



Modelização do processo de decisão para manutenção de tubagens industriais numa refinaria

Petrogal – Refinaria de Matosinhos

Gabriela Mónica de Sousa Pacheco Bi Madeira

Dissertação de Mestrado

Orientador na FEUP: Eng.º Eduardo Gil da Costa

Orientador na Empresa: Eng.º António Paulo Vasconcelos



Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
Mestrado Integrado em Engenharia Industrial e Gestão

2011-07-01

Aos meus avós

Resumo

Com o crescente aumento da importância dos custos no funcionamento das empresas, a relevância da manutenção tem vindo a aumentar nos últimos anos. Nos dias de hoje, a opção por políticas de manutenção correctiva, tão utilizada no passado, já não é viável na maior parte das empresas, devido aos elevados custos de falha associados, quer directamente com a perda de produção e manutenção quer indirectamente, associados a custos de qualidade, imagem e ambientais, muitas vezes de difícil qualificação. Assim se explica a evolução verificada na área da manutenção nos últimos anos, adoptando políticas com o objectivo de cada vez mais assegurar a qualidade e segurança dos sistemas produtivos, aumentando a fiabilidade e disponibilidade dos sistemas, assegurando desse modo a produtividade, rentabilidade e preservação do meio ambiente.

No caso em estudo, o objectivo proposto era definir qual a melhor estratégia de manutenção para um componente específico do aparelho produtivo - as tubagens - da Refinaria de Matosinhos. A definição da estratégia de manutenção mais apropriada para uma gama tão alargada de tubagens requer o desenvolvimento de um sistema de apoio à decisão adequado. Isto porque a selecção da política de manutenção para cada um destes componentes é extremamente complexa devido às dificuldades relacionadas com a recolha de informação relevante, escolha do número de factores a considerar e sua subjectividade, associados ao elevado número de linhas existentes em diferentes serviços e modos de instalação, entre outros. Para além disso, cada linha tem as suas características próprias, não sendo possível definir uma estratégia global baseada num único tipo de manutenção para todas as tubagens.

Optou-se por testar a metodologia AHP (*analytic hierarchy process*), cuja principal vantagem é o facto de permitir comparar critérios subjectivos e critérios objectivos, e deste modo verificar a sua influência no objectivo final - que neste caso será a escolha da estratégia de manutenção mais adequada a estes componentes.

Quando integrado com uma análise prévia da criticidade dos componentes, por exemplo utilizando a metodologia RBI, a metodologia AHP provou ser uma ferramenta de suporte válida para a selecção da estratégia de manutenção a implementar. A combinação na metodologia AHP de vários critérios essenciais para a selecção da política de manutenção, tais como influência na ocorrência de danos, possíveis custos, recursos necessários para a sua implementação/aplicabilidade, assim como potencial valor acrescentado, permitiu dividir as tubagens em 3 grupos e o seu tratamento diferenciado.

Com a aplicação do método proposto, concluiu-se que em linhas de criticidade elevada a adopção de políticas de manutenção mais evoluídas e dispendiosas, tais como a manutenção condicionada e preditiva é uma mais-valia. Já em linhas de baixa criticidade, associadas por exemplo a uma baixa consequência de falha e reduzido impacto no funcionamento da unidade, a adopção de políticas menos conservativas, nomeadamente do tipo correctivo, preventivo e/ou oportunística, apresenta-se como uma opção a ter em conta.

Decision Process Modeling for the maintenance of industrial piping in a refinery

Abstract

As the importance of the economic factors inside every single company in the business is increasing since some years now, the maintenance actions are getting more relevant too. This happens as nowadays, the corrective maintenance policy, which was mainly preferred and used in the past, is not affordable anymore in most of the situations, due to its high associated costs.

That is how the evolution in the maintenance area can be explained, in order to ensure the quality and safety of all the production units. Moreover, the increase of the productivity and profitability is also and always a target.

In the situation which is being analyzed, the main objective will be the modeling of the best maintenance strategy for the piping in the refinery of Matosinhos. This strategy conception for such a wide variety of piping involves the development of an appropriate decision support system. This can be justified due to the complexity of the process, which requires a lot of information gathering, and the decision about which inputs should be taken into consideration, not to mention the subjectivity of these.

Each line has its own characteristics, and as a result of that, it is not possible to set a global strategy for all of them. Consequently, it was decided to implement the AHP (*analytic hierarchy process*) methodology, which presents as its main advantage the possibility to compare subjective and objective criteria. As a result, it is possible to define how these criteria will affect the decision about the final objective, which in this case will be to choose the best maintenance strategy.

When incorporated with a previous critical analysis, which will divide all the piping in 3 different groups according to their criticality, the AHP method has proved to be a valid support when selecting the maintenance policy for the 3 groups. The hierarchical structure proposed for the implementation of the AHP deals with various criteria, which are essential for the decision, such as possible damages, costs, resources needed to implement the selected strategy, as well as potential added value.

After the implementation of the AHP, it was possible to conclude that when dealing with high critical lines, the decision about the maintenance policy should be made between the most developed and expensive policies, in particular the predictive and condition based ones. Concerning the less critical lines, which are related with low failure consequences and low importance for the unit's process, it is justifiable the option of less conservative policies, such as corrective, preventive and opportunistic policies.

A good maintenance strategy will lead to a significant cost reduction, not only because of the decrease of the number of unnecessary actions, but also due to an appropriate assignment of the available resources to the equipments that need them the most. When dealing with the most critical lines, a good maintenance strategy will also focus on the failures number reduction, due to their high consequence costs, as these have become quite more important than they used to be.

Agradecimentos

Por todo o apoio e ajuda para a realização desta dissertação, gostaria de agradecer em primeiro lugar ao pessoal da refinaria de Matosinhos, especialmente à área da Inspeção Estática, nomeadamente ao Eng.º Paulo Vasconcelos, Sr. Rodrigo Tavares, Eng.º Miguel Faria, Eng.º Paulo Rodrigues, Eng.º Paulo Vieira, Eng.º Jorge Romão, Eng.º Telmo Salgado, Eng.º Miguel Sousa, Eng.º Ricardo Correia, Eng.º Arnaldo Borges e ao Eng.º João Serra. Obrigada por toda a paciência e por me terem proporcionado a melhor integração que se pode desejar numa empresa. Não posso também deixar de agradecer ao Sr. Valentim Monteiro pela oportunidade concedida.

Também gostaria de agradecer ao Eng.º Eduardo Gil Costa, pela orientação fornecida durante a realização deste projecto, assim como ao Prof. Carlos Bragança, Prof. António Brito e ao Prof. Bernardo Almada-Lobo, pelo tempo concedido para aceder às minhas dúvidas. Não posso deixar de referir os meus agradecimentos ao Prof. Luís Andrade Ferreira, pois sem o seu contributo e apoio na fase final do projecto, não teria provavelmente conseguido realizar tudo a que me tinha proposto.

Um obrigada à Alexandra Mouta, Joana Mota e Rita Petiz, por terem ajudado a tornar os meus 5 anos de faculdade os melhores da minha vida até hoje. E à Maria, João, Bernardo, Rita, Diogo e Rui, pela amizade que significa muito para mim, independentemente se os conheço há 20 ou há 2 anos.

Last but never the least, um muito obrigado à minha família pelo apoio que sempre me deram.

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Apresentação da empresa	3
1.2	Objectivos	4
1.3	Desenvolvimento do trabalho	4
2	Estado da arte	6
2.1	Políticas de manutenção/intervenção	6
2.1.1	Manutenção correctiva	7
2.1.2	Manutenção Preventiva	8
2.1.3	Manutenção oportunística	9
2.1.4	Manutenção condicionada	10
2.1.5	Manutenção preditiva	12
	Comparação entre os tipos de manutenção.....	13
2.2	13	
2.3	Estratégias de manutenção.....	14
2.3.1	Evolução das estratégias de manutenção/intervenção.....	15
2.3.2	AHP – Analytic hierarchy process.....	16
3	Análise da situação actual	20
3.1	Causas de degradação/falha das linhas	20
3.2	Inspecção de linhas de tubagem.....	22
3.3	Estratégia actual na refinaria de Matosinhos	23
3.3.1	Benefícios e limitações da metodologia RBI.....	24
3.3.2	Melhorias Possíveis da estratégia actual.....	25
4	Nova metodologia para a estratégia de manutenção	28
4.1	Justificação para o estudo feito	28
4.2	Índice de criticidade	30
4.2.1	Parâmetros incluídos no índice de criticidade.....	32
4.2.2	Definição dos pesos dos parâmetros.....	35
4.3	Implementação da AHP	37
4.3.1	Graus da hierarquia	38
4.3.2	Matrizes de comparação dois-a-dois.....	45
4.4	Análise dos resultados	46
5	Aplicação da metodologia AHP num caso prático	47
5.1	Cálculo do índice de criticidade.....	47
5.2	Resultados obtidos e análise	48
5.2.1	Análise de sensibilidade	51
6	Conclusões e perspectivas de trabalho futuro	53
	Lista de referências	55
	Anexos.....	59
	Anexo A – Refinaria de Matosinhos	59
	Principais Fábricas da Refinaria de Matosinhos.....	60
	Unidade 3000	61

