; Fora de ajuste.	Variável fora dos limites aceitáveis.	Paragem do equipamento.	Paragem da produção.	12,178	0,03	0,5	5745500	1.024.020	2	2	3	12	
				Falha no arranque	Falha de controlo; Falha de instrumentação.	Variável fora dos limites aceitáveis.	Equipamento não arranca.	Sem efeito.	12,178	0,01	0,5	5745500	358.347	2	2	3	12	
	Instrumentos de temperatura	Leitura da temperatura num ponto do equipamento.	Controlo e monitorização	Falsa paragem	Falha de instrumentação; Falha mecânica; Falta de sinal, indicação ou alarme; Falha eléctrica; Vibração; Falha de controlo; Fuga; Fora de ajuste.	Variável fora dos limites aceitáveis.	Paragem do equipamento.	Paragem da produção.	5,941	0,03	1,0	5745500	1.024.020	2	1	1	2	
	Instrumentos de pressão	Leitura da pressão num ponto do equipamento.	Controlo e monitorização	Falsa paragem	Falha de instrumentação; Falha mecânica; Falta de sinal, indicação ou alarme; Falha eléctrica; Vibração; Falha de controlo; Fuga; Fora de ajuste.	Variável fora dos limites aceitáveis.	Paragem do equipamento.	Paragem da produção.	4,034	0,03	1,0	5745500	695.320	1	1	1	1	
	Líquido lubrificante	Líquido que promove a lubrificação dos componentes em contacto.	Sistema de lubrificação	Falsa paragem	Falha de instrumentação; Falha mecânica; Falta de sinal, indicação ou alarme; Falha eléctrica; Vibração; Falha de controlo; Fuga; Fora de ajuste.	Qualidade do líquido lubrificante não corresponde às especificadas.	Paragem do equipamento.	Paragem da produção.	4,034	0,40	1,0	5745500	9.270.939	1	2	3	6	
	Tubagens	Garante a ligação entre os componentes ou subsistemas, para que o fluido chegue de um ponto ao outro.	Unidade de compressão	Falsa paragem	Falha de instrumentação; Falha mecânica; Falta de sinal, indicação ou alarme; Falha eléctrica; Vibração; Falha de controlo; Fuga; Fora de ajuste.	Perda de vapor na compressão.	Paragem do equipamento.	Paragem da produção.	4,034	0,03	1,0	5745500	695.320	1	1	2	2	
Motores eléctricos - Bombas - Processamento do produto	Unidade de controlo	Equipamento que controla todas as variáveis de relevo do sistema.	Controlo e monitorização	Falsa paragem	Falha eléctrica; Falha mecânica; Falha do isolamento; Vibração.	Variável fora dos limites aceitáveis.	Paragem do equipamento.	Paragem da produção.	25,013	0,03	0,1	5745500	354.900	3	2	3	18	
				Deficiência estrutural	Falha mecânica; Diversas influências externas; Desgaste; Cavitação.	Leitura deficiente das variáveis.	Não efectua a função com os requisitos especificados.	Afecta a produção.	25,013	0,01	0,3	5745500	397.818	3	1	1	3	
				Falha no arranque	Falha eléctrica; Falha de controlo.	Variável fora dos limites aceitáveis.	Equipamento não arranca.	Sem efeito.	25,013	0,01	0,2	5745500	331.515	3	1	3	9	
				Débito insuficiente	Falha eléctrica.	Leitura deficiente das variáveis.	Não efectua a função com os requisitos especificados.	Afecta a produção.	25,013	0,01	0,4	5745500	589.488	3	1	1	3	
	Chumaceira radial	Garante a rotação do veio, e a sua excentricidade.	Motor eléctrico	Deficiência estrutural	Falha mecânica; Diversas influências externas; Desgaste; Cavitação.	Funcionamento incorrecto, podendo causar deterioração do componente.	Pode provocar o seu colapso.	Sem efeito.	18,309	0,30	0,5	5745500	15.923.079	3	2	2	12	
				Colapso	Falha mecânica; Vibração; Desgaste.	Colapso .	Pode provocar o seu colapso.	Paragem da produção.	18,309	0,70	0,3	5745500	20.624.047	3	2	3	18	
				Vibração	Desalinhamento; Vibração; Desgaste.	Ruído e provável fractura do componente.	Pode provocar o seu colapso, e do veio de ligação ao equipamento accionado.	Sem efeito.	18,309	0,50	0,2	5745500	11.327.253	3	2	2	12	
	Empanque	Garante a rotação do veio, a sua excentricidade e a vedação da zona em questão.	Motor eléctrico	Vibração	Desalinhamento; Vibração; Desgaste.	Ruído, má vedação e provável fractura do componente.	Pode provocar o seu colapso, e do veio de ligação ao equipamento accionado.	Sem efeito.	3,152	0,50	1,0	5745500	9.054.908	1	2	2	4	
Motores eléctricos - Compressores - Processamento de gás	Ventilador com motor	Arrefecimento do motor	Sistema de refrigeração	Falha no arranque	Falha eléctrica; Falha de instrumentação.	O ventilador não arranca quando era previsto.	Sobreaquecimento do equipamento.	Sem efeito.	14,958	0,01	0,1	5745500	107.383	2	1	3	6	
				Desvio dos parâmetros de funcionamento	Falha de instrumentação; Falha eléctrica.	O ventilador não funciona com as especificações correctas.	Sobreaquecimento do equipamento.	Sem efeito.	14,958	0,01	0,9	5745500	752.028	2	1	2	4	
	Unidade de controlo	Equipamento que controla todas as variáveis de relevo do sistema.	Controlo e monitorização	Falsa paragem	Circuito aberto.	Variável fora dos limites aceitáveis.	Paragem do equipamento.	Paragem da produção.	7,475	0,03	0,7	5745500	966.278	2	2	3	12	
				Falha no arranque	Falha eléctrica; Falha de instrumentação.	Variável fora dos limites aceitáveis.	Equipamento não arranca.	Sem efeito.	7,475	0,01	0,3	5745500	107.383	2	1	3	6	
	Acoplamento	Transmite a potência do veio do motor eléctrico para o veio do compressor.	Motor eléctrico	Débito insuficiente	Falha eléctrica; Falha de instrumentação.	Patinagem no acoplamento.	Não transmite a potência total.	Afecta a produção.	3,737	0,01	1,0	5745500	214.709	1	1	1	1	
	Instrumentos gerais	Leitura de uma variável num ponto do equipamento.	Controlo e monitorização	Desvio dos parâmetros de funcionamento	Falha de instrumentação; Falha eléctrica.	Leitura deficiente das variáveis.	Pode não efectuar a sua função com os requisitos especificados.	Afecta a produção.	3,736	0,01	1,0	5745500	214.652	1	1	1	1	
	Líquido lubrificante	Líquido que promove a lubrificação dos componentes em contacto.	Sistema de lubrificação	Desvio dos parâmetros de funcionamento	Falha de instrumentação; Falha eléctrica.	Qualidade do líquido lubrificante não corresponde às especificadas.	Lubrificação defeciente dos componentes e não efectua a sua função com os requisitos especificados.	Afecta a produção.	3,736	0,08	1,0	5745500	1.717.215	1	2	3	6	
	Dispositivo de actuação	Equipamento que dá ordem ao início do funcionamento do motor.	Controlo e monitorização	Falha no arranque	Falha eléctrica; Falha de instrumentação.	Dispositivo não funciona.	Equipamento não arranca.	Sem efeito.	1,869	0,01	1,0	5745500	107.383	1	1	3	3	
	Estator	Forma um campo magnético capaz de induzir no rotor uma corrente.	Motor eléctrico	Falha no arranque	Falha eléctrica; Falha de instrumentação.	Estator não cria campo eléctrico.	Equipamento não arranca.	Sem efeito.	1,869	0,01	1,0	5745500	107.383	1	1	3	3	
Turbinas a gás - Industrial (0 a 1000 kW)	Válvulas	Controla a passagem do vapor, se pode ou não passar ou a sua quantidade.	Gerador de gás	Falsa paragem	Falha mecânica; Falta de sinal, indicação ou alarme; Falha de instrumentação; Falha de controlo; Falha eléctrica; Fora de ajuste; Vibração.	Válvula fechou sem motivo.	Paragem do equipamento.	Paragem da produção.	22,930	0,03	0,7	5745500	2.624.947	3	2	3	18	
				Falha no arranque	Falha mecânica; Falha de instrumentação; Falha de controlo; Falha eléctrica; Fora de ajuste; Falta de sinal, indicação ou alarme; Gripagem.	Válvula não abriu.	Equipamento não arranca.	Sem efeito.	22,930	0,01	0,3	5745500	442.461	3	1	3	9	
	Unidade de controlo	Equipamento que controla todas as variáveis de relevo do sistema.	Controlo e monitorização	Falsa paragem	Falha mecânica; Falta de sinal, indicação ou alarme; Falha de instrumentação; Falha de controlo; Falha eléctrica; Fora de ajuste; Vibração.	Variável fora dos limites aceitáveis.	Paragem do equipamento.	Paragem da produção.	19,862	0,03	0,7	5745500	2.427.761	3	2	3	18	
				Falha no arranque	Falha mecânica; Falha de instrumentação; Falha de controlo; Falha eléctrica; Fora de ajuste; Falta de sinal, indicação ou alarme; Gripagem.	Variável fora dos limites aceitáveis.	Equipamento não arranca.	Sem efeito.	19,862	0,01	0,3	5745500	331.918	3	1	3	9	
	Controlo de vapor	Controla a quantidade de vapor admitida.	Gerador de gás	Falsa paragem	Falha mecânica; Falta de sinal, indicação ou alarme; Falha de instrumentação; Falha de controlo; Falha eléctrica; Fora de ajuste; Vibração.	Variável fora dos limites aceitáveis.	Paragem do equipamento.	Paragem da produção.	13,201	0,03	0,6	5745500	1.383.401	2	2	3	12	
				Falha no arranque	Falha mecânica; Falha de instrumentação; Falha de controlo; Falha eléctrica; Fora de ajuste; Falta de sinal, indicação ou alarme; Gripagem.	Dispositivo não funciona.	Equipamento não arranca.	Sem efeito.	13,201	0,01	0,4	5745500	297.330	2	1	3	6	
	Instrumentos de velocidade	Leitura da velocidade num ponto do equipamento.	Controlo e monitorização	Falsa paragem	Falha mecânica; Falta de sinal, indicação ou alarme; Falha de instrumentação; Falha de controlo; Falha eléctrica; Fora de ajuste; Vibração.	Variável fora dos limites aceitáveis.	Paragem do equipamento.	Paragem da produção.	9,520	0,03	0,8	5745500	1.252.059	2	2	3	12	
				Falha no arranque	Falha mecânica; Falha de instrumentação; Falha de controlo; Falha eléctrica; Fora de ajuste; Falta de sinal, indicação ou alarme; Gripagem.	Variável fora dos limites aceitáveis.	Equipamento não arranca.	Sem efeito.	9,520	0,01	0,2	5745500	129.618	2	1	3	6	
	Arranque da unidade	Equipamento que dá ordem ao início do funcionamento do motor.	Sistema de arranque	Falha no arranque	Falha mecânica; Falha de instrumentação; Falha de controlo; Falha eléctrica; Fora de ajuste; Falta de sinal, indicação ou alarme; Gripagem.	Dispositivo não funciona.	Equipamento não arranca.	Sem efeito.	6,963	0,01	1,0	5745500	400.059	2	1	3	6	
	Instrumentos de temperatura	Leitura da temperatura num ponto do equipamento.	Controlo e monitorização	Falsa paragem	Falha mecânica; Falta de sinal, indicação ou alarme; Falha de instrumentação; Falha de controlo; Falha eléctrica; Fora de ajuste; Vibração.	Variável fora dos limites aceitáveis.	Paragem do equipamento.	Paragem da produção.	6,502	0,03	1,0	5745500	1.120.717	2	2	3	12	
	Instrumentos de vibração	Leitura da vibração num ponto do equipamento.	Controlo e monitorização	Falsa paragem	Falha mecânica; Falta de sinal, indicação ou alarme; Falha de instrumentação; Falha de controlo; Falha eléctrica; Fora de ajuste; Vibração.	Variável fora dos limites aceitáveis.	Paragem do equipamento.	Paragem da produção.	6,281	0,03	1,0	5745500	1.082.625	2	2	3	12	
	Alimentação interna de energia	Em caso de falha de energia, este despositivo é accionado para o equipamento continuar em funcionamento.	Controlo e monitorização	Falsa paragem	Falha mecânica; Falta de sinal, indicação ou alarme; Falha de instrumentação; Falha de controlo; Falha eléctrica; Fora de ajuste; Vibração.	Variável fora dos limites aceitáveis.	Paragem do equipamento.	Paragem da produção.	4,339	0,03	1,0	5745500	747.892	1	2	3	6	

Anexo XV – Horas de Marcha dos equipamentos da U-1200

Tabela 65 - Horas de marcha dos equipamentos da Unidade 1200.

Código do equipamento	H.M. totais	H.M. 2005	% Funcionamento
CM 1201 A	145170	3441	50,7%
CM 1201 B	141267	5347	49,3%
PM 1201 A	188954	8666	87,8%
PT 1201 B	26253	32	12,2%
PM 1202	13216	0	100,0%
PM 1203	205064	8695	100,0%
PM 1204 A	64593	4417	46,3%
PM 1204 B	74868	4221	53,7%
PM 1205 A	89109	4391	49,9%
PM 1205 B	89288	4424	50,1%
PM 1206 A	102358	3340	48,8%
PM 1206 B	107221	5272	51,2%
PM 1207 A	89576	3906	49,4%
PM 1207 B	91724	4165	50,6%
PM 1208 A	102611	4084	48,5%
PM 1208 B	108906	4679	51,5%
PM 1210	26425	235	100,0%
PM 1211 A	81569	3424	47,7%
PM 1211 B	89306	4062	52,3%
PM 1212	16934	0	100,0%

Anexo XVI – Gráficos de fiabilidade dos equipamentos P-1201 A e C-1201 A

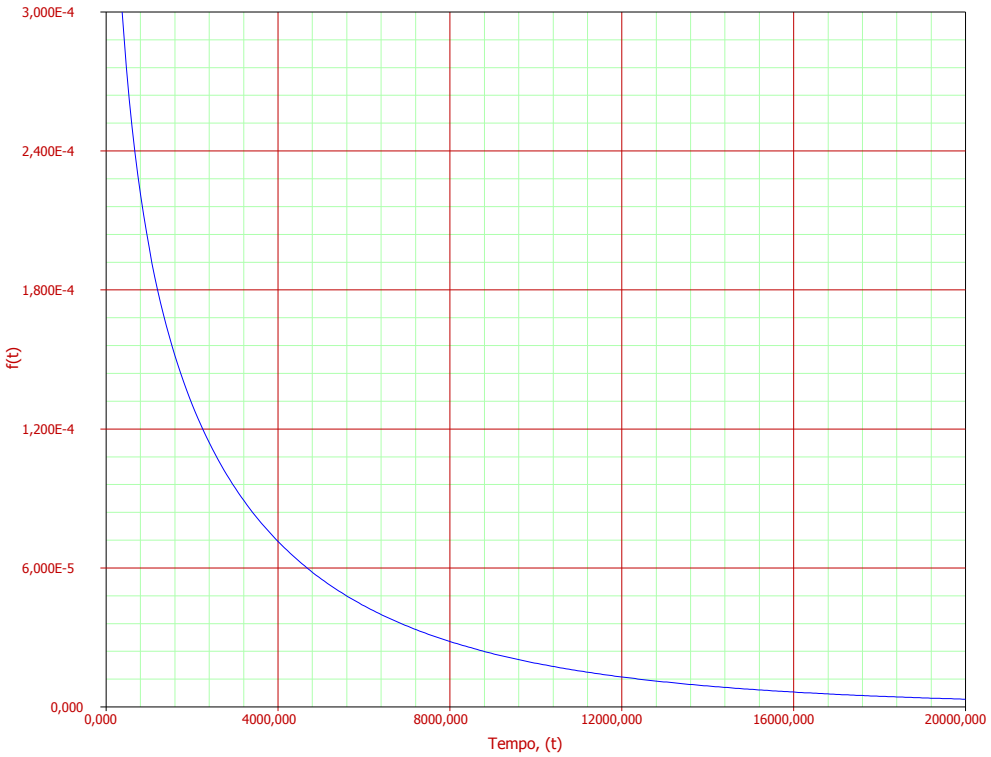


Gráfico 58 - Curva pdf do equipamento P-1201 A.

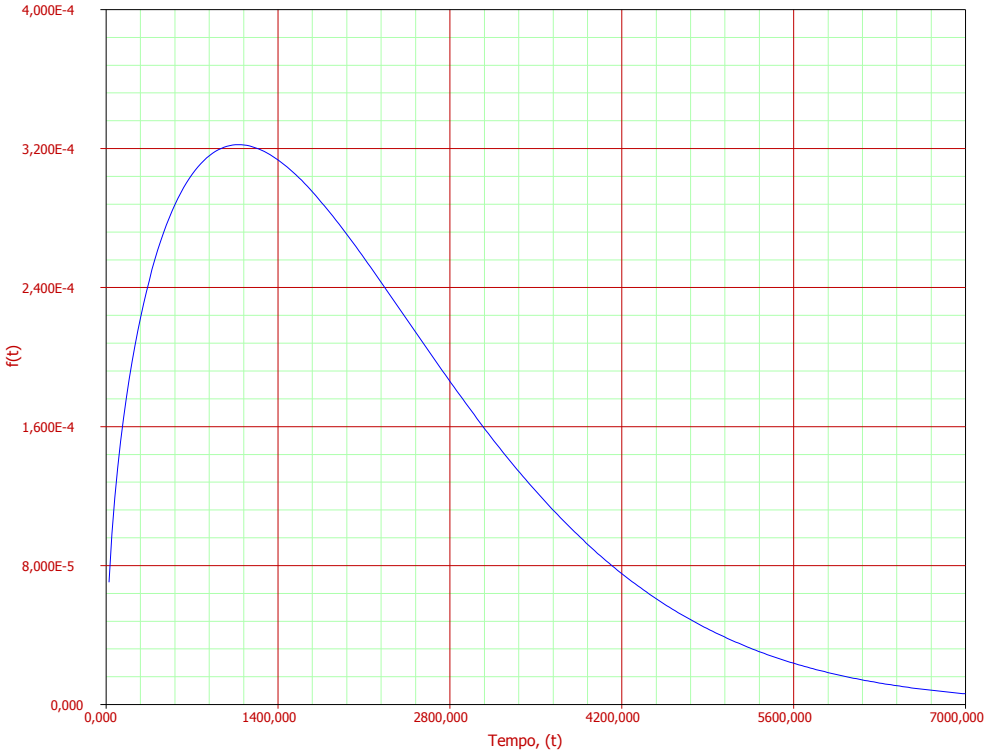


Gráfico 59 - Curva pdf do equipamento C-1201 A.

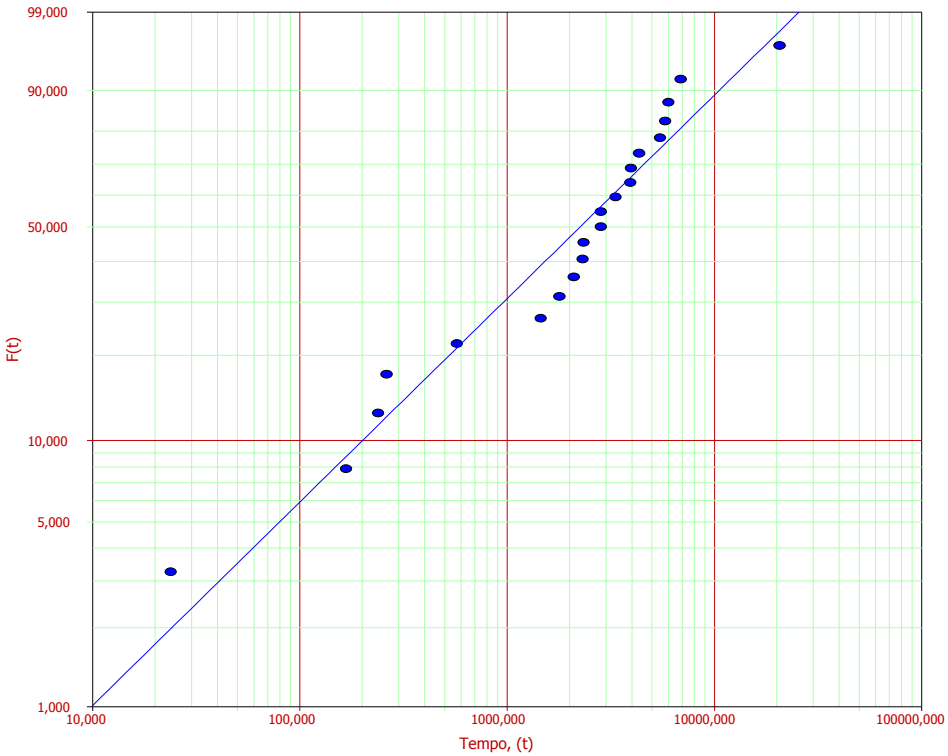


Gráfico 60 - Curva da probabilidade de falha do equipamento P-1201 A.

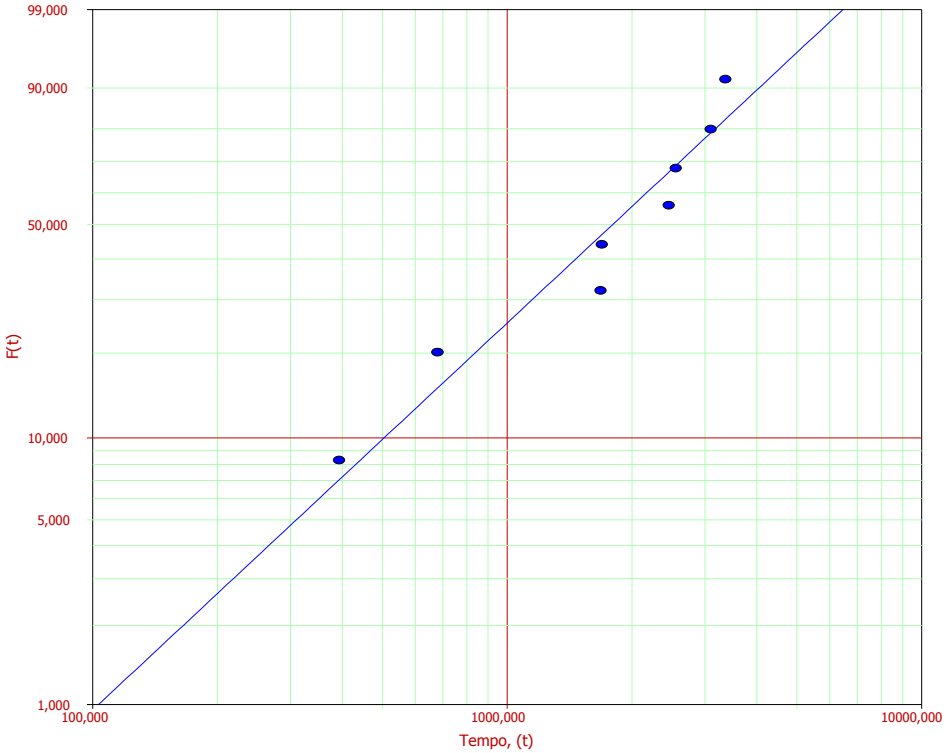


Gráfico 61 - Curva da probabilidade de falha do equipamento C-1201 A.

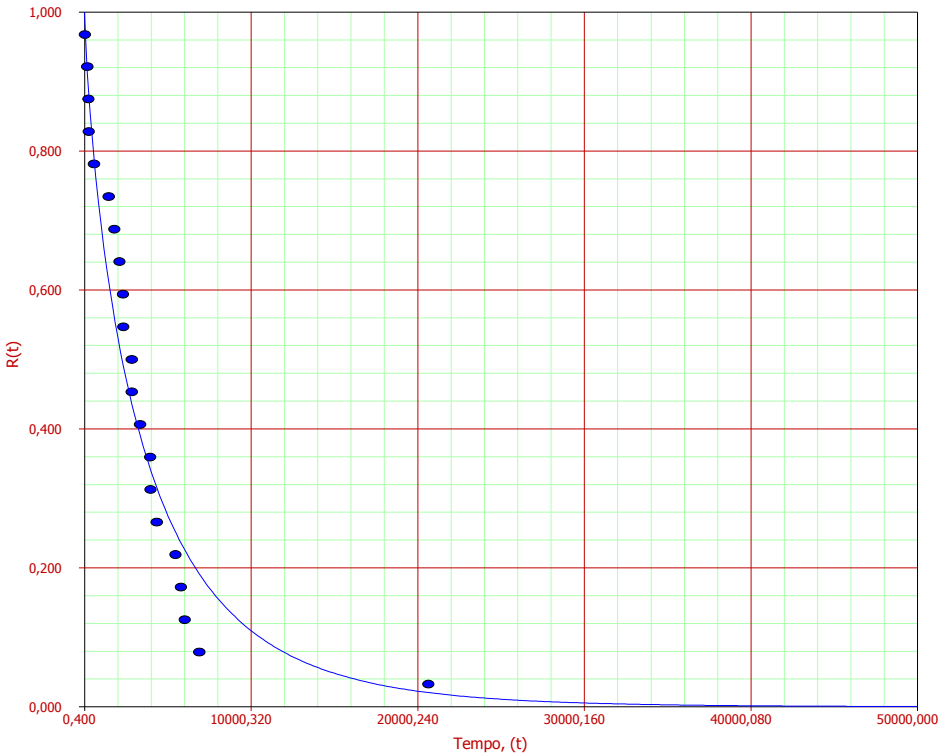


Gráfico 62 - Curva da fiabilidade do equipamento P-1201 A.

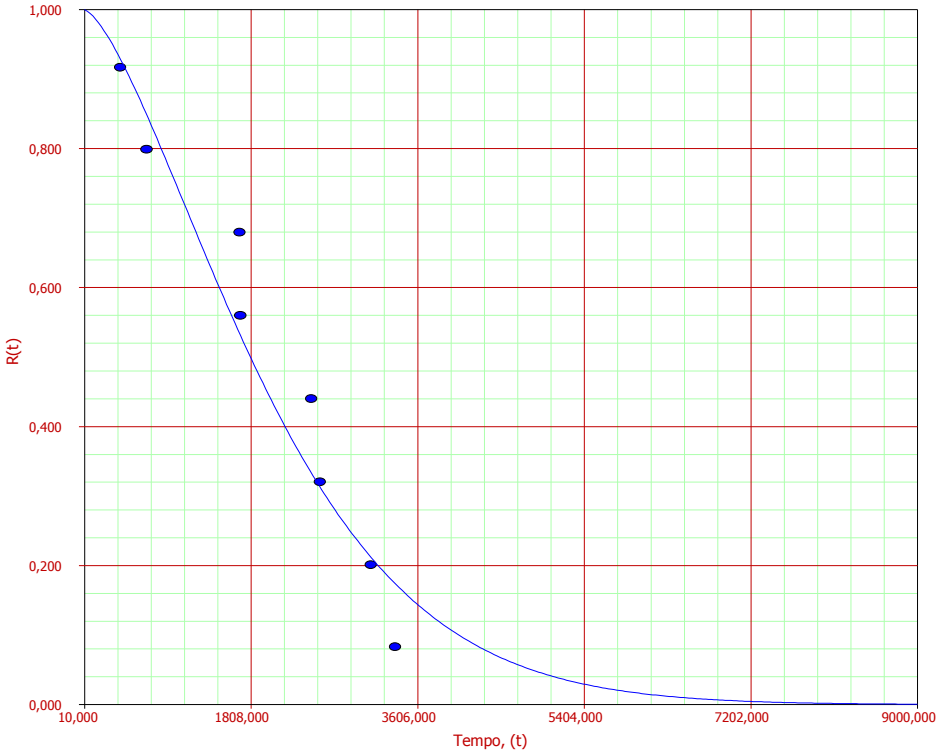


Gráfico 63 - Curva da fiabilidade do equipamento C-1201 A.

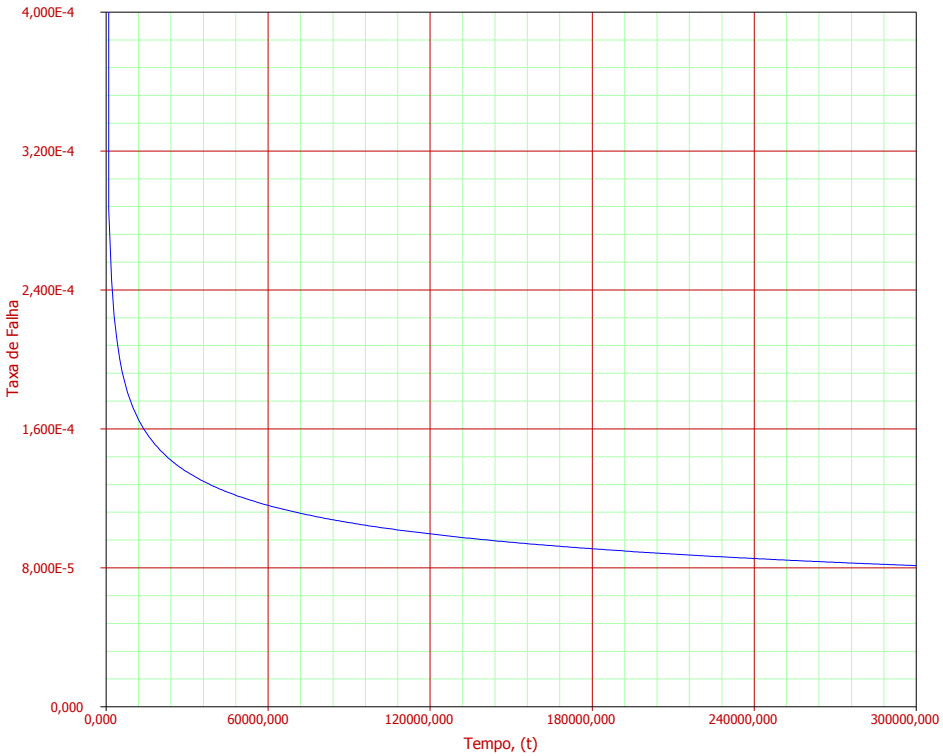


Gráfico 64 - Curva da taxa de falha do equipamento P-1201 A.

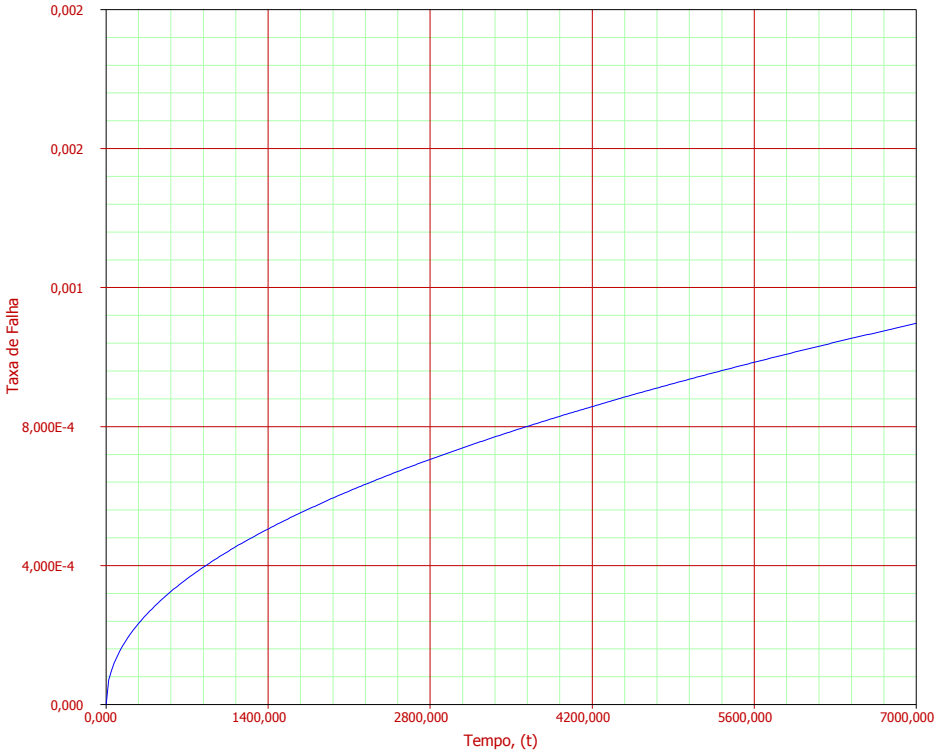


Gráfico 65 - Curva da taxa de falha do equipamento C-1201 A.

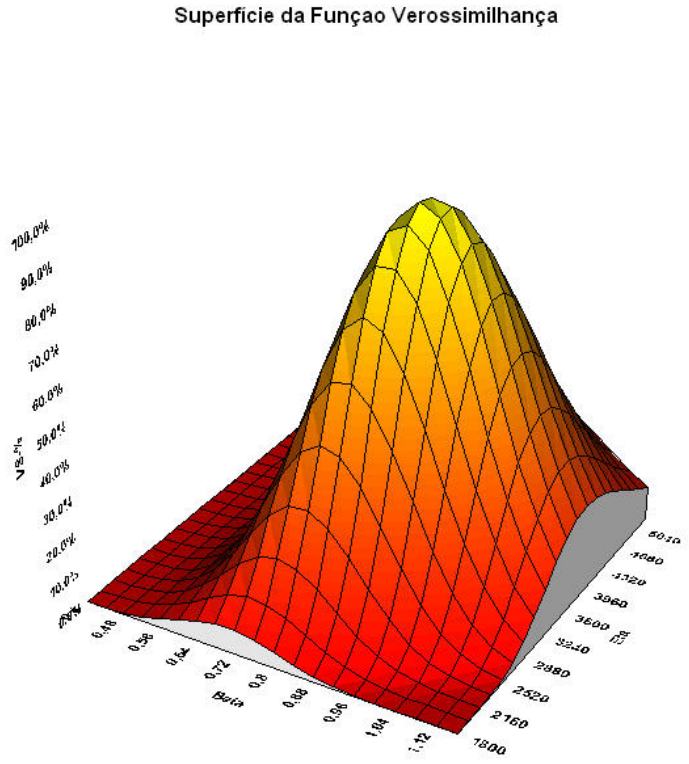


Figura 62 - Superfície da função verosimilhança do equipamento P-1201 A.

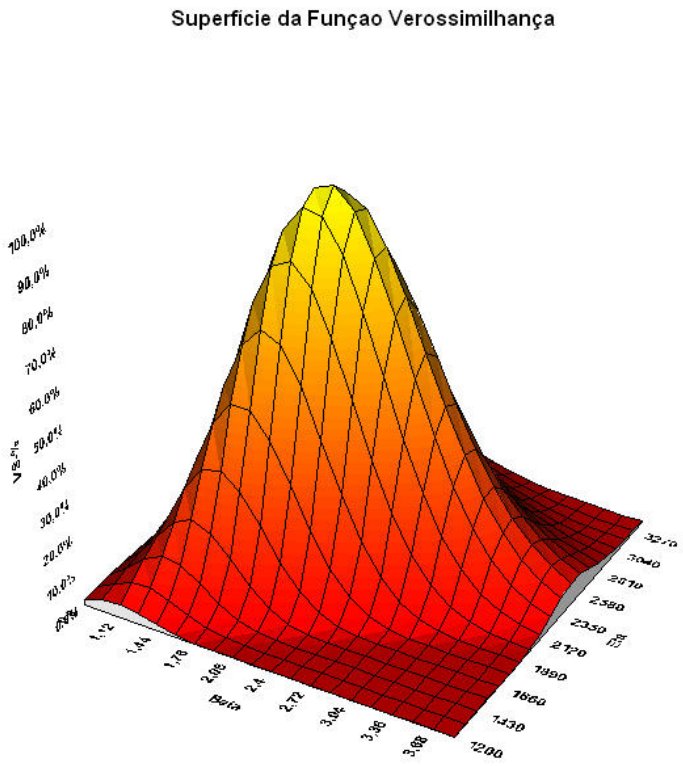


Figura 63 - Superfície da função verosimilhança do equipamento C-1201 A.

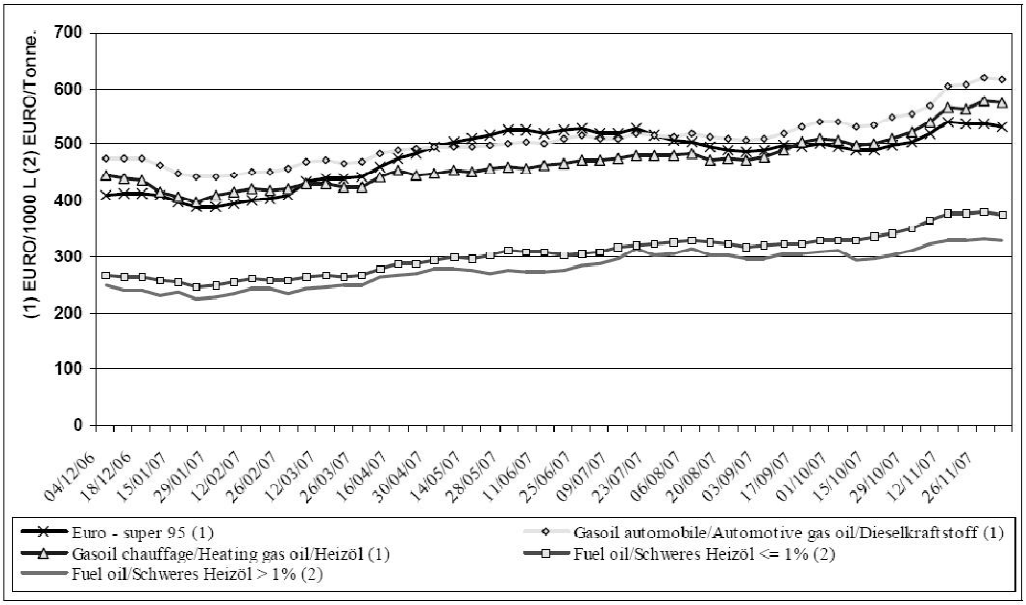
Anexo XVII – Preços dos combustíveis

OIL/ÖL
BULLETIN
PETROLIER

EUROPEAN COMMISSION
COMMISSION EUROPEENNE
EUROPÄISCHE KOMMISSION
Directorate-General for Energy and Transport
Direction générale Energie et Transports
Generaldirektion Energie und Transport

Brussel(s) Bruxelles, 04/12/2007 NUM: 1387

PRIX A LA CONSOMMATION DES PRODUITS PETROLIERS (hors droits et taxes) - MOYENNE PONDEREE - EUR 25
CONSUMER PRICES OF PETROLEUM PRODUCTS (Net of duties and taxes) - WEIGHTED AVERAGE
VERBRAUCHERPREISE FÜR MINERALÖLERZEUGNISSE (ohne Steuern und Abgaben) - GEWICHTETER DURCHSCHNITT



Anexo XVIII – Gráficos de risco

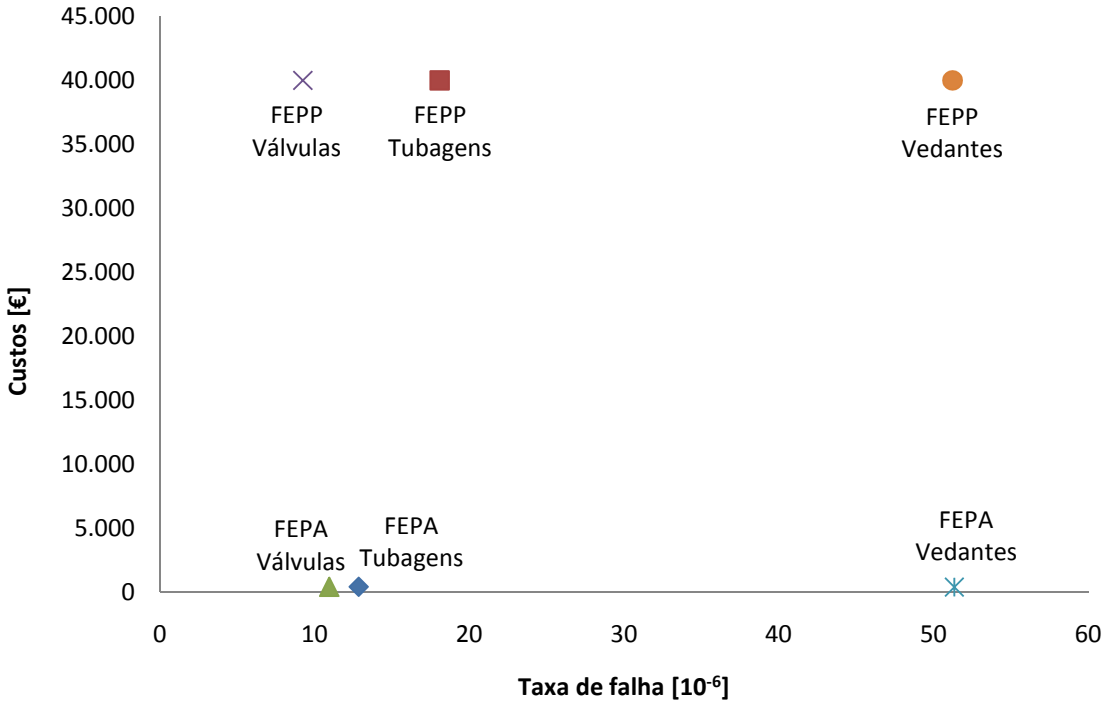


Gráfico 66 - Risco das combinações (componentes/modo de falha) das bombas centrífugas - processamento do produto.

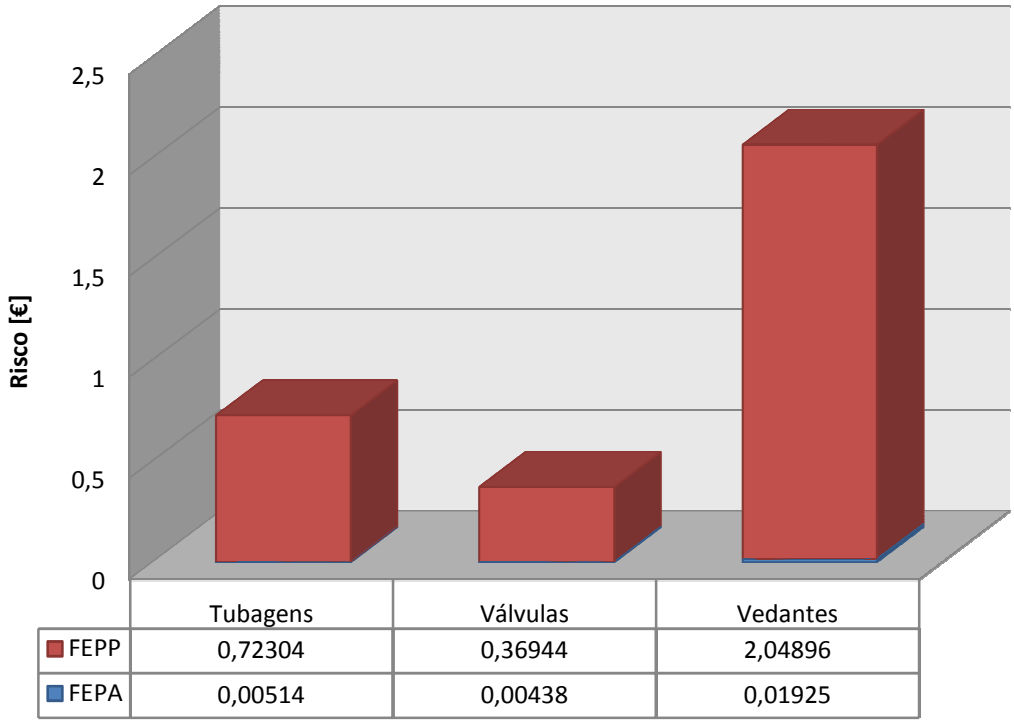


Gráfico 67 - Risco dos componentes das bombas centrífugas - processamento do produto.

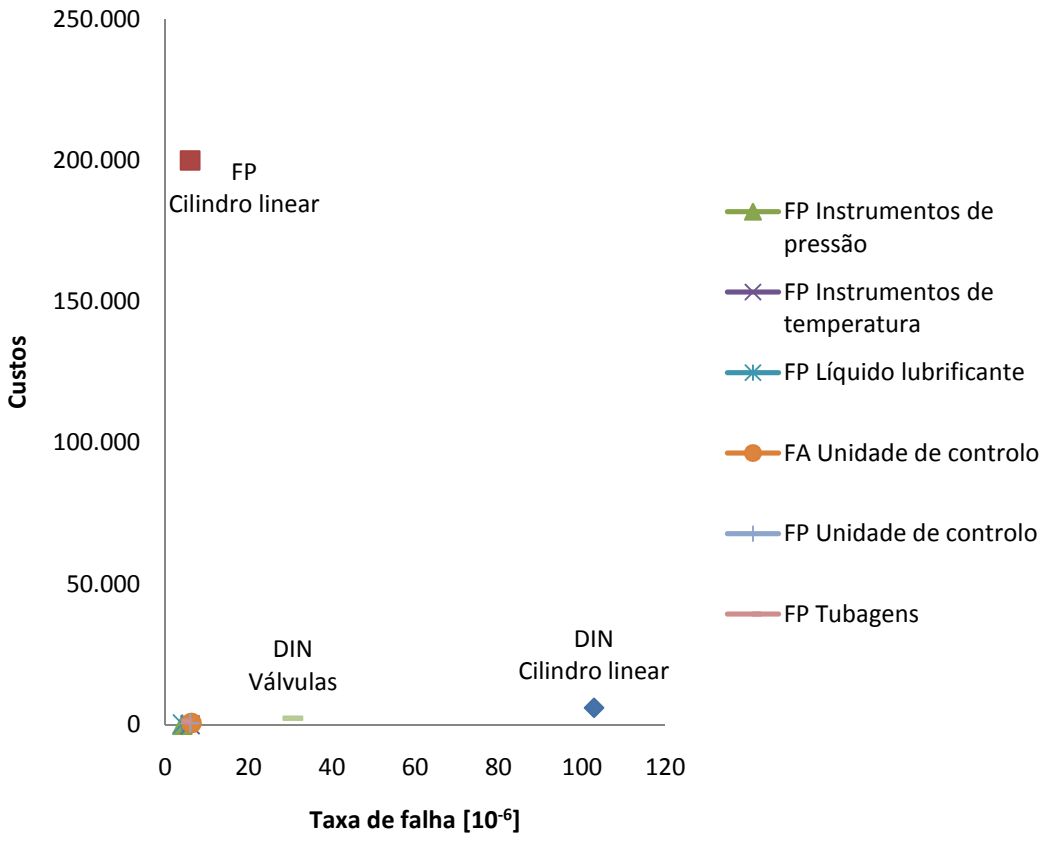
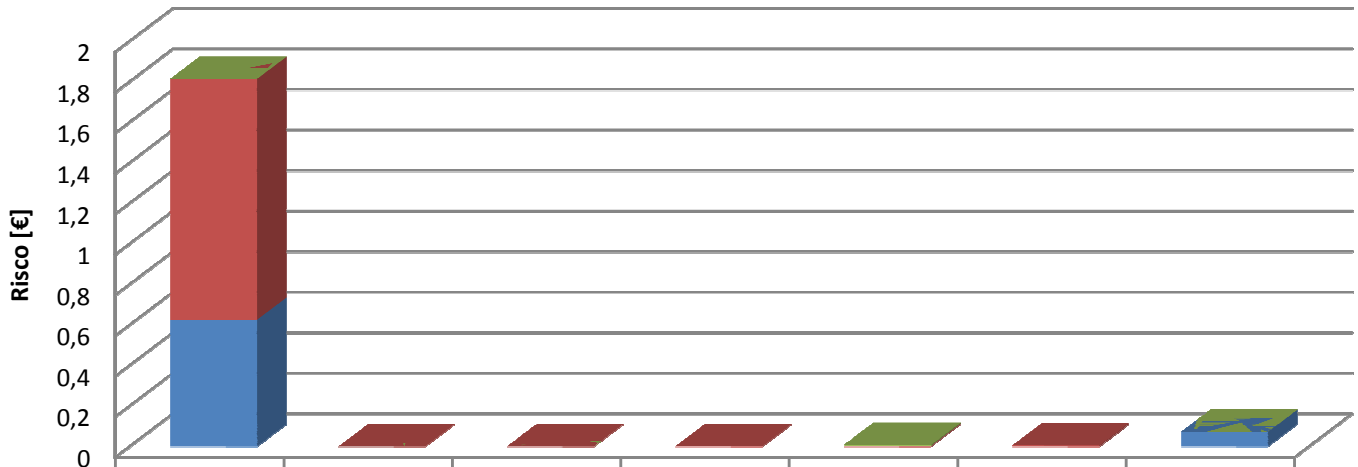


Gráfico 68 - Risco das combinações (componentes/modo de falha) dos compressores alternativos - accionamento eléctrico (100 a 1000 kW).



	Cilindro linear	Instrumentos de pressão	Instrumentos de temperatura	Líquido lubrificante	Unidade de controlo	Tubagens	Válvulas
FA	0	0	0	0	0,00424	0	0
FP	1,1882	0,00026	0,00039	0,00133	0,00404	0,00547	0
DIN	0,62566	0	0	0	0	0	0,07225

Gráfico 69 - Risco dos componentes dos compressores alternativos - accionamento eléctrico (100 a 1000 kW).

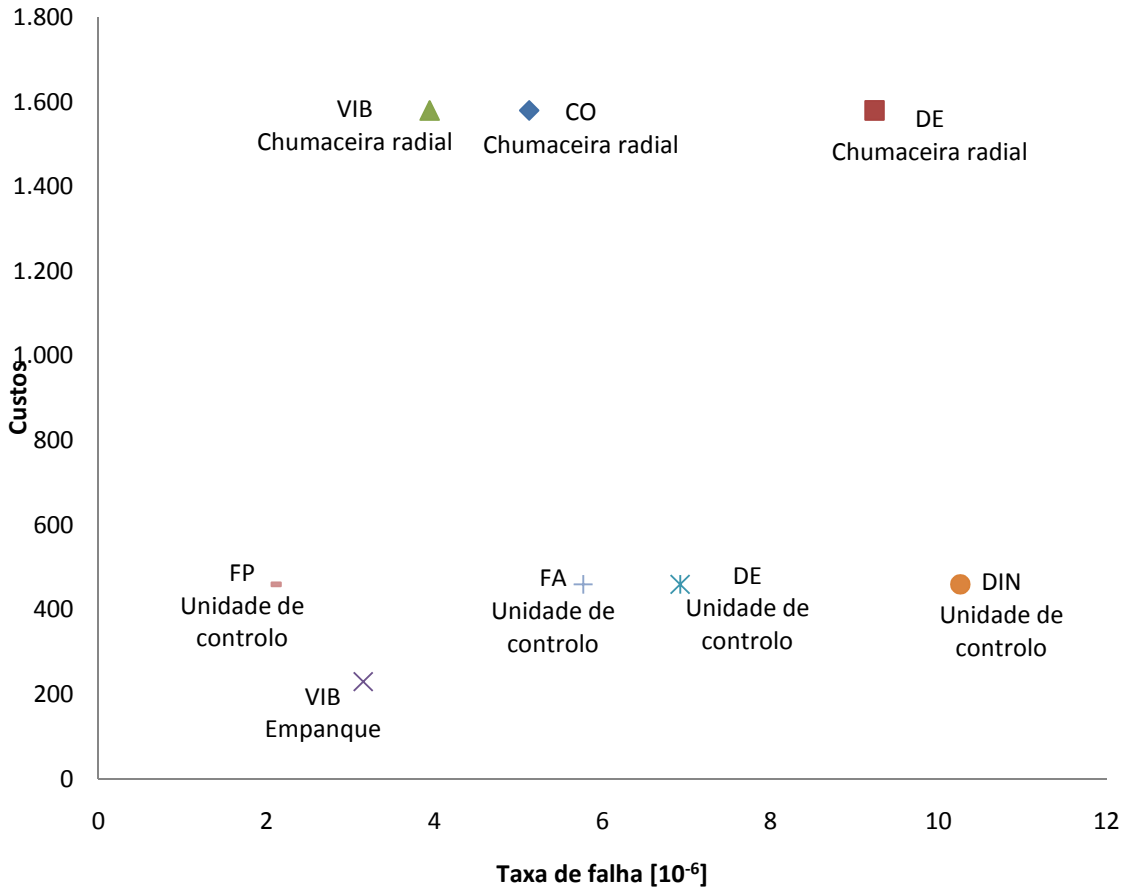
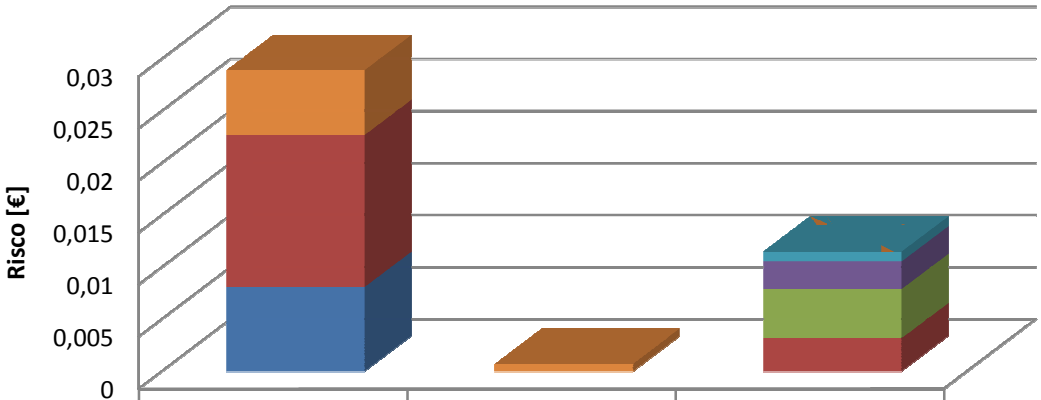


Gráfico 70 - Risco das combinações (componentes/modo de falha) dos motores eléctricos - bombas - processamento do produto.