Anexo B - Inspeção de tubagens	63
Procedimento inspecção de tubagens.....	63
Técnicas de Inspeção em serviço.....	63
Relatório modelo de inspecção	66
Anexo C – Tipos de corrosão	68
Anexo D – Estratégias de manutenção	72
Anexo E – RBI	73
Inputs e outputs do RBI	73
Dados do RBI da unidade 3000	76
Anexo F – Análise PHA (Preliminary hazard analysis)	78
Anexo G – Parâmetros considerados no cálculo do número de criticidade	79
Probabilidade de falha.....	79
Consequência de falha.....	79
Importância da falha.....	80
Dificuldade de acesso	81
Isolamento	81
Evolução do risco	81
Anexo H – Definição da importância da linha	82
Anexo I – Acções de Manutenção	84
Pintura	85
Isolamento.....	85
Andaimes	86
Operações metalomecânicas	86
Anexo J – Métodos para cálculo dos diferentes custos de falha/ danos.....	88
Custos ambientais.....	88
Custos de downtime.....	91
Custos de perda de produto.....	92
Anexo K – Aplicação da Metodologia AHP	93
Grau 1	93
Matrizes de comparação entre as 5 alternativas e todos os 23 subcritérios do nível imediatamente anterior às alternativas.....	98
Grau 2	103
Grau 3	107
Índices de inconsistência.....	112
Anexo L – Análise de sensibilidade	113

Índice de Figuras

Figura 1 – Exemplo de linhas da refinaria de Matosinhos	1
Figura 2 – Logótipo da Galp Energia	3
Figura 3 – Localização da unidade 3000 na refinaria de Matosinhos	4
Figura 4 – Política de FBM (Kumar, et al. 2000).....	7
Figura 5 – Curva P-F	13
Figura 6 – Exemplo de uma falha mecânica numa linha.....	20
Figura 7 – Linha de parafina com traçagem	21
Figura 8 – Esquema de funcionamento do RBI (American Petroil Institute, 2002)	22
Figura 9 - Contribuição típica dos equipamentos para o risco de uma unidade/instalação (Koppen 1998).....	25
Figura 10 - Exemplo do RBI da linha L-P-33403-1-1.5inch S31	35
Figura 11 – Classificação ALARP para zonas de risco.....	37
Figura 12 – Exemplo de uma fuga de uma linha, neste caso durante um ensaio	41
Figura 13 – Imagem da refinaria de Matosinhos	59
Figura 14 – Capacidade de Tratamento da Refinaria de Matosinhos.....	59
Figura 15 – Mapa da Refinaria de Matosinhos	61
Figura 16 – Representação esquemática da unidade 3000	62
Figura 17 – Procedimento de inspecção de tubagens na refinaria de Matosinhos	63
Figura 18 - Inspeção à linha de petróleo 3: 4-P30-3091-1-B1R e 4-P30-3091-2-B1R	64
Figura 19 – Posição e códigos dos pontos de leitura dos TML em troços horizontais e verticais.....	64
Figura 20 - Fenómeno de CUI.....	69
Figura 21 - Pitting com 1,5 mm no troço horizontal	70
Figura 22 - Fenómeno de corrosão galvânica entre a linha e o suporte	71
Figura 23 - Levantamento de dados para mecanismos de degradação específicos de linhas de tubagem	73
Figura 24 – Inputs para o cálculo do modo de perda de espessura	74
Figura 25 – Matriz da análise do risco do RBI.....	74
Figura 26 – Espessura de isolamento para conservação de calor nas linhas (mm) (Petrogal 2000)	86
Figura 27 – Exemplo de um orçamento de operações metalomecânicas para intervenção numa linha	87
Figura 28 – Exemplo de um orçamento para limpeza de um derrame provocado por uma fuga numa linha	88

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Frequência de inspecção (American Petroleum Institute 1998).....	9
Tabela 2 - Escala fundamental de números absolutos (Saaty, 2008)	18
Tabela 3 – Valores de RI para diferentes ordens de matrizes	19
Tabela 4 – Peso dos parâmetros significantes para a análise da criticidade da linha	35
Tabela 5 – Classificação dos três graus do índice de criticidade.....	36
Tabela 6 - Capacidade de produção diária da U3000.....	40
Tabela 7 – Cálculo do índice de criticidade para algumas linhas da U3000	47
Tabela 8 – Classificações finais dos tipos de manutenção para cada grau de criticidade	48
Tabela 9 – Exemplo de linhas com grau 2 de criticidade.....	49
Tabela 10 – Descrição dos diferentes tipos de corrosão.....	69
Tabela 11 – Excerto da Tabela resumo dos outputs do RBI para a U3000	76
Tabela 12 - Correspondência entre o valor definido pelo RBI e o que irá ser utilizado no cálculo do número de criticidade.....	79
Tabela 13 – Graus de consequência a nível pessoal.....	79
Tabela 14 – Escala de consequências ao nível dos danos no equipamento.....	79
Tabela 15 – escala de consequências ao nível de danos ambientais	80
Tabela 16 – correspondência entre o grau de consequência definido pelo RBI e o valor de consequência a utilizar no cálculo da criticidade da linha.....	80
Tabela 17 – correspondência entre a descrição da importância da linha e o grau de importância desta.....	80
Tabela 18 - correspondência entre a cota média em que se encontra a linha e o grau de dificuldade de acesso desta.....	81
Tabela 19 - correspondência entre o parâmetro da existência de isolamento e o valor a ser considerado nos cálculos do número de criticidade.....	81
Tabela 20 - correspondência entre a evolução do risco da linha e o factor a ser considerado nos cálculos	81
Tabela 21 – Características dos diferentes circuitos da unidade 3000	82
Tabela 22 – Previsão do tamanho do furo da linha consoante o nível de risco (American Petroil Institute, 2000).....	83
Tabela 23 - Custos dos 4 tipos de acções de intervenção/manutenção em 3 linhas da unidade 3000	84
Tabela 24 – Alguns esquemas de Pintura adoptados pelo Petrogal	85

Tabela 25 – Relação entre o nível de risco da linha e o diâmetro da fuga em caso de falha (American Petroil Institute, 2000)	89
Tabela 26 – Sistema de classificação de detecção e isolamento de fugas (American Petroil Institute, 2000)	89
Tabela 27 - Duração das fugas baseado no sistema de detecção e isolamento existente (American Petroil Institute, 2000)	90
Tabela 28 - tempos de <i>outage</i> das linhas (dias) (American Petroleum Institute 2000)..	92
Tabela 29 – Diferentes cenários para a análise de sensibilidade de linhas de grau 1...	113
Tabela 30 – Diferentes cenários para a análise de sensibilidade de linhas de grau 2...	114
Tabela 31 – Diferentes cenários para linhas de grau 3	114

Índice de Gráficos

Gráfico 1 – Aumento da duração de vida dos equipamentos obtida com a implementação de manutenção condicional. (Timmins, 1996)(adaptado).....	12
Gráfico 2 - Tipo de manutenção vs. Resultados (Correia 2008)	13
Gráfico 3 - Acidentes perigosos causados por corrosão – interna vs. externa (2002-2009) (The oil drum, 2010)	22
Gráfico 4 - Diferenças entre planos de inspecção com e sem RBI (Jovanovic 2003)....	24
Gráfico 5 – Análise de risco RBI efectuada para a data futura	26
Gráfico 6 – Influência dos principais parâmetros de decisão da definição da política de manutenção adequada para as linhas com grau 2 de criticidade	50
Gráfico 7 – Influência dos principais parâmetros de decisão da definição da política de manutenção adequada para as linhas com grau 3 de criticidade	51
Gráfico 8 – Situação em que o risco admissível é excedido antes da data planeada.....	75

Índice de equações

Equação 1 – Índice de consistência	19
Equação 2 – Índice de inconsistência	19
Equação 3 – Cálculo do número de criticidade da uma linha	36
Equação 4 – Custos de inspecção	43
Equação 5 – Caudal mássico libertado em caso de fuga	90
Equação 6 – Equação de <i>Bernoulli</i>	91
Equação 7 – Equação de <i>Bernoulli</i> simplificada (m/s)	91

Siglas e acrónimos

- AHP: *Analytic hierarchy Process*.
- API: *American Petroleum Institute*.
- CUI: *Corrosion under isolation* – Corrosão sob isolamento.
- FBM: Política de *Failure-Based Maintenance*
- FMECA: *Failure Mode and criticality analysis*
- IE: Inspeção estática
- PMT: *Preventive maintenance task*
- RAI: Rede de água de incêndio.
- RBI: *Risk Based inspection*. Metodologia de análise de risco desenvolvida pelo API.
- RCM: *Política de Reliability centered maintenance*
- RM: Refinaria de Matosinhos
- TBM: Política de *Time-based maintenance*
- TML's: *Tickness monitoring locations*

1 Introdução

As expectativas de performance e fiabilidade dos diversos sistemas a que o homem recorre diariamente, quer na indústria quer na sua vida pessoal, são muito mais elevadas do que eram há 10 anos atrás, muito devido quer às normas e seus requisitos que nortearam o projecto e utilização quer à forte concorrência existente e exigências de desempenho requeridas pelos consumidores.