	Chumaceira radial	Empanque	Unidade de controlo
VIB	0,00623	0,00072	0
FP	0	0	0,00095
FA	0	0	0,00265
DIN	0	0	0,00472
DE	0,0146	0	0,00318
CO	0,0081	0	0

Gráfico 71 - Risco dos componentes dos motores eléctricos - bombas - processamento do produto.

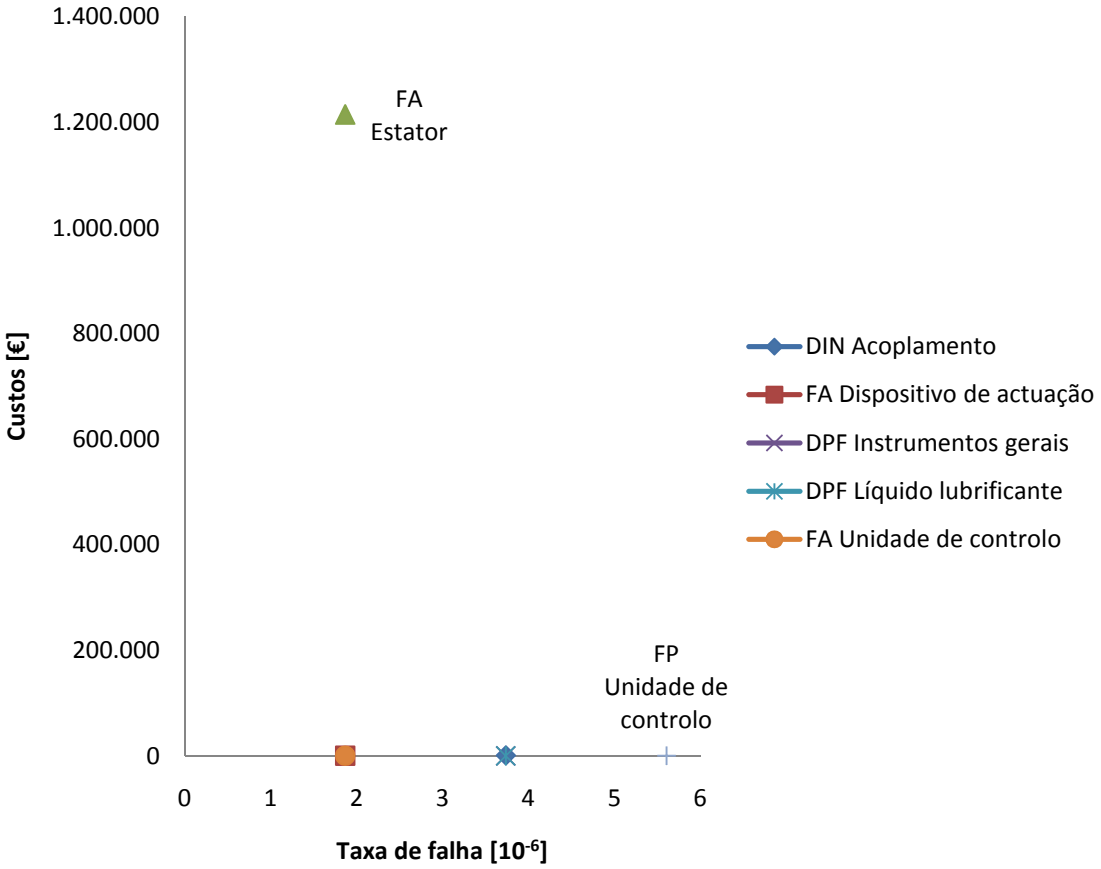
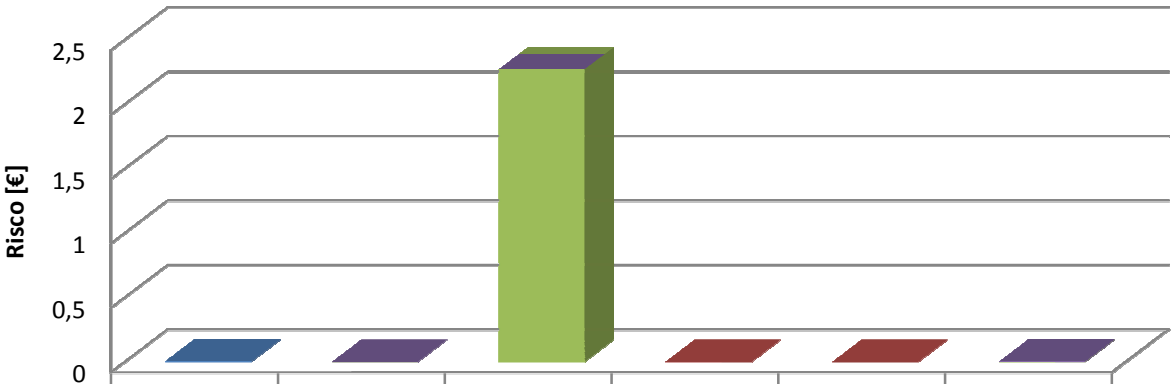


Gráfico 72 - Risco das combinações (componentes/modo de falha) dos motores eléctricos - compressores - processamento de gás.



	Acoplamento	Dispositivo de actuação	Estator	Instrumentos gerais	Líquido lubrificante	Unidade de controlo
FP	0	0	0	0	0	0,00258
FA	0	0,00034	2,26986	0	0	0,00086
DPF	0	0	0	0,00024	6E-05	0
DIN	0,00441	0	0	0	0	0

Gráfico 73 - Risco dos componentes dos motores eléctricos - compressores - processamento de gás.

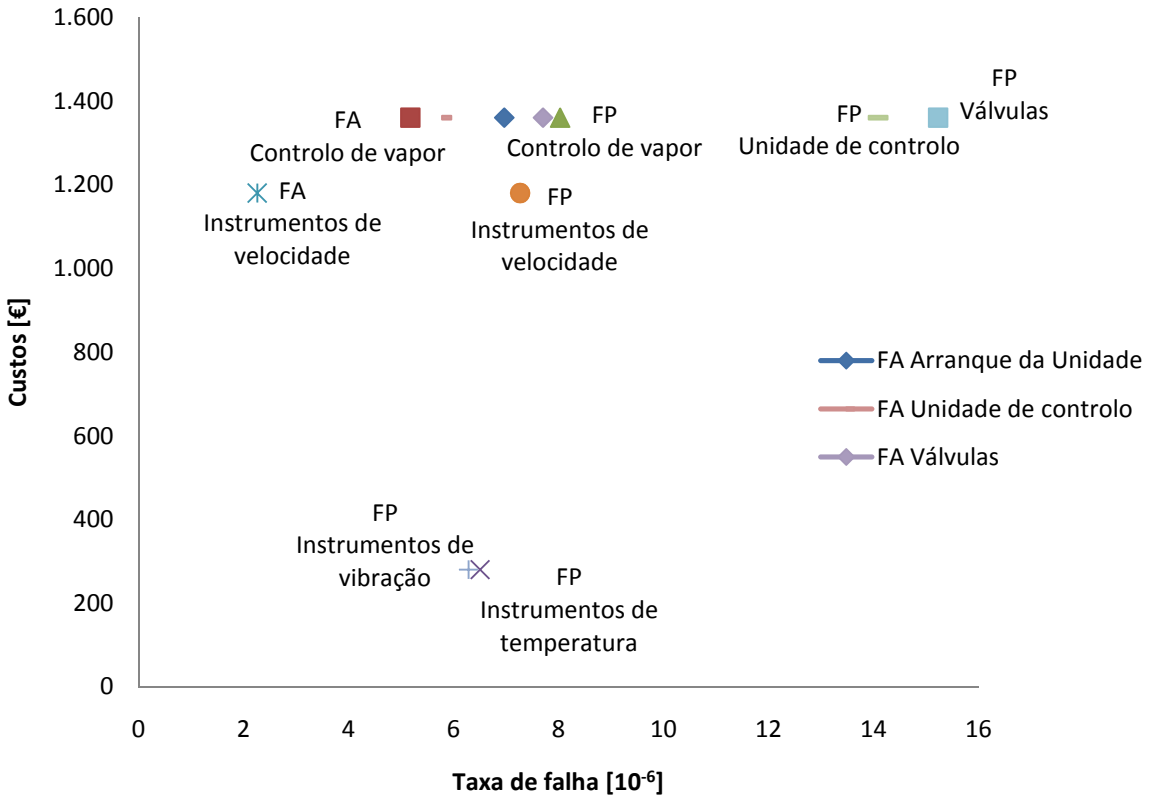
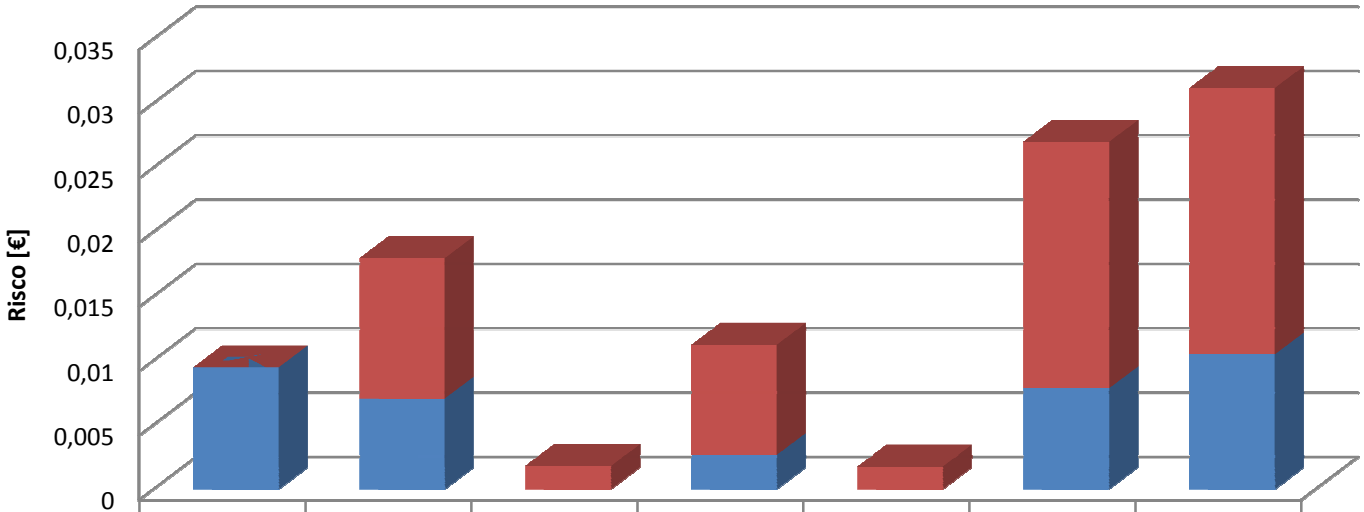


Gráfico 74 - Risco das combinações (componentes/modo de falha) das turbinas a gás - industrial (0 a 1000 kW).



	Arranque da unidade	Controlo de vapor	Instrumentos de temperatura	Instrumentos de velocidade	Instrumentos de vibração	Unidade de controlo	Válvulas
FP	0	0,01091	0,00182	0,00857	0,00176	0,01915	0,02071
FA	0,00947	0,00704	0	0,00266	0	0,00786	0,01047

Gráfico 75 - Risco dos componentes das turbinas a gás - industrial (0 a 1000 kW).

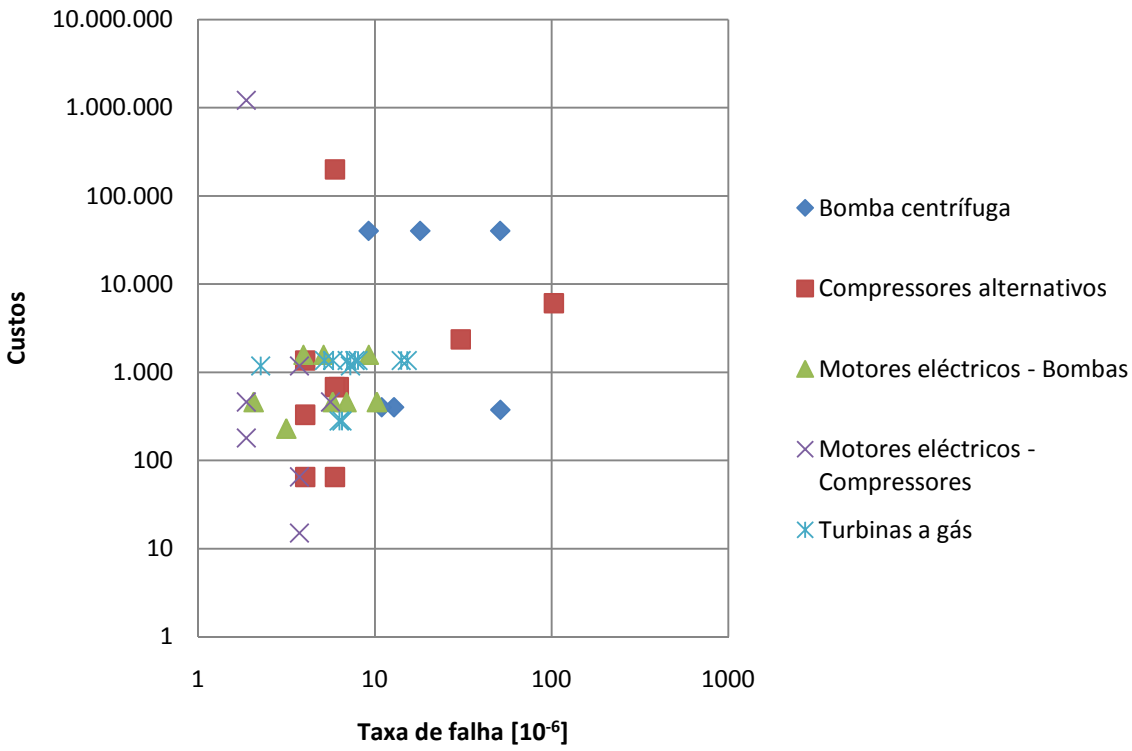
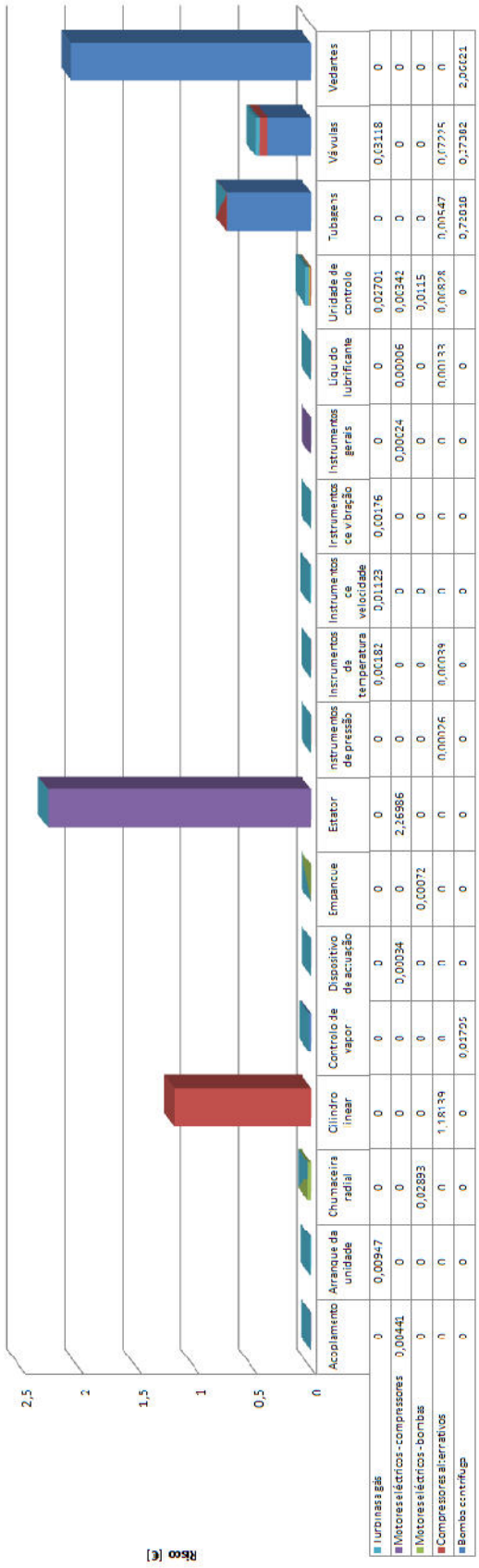


Gráfico 76 - Risco das combinações (componentes/modos de falha) dos equipamentos dinâmicos existentes na Unidade 1200.



	Acoplamento	Arranque da unidade	Chumaceira radial	Cilindro linear	Controlo de vapor	Dispositivo de actuação	Empanque	Estator	Instrumentos de pressão	Instrumentos da temperatura	Instrumentos de velocidade	Instrumentos de vibração	Instrumentos gerais	Liquido lubrificante	Unidade de controlo	Tubagens	Válvulas	Vedantes
Turbinas a gás	0	0,00947	0	0	0	0	0	0	0	0,00182	0,01123	0,00176	0	0	0,02701	0	0,03118	0
Motores eléctricos - compressores	0,00441	0	0	0	0	0,00034	0	2,26986	0	0	0	0	0,00024	0,00006	0,00342	0	0	0
Motores eléctricos - bombas	0	0	0,02893	0	0	0	0,00072	0	0	0	0	0	0	0	0,0115	0	0	0
Compressores alternativos	0	0	0	1,18139	0	0	0	0	0,00026	0,00039	0	0	0	0,00133	0,00828	0,00547	0,07225	0
Bombas centrífugas	0	0	0	0	0,01795	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,72618	0,17382	2,06121

Gráfico 77 - Risco dos componentes dos equipamentos dinâmicos existentes na Unidade 1200.

Anexo XIX – Diagrama e árvore de decisão

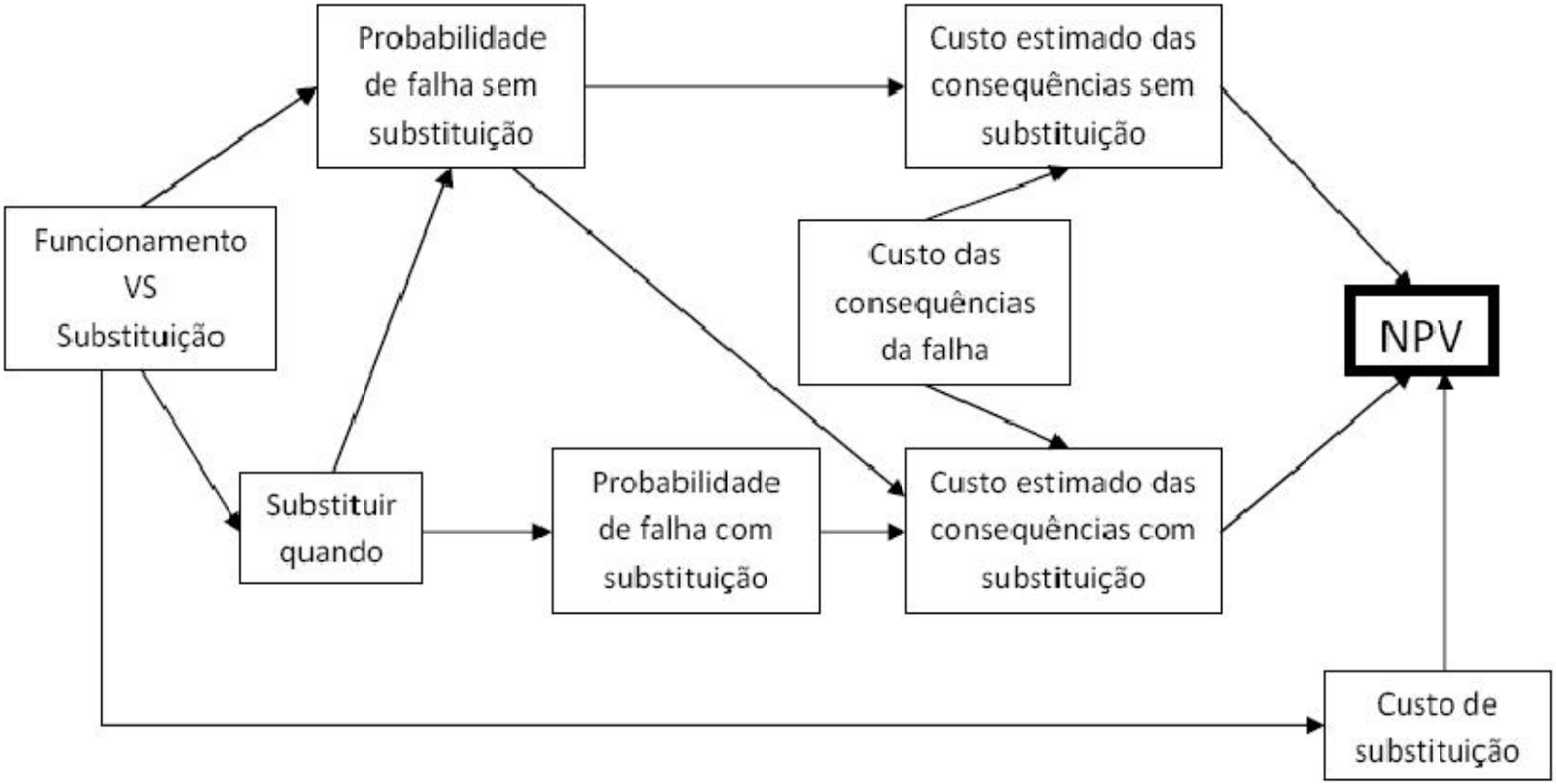


Figura 64 - Diagrama de decisão.

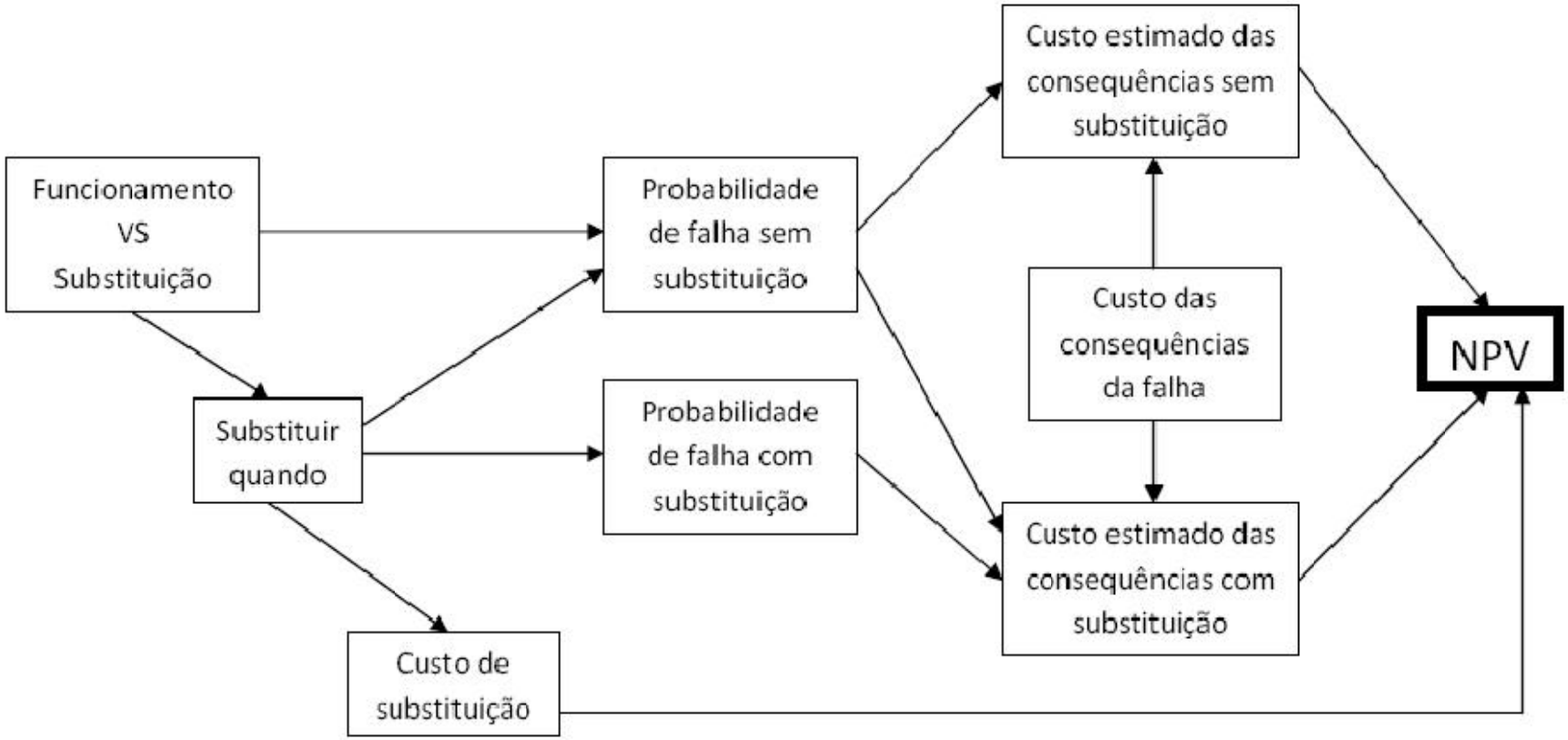


Figura 65 - Árvore de decisão.

Anexo XX – NPV do equipamento P-1201 A

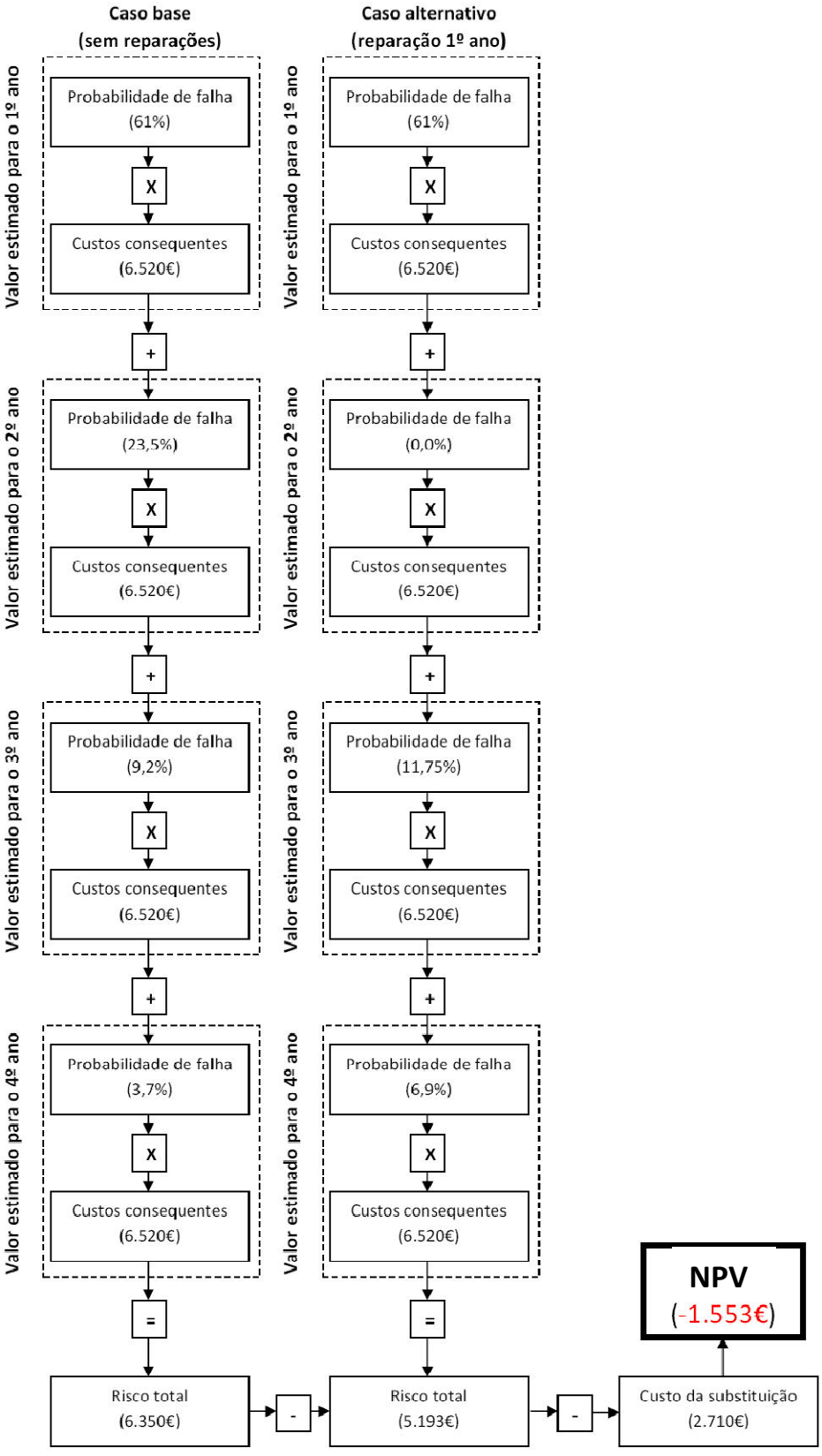


Figura 66 - Cálculo do NPV casa base *vs.* caso alternativo (reparação 1º ano) da P-1201 A.

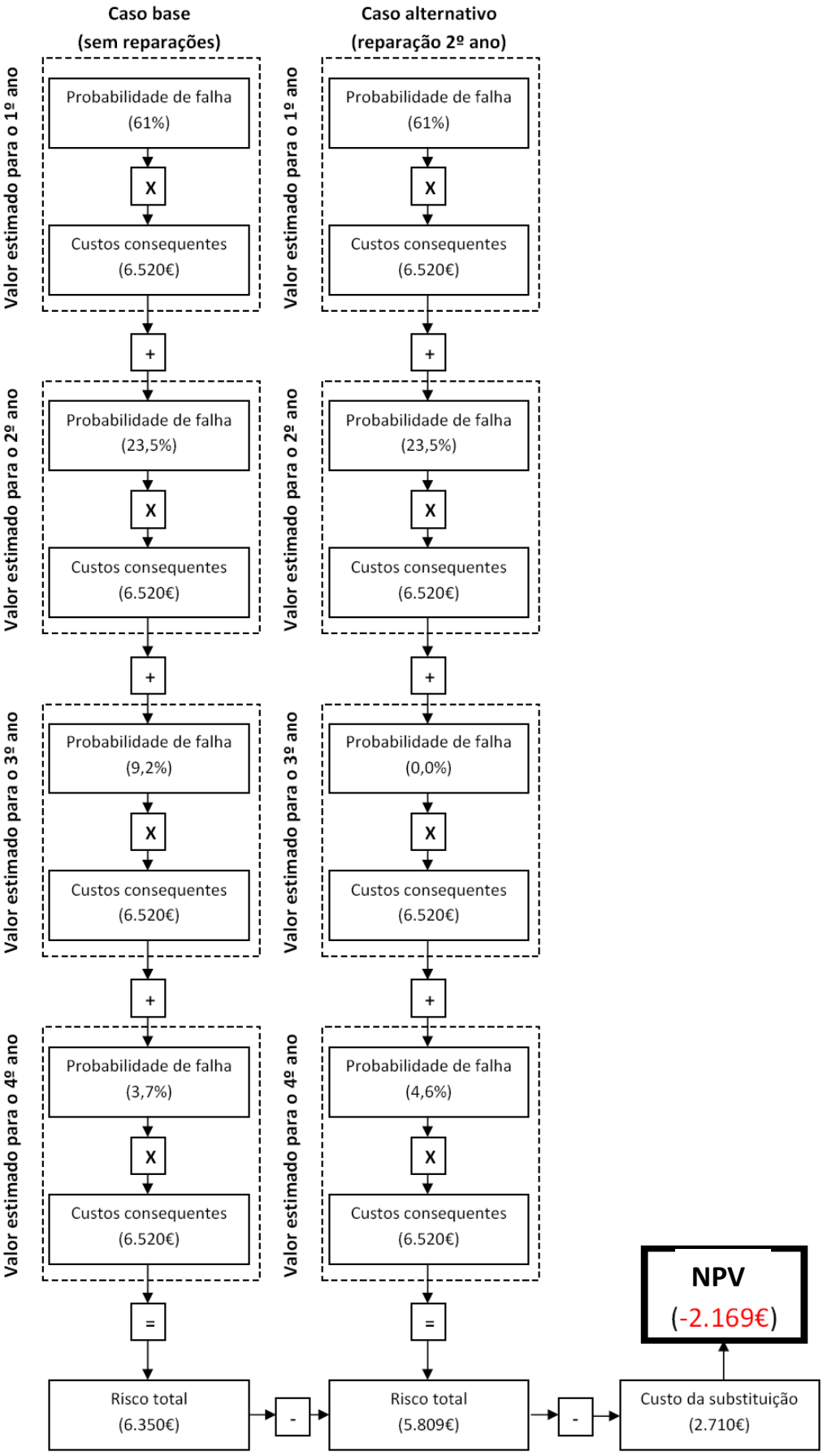


Figura 67 - Cálculo do NPV casa base *vs.* caso alternativo (reparação 2º ano) da P-1201 A.

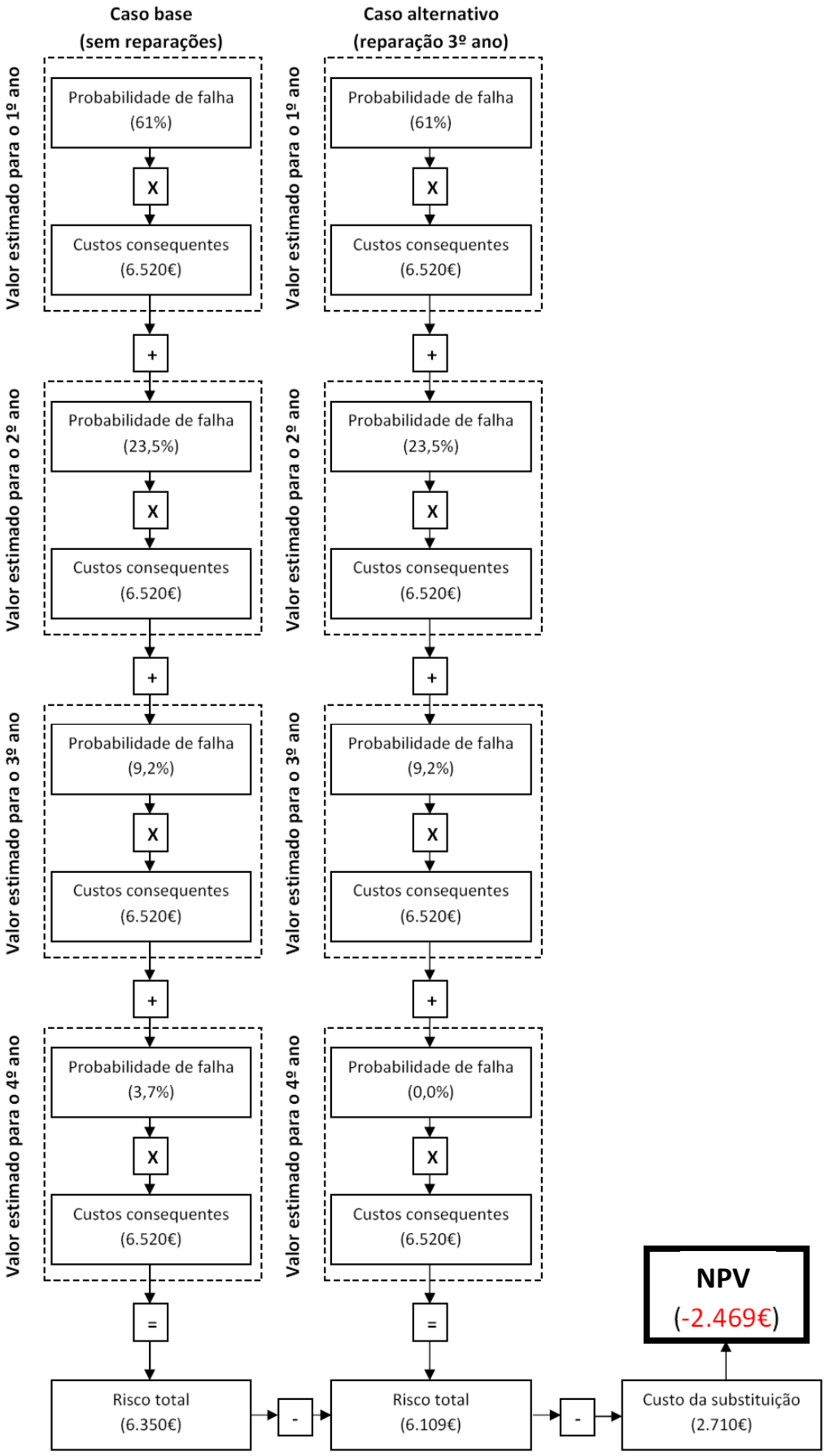


Figura 68 - Cálculo do NPV casa base *vs.* caso alternativo (reparação 3º ano) da P-1201 A.

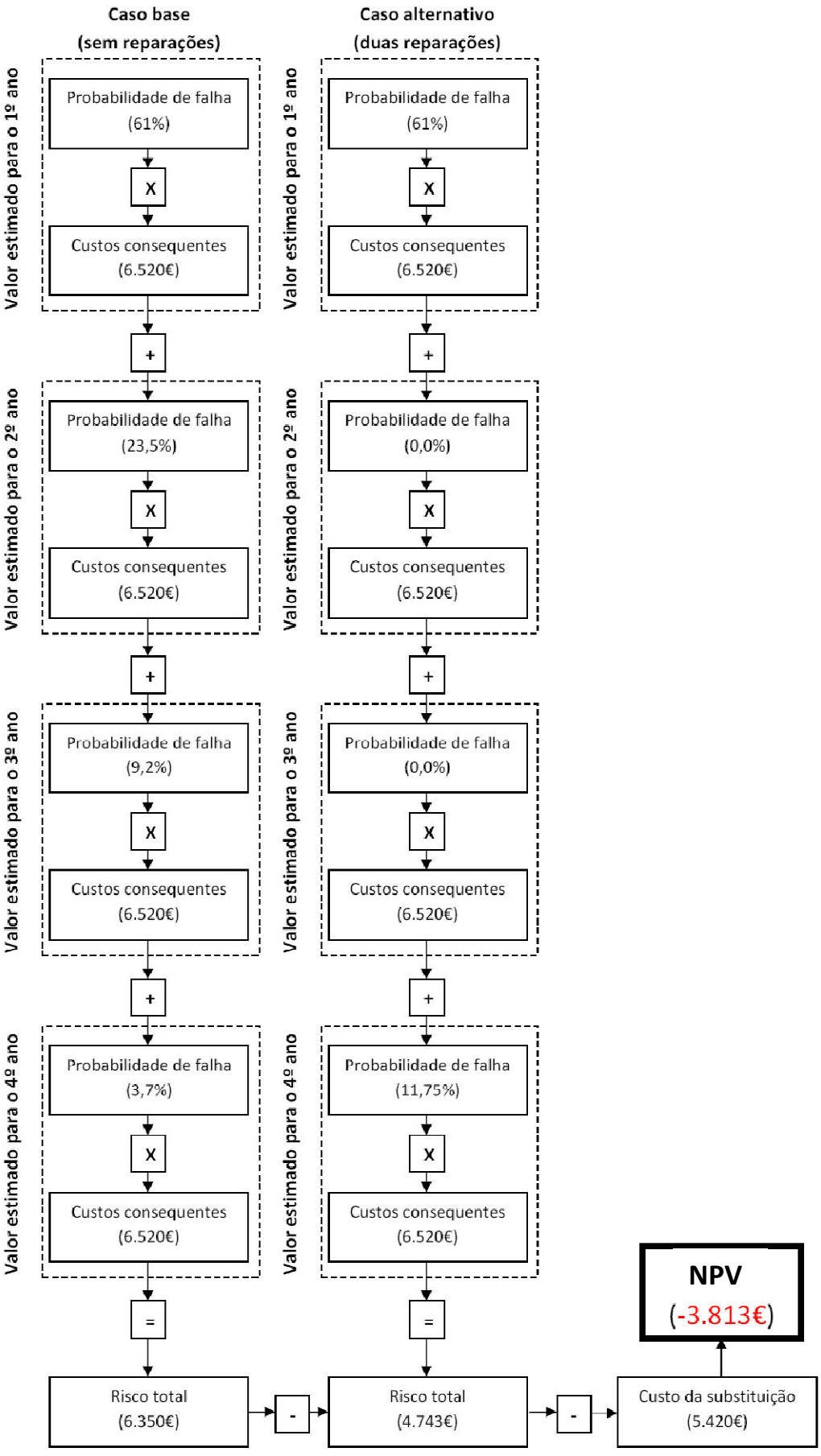


Figura 69 - Cálculo do NPV casa base *vs*. caso alternativo (duas reparações) da P-1201 A.

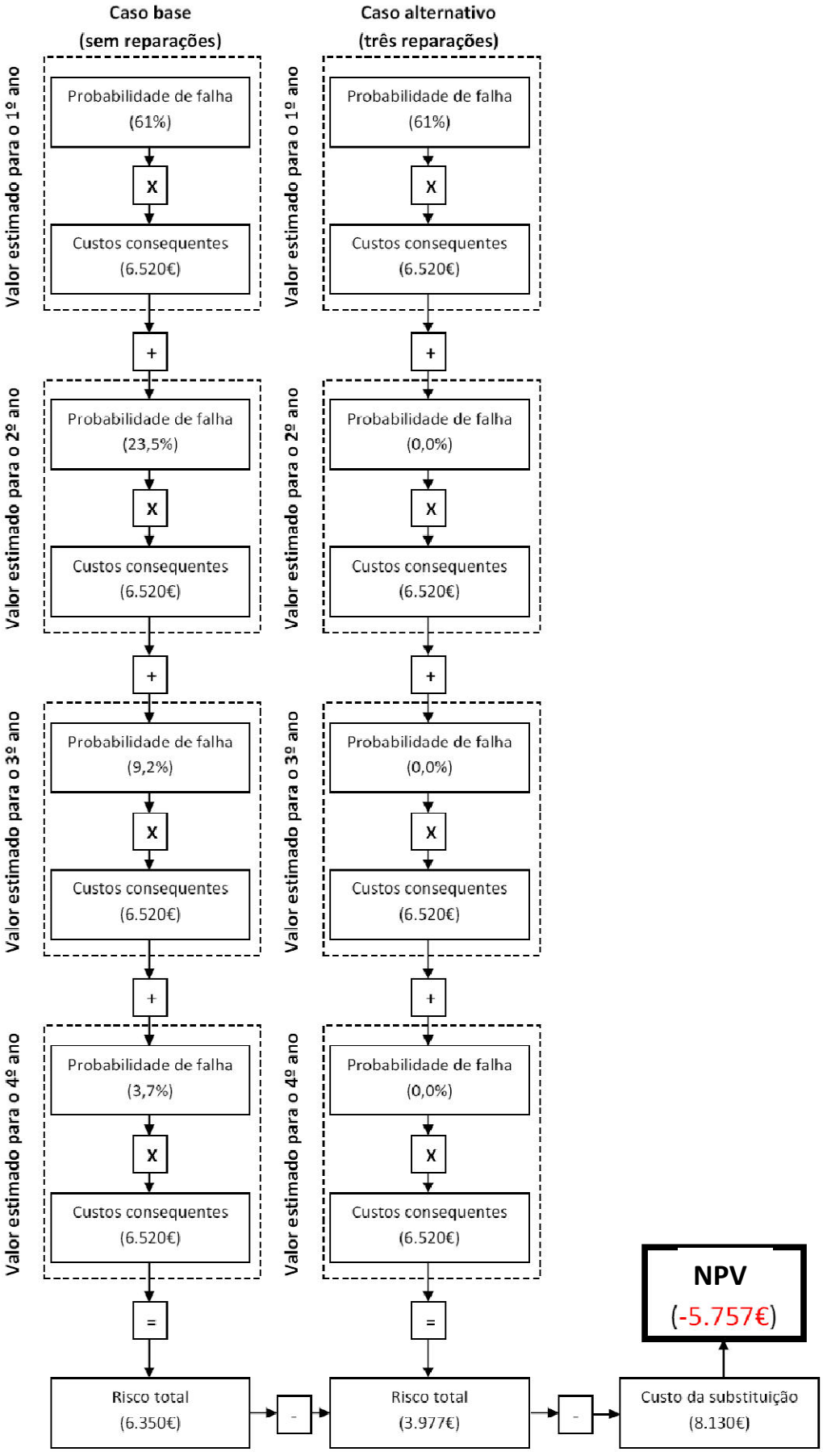


Figura 70 - Cálculo do NPV casa base *vs.* caso alternativo (reparação todos os anos) da P-1201 A.

Anexo XXI - NPV dos componentes

Estator – Motores eléctricos – compressores – processamento de gás

Contabilizando a perda de produção

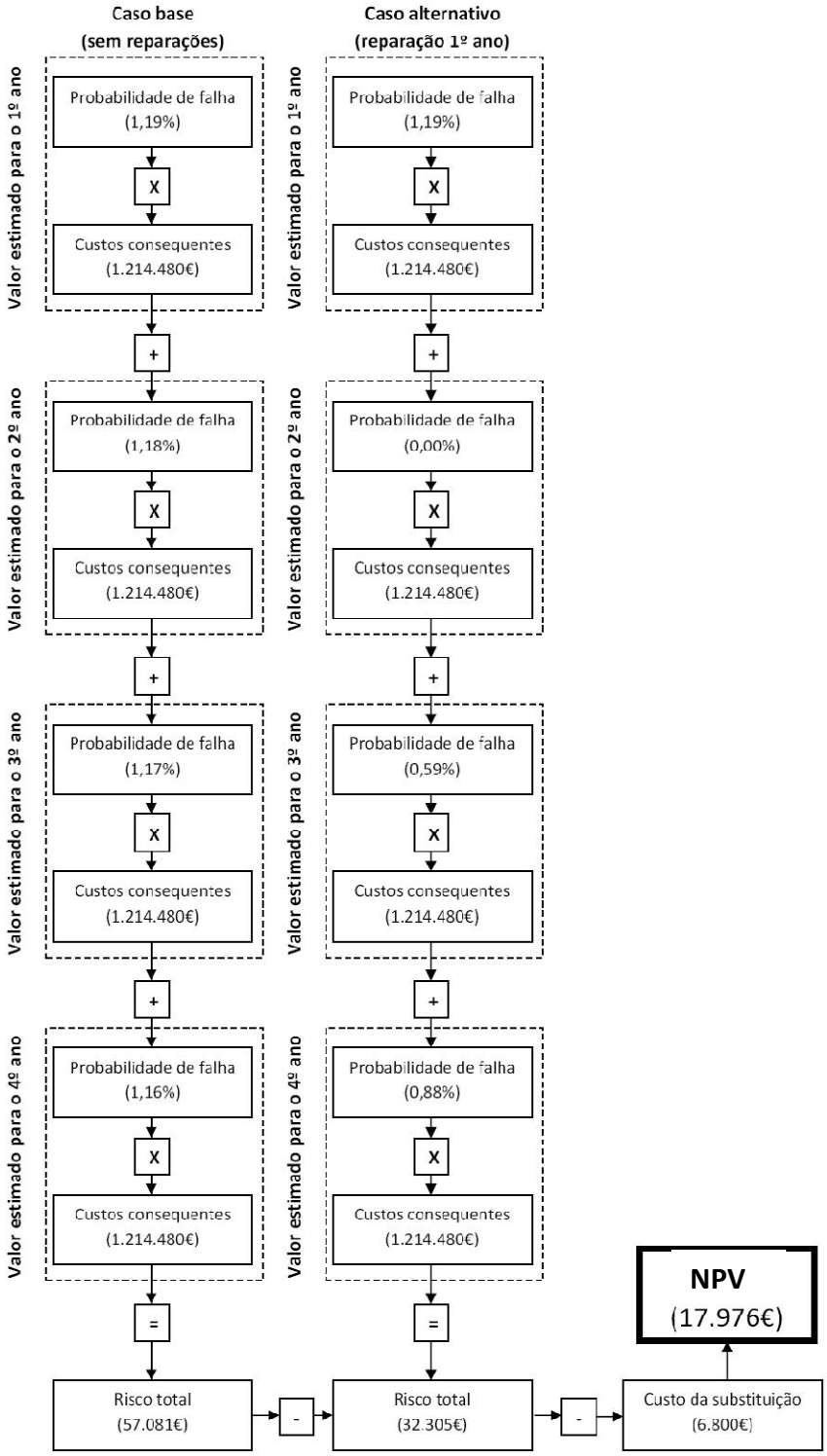


Figura 71 - Cálculo do NPV casa base *vs*. caso alternativo (reparação 1º ano) do estator (c/ p.p.).