Consequentemente, o objectivo de qualquer indústria, e as refinarias não são excepção, é melhoria contínua da eficiência, redução de custos a ela associada e, ao mesmo tempo, uma constante melhoria do seu desempenho global.

No caso dos equipamentos em estudo, tubagens, as fugas que no pós guerra e décadas que precederam os choques petrolíferos e do levantamento de questões ambientais pertinentes eram consideradas apenas como *inconvenientes*, são agora classificadas como emissões e derrames perigosos, que podem resultar em reparações, paragens dispendiosas (Holt 2003) e remediações ambientais inoportáveis. Por exemplo, uma fuga de hidrocarbonetos de uma tubagem em 2003 em Forte McMurray, em Alberta - Canada, resultou em perdas de \$120 000 000 para um operador. (Nolan 2011)

Um equipamento começa a envelhecer a partir do momento em que é construído. As tensões cíclicas causam folgas e fadigas; as altas temperaturas causam fluência; a erosão e corrosão causam enfraquecimento. De forma a prevenir estes fenómenos, a realização de inspecções e testes não destrutivos, permitem a detecção da deterioração e a realização de reparações, com o objectivo de limitar os danos ou restauração do nível de desempenho para os níveis que existiam originalmente.

No entanto, o mesmo tipo de equipamentos, com diferentes idades e com diferentes características têm diferentes taxas de falha. assim como equipamentos com diferentes falhas têm diferentes consequências. (ASME, 2003)

Devido às diferentes características das linhas (especificações), é necessário definir um *mix* óptimo de acções/políticas de manutenção, assim como de acções de inspecção, de modo a aumentar a disponibilidade das unidades da refinaria e reduzir custos operacionais. No entanto, toda esta estratégia tem de assentar em bases que a permitam justificar as diversas operações, pois nem sempre é fácil convencer a gestão a investir em novas estratégias de manutenção, especialmente quando não há muita investigação feita a comprovar a contribuição da manutenção para o aumento do lucro das organizações. (Aoudia, Belmokhtar, & Zwingelstein, 2008) Muito embora vários trabalhos de pesquisa já tenham demonstrado que a manutenção é uma função estratégica, o seu impacto influencia todos os aspectos de performance de uma organização, incluindo competitividade, produtividade, qualidade e segurança. (Aoudia, Belmokhtar, & Zwingelstein, 2008)



Figura 1 – Exemplo de linhas da refinaria de Matosinhos

A evolução ao nível do tipo de estratégia adoptado pelas refinarias nos últimos anos é também justificada pela existência de uma grande variedade e quantidade de tubagens, sendo que na refinaria de Matosinhos, sem considerar os *pipelines* e as linhas da área da movimentação, existem cerca de 15 mil linhas. Este facto faz com que os inspectores tenham tipicamente recursos limitados ao nível temporal, orçamental e de mão-de-obra.

A definição de uma estratégia de manutenção adequada a partir do desenvolvimento e análise de um modelo de manutenção óptimo permitirá também minimizar falhas não planeadas das linhas, assim como identificar potenciais problemas antes que estes se tornem sérios. Isto porque a maior parte dos problemas podem ser minimizados se forem detectados e reparados cedo, pois a evolução dos mecanismos de falha é proporcional à sua gravidade. (Higgins 2006) No caso das linhas da refinaria de Matosinhos, não é adequado adoptar uma política de manutenção geral para todas as linhas, pois os comportamentos destas ao longo do tempo não são semelhantes, dependendo de diversos factores, tais como as condições de funcionamento e o facto de que:

- Nem todas se revelam de importância elevada para o funcionamento da unidade em que estão inseridas, ou seja, caso falhem podem não afectar o funcionamento e rendimento da unidade;
- Pode não ser possível ou prático monitorizar as condições da linha (porque sendo necessário efectuar operações de manutenção/inspecção a uma linha, isso pode só ser possível durante a paragem da unidade, devido à impossibilidade de seccionar a linha, ou então porque a linha está ligada a um componente crítico que não pode ser retirado de funcionamento);
- Existem itens críticos, por exemplo ao nível das consequências de uma possível falha, nos quais não pode ser sequer considerada a aplicação de manutenção correctiva.

Consequentemente, para realizar uma manutenção adequada, devidamente programada e organizada, é necessário estabelecer quais as linhas críticas da unidade, de modo a planear tarefas de inspecção e manutenção, assim como definir a frequência e âmbitos adequados para ambas. Para isso, no âmbito desta dissertação e dos interesses da actividade efectuada na Refinaria de Matosinhos da Petrogal, foi desenvolvida uma metodologia de análise das linhas, de forma a identificar os componentes mais críticos, definindo então as políticas de manutenção a implementar.

Também é preciso ter em conta que o risco não pode ser reduzido a zero, muito menos apenas devido a acções de inspecção e manutenção, pois factores residuais de risco de fuga têm sempre uma influência crucial, tais como erros humanos, desastres naturais e erros de concepção. Consequentemente, as falhas do equipamento e as acções correctivas de manutenção não podem ser totalmente evitadas, mesmo que se adoptem outros tipos de manutenção, nomeadamente os mais evoluídos – condicionada e predictiva. Este facto explica-se pela natureza estocástica das falhas dos equipamentos. (Wang, Chu, & Wu, 2006)

O objectivo será então decidir se devem efectuar-se ou não acções de manutenção e mitigação do risco, assim como acções de inspecção, sendo sempre considerada a parte económica, que nos dias de hoje se revela mais importante do que nunca. Já o objectivo prático desta dissertação passará pela elaboração de uma estratégia de manutenção para as linhas da unidade 3000 da refinaria. A estratégia mais adequada economicamente será aquela que utilizará melhor a informação fornecida sobre as condições da linha para maximizar a utilização da vida do componente, minimizando sempre o número de falhas e de manutenções/inspecções.

De referir que o interesse da aplicação deste tipo de análise é também justificado pelo facto desta metodologia nunca ter sido aplicada em nenhum projecto de dissertação realizado na RM por um aluno da FEUP.

1.1 Apresentação da empresa



A refinaria de Matosinhos é parte integrante do sistema produtivo da Galp Energia e em conjunto com a refinaria de Sines constituem as duas únicas refinarias do país. Fruto dos recentes investimentos realizados nas duas refinarias, estes dois complexos fabris trabalharão em conjunto, interligados por um “pipeline marítimo” constituído por um vai e vem de navios, permitindo que funcionem como um complexo único de 330000 barris/dia

Figura 2 – Logótipo da Galp Energia

Situada no conselho de Matosinhos, possui uma área de mais de 290 hectares, estando interligada ao terminal de petroleiros do Porto de Leixões por um *pipeline* com uma extensão de 2km, à monobóia e ao aeroporto de Francisco Sá Carneiro. Os trabalhos de construção iniciaram-se em Setembro de 1967, tendo sido inaugurada oficialmente em 1970.

Para o desenvolvimento das actividades necessárias à obtenção dos produtos comerciais refinados, a refinaria é constituída por diversas fábricas, estando as principais descritas no anexo A. A unidade analisada durante o projecto pertence à fábrica dos combustíveis, sendo esta constituída por 14 unidades principais divididas por duas linhas de fabrico, sendo que é na segunda linha que está integrada a unidade 3000.