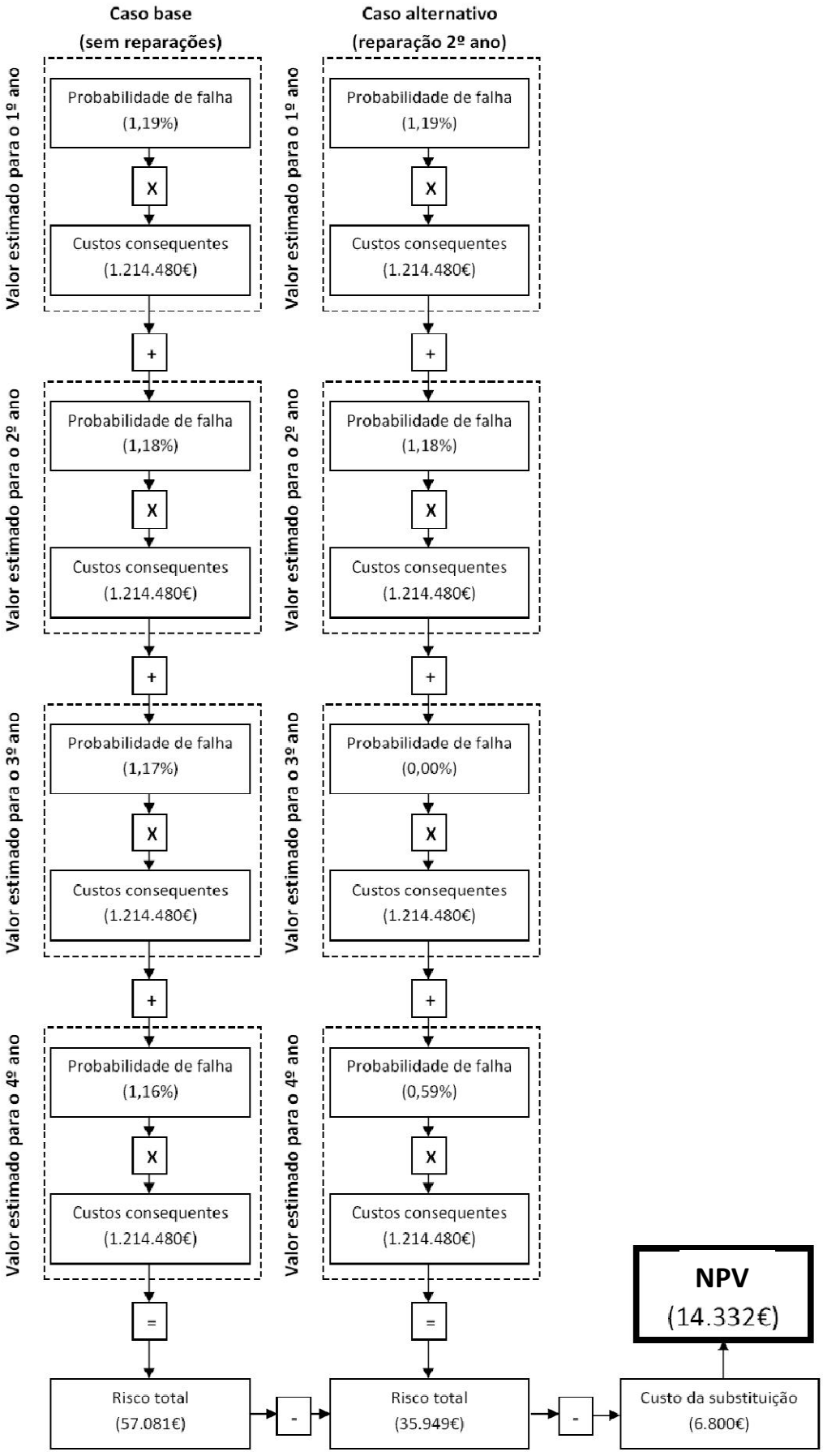


Figura 72 - Cálculo do NPV casa base *vs*. caso alternativo (reparação 2º ano) do estator (c/ p.p.).

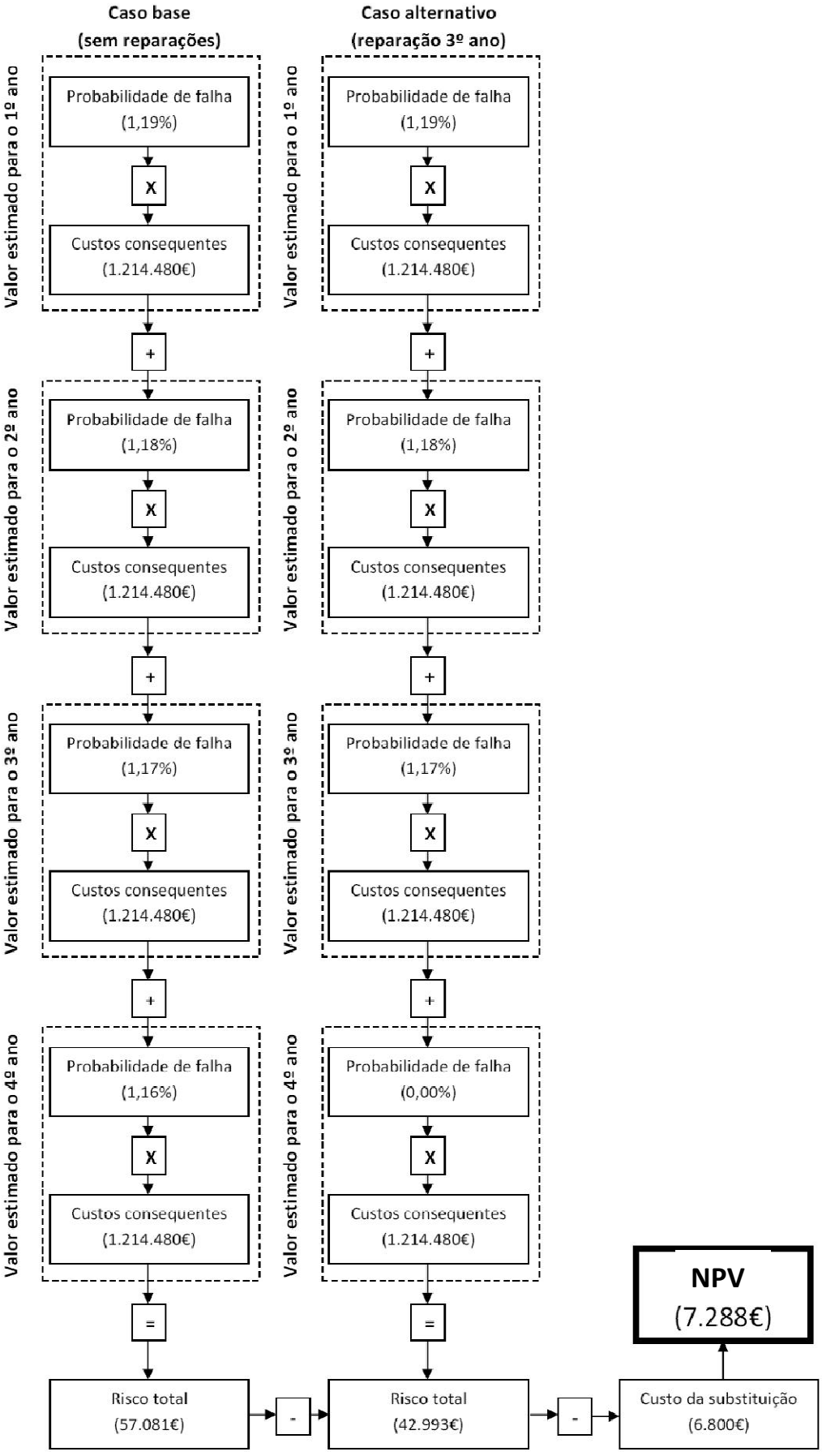


Figura 73 - Cálculo do NPV casa base *vs.* caso alternativo (reparação 3º ano) do estator (c/ p.p.).

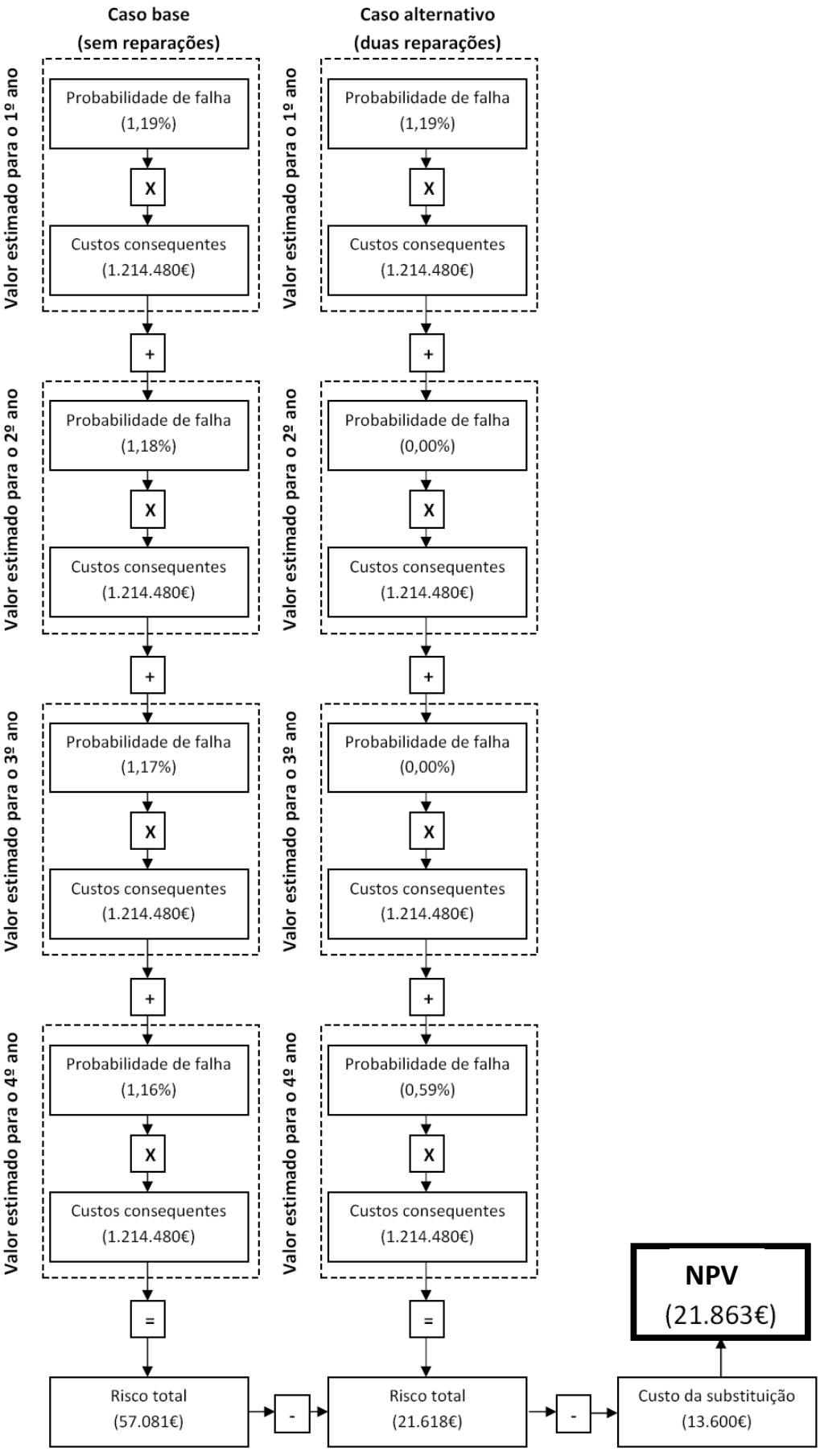


Figura 74 - Cálculo do NPV casa base *vs*. caso alternativo (duas reparações) do estator (c/ p.p.).

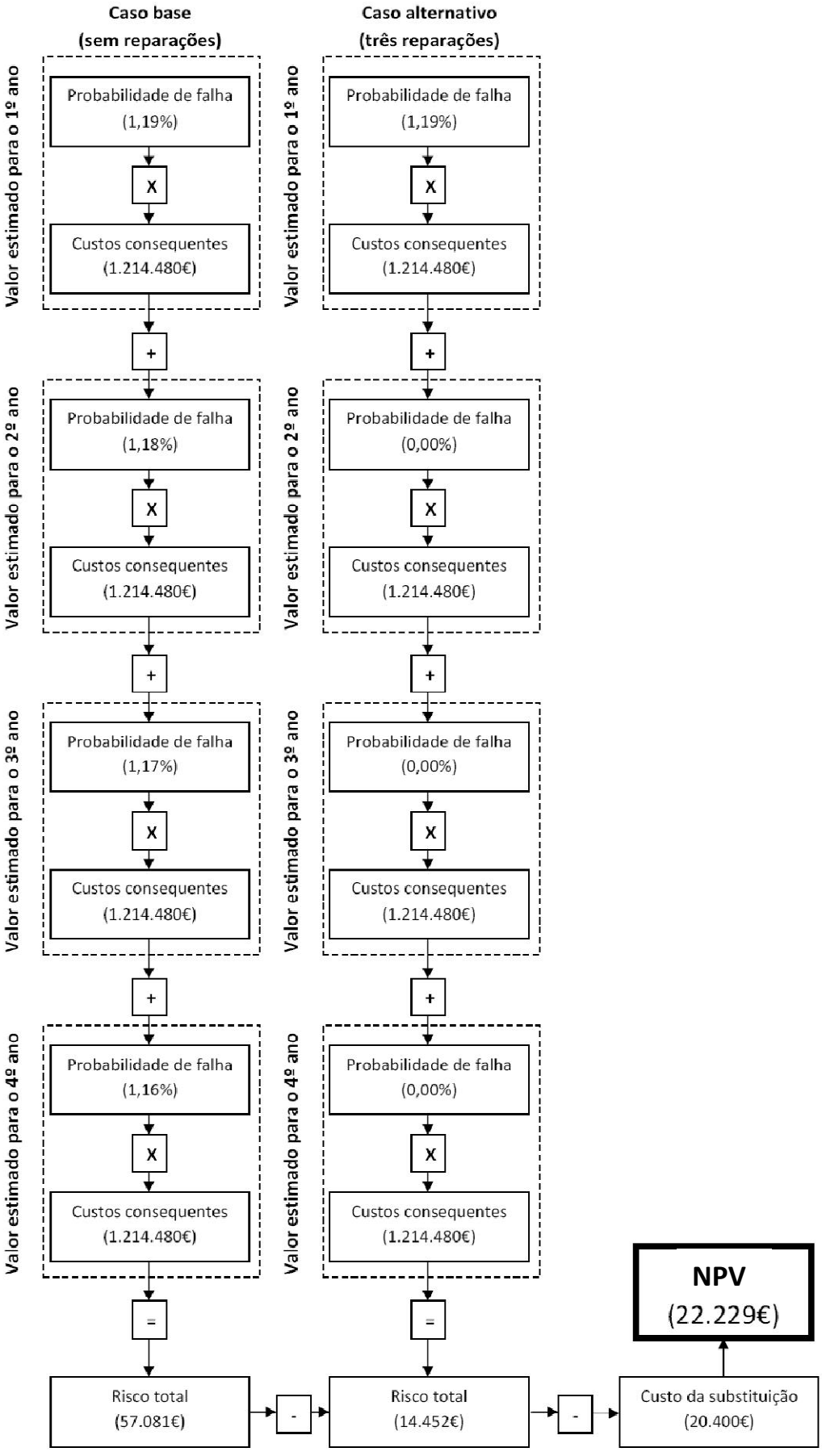


Figura 75 - Cálculo do NPV casa base *vs*. caso alternativo (reparação todos os anos) do estator (c/ p.p.).

Sem contabilizar a perda de produção

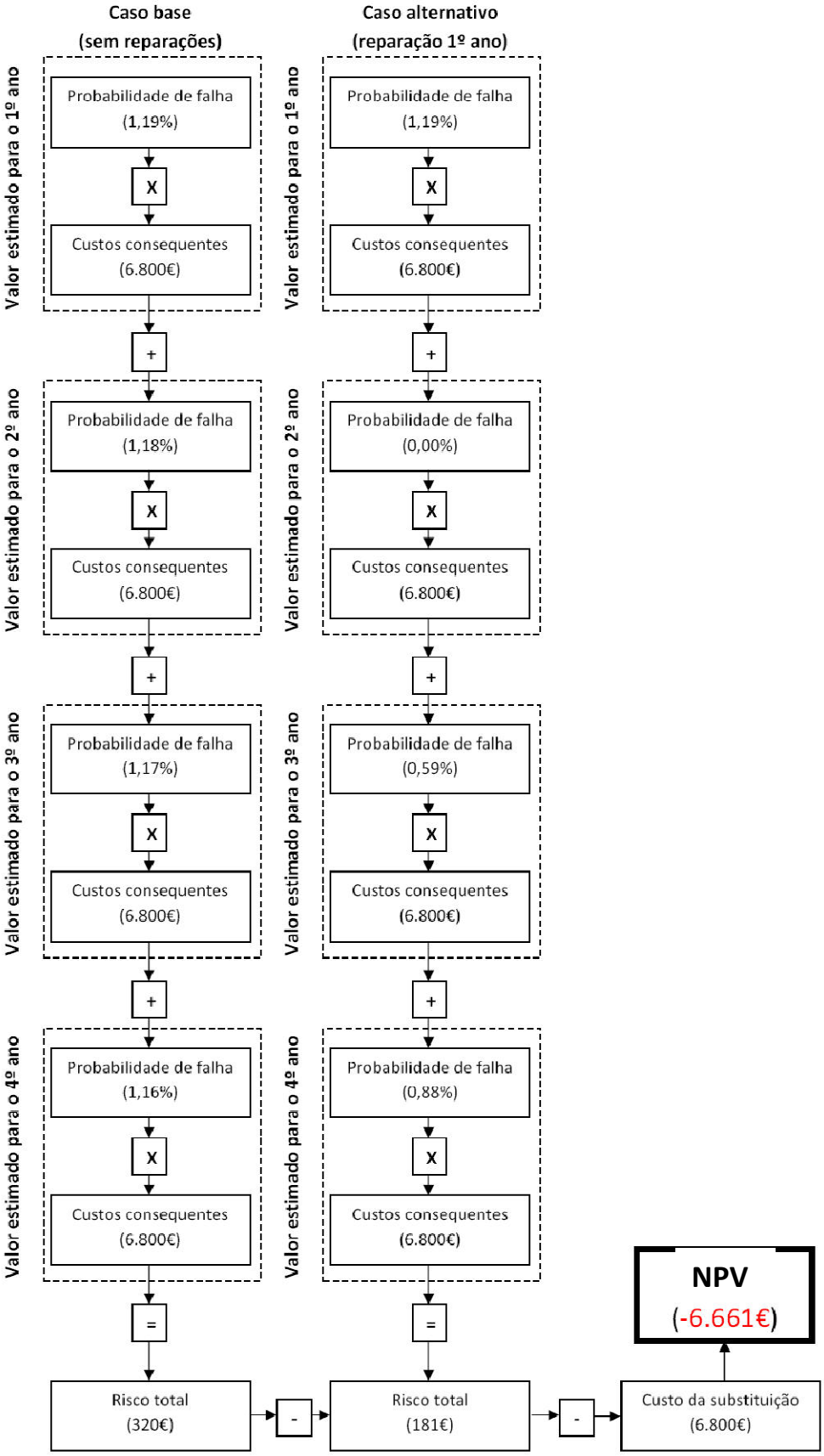


Figura 76 - Cálculo do NPV casa base *vs*. caso alternativo (reparação 1º ano) do estator (s/ p.p.).

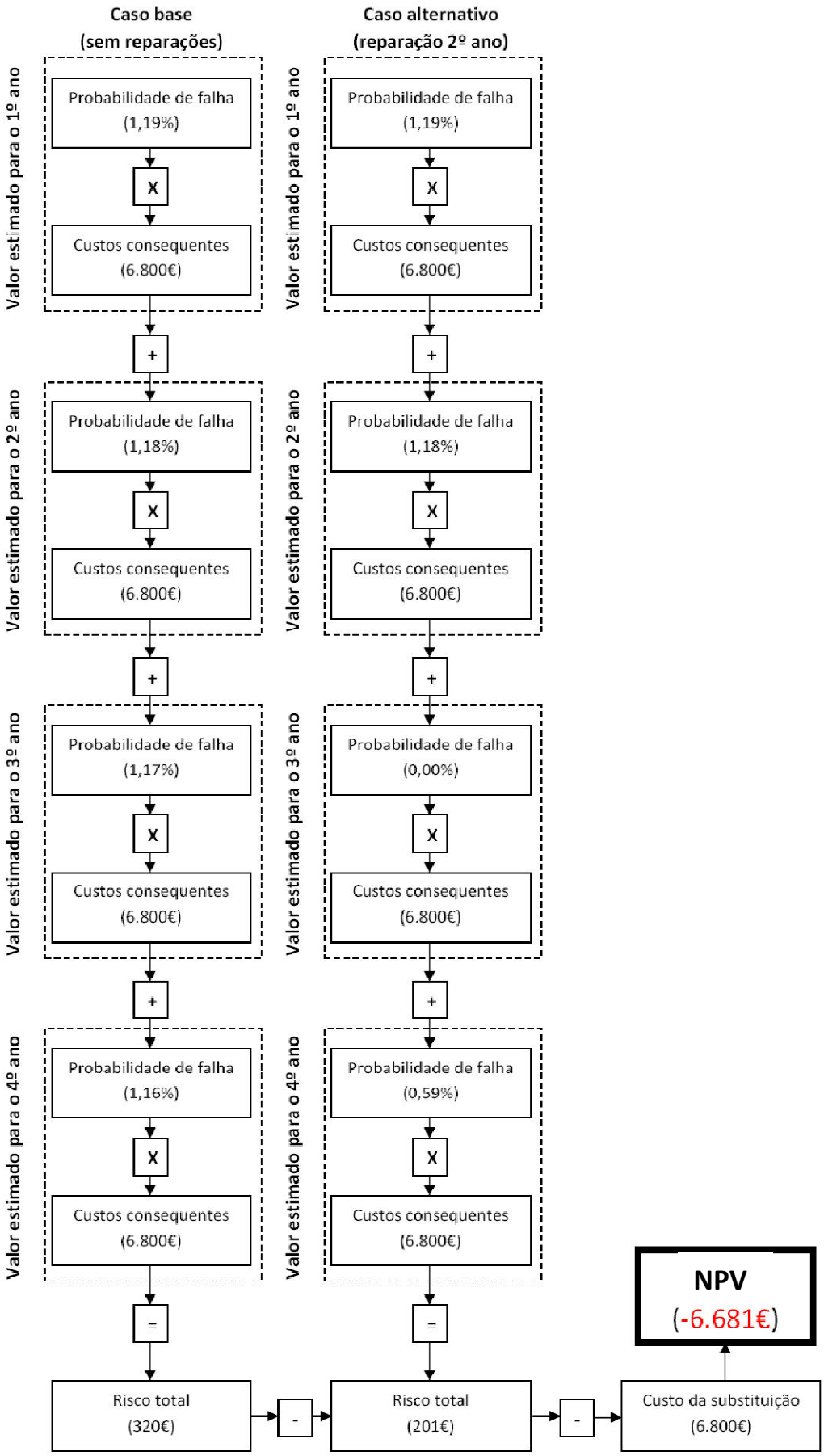


Figura 77 - Cálculo do NPV casa base *vs*. caso alternativo (reparação 2º ano) do estator (s/ p.p.).

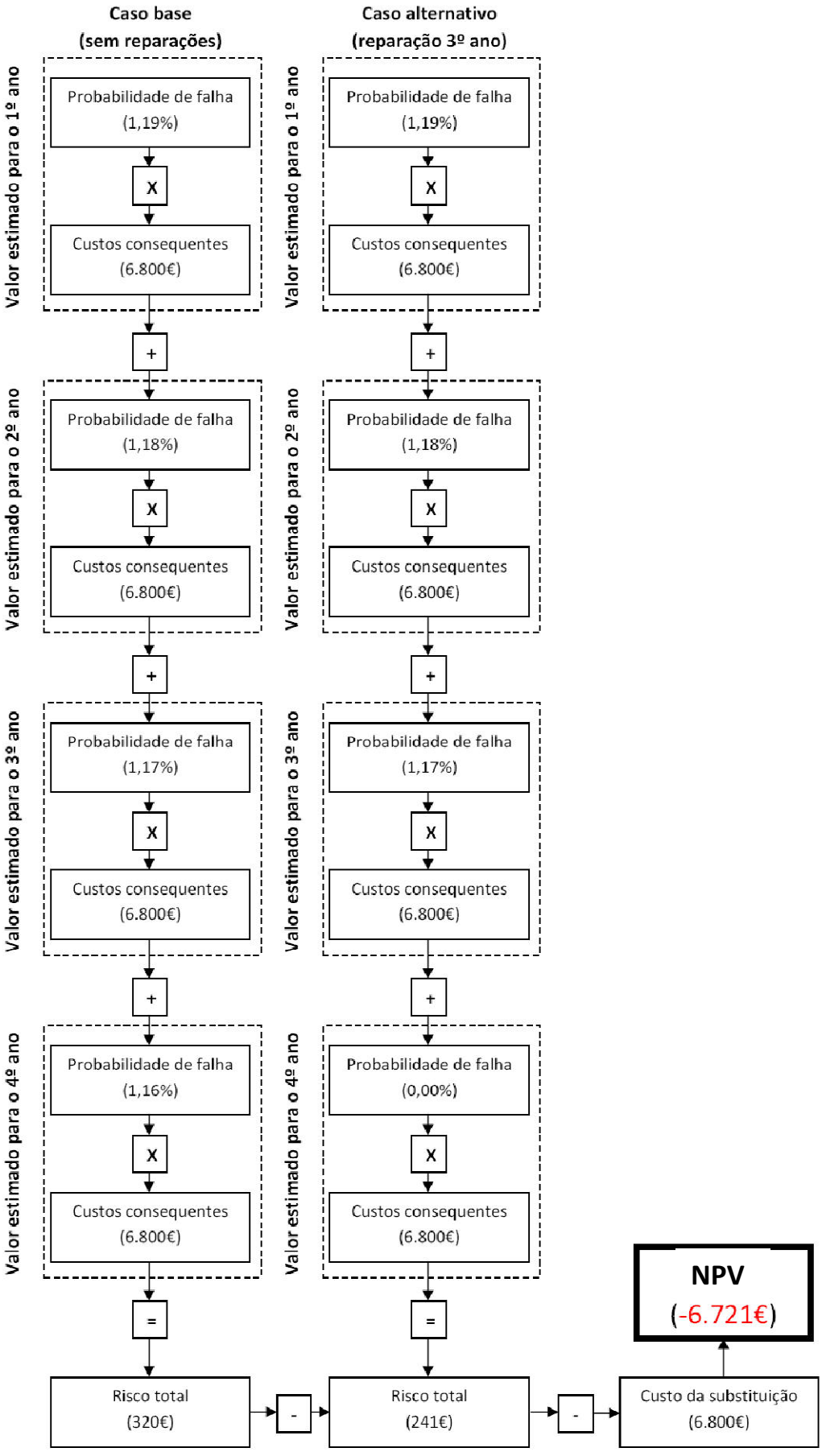


Figura 78 - Cálculo do NPV casa base *vs*. caso alternativo (reparação 3º ano) do estator (s/ p.p.).

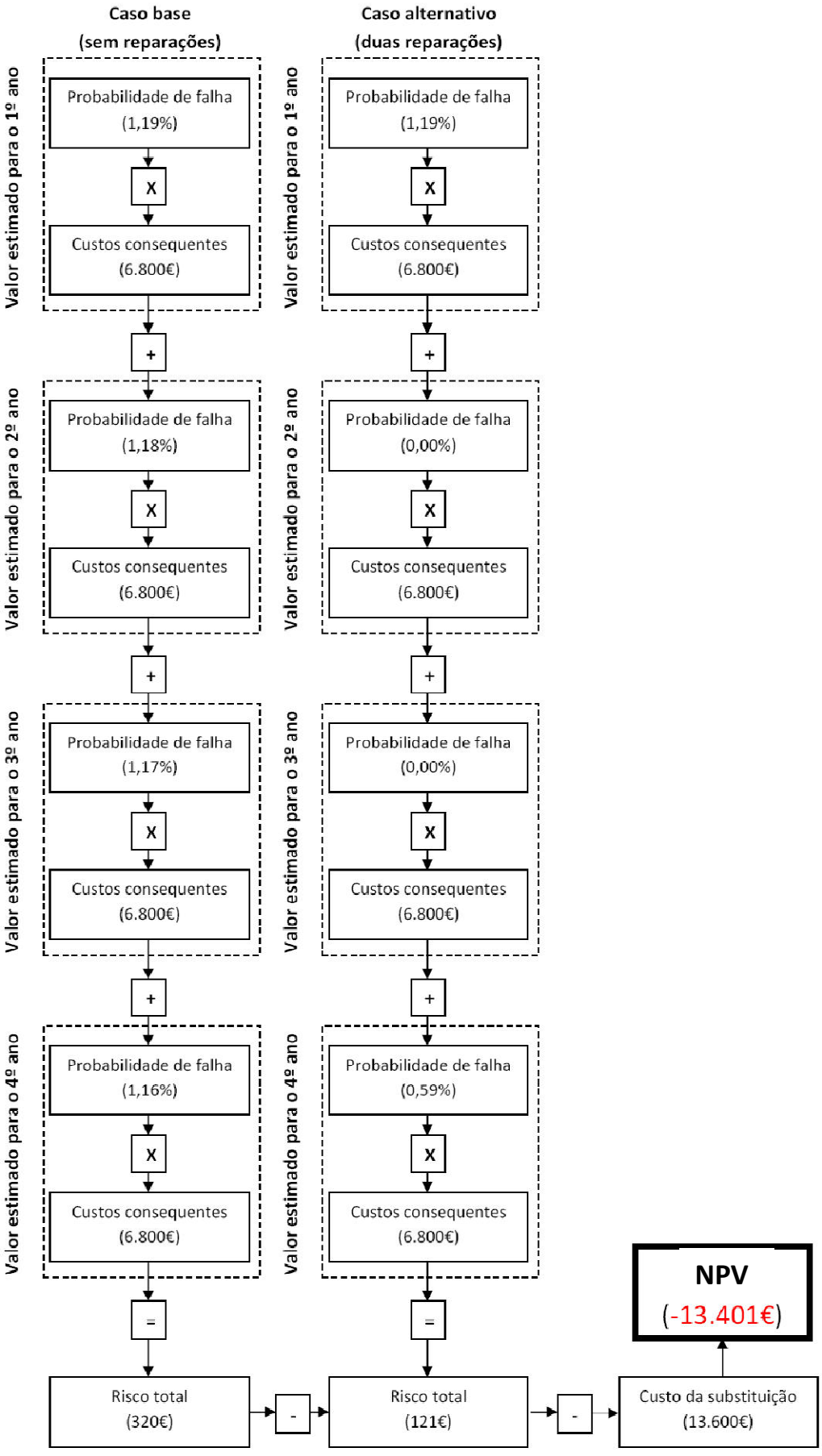


Figura 79 - Cálculo do NPV casa base *vs*. caso alternativo (duas reparações) do estator (s/ p.p.).

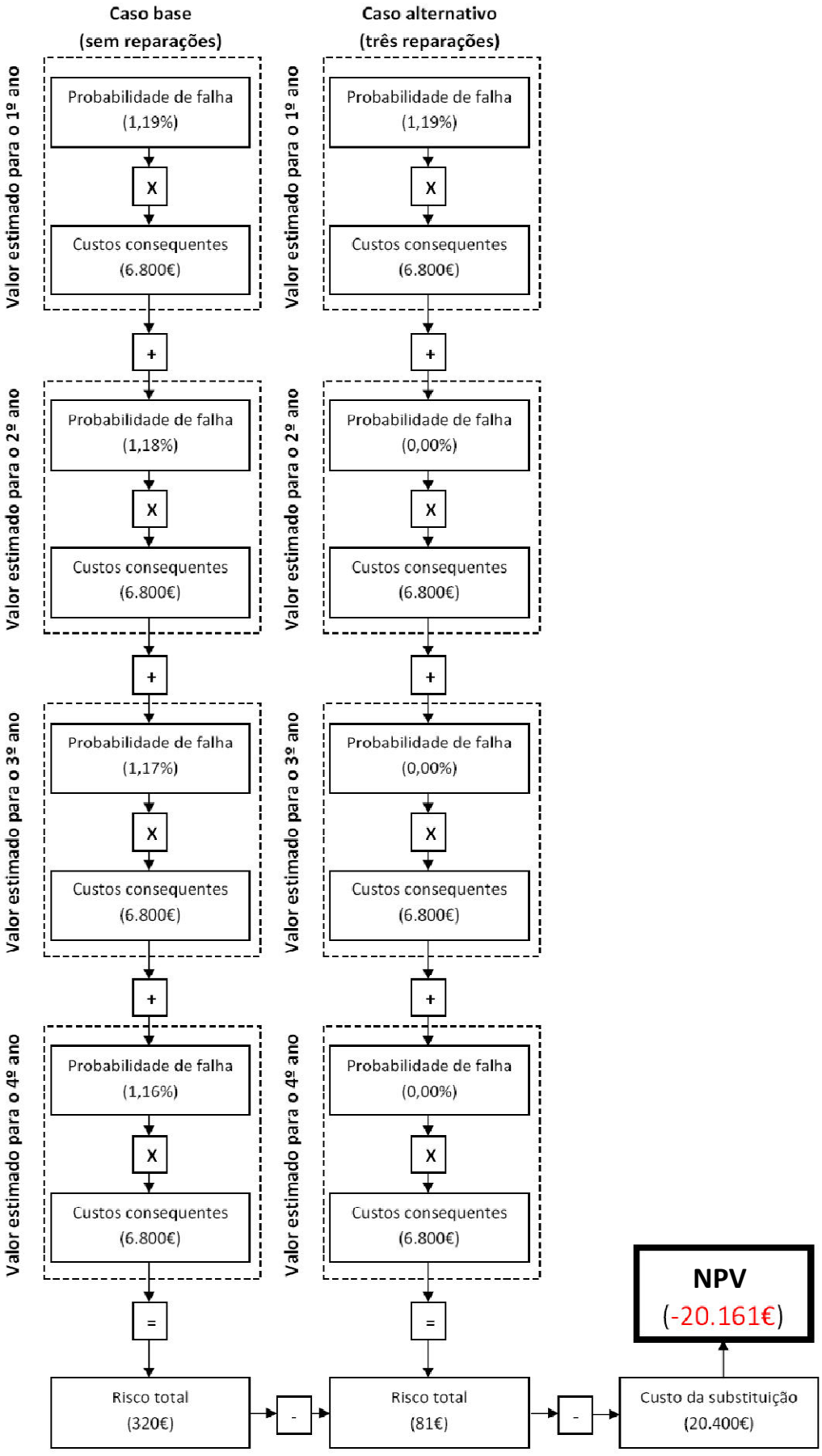


Figura 80 - Cálculo do NPV casa base *vs*. caso alternativo (reparação todos os anos) do estator (s/ p.p.).

Tubagens – Bombas centrífugas – processamento do produto

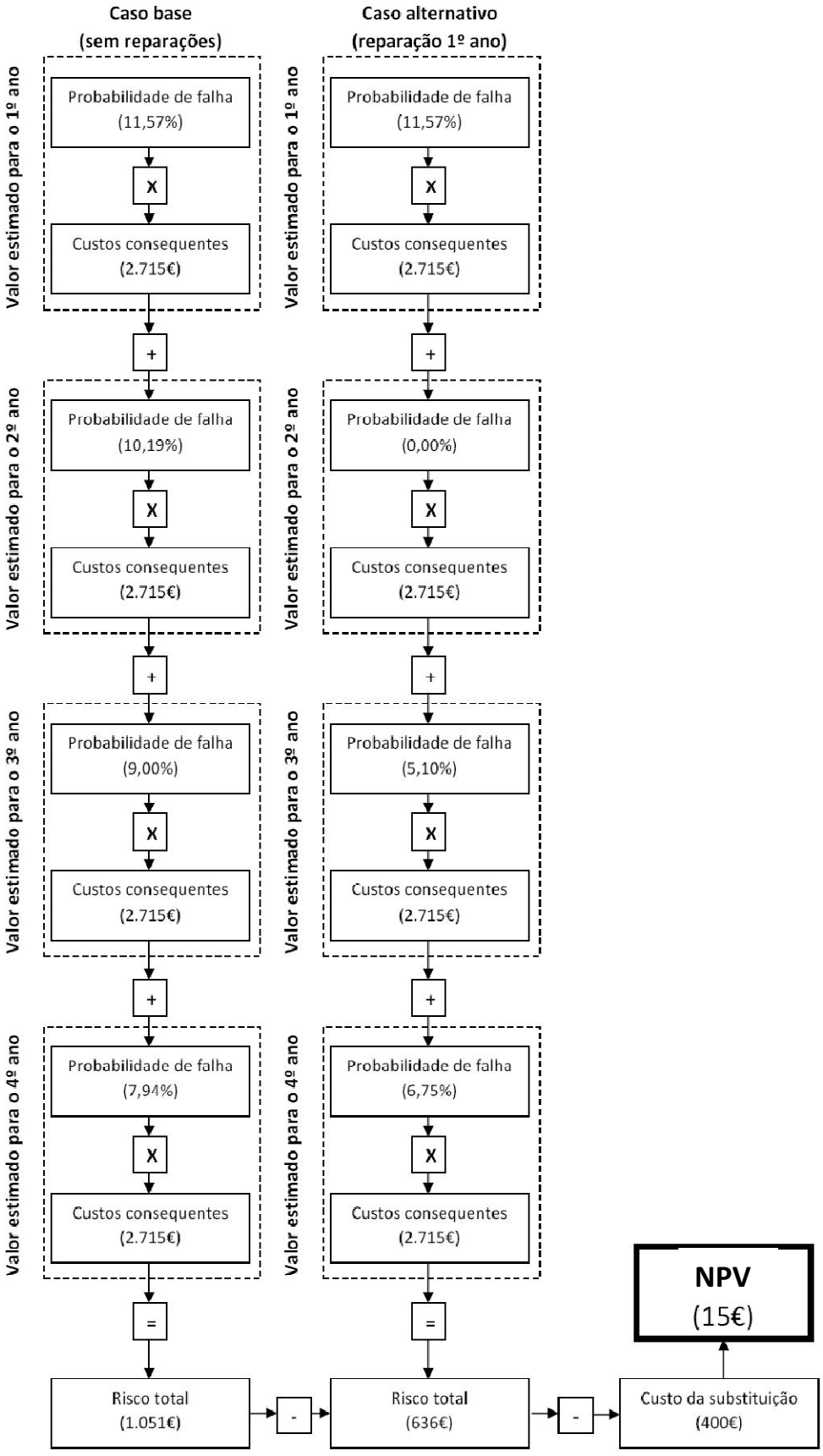


Figura 81 - Cálculo do NPV casa base *vs*. caso alternativo (reparação 1º ano) das tubagens.

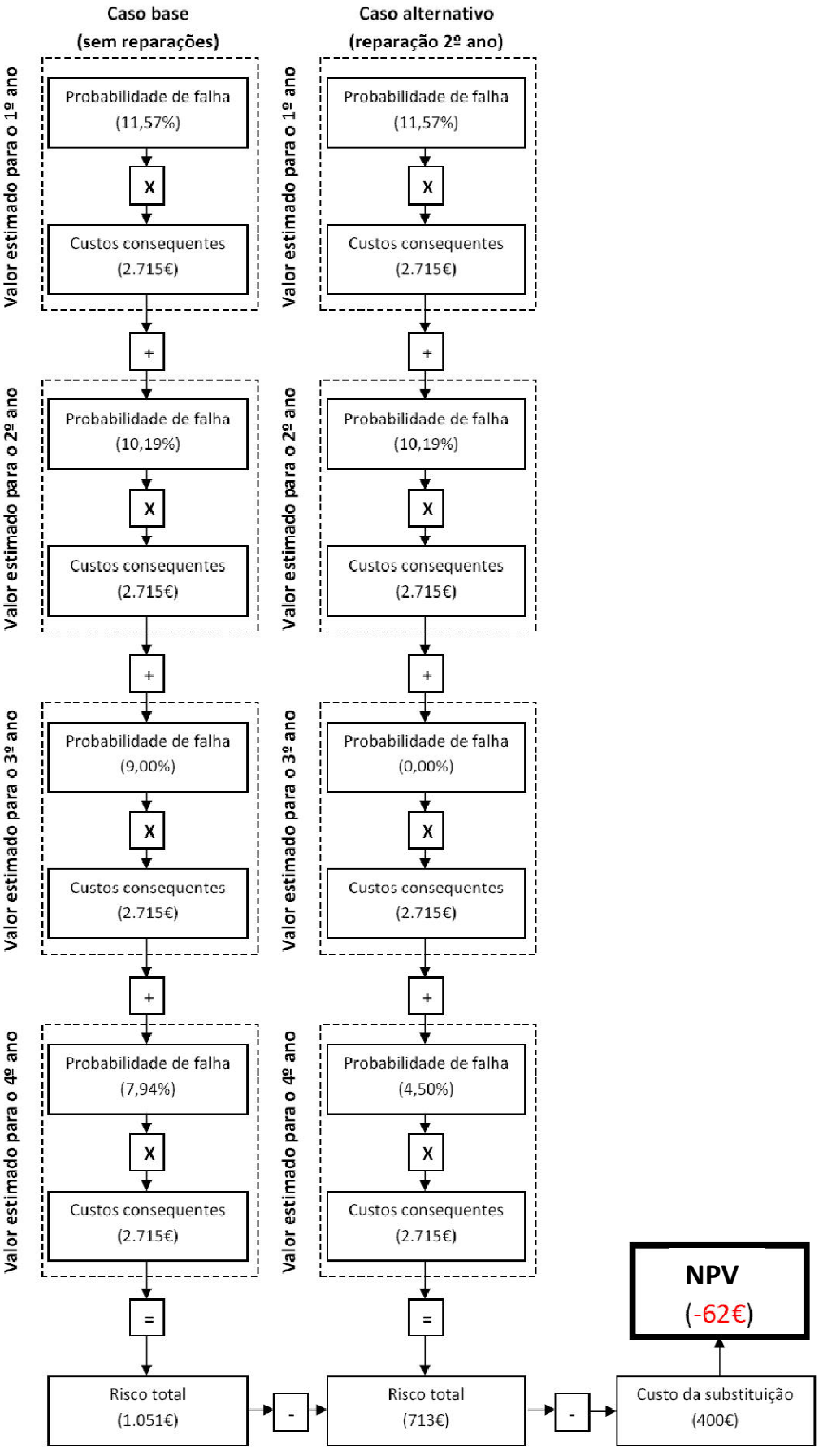


Figura 82 - Cálculo do NPV casa base *vs.* caso alternativo (reparação 2º ano) das tubagens.

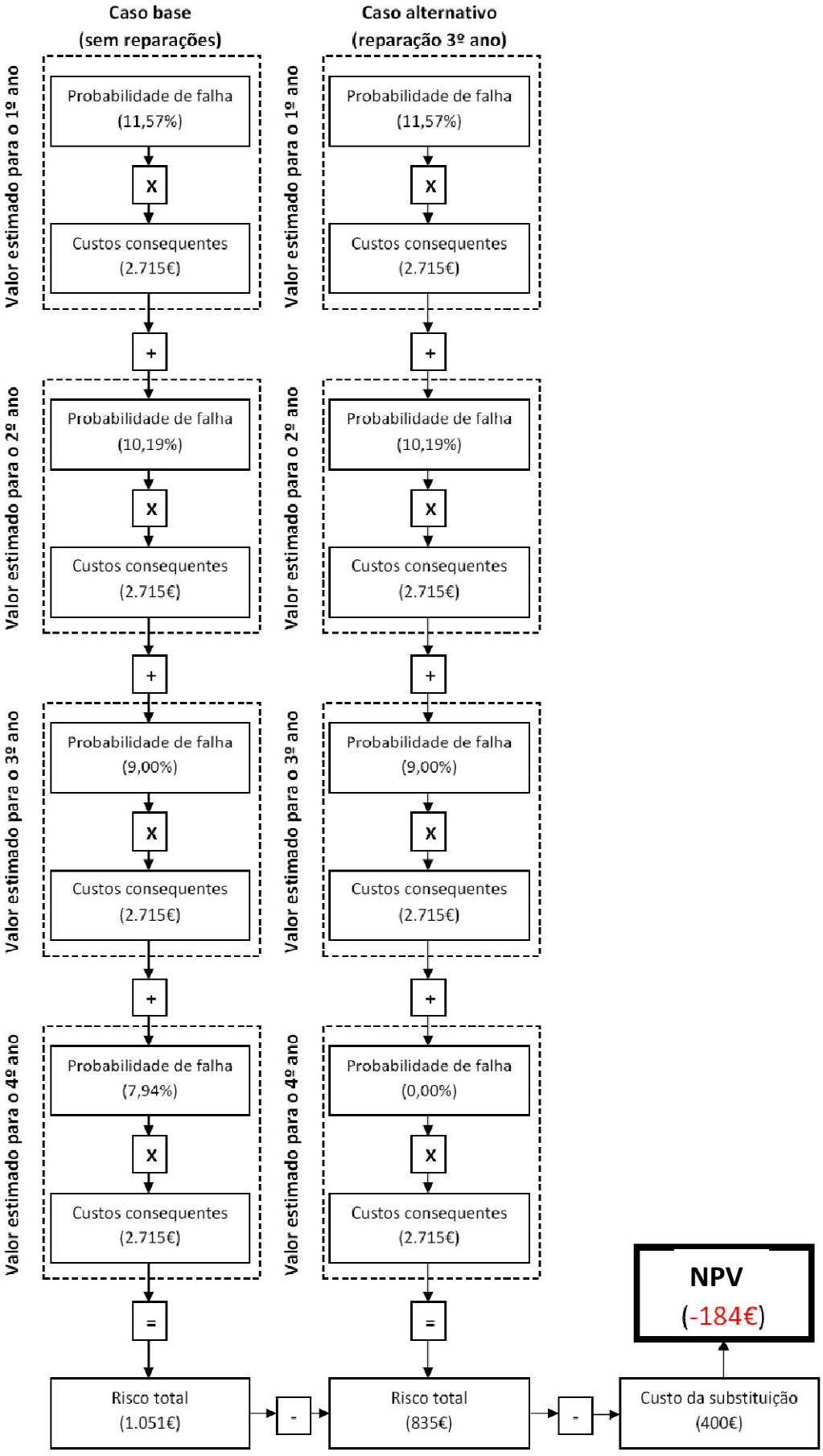


Figura 83 - Cálculo do NPV casa base *vs*. caso alternativo (reparação 3º ano) das tubagens.

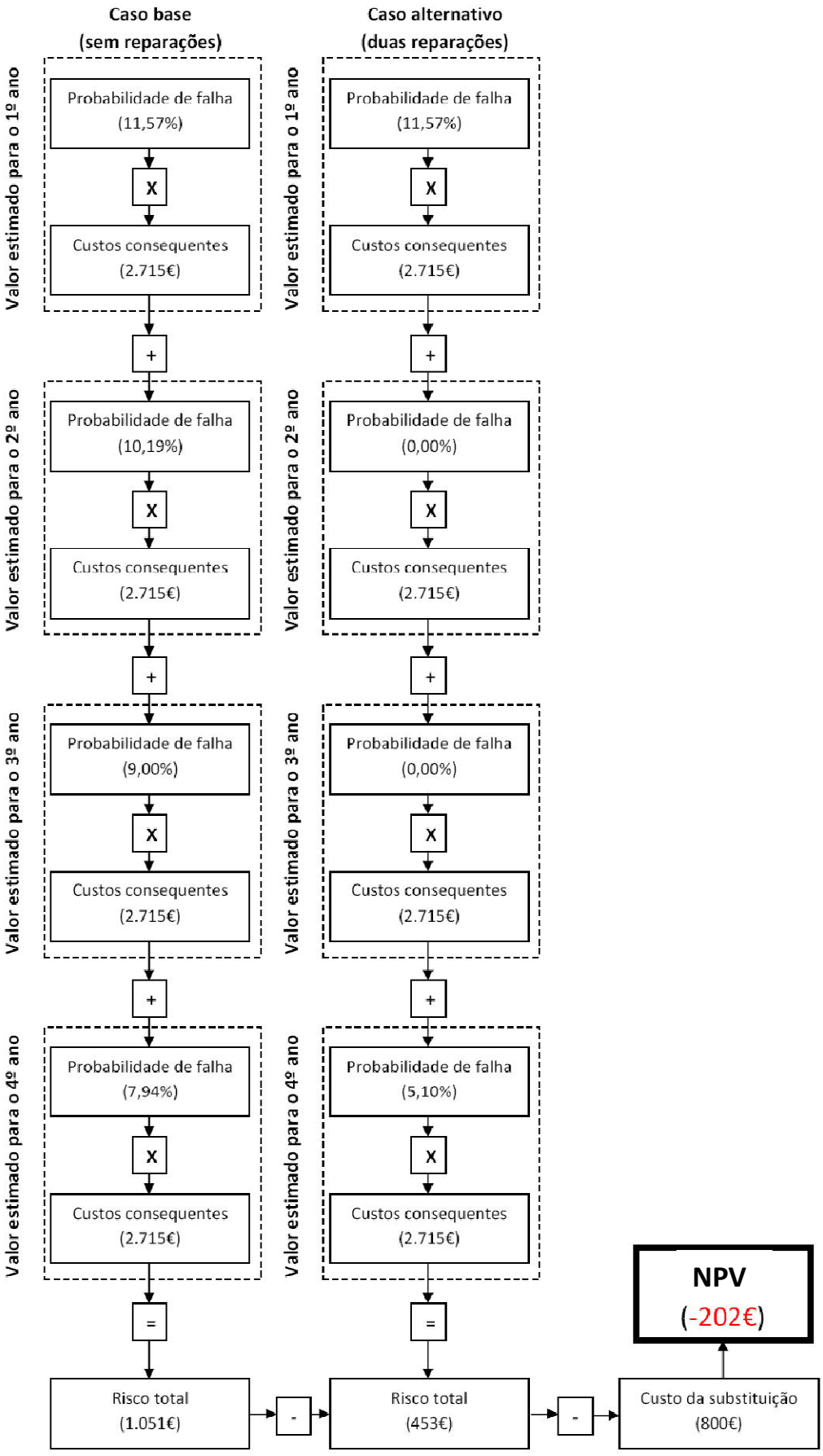


Figura 84 - Cálculo do NPV casa base *vs*. caso alternativo (duas reparações) das tubagens.

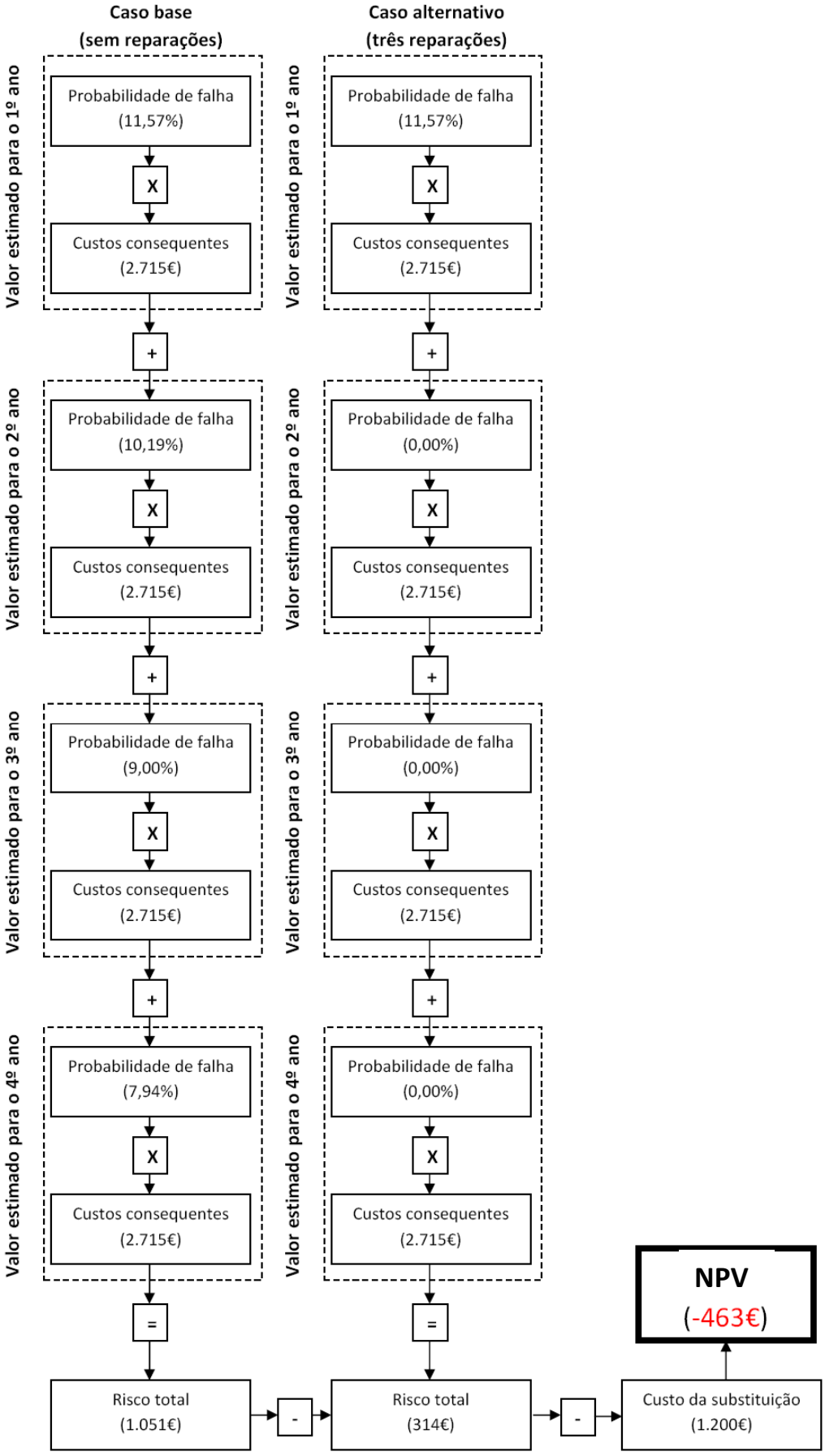


Figura 85 - Cálculo do NPV casa base *vs*. caso alternativo (reparação todos os anos) das tubagens.