A aplicação prática do modelo proposto será efectuada na unidade 3000, onde se dá o processo de destilação atmosférica. O petróleo bruto é submetido a uma destilação fraccionada de onde se obtém produto de topo (gases, gasolina leve e gasolina pesada), petróleo, gasóleo e resíduo atmosférico. O produto de topo é ainda sujeito a um *splitting* para produzir gasolina leve posteriormente desbutanizada e gasolina pesada que segue como carga da Unidade de Dessulfuração de Gasolina Pesada *Unifining*¹. Os restantes produtos são enviados para a armazenagem. Uma descrição mais pormenorizada da unidade encontra-se no anexo A.

¹ UNIFINING: processo de fabrico patenteado. Processo de hidrogenação

De referir a enorme importância desta unidade, onde se dá a entrada do petróleo bruto para a refinaria, e consequentemente, uma possível paragem desta afectará gravemente o funcionamento normal de todo o complexo. A localização da unidade no recinto da refinaria encontra-se representada pela Figura 3.

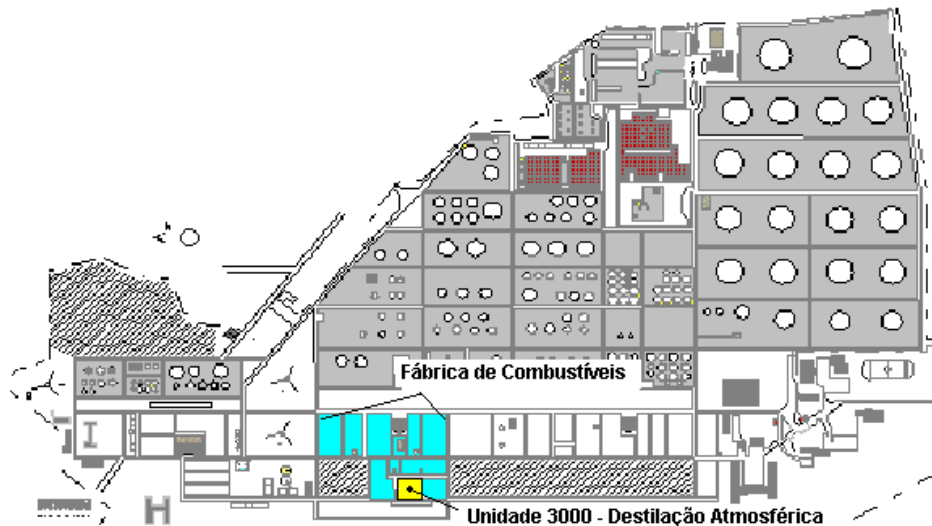


Figura 3 – Localização da unidade 3000 na refinaria de Matosinhos

1.2 Objectivos

Com a aplicação da metodologia proposta espera-se:

- Aumentar a cobertura dos equipamentos de maior risco, focando a maior parte dos recursos disponíveis, tanto de mão-de-obra como a financeiro, neste tipo de linhas;
- Garantir que o risco seja reduzido a valores razoavelmente praticáveis;
- Optimizar o calendário de inspecção e manutenção, de modo a evitar inspecções desnecessárias a equipamentos que não o justifiquem;
- Identificar e usar as políticas mais apropriadas de inspecção e manutenção, tendo sempre em conta as características das tubagens, pois não é viável a adopção de um tipo de manutenção geral para todos os tipos de tubagem;
- Adequar o esforço necessário e suficiente aos equipamentos de menor risco;
- Definir a estratégia para aumentar o tempo de vida útil dos equipamentos;
- Obter uma estratégia de manutenção que permita aumentar a eficiência, produtividade e redução de custos da refinaria.

1.3 Desenvolvimento do trabalho

Neste primeiro capítulo, é feita uma breve apresentação da empresa e são definidos o enquadramento e objectivos da dissertação.

No capítulo 2 é analisado o estado da arte, para que seja possível avaliar o estado da manutenção ao nível das tubagens, tendo sido recolhida informação sobre as várias políticas de manutenção, assim como a evolução de possíveis estratégias aplicáveis

nestes equipamentos. É demonstrada a importância da parte económica de todos os processos operacionais, sendo que o peso da manutenção dos orçamentos das indústrias é cada vez maior, muito devido ao aumento das exigências de segurança e ambientais. São também referenciadas algumas estratégias de manutenção, e é explicada a metodologia AHP, assim como os seus potenciais benefícios.

No capítulo 3, o equipamento em estudo é analisado ao pormenor, nomeadamente através das suas características e métodos de inspecção. São apresentadas as principais causas de degradação/falha das tubagens, que serão a principal origem da necessidade de efectuar manutenção às linhas. É descrita a estratégia actual de manutenção/inspecção seguida na refinaria, nomeadamente através do uso do software RBI, o qual é pormenorizadamente explicado, sendo apresentados os seus *inputs* e *outputs*, assim como os principais benefícios e desvantagens.

De seguida demonstrou-se a importância da melhoria da estratégia de manutenção e inspecção das tubagens da refinaria de Matosinhos, sendo justificada a necessidade do projecto realizado nesta dissertação. São apresentadas as lacunas na estratégia existente, assim como necessidades de informação adicional para obter novos *inputs* para o modelo proposto.

Optou-se por adaptar a metodologia proposta por Bevilacqua e Braglia, que se divide em 3 passos: cálculo do índice de criticidade, implementação do AHP e por fim, análise de sensibilidade. Foi então possível dividir as tubagens da refinaria segundo três graus de criticidade diferentes, para de seguida aplicar o AHP nestes três tipos de linhas. O resultado final desta metodologia permite concluir qual a melhor política de manutenção para cada grupo de linhas com um dos três graus de criticidade.

Após a determinação de todos os dados e inputs necessários ao método proposto, este será então aplicado a algumas linhas da U3000, para que seja possível a discussão dos resultados obtidos. Deste modo a metodologia da análise desenvolvida será avaliada, e os resultados obtidos, nomeadamente o tipo de manutenção adequado para cada grau de criticidade, serão sujeitos a uma análise crítica, sendo realizada também uma série de análises de sensibilidade.

Finalmente, no sexto e último capítulo, além das conclusões do trabalho realizado, 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 Estado da arte

Maintenance is the management of failures and the assurance of availability

Jack Hessburg²

No passado, o tipo mais comum e “natural” de manutenção era a correctiva, baseado no princípio de “arranjar quando quebra”, ou seja, reparar apenas quando um componente falhasse (Jovanovic 2003). Isto considerando que a falha é o vazamento de fluido para o exterior da tubagem (American Petroleum Institute 2002).

Actualmente, a adopção de manutenção correctiva como a única forma de intervenção não é mais aceitável, devido a factores críticos como a segurança das unidades e da instalação e o aumento dos custos de manutenção, que podem representar entre 15% e 60% dos custos de produção (Bevilacqua e Braglia 2000).

A manutenção correctiva tem dois factores que contribuem para os elevados custos de manutenção: fraco planeamento e reparações incompletas. (Higgins 2006).

O primeiro factor explica-se pelo elevado grau de emergência aquando de uma falha na tubagem, especialmente se, por exemplo, a linha for importante para o funcionamento da unidade. Daí não existir tempo para o planeamento da reparação, traduzindo-se em custos 3 ou 4 vezes superiores aos incorridos caso a mesma reparação fosse bem planeada (Higgins 2006). Quanto às reparações incompletas, devem-se ao facto da manutenção correctiva se concentrar em reparar os resultados da falha, e não a sua causa de raiz, pois o objectivo é que o componente volte o mais rápido possível a funcionar.

Enquanto que os hidrocarbonetos por si só não são corrosivos, impurezas como compostos de enxofre ou produtos químicos acrescentados durante o processo e erosão, podem resultar em perdas de espessura, que numa situação extrema, podem originar um derrame devido à reduzida espessura da linha para as pressões em jogo. Esta situação é no entanto rara pois os departamentos de inspecção das refinarias mantêm um controlo apertado destas perdas de espessura e estão familiarizados com os mecanismos de corrosão nos componentes (Sutherland 1997).

2.1 Políticas de manutenção/intervenção

A principal diferença das políticas de manutenção existentes reside no ponto onde a reparação ou acção de manutenção são implementados (Higgins 2006).

A classificação dos diferentes tipos de manutenção não é unânime, dependendo do autor e do livro consultado. Por exemplo, segundo Luís Andrade Ferreira (Ferreira, 1998), a manutenção pode ser dividida em dois tipos, curativa e preventiva, sendo que esta última englobará a manutenção sistemática e a condicional/condicionada. Para o autor, a

² Responsável do departamento mecânico da companhia de aviação comercial Boeing

manutenção sistemática é efectuada tendo como base um plano estabelecido segundo o tempo ou número de unidades de utilização, tendo por objectivo manter o sistema num estado de funcionamento equivalente ao inicial (Ferreira, 1998).