Válvulas – Bombas centrífugas – processamento do produto

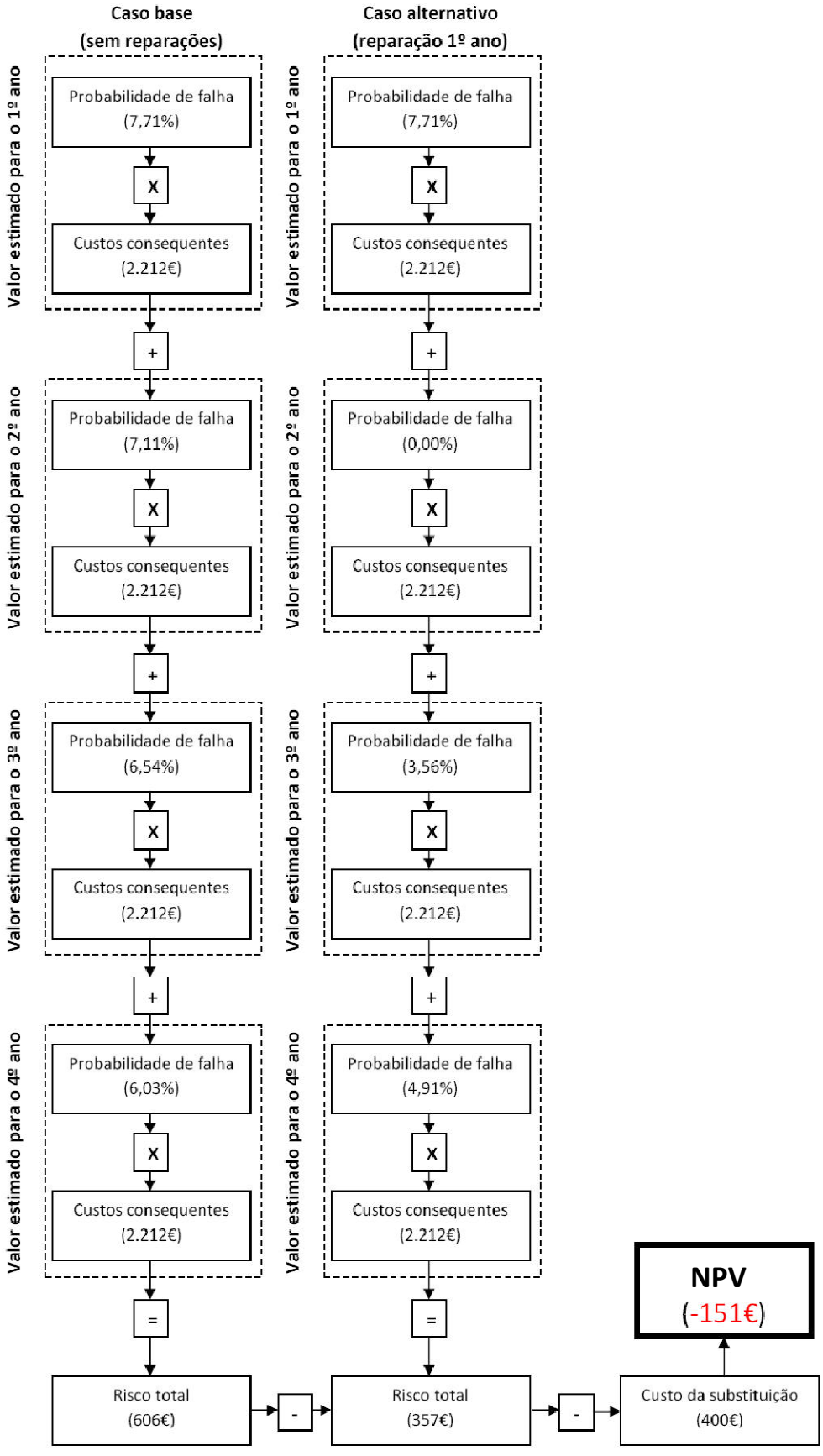


Figura 86 - Cálculo do NPV casa base *vs*. caso alternativo (reparação 1º ano) das válvulas.

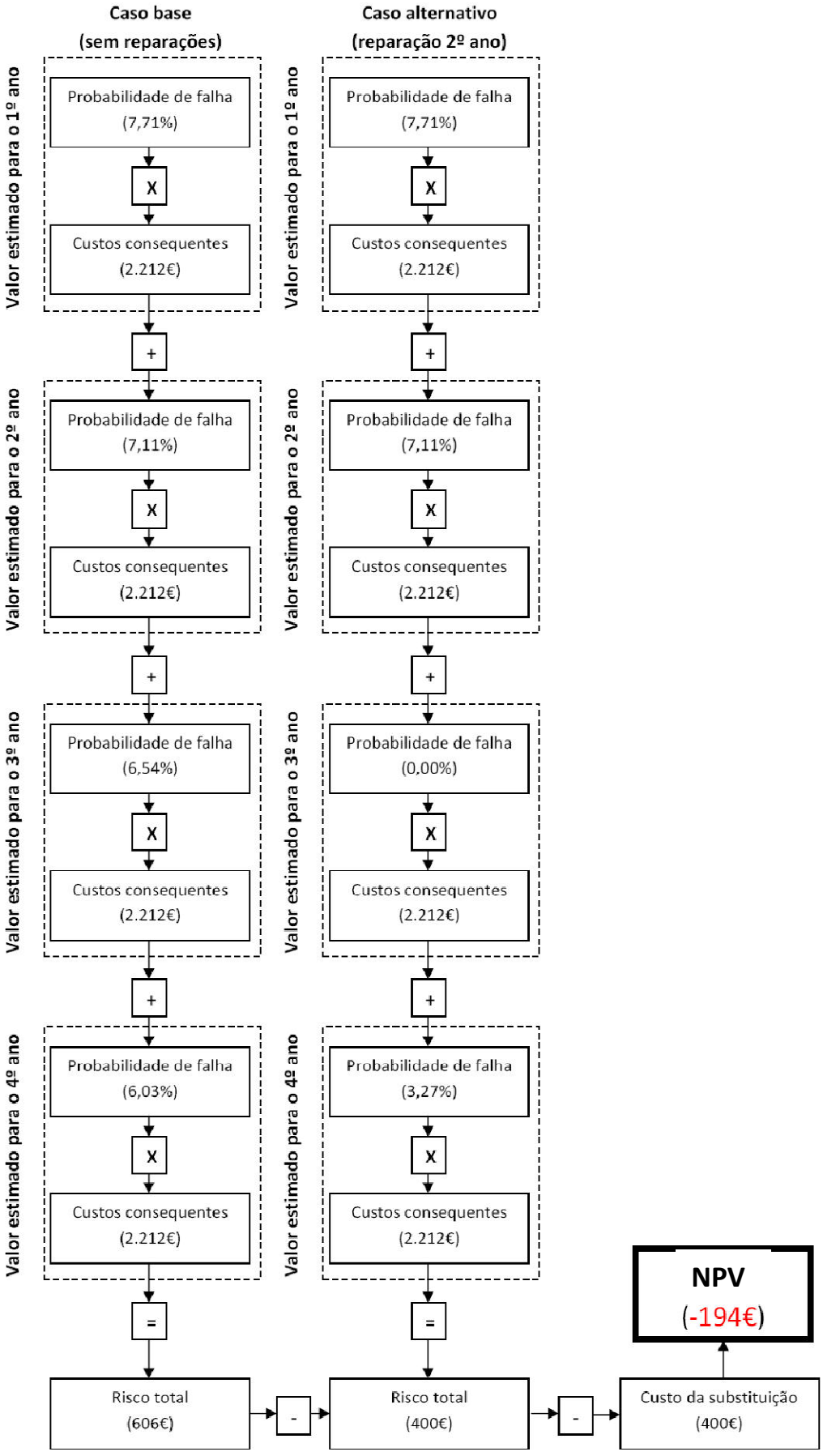


Figura 87 - Cálculo do NPV casa base *vs.* caso alternativo (reparação 2º ano) das válvulas.

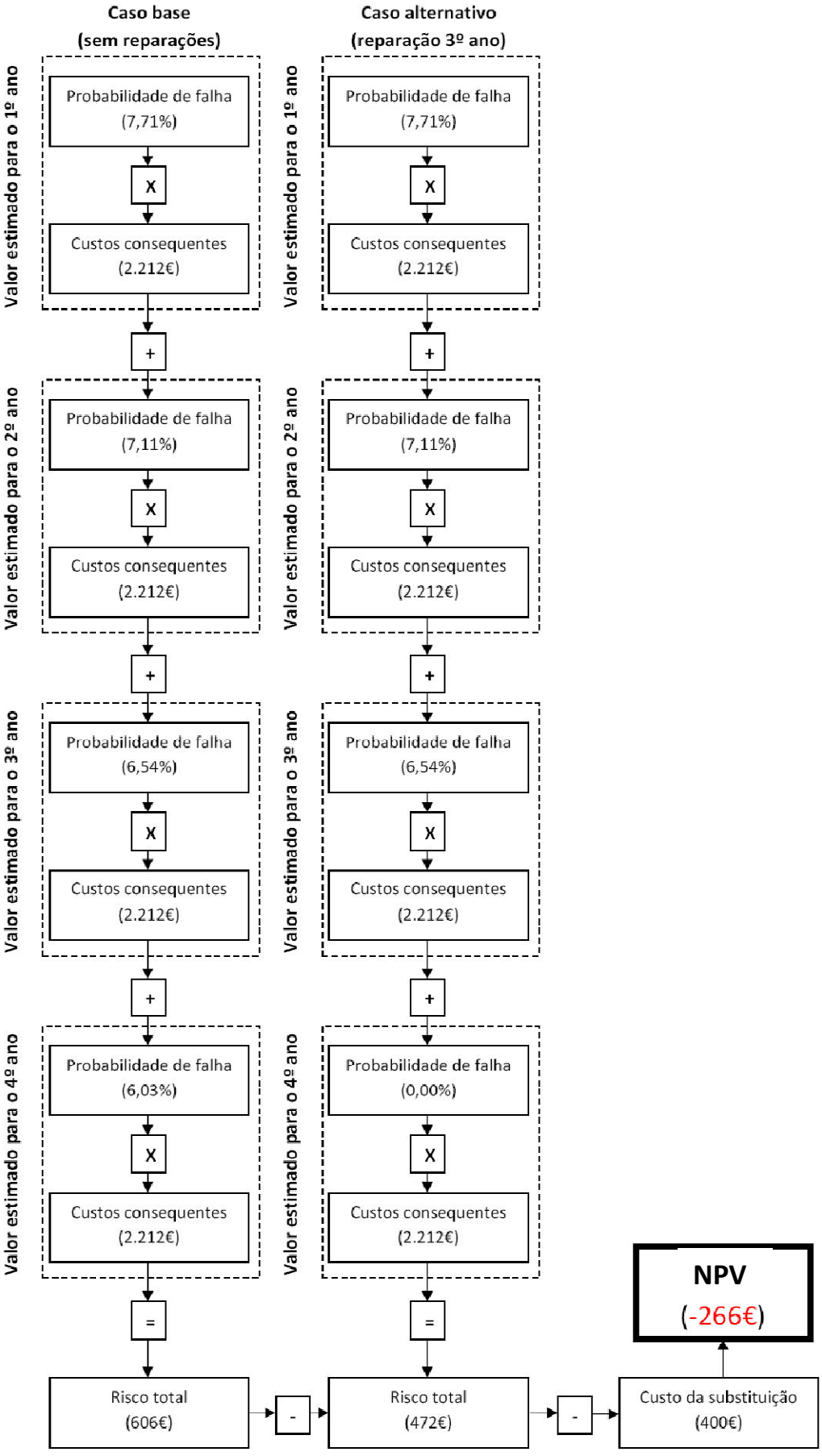


Figura 88 - Cálculo do NPV casa base *vs.* caso alternativo (reparação 3º ano) das válvulas.

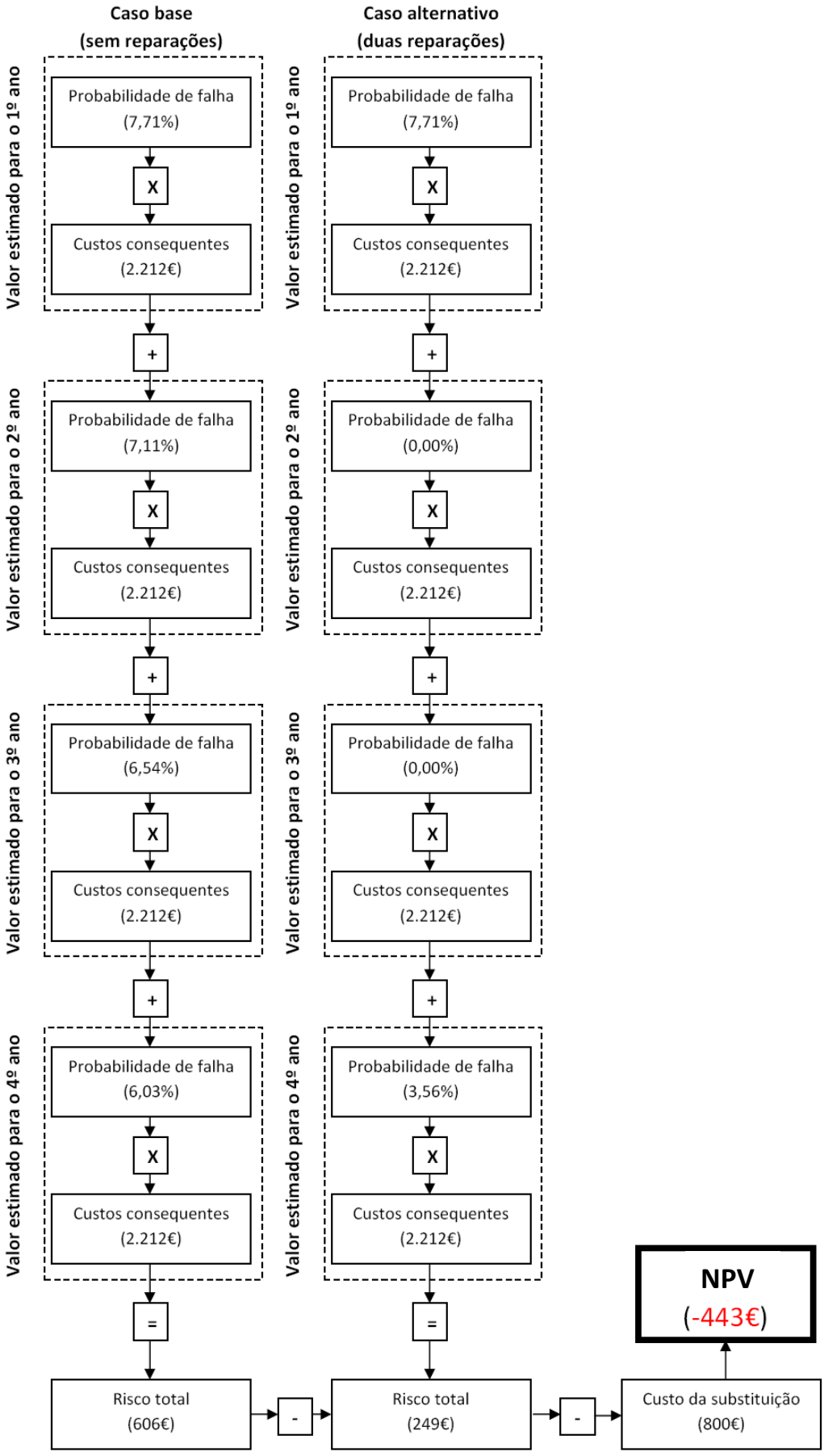


Figura 89 - Cálculo do NPV casa base *vs*. caso alternativo (duas reparações) das válvulas.

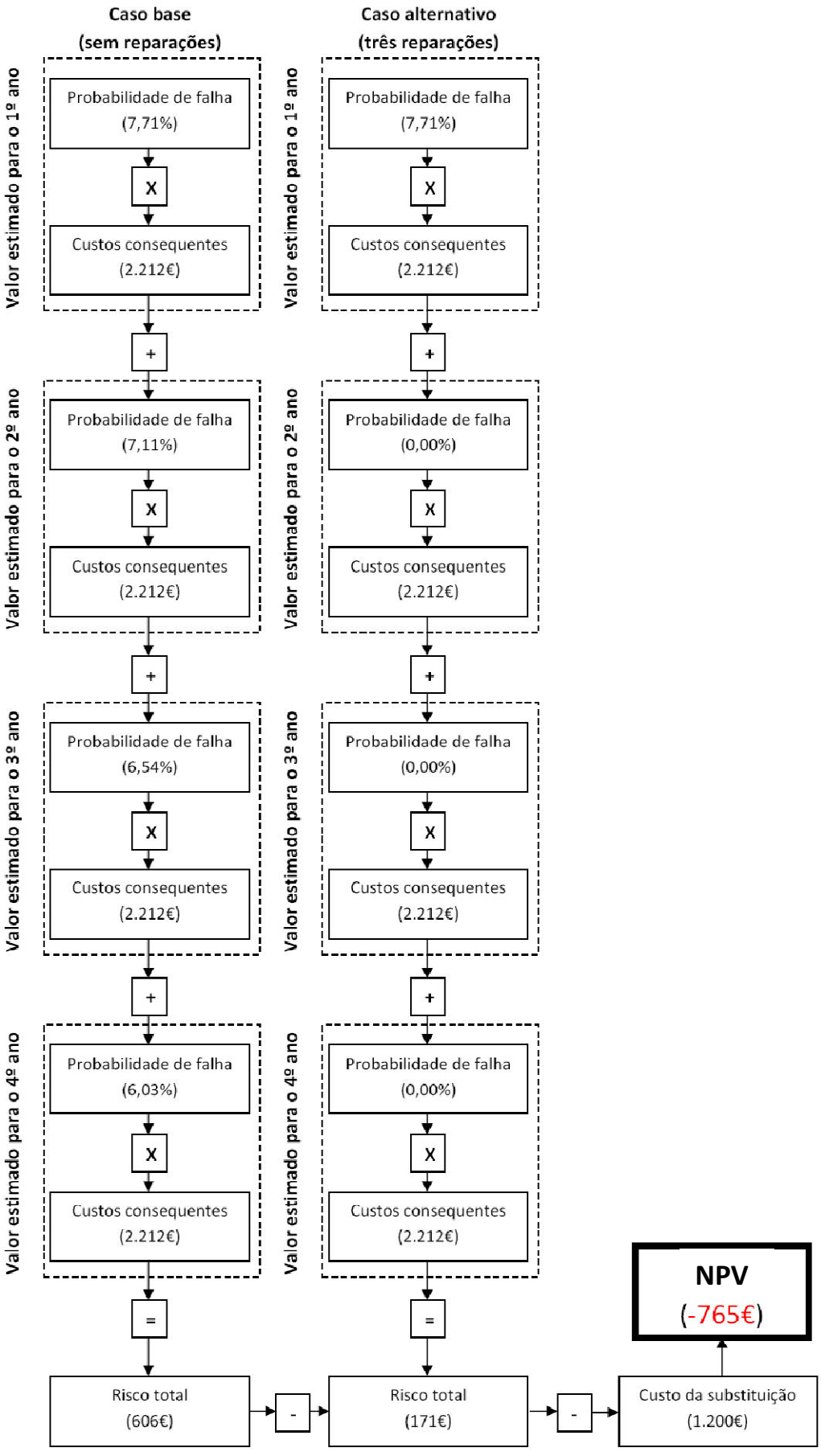


Figura 90 - Cálculo do NPV casa base *vs*. caso alternativo (reparação todos os anos) das válvulas.

Vedantes – Bombas centrífugas – processamento do produto

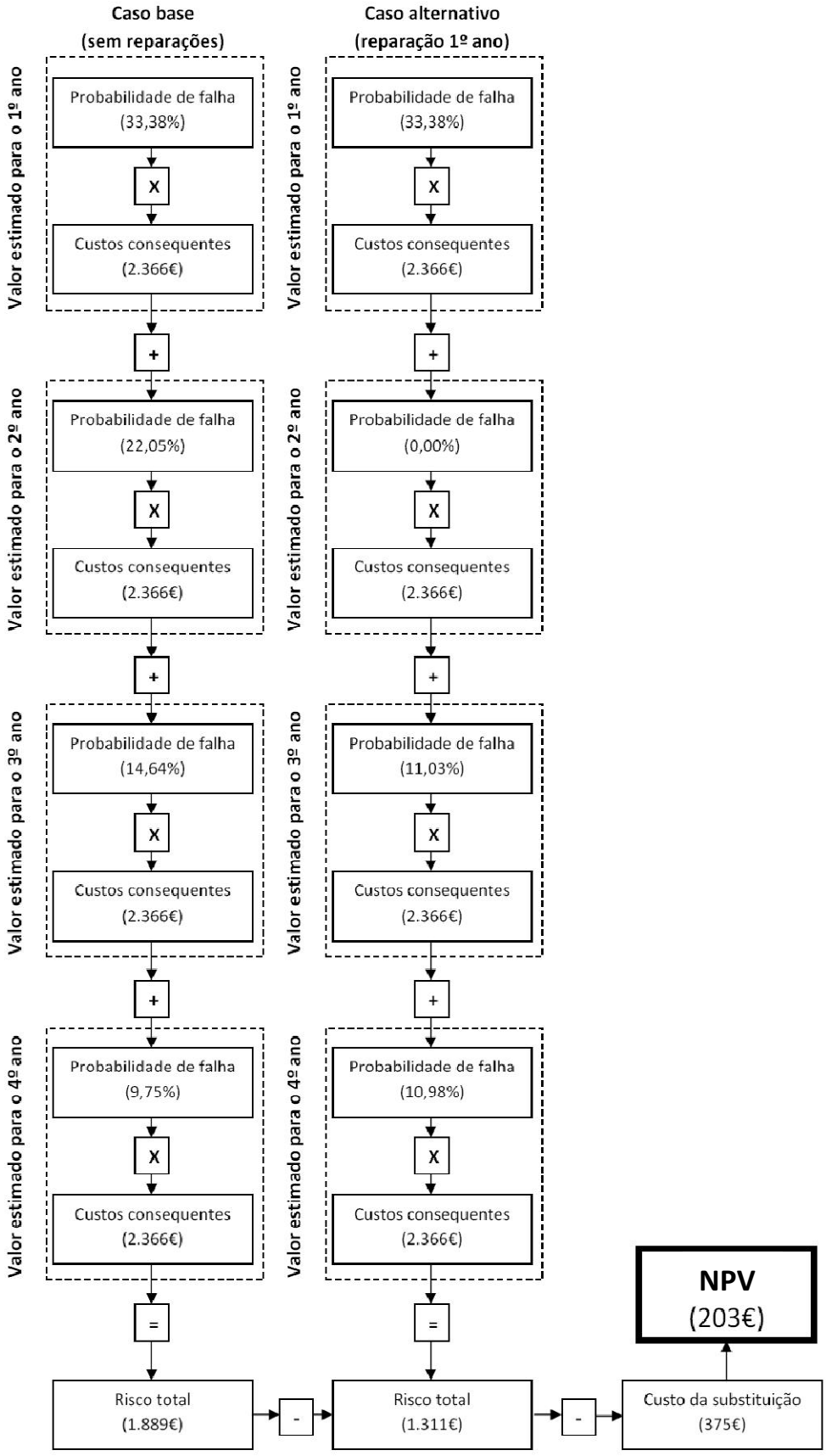


Figura 91 - Cálculo do NPV casa base *vs*. caso alternativo (reparação 1º ano) dos vedantes.