Já Kumar et al (2000) dividem as políticas de manutenção em 3 categorias: manutenção correctiva, manutenção preventiva e manutenção condicional. E uma última classificação é definida por Bevilacqua e Braglia (2000) segundo os quais existem 5 tipos de políticas de manutenção, sendo estas a correctiva, a preventiva, a oportunística, a condicionada e a predictiva. Esta será a classificação adoptada ao longo desta dissertação para a análise das tubagens, não só por ter uma gama mais alargada de possibilidades em relação às outras classificações analisadas, mas também porque será a metodologia proposta por estes autores a adoptada para desenvolver no capítulo 4 um modelo de estratégia para a manutenção das tubagens da refinaria.

2.1.1 Manutenção correctiva

Muitas empresas pensam na manutenção como uma fonte inevitável de custo. Para estas, as acções de manutenção têm uma função correctiva e são apenas executadas em situações de emergência (Bevilacqua e Braglia 2000). Consequentemente, a fiabilidade do componente é afectada, levando a um aumento da frequência de reparações e um aumento acentuado dos custos de manutenção (Higgins 2006).

Este tipo de acções de manutenção, *Corrective Maintenance Task (CMT)*, são implementadas com a intenção de restaurar as funcionalidades de um item ou sistema, após a perda de funcionalidade ou performance deste – ou seja, após a falha (Kumar, et al. 2000). Consequentemente, haverá sempre um tempo de *downtime*³ do equipamento, enquanto este é reparado, tal com demonstra a Figura 4 – área mais escura do gráfico.

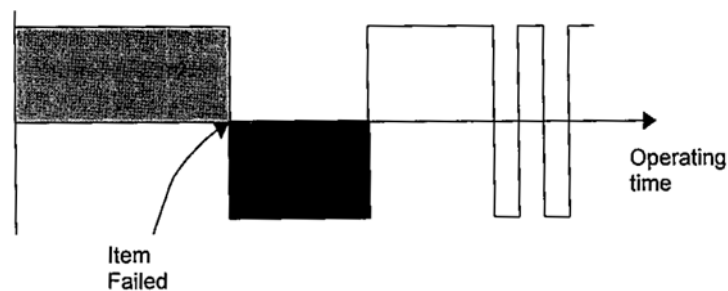


Figura 4 – Política de FBM (Kumar, et al. 2000)

Segundo Ferreira (1988), este tipo de manutenção justifica-se quando:

- Os custos indirectos da avaria são mínimos e não há problemas de segurança;
- A empresa adopta uma política de renovação frequente do parque material;
- O parque é constituído por vários equipamentos em que as eventuais avarias não afectam de forma crítica a produção.

³ *Downtime*: tempo dispendido para a manutenção do equipamento. Ou seja, é o tempo desde que o equipamento falha, até que se apresenta novamente em condições para entrar em funcionamento.

Estas acções estão associadas a uma *Failure-Based maintenance Policy, FBM*. Nesta, as medidas de manutenção correctiva podem ser caracterizadas com o grau de “normal”, “urgentes” e “emergência”, dependendo da natureza da resposta necessária (Kumar, et al. 2000). Embora cada vez seja menos corrente a adopção de manutenção correctiva, esta ainda continua a ser a mais utilizada para componentes não críticos – no caso das tubagens em estudo, pode ser mais económico optar por fazer manutenção correctiva na RAI em vez de preventiva e/ou condicional, tal como vai ser explicado no ponto 2.1.

Este é no entanto o tipo de política que permite aproveitar ao máximo a vida operacional de uma linha, pois esta funcionará até falhar. Também sistemas onde exista redundância de funções são aptos para esta política. De referir que a análise dos custos de manutenção permitiu demonstrar que uma reparação feita após uma falha, em situação de urgência, será normalmente 3 ou 4 vezes mais cara que a mesma acção de manutenção quando feita de uma forma planeada (Mobley, 2002).

Mesmo que se opte por implementar medidas unicamente preventivas, existirá sempre a necessidade de efectuar acções correctivas. Existem sempre avarias não previsíveis - num sistema normal – ou seja, dentro da média da indústria - pelo menos com uma taxa de 5% (Andrade 1998).

2.1.2 Manutenção Preventiva

Preventive Maintenance Tasks (PMT) são acções de manutenção feitas para reduzir a probabilidade de falha de um item/sistema ou para maximizar os seus benefícios operacionais, (Kumar, et al. 2000), numa data pré definida. Este tipo de manutenção pode ser classificado em 3 tipos: *clock based*, se for feita após um período de tempo medido em horas/dias/meses, *age-based maintenance*, se se efectuarem acções de manutenção quando o equipamento atinge uma determinada idade, ou então *usage-based maintenance*, quando o equipamento atinge uma determinada “quantidade” de uso (tipicamente kms ou horas de funcionamento) (Rausch, 2006).

O período de intervenção pode também ser determinado através de dados dos construtores, ou então através de uma previsão da fiabilidade associada a leis estatísticas que permitiriam encontrar o MTBF⁴ (Ferreira, 1998).

No caso das tubagens, este tipo de acções, nomeadamente a medição de TML⁵s e a inspecção visual externa (consultar anexo B), são feitas de acordo com intervalos fixos de tempo, neste caso em anos, segundo a norma do API⁶ 570 (ver Tabela 1). Segundo esta classificação, toda a tubagem pode ser categorizada em 3 classes, baseada no perigo potencial do fluído circulante e a sua relação com a deterioração da tubagem, sendo que

⁴ Mean time between failures

⁵ Thickness monitoring locations

⁶ *American Petroleum Institute*. O API distribui mais de 200 000 cópias das suas publicações por ano. Estas, assim como normas técnicas e produtos electrónicos, têm como objectivo ajudar os utilizadores a melhorar as suas operações a nível de eficiência e redução de custos, assim como cumprir os regulamentos de saúde, segurança e ambiente. Assim se justifica a adopção e uso por parte da Refinaria de Matosinhos destes códigos.

a frequência de inspecção é estabelecida tendo como base a composição do fluido da tubagem ou metade da vida restante desta (Chang, et al. 2005).

Tabela 1 - Frequência de inspecção (American Petroleum Institute 1998)

Tipo de circuito	Frequência de Medição de espessuras (TML's)	Frequência de inspecção visual externa
Classe 1	5 Anos	5 Anos
Classe 2	10 Anos	5 Anos
Classe 3	10 Anos	10 Anos

Contudo, as condições reais das tubagens raramente são as previstas, isto porque o estado destas depende muito do modo e condições de funcionamento e da possível distribuição do risco. Exemplo disso mesmo são as linhas que trabalham em serviço descontínuo, sendo este um factor muito importante de degradação.⁷ Também o facto da refinaria de Matosinhos se encontrar ao lado do mar influencia o aumento das condições de degradação da tubagem.

Para além disso, determinar previamente a frequência de inspecção pode não só conduzir a que se efectuem menos inspecções do que as necessárias a alguns componentes com risco elevado, mas também ao gasto de recursos na inspecção de tubagens com um baixo nível de risco (Chang, et al. 2005).

As acções de manutenção preventiva estão então associadas a uma *Time-based maintenance policy*, *TBM*. Nesta, são tomadas medidas preventivas em intervalos fixos, definidos mesmo antes de o equipamento entrar em funcionamento, de modo a reduzir a probabilidade de ocorrência de falhas e a evitar que o sistema falhe. Esta política de manutenção deve ser implementada em linhas nas quais a probabilidade de ocorrência de uma falha é baixa, quando os custos de implementar esta política são substancialmente mais baixos do que as alternativas ou então quando as condições do sistema não permitam que este seja monitorizado, quer seja por falta de acessos ou por razões económicas (Kumar, et al. 2000). No entanto, cada vez menos se justifica a adopção deste tipo de manutenção, especialmente no caso em estudo. Isto porque este tipo de acções não diferencia as linhas consoante a sua criticidade, sendo por vezes dispendidos recursos em linhas que não os necessitam/justificam.

Mesmo na situação em que é feita demasiada inspecção pode até acontecer que o nível de risco suba, devido a algumas técnicas de inspecção invasivas que podem causar deterioração adicional. (American Petroleum Institute 2002)

2.1.3 Manutenção oportunística

A manutenção oportunística aproveita as intervenções realizadas noutros equipamentos para se efectuarem intervenções também no equipamento em estudo. Por exemplo, se se tiver decidido inspecionar uma linha de difícil acesso, e a linha em estudo estiver

⁷ Por exemplo, em funcionamento normal a própria temperatura da tubagem elimina parte das condensações dos agentes atmosféricos, evitando a ocorrência de corrosão externa.

próxima, pode-se optar por efectuar medidas de intervenção nesta mesma linha, quer seja de manutenção e/ou inspecção.

Na refinaria de Matosinhos, este tipo de opção de manutenção ocorre quando toda a instalação/unidade é parada numa data pré definida de modo a permitir realizar todas as tarefas de manutenção ao mesmo tempo (Bevilacqua & Braglia, 2000). Exemplo duma paragem deste tipo foi a que aconteceu na unidade 3300 da refinaria a 24 de Maio de 2011, que se prolongou por cerca de um mês.

A opção de apenas efectuar manutenção oportunística ao nível das tubagens também não será a mais indicada, pois as tubagens podem ter necessidades de inspecção anteriores à data definida para paragem da unidade.

No entanto esta opção é muito utilizada para a inspecção de linhas isoladas, pois devido às elevadas temperaturas de funcionamento, os *TML*'s só podem ser medidos com rigor quando as linhas estão frias, o que acontece durante a paragem. Também, durante as paragens, o isolamento pode ser retirado, pois a linha não está em funcionamento não necessitando de ser aquecida (através de isolamento ou traçagem), sendo mais fácil inspecioná-la.

2.1.4 Manutenção condicionada

Maintenance carried out in response to a significant deterioration in a unit as indicated by a change in the monitored parameters of the unit's condition or performance (Kelly e Harris, 1978)

A manutenção condicionada reconhece que uma mudança nas condições e/ou performance pode levar a uma falha, e que portanto as acções de manutenção deverão ser baseadas nas condições actuais do item/sistema (Kumar, et al. 2000). Através da monitorização de alguns parâmetros será possível identificar a altura mais adequada para efectuar medidas de manutenção. Os equipamentos podem então sofrer reparações temporárias (como por exemplo colocação de braçadeiras, no caso das tubagens), substituídos parcialmente ou então totalmente, dependendo do estado dos componentes (Veldman, Klingenberg, & Wortmann, 2011) e de outros factores, que irão ser analisados ao longo desta dissertação.

Neste tipo de manutenção, a decisão de intervenção é tomada quando existe evidência experimental da avaria iminente ou da aproximação do limite de degradação pré determinado (Andrade 1998). Por exemplo, no caso das tubagens, este parâmetro pode ser o aproximar do limite da espessura mínima de funcionamento considerada, que tem um valor específico para cada linha.

Este tipo de acções não só ultrapassa as desvantagens dos outros tipos de medidas de manutenção já referidos, como aumenta a vida operacional do sistema sem aumentar o risco de falha. No entanto, a manutenção condicionada não é ainda um conceito de manutenção dominante (Veldman, Klingenberg, & Wortmann, 2011). Os elevados custos de implementação/aplicabilidade comparativamente com os outros tipos de manutenção justificam este facto, devido a custos, por exemplo, de monitorizar continuamente a linha através da colocação de analisadores de corrosão nas linhas (que

no caso da RM existem nas linhas mais críticas da unidade 3000 e nas linhas das novas unidades) ou então através do uso de caudalímetros (que permitem medir o caudal entre diferentes pontos de linha, de modo a concluir se existem perdas), no qual a utilização se pode considerar em tubagens de transporte de longa distância, como por exemplo oleodutos, mas não em refinarias.

Improvements in plant reliability and plant condition monitoring were naturally the key to upgrading production efficiency

Hernu, 1992 in (Hunt, 1996)

O futuro aponta para a adopção de medidas de manutenção condicionada, que requerem acções de monitorização, quer periódica quer contínua. A monitorização é uma ferramenta essencial para uma política de manutenção condicionada, sendo que um dos principais objectivos da monitorização é determinar intervalos de inspecção (Golmakani & Fattahipour, 2011).

Isto porque manutenção sem monitorização das condições é como tomar medicamentos todos os dias sem verificar se ainda são precisos ou se alguma vez o foram, enquanto que monitorização das condições sem manutenção é como saber que se está doente mas não se preocupar em ir ao médico (Hunt 1996). Existe então a necessidade de encontrar um equilíbrio de custos de inspecção/monitorização.

Ou seja, quanto mais manutenção for efectuada, menos monitorização é requerida, sendo então o objectivo otimizar os processos de manutenção e monitorização/inspecção, de modo a atingir os mais baixos custos possíveis.

Existem diversas possibilidades, que podem por exemplo incluir um nível elevado de manutenção, sendo que nesta situação a probabilidade de falha é muito baixa e não faz sentido fazer monitorização – resultando, no entanto, num elevado *downtime* e em custos inaceitáveis. Já a situação oposta passaria por monitorizar continuamente todos os componentes de um determinado equipamento, tornando possível determinar o momento exacto de substituição de cada componente, situação esta que também se traduziria em custos de monitorização/inspecção muito elevados. Isto porque as inspecções requerem mão-de-obra, assim como mecanismos/ferramentas de trabalho específicos, e por vezes suspensão das operações. Justifica-se, então, a existência de um *trade off* entre custos de inspecção e custos de possíveis falhas, (Golmakani & Fattahipour, 2011).

Através da monitorização/inspecção das tubagens, é possível verificar a queda de performance. Nesta situação, são tomadas medidas de manutenção, de modo a voltar à condição previamente verificada na linha (Hunt 1996). Como a causa maioritária de degradação das tubagens são os fenómenos de corrosão, o principal objectivo da monitorização numa política de manutenção condicionada será monitorizar este mecanismo de degradação.

A manutenção condicional utiliza ao máximo, dentro do possível, as suas possibilidades dos componentes e equipamentos, diminuindo os stocks de peças sobresselentes

(Andrade 1998). Claro que a manutenção correctiva é a que utiliza o máximo do tempo de vida dos equipamentos, no verdadeiro sentido da palavra, pois a manutenção condicionada não deixa o equipamento estar em funcionamento até ao fim da sua vida, tendo em conta o risco, fazendo o *trade off* adequado entre este factor e a probabilidade de falha.

Daí que a manutenção condicional represente apenas 40% do custo quando comparada com medidas de manutenção correctiva (Timmins 1996). Outra vantagem, visível no gráfico 1, é a extensão da vida de serviço atingida através desta opção de manutenção. Isto porque, comparando a manutenção correctiva com a condicional, a manutenção correctiva não implementa qualquer medida de manutenção durante o tempo de vida do equipamento, e conseqüentemente o equipamento pode acabar por ter a sua vida útil encurtada, devido aos acentuados mecanismos de degradação.

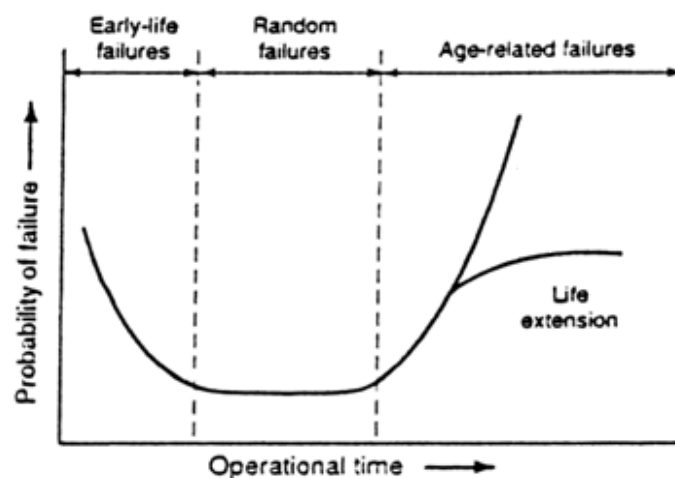


Gráfico 1 – Aumento da duração de vida dos equipamentos obtida com a implementação de manutenção condicional. (Timmins, 1996)(adaptado)

2.1.5 Manutenção preditiva

Este tipo de manutenção é baseado na experiência, através da análise dos dados do passado, e caso existam, do presente. Ou seja, na manutenção preditiva os parâmetros adquiridos são analisados para tentar encontrar uma tendência temporal (Bevilacqua & Bragliab, 2000). Deste modo é possível prever quando é que o parâmetro em análise vai atingir o valor crítico previamente definido, através da modelização, por exemplo no caso em estudo, de uma lei de corrosão.

Deste modo, os responsáveis são capazes de prever, sempre dependendo das condições operacionais, quando será adequado efectuar a substituição ou intervir no equipamento.