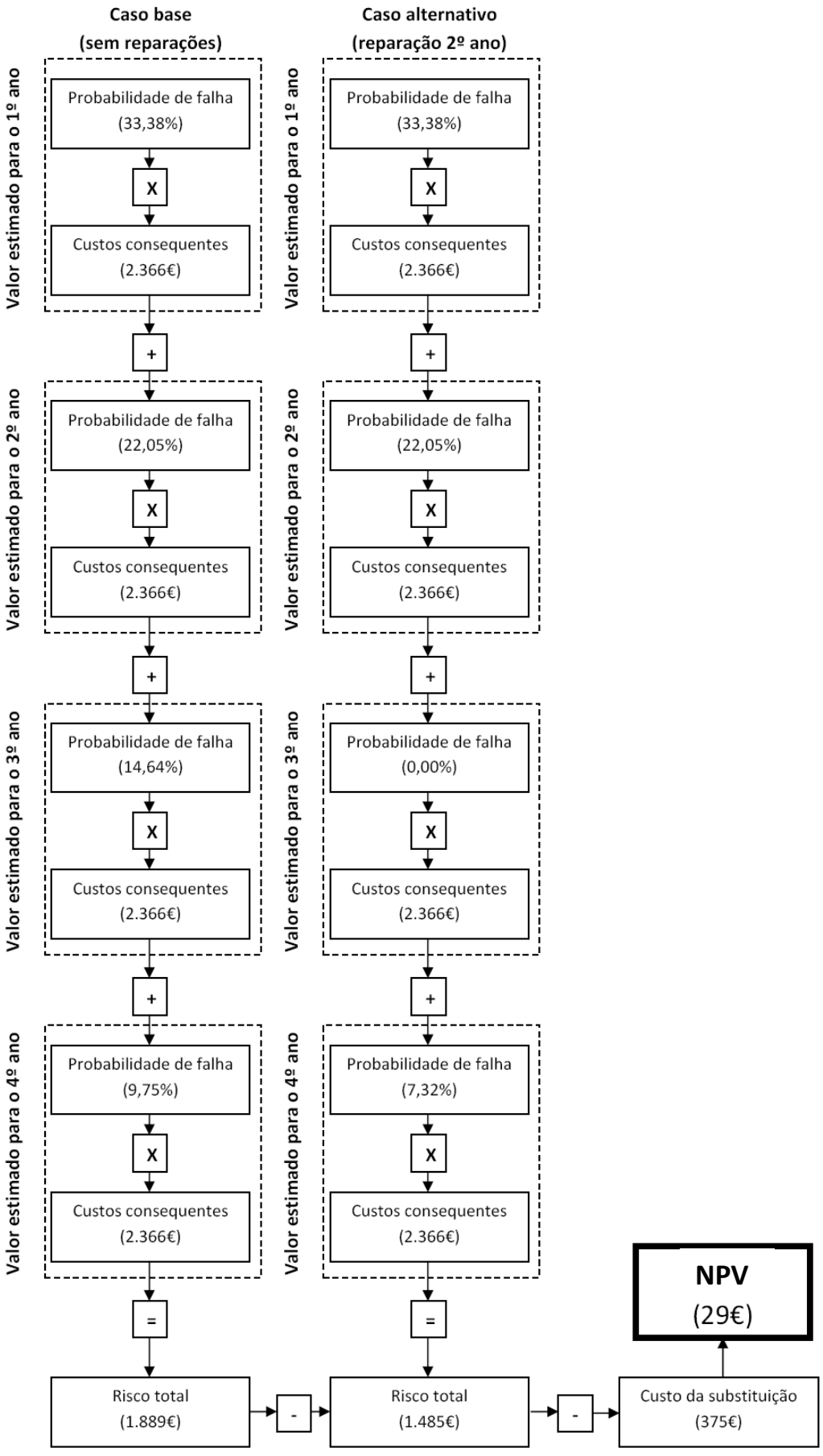


Figura 92 - Cálculo do NPV casa base *vs*. caso alternativo (reparação 2º ano) dos vedantes.

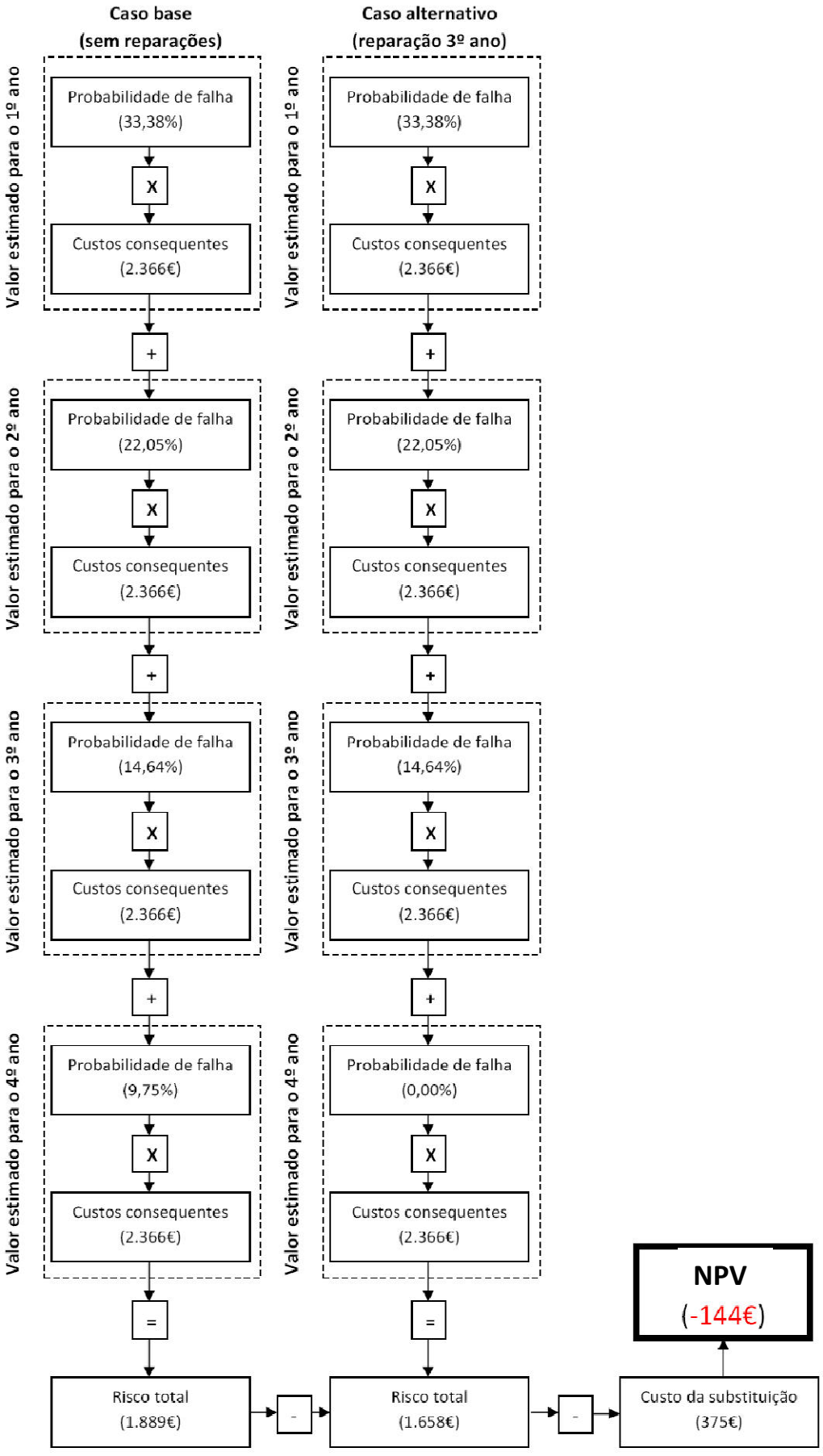


Figura 93 - Cálculo do NPV casa base *vs.* caso alternativo (reparação 3º ano) dos vedantes.

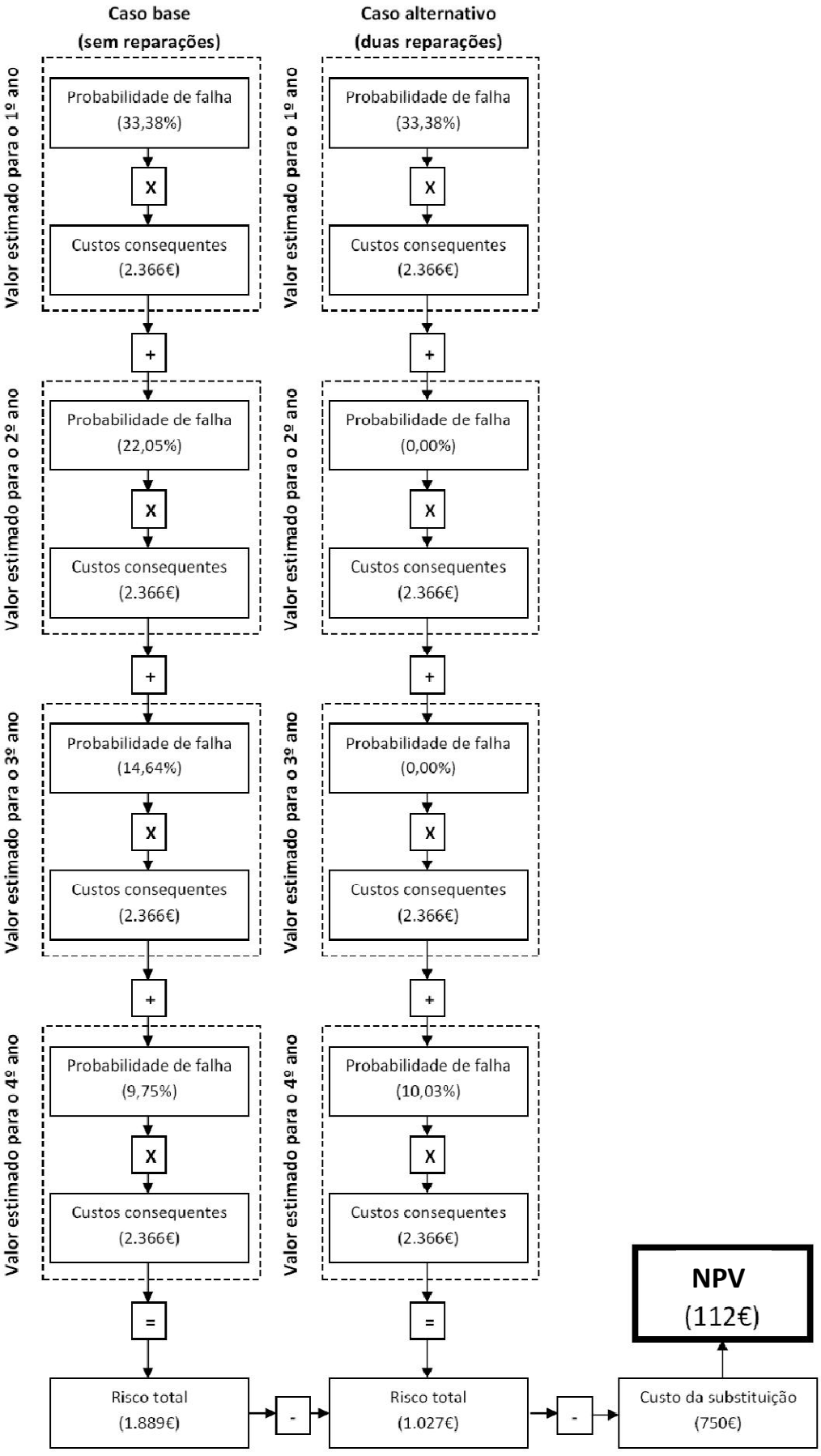


Figura 94 - Cálculo do NPV casa base *vs*. caso alternativo (duas reparações) dos vedantes.

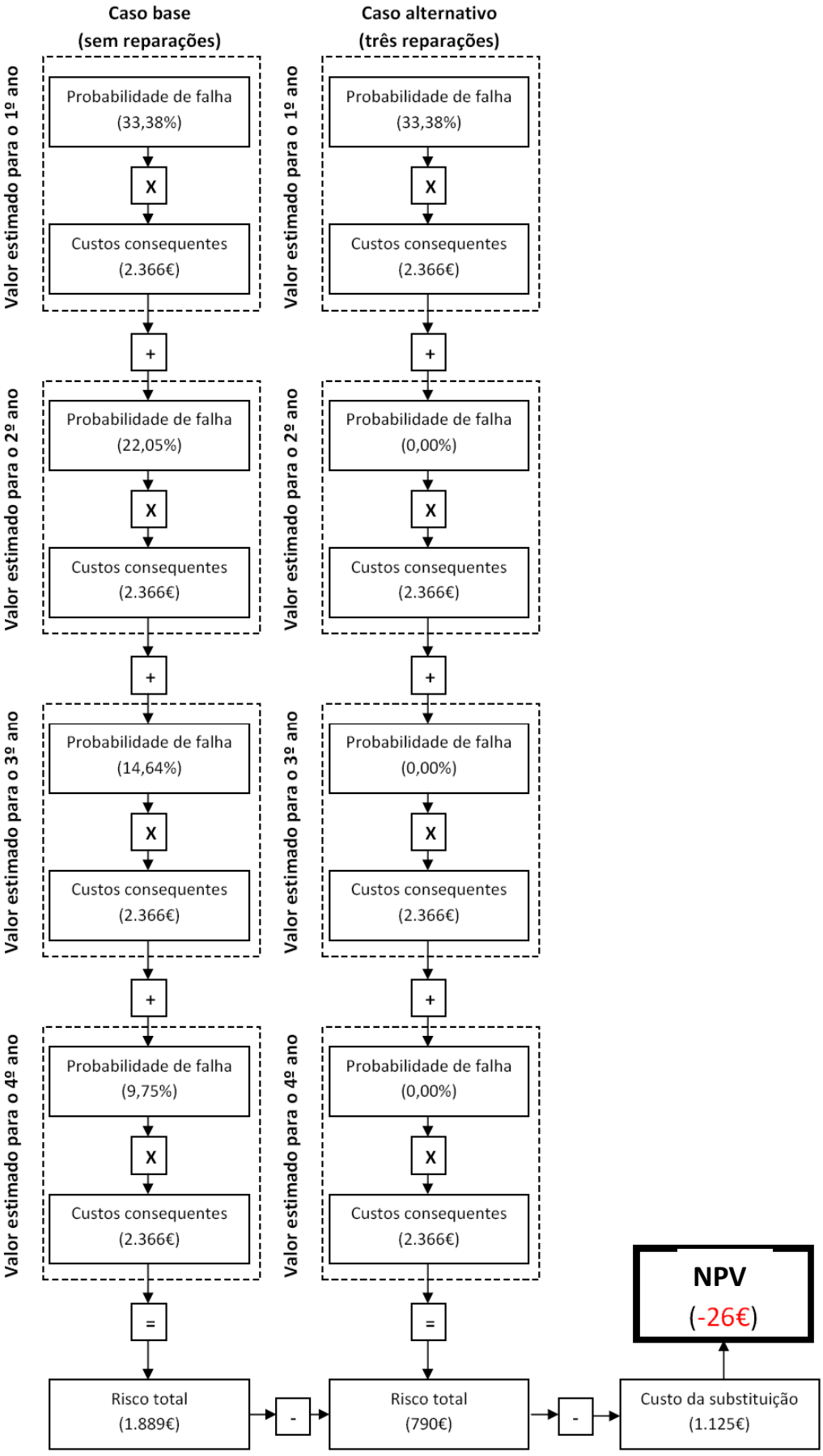


Figura 95 - Cálculo do NPV casa base *vs*. caso alternativo (reparação todos os anos) dos vedantes.

Anexo XXII – Tabela de estratégia dos tipos de inspecção

Tabela 66 - Tabela de estratégia para escolha da inspecção a utilizar.

Equipamento	Estratégias Base – candidatas	Modo de falha	Categorias							
			Número de elementos	POF (hoje)	Efectividade	Duração	POFIns	Inspectores	Custo de reparação	PV
Bombas centrífugas	**Sem inspecção**	Fuga do lubrificante	17	29,79%					2.880€	14.585€
	Análise do lubrificante				80%	1 hora	5,96%	Próprios		3.427€
								Terceiros		3.682€
	Visual				20%	5 min	23,83%	Próprios		11.711€
								Terceiros		11.732€
	Monitorização	Fuga do produto		25,53%						12.499€
	Termografia				50%	30 min	12,77%	Próprios		6.505€
								Terceiros		6.632€
	Visual				20%	5 min	20,42%	Próprios		10.042€
								Terceiros		10.063€
	Sem inspecção	Vibração		2,13%						1.043€
	Análise de vibrações				80%	15 min	0,43%	Próprios		336€
								Terceiros		400€
Compressores alternativos	**Monitorização**	Débito insuficiente	2	26,66%					2.190€	1.168€
	Análise de vibrações				50%	15 min	13,33%	Próprios		599€
								Terceiros		606€
	Sem inspecção	Fuga do produto		4,67%						205€
	Termografia				50%	30 min	2,34%	Próprios		132€
								Terceiros		147€
	Visual				20%	5 min	3,74%	Próprios		169€
								Terceiros		171€
	Sem inspecção	Vibração		1,33%						58€
	Análise de vibrações				70%	15 min	0,40%	Próprios		32€
								Terceiros		40€
Motores eléctricos	**Monitorização**	Falha no arranque	20	7,63%					3.795€	5.791€
	Análise de parâmetros				80%	15 min	1,53%	Próprios		818€
								Terceiros		893€

Anexo XXIII – Cálculo do NPV das estratégias de Inspecção

Bombas centrífugas

Tabela 67 - Cálculo do NPV para o modo de falha "Fuga do lubrificante" para as bombas centrífugas.

Estratégias de inspecção		Fuga do lubrificante			
Caso base	Sem inspecção	14.585€			
Inspectores		Próprios		Terceiros	
Casos alternativos	Análise do lubrificante	3.427€		3.682€	
	Visual		11.711€		11.732€
NPV		11.158€	2.875€	10.903€	2.853€

Tabela 68 - Cálculo do NPV para o modo de falha "Fuga do produto" para as bombas centrífugas.

Estratégias de inspecção		Fuga do produto			
Caso base	Monitorização	12.499€			
Inspectores		Próprios		Terceiros	
Casos alternativos	Termografia	6.505€		6.632€	
	Visual		10.042€		10.063€
NPV		5.995€	2.457€	5.867€	2.436€

Tabela 69 - Cálculo do NPV para o modo de falha "Vibração" para as bombas centrífugas.

Estratégias de inspecção		Vibração	
Caso base	Sem inspecção	1.043€	
Inspectores		Próprios	Terceiros
Casos alternativos	Análise de Vibrações	336€	400€
NPV		707€	643€

Compressores alternativos

Tabela 70 - Cálculo do NPV para o modo de falha "Débito insuficiente" para os compressores alternativos.

Estratégias de inspecção		Débito insuficiente	
Caso base	Monitorização	1.168€	
Inspectores		Próprios	Terceiros
Casos alternativos	Análise de Vibrações	599€	606€
NPV		569€	561€

Tabela 71 - Cálculo do NPV para o modo de falha "Fuga do produto" para os compressores alternativos.

Estratégias de inspecção		Fuga do produto			
Caso base	Sem inspecção	205€			
Inspectores		Próprios		Terceiros	
Casos alternativos	Termografia	132€		147€	
	Visual		169€		171€
NPV		72€	36€	57€	33€

Tabela 72 - Cálculo do NPV para o modo de falha "Vibração" para os compressores alternativos.

Estratégias de inspecção		Vibração	
Caso base	Sem inspecção	58€	
Inspectores		Próprios	Terceiros
Casos alternativos	Análise de Vibrações	32€	40€
NPV		26€	18€

Motores eléctricos

Tabela 73 - Cálculo do NPV para o modo de falha "Falha no arranque" para os motores eléctricos.

Estratégias de inspecção		Falha no arranque	
Caso base	Monitorização	5.791€	
Inspectores		Próprios	Terceiros
Casos alternativos	Análise de parâmetros	818€	893€
NPV		4.973€	4.898€

Anexo XXIV – Diagrama de decisão do programa de manutenção e do programa inspecção ideais

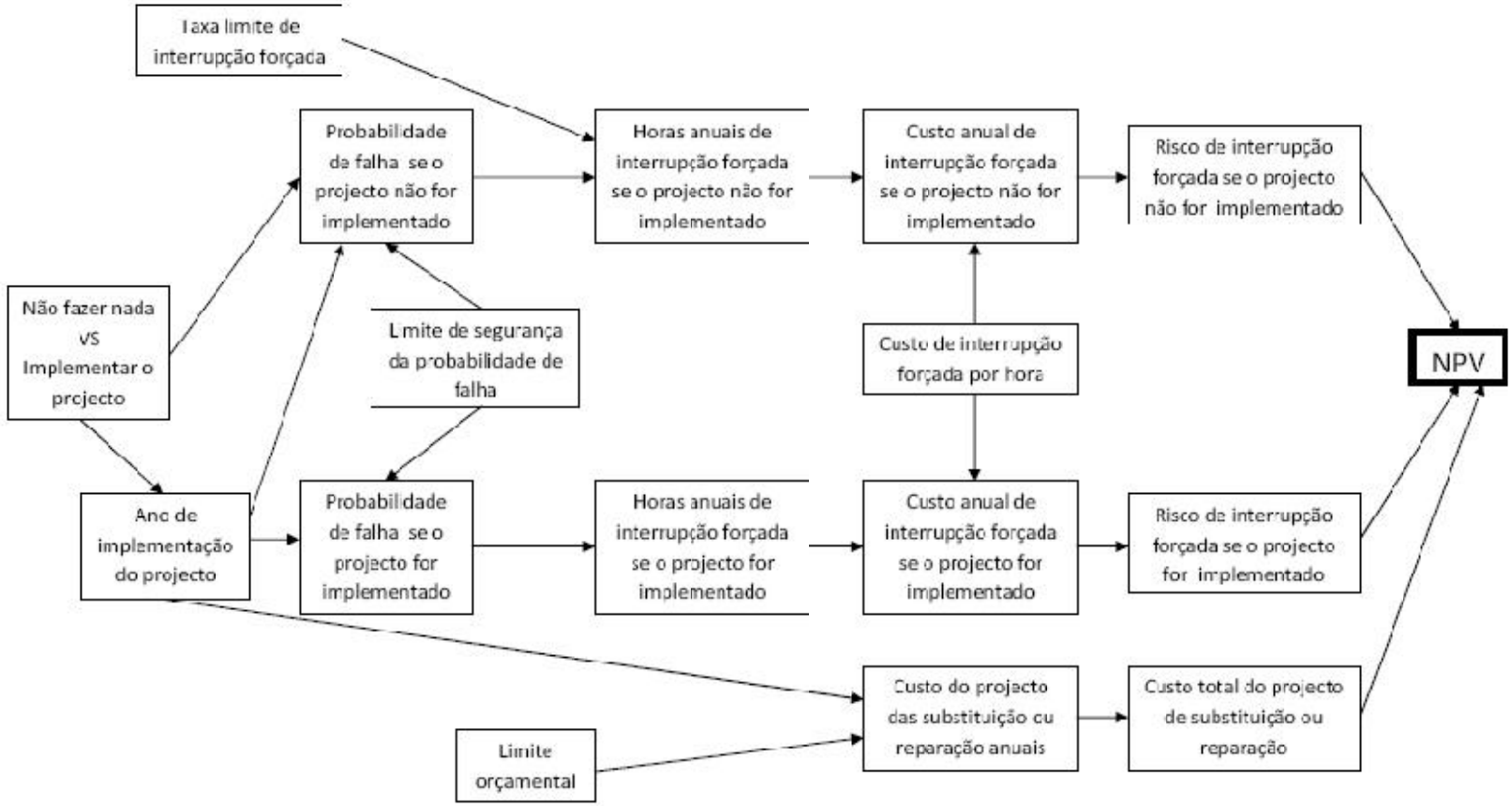


Figura 96 - Diagrama de decisão do programa de manutenção ideal.

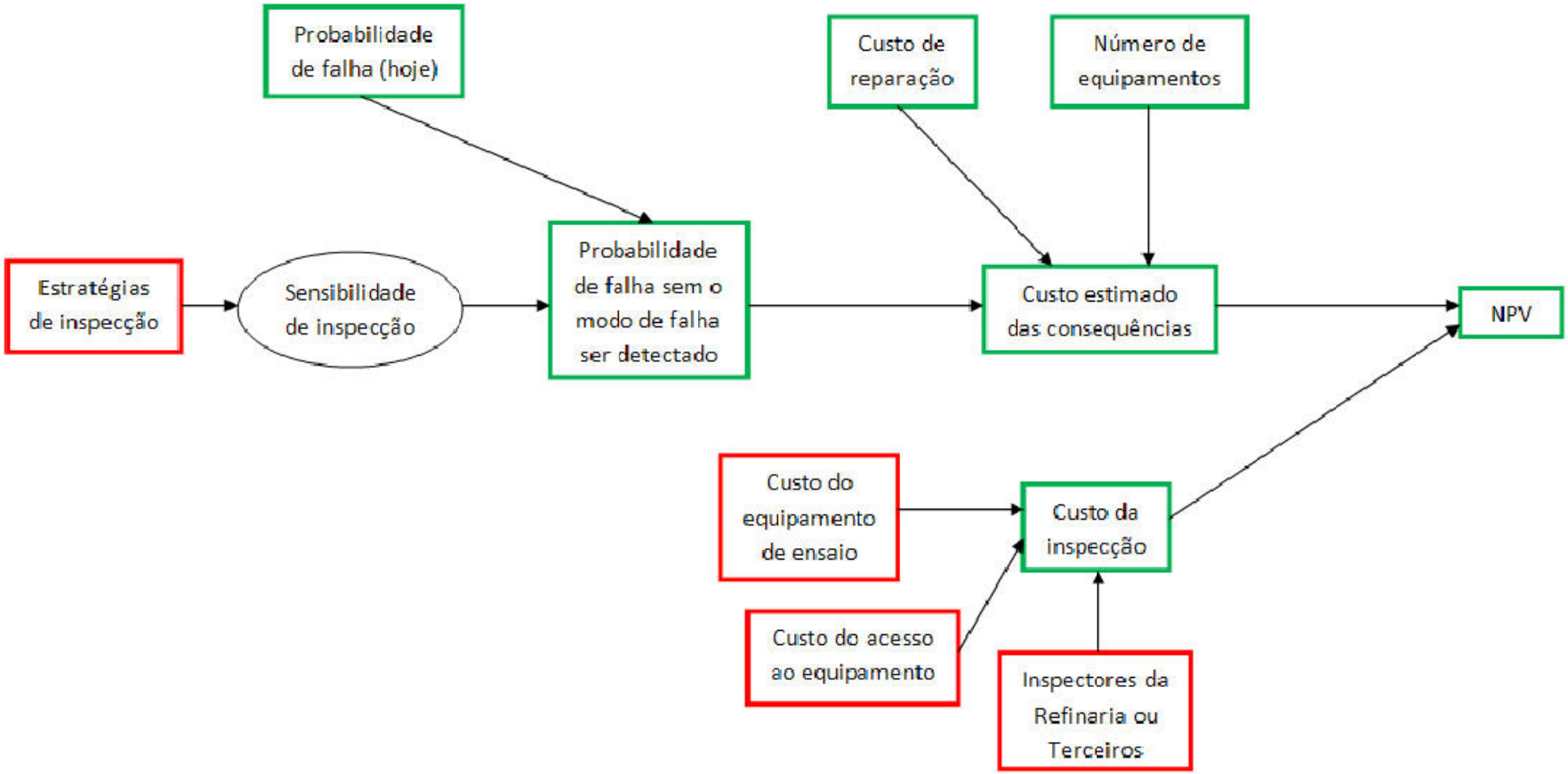


Figura 97 - Diagrama de decisão do programa de inspecção ideal.