Analizando a curva P-F (Figura 5), pode dizer-se que a manutenção preditiva é mais conservativa do que a condicionada, pois as suas acções situam-se na primeira parte do gráfico, ou seja, na zona em que as condições do equipamento se começam a degradar, entre o ponto inicial e o ponto P – ponto que marca o início de possível ocorrência de falha. Já a manutenção condicionada, caso a monitorização implementada seja contínua,

permite ter acesso aos dados em tempo real do equipamento em estudo, permitindo decidir quando se deve intervir no intervalo P-F da curva, ou seja, entre o ponto de potencial falha (P) e o ponto onde se dá a falha (F), não sendo por isso necessário tomar medidas tão cedo como na manutenção preditiva. Embora isto seja economicamente mais vantajoso, a manutenção condicionada tem sempre o seu custo agravado pelos custos de aplicabilidade, que tornam frequentemente a manutenção preditiva mais vantajosa. Só quando não é possível modelizar a lei de corrosão, por esta ser variável, ou quando a criticidade/importância das linhas o justifica, é que se opta normalmente pela manutenção condicionada.

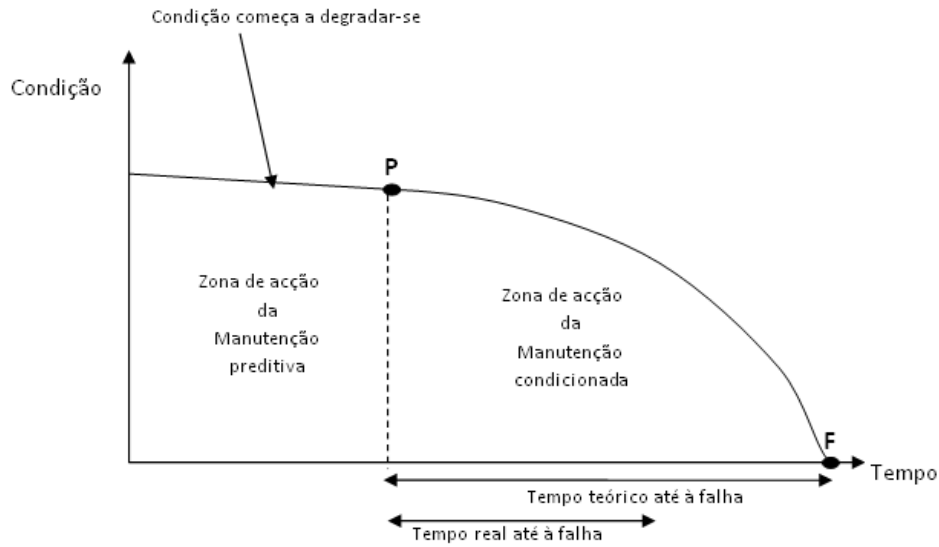


Figura 5 – Curva P-F

No entanto, a investigação já provou que métodos de manutenção baseados na experiência tendiam a ignorar falhas tais como rupturas, pois estas raramente aconteciam (ASME, 2003). Esta é uma desvantagem desta política, porque falhas nos sistemas de tubagens das refinarias podem ter um enorme potencial para provocar incêndios graves, pois muitas linhas transportam fluidos altamente inflamáveis e gases sujeitos a uma grande pressão e/ou elevada temperatura.

2.2 Comparação entre os tipos de manutenção

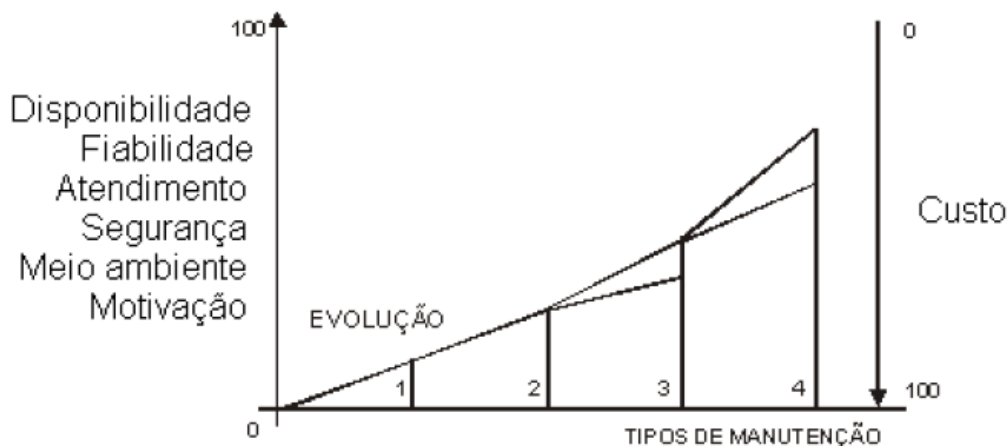


Gráfico 2 - Tipo de manutenção vs. Resultados (Correia 2008)

O gráfico 2 demonstra a relação entre os diferentes tipos de manutenção com os custos e diferentes factores, tais como a disponibilidade e fiabilidade. As zonas 1 pode então corresponder a uma política de manutenção correctiva, enquanto que a zona 2 é mais características de políticas preventivas e oportunistas. Já a zona 3 corresponde a políticas condicionais e preditivas. Já a zona 4 será o resultado da implementação de uma estratégia de manutenção que combine tipos de acções de manutenção para diferentes linhas.

Tal como se verifica neste gráfico, há uma redução de custos de falha proporcional ao aumento do grau de flexibilidade do tipo de manutenção, ou seja, quanto menos pré determinada e mais baseada nas condições do equipamento, maior será o grau de disponibilidade e segurança, entre outros.

Segundo Luís Andrade Ferreira (1998), na selecção do tipo de manutenção a utilizar, dever-se-á ter em atenção que os objectivos fundamentais da Manutenção em termos de disponibilidade e segurança dos equipamentos devem ser obtidos com um custo global mínimo, potenciando ganhos globais para a instalação.

2.3 Estratégias de manutenção

The problems we face today cannot be solved at the same level of thinking we were at, when we created them

(Albert Einsten)

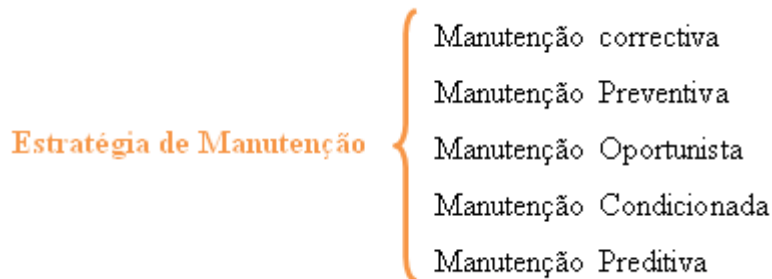
Todos os utilizadores esperam que os seus sistemas funcionem o maior tempo possível, ou então, enquanto for necessário. Para atingir estes objectivos, é necessário manter as funcionalidades do sistema durante o seu funcionamento, através da implementação de medidas apropriadas de manutenção (Kumar, et al. 2000). Daí a necessidade de escolha de uma estratégia de manutenção apropriada, de forma a aumentar a disponibilidade e tempo de vida dos equipamentos, e ao mesmo tempo reduzir custos.

Cada vez mais as empresas lidam com altos investimentos de capitais e elevadas despesas de *downtime*, disponibilidade e fiabilidade. Isto coloca pressão na área da manutenção e justifica a necessidade para práticas e tecnologias de manutenção avançadas (Veldman, Klingenberg, & Wortmann, 2011).

Para além disso, actualmente o risco já não é apenas uma questão de segurança, envolvendo regras e regulamentos, mas também uma questão económica, pois *na prática é mais importante conhecer e lidar com o risco do que necessariamente eliminá-lo e reduzi-lo de todas as maneiras possíveis* (Slovic 2000). Torna-se então essencial incluir na definição de uma estratégia de manutenção/intervenção uma análise do risco, de modo a obter o melhor *trade off* entre este parâmetro, a parte económica, e factores como a segurança e disponibilidade, entre outros.

Nas refinarias a distribuição da enorme quantidade de tubagens é mais complexa do que em qualquer outro tipo de equipamento, sendo que em geral são também estes os equipamentos onde existe mais dificuldade em definir o planeamento da inspecção

(Chang, et al. 2005). Torna-se então cada vez mais necessário que os departamentos de manutenção e inspecção, tradicionalmente separados, se integrem de forma a minimizar tempos de paragens e custos de manutenção (Jovanovic 2003). Normalmente, uma boa estratégia de manutenção combina diferentes políticas de manutenção (representadas no esquema 1), consoante as características dos equipamentos (Bevilacqua & Braglia, 2000).



Esquema 1 – Tipos de políticas de manutenção que uma estratégia de manutenção pode englobar

2.3.1 Evolução das estratégias de manutenção/intervenção

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, 1998). Nas últimas décadas as estratégias de manutenção evoluíram desde estratégias baseadas unicamente em manutenção preventiva/correctiva até estratégias mais elaboradas baseadas na monitorização das condições e RCM (Bertolini M. , Bevilacqua, Ciarapica, & Giacchetta, 2009).

Na literatura podem ser encontrados vários métodos para planear as actividades de manutenção de unidades industriais. A estratégia RCM – *Reliability centered maintenance* – foi a base de tudo, começando a ser integrada na aviação. Esta abordagem, com o objectivo de minimização dos custos de manutenção através do *trade off* entre os elevados custos, resultantes da aplicação da metodologia da manutenção correctiva e os custos de políticas de manutenção preventiva ou condicionada, tendo em conta potenciais reduções do tempo de vida do equipamento (Bertolini & Bevilacqua, 2006).

Outro ramo nesta cadeia de progresso foi recentemente acrescentado com a introdução de uma metodologia baseada na análise do risco – *Risk based inspection, RBI*. O objectivo desta metodologia passa pela definição de uma estratégia para definir quais as melhores datas para inspeccionar e efectuar medidas de mitigação do risco, sendo calculados pela metodologia factores como a probabilidade e consequência de falha, de modo a fazer uma análise correcta do risco existente – tal como irá ser explicado no ponto 3.3.1. desta dissertação. No entanto, embora o software RBI tenha como *output* planos de inspecção e ensaios recomendados consoante a classificação de risco e o nível máximo aceitável para o mesmo, estes tendem a ser conservadores e consequentemente a sua aplicação numa instalação da dimensão da refinaria de Matosinhos tenderá a ser extremamente dispendiosa, pelo menos numa primeira fase. Outras estratégias de

manutenção, tais como a TQM e a TPM encontram-se resumidamente explicadas no anexo D.

Para além destas estratégias, podem ser aplicadas outras metodologias multi-critério de análise à fiabilidade e ao modo de falha, tais como a análise FMECA – *failure mode and criticality analysis* -, que permite identificar potenciais modos de falha, assim como as suas causas e os efeitos no funcionamento do sistema (Industry Standards & Regulations, 2006). No entanto, esta análise não fornece qualquer tipo de indicação sobre que tipo de estratégia de manutenção adoptar.

Para além disso, para muitos gestores, uma importante lacuna da FMECA assenta no facto desta técnica considerar apenas algumas características da falha, sendo que factores importantes como os económicos não são considerados (Braglia, 2000). Assim se justifica a opção pelo AHP, que pode ser usado na tomada de decisões sobre questões complexas, não estruturadas e que contêm atributos múltiplos. As decisões resultantes da análise dos critérios podem conter elementos objectivos e subjectivos, sendo que o AHP se apresenta então como um método para tratar e analisar critérios que podem ser quantificados e/ou apenas avaliados de forma subjectiva (Nataraj, 2006).

2.3.2 AHP – Analytic hierarchy process

Designed to reflect the way people actually think, the AHP was developed more than 20 years ago and it is one of the most used multi-criteria decision-making techniques.

(Bevilacqua & Braglia, 2000)

As decisões que tomamos são baseadas em factores objectivos e subjectivos, que são posteriormente analisados e avaliados até uma tomada de posição pelo decisor. Daí que a avaliação de critérios intangíveis se apresente como o factor desafiante para a percepção humana há muito tempo (Saaty, 2008).

Nos dias de hoje, a tomada de decisões tornou-se numa ciência matemática nos dias de hoje (Figuera, Greco, & Ehrgott, 2005). Isto porque formaliza o pensamento em factos objectivos para que os parâmetros que usamos para tomar melhores decisões sejam transparentes em todos os aspectos, partindo do princípio que é possível através da matemática atribuir um valor a todas as coisas (Saaty, 2008). Esta constitui principal vantagem do AHP: permite avaliar parâmetros intangíveis em termos relativos, facilitando a tomada de decisões através da organização de percepções, sentimentos, opiniões e sentimentos numa *framework* que mostra as forças que influenciam uma decisão (Bayazit, 2005).

Ou seja, o AHP ajuda a organizar aspectos críticos de um problema numa estrutura hierárquica semelhante a uma árvore genealógica. Ao reduzir as decisões complexas a uma série de comparações simples hierarquizadas, sintetizando depois os resultados, o AHP não só ajuda os analistas a chegar à melhor decisão, mas também favorece um raciocínio claro para as escolhas feitas.

Na literatura analisada existem diversos métodos para incluir o AHP na definição da estratégia de manutenção de equipamentos. Bertolini and Bevilacqua propõem uma metodologia que reúne o AHP e uma extensão da programação linear – *goal*

programming – de modo a definir a melhor estratégia de manutenção para bombas numa refinaria. Já uma combinação entre a análise FMECA e o AHP é proposta por (Braglia, 2000), de modo a superar as desvantagens da análise FMECA com a introdução do AHP, sendo este método denominado MAFMA – *Multi-attribute failure model analysis*. No projecto realizado, optou-se no entanto por adaptar o método proposto por Bevilacqua e Braglia, que consiste no cálculo de um índice de criticidade para cada linha, seguindo-se da aplicação da análise AHP para cada um dos 3 graus de criticidade definidos.

2.3.2.1 Funcionamento da metodologia

We are all fundamentally decision makers. Everything we do consciously or unconsciously is the result of some decision. (Saaty, 2008)

A metodologia AHP é baseada no pressuposto que uma pessoa quando decide pode fazê-lo mais facilmente por comparação do que de uma forma absoluta (Braglia, 2000). Isto porque as decisões envolvem parâmetros intangíveis que têm de ser analisados. Para tomar decisões, é então necessário conhecer o problema, o objectivo da decisão, os critérios e subcritérios da decisão, mas também como a decisão pode afectar o meio envolvente e as diferentes alternativas de decisão possíveis (Saaty, 2008).

Consequentemente, para tomar uma boa decisão de uma forma organizada de modo a obter prioridades é necessário decompô-la nos seguintes passos:

- Definir o problema e o tipo de conhecimento que se pretende alcançar;
- Estruturar a hierarquia da decisão por níveis, desde o topo, com o objectivo da decisão, até aos níveis seguintes – critérios, dos quais os níveis inferiores estão dependentes, sendo estes normalmente as alternativas.
- Construir matrizes emparelhadas (também denominadas matrizes de comparação *dois-a-dois*). Cada elemento num nível superior é usado para comparar os elementos do nível imediatamente inferior. As entradas destas matrizes indicam quanto mais importante um elemento é relativamente ao outro ao qual está a ser comparado. O decisor pode verbalmente expressar a sua preferência entre cada par de elementos, definindo-os como: igualmente importantes, moderadamente mais importantes, muito mais importantes, extremamente mais importante, e mais importante possível, sendo que estas preferências podem ser traduzidas por números, nomeadamente 1,3,5,7,9. Os números pares serão valores intermédios de comparação.
- Usar as prioridades obtidas a partir das comparações para pesar as prioridades no nível imediatamente inferior, fazendo isto para cada elemento. Depois, para cada elemento do nível abaixo adicionam-se os seus valores pesados e obtêm-se a sua prioridade total ou global. Continua-se este processo de pesagem e soma até às últimas prioridades das alternativas do nível mais inferior serem obtidas (Saaty 2008). Deste modo, será possível definir qual a melhor alternativa para o objectivo de resolução do problema.

A hierarquia do problema está então definida em níveis, com o primeiro nível a reflectir o objectivo final da decisão que se pretender tomar, enquanto os intermediários exprimem os factores e/ou critérios e subcritérios que afectam a escolha da decisão. As diferentes alternativas às decisões de opção encontram-se no último nível, que no caso em estudo serão as diferentes políticas de manutenção.

A escala utilizada pelo AHP, demonstrada na Tabela 2, permite que o decisor incorpore experiência, subjectividade e conhecimento nas matrizes de comparação, de uma forma intuitiva e natural (Dey, 2001). Para demonstrar o funcionamento desta, pode dar-se o exemplo da análise das bebidas consumidas num país. Terá de se avaliar, por exemplo, quantas vezes mais, ou quão mais elevado, é o consumo de café em relação ao chá. Se a avaliação for classificada pela Tabela 2 como sendo 9, o consumo de café será 9 vezes o do chá. O oposto acontecerá se este consumo foi classificado como 1/9.

Tabela 2 - Escala fundamental de números absolutos (Saaty, 2008)

Intensidade de importância	Definição	Explicação
1	Importância igual	As duas actividades contribuem da mesma forma para o objectivo
3	Importância moderada	A experiência e a opinião formada pode favorecer ligeiramente uma actividade em relação à outra
5	Importância forte	A experiência e a opinião formada favorecem realmente uma actividade em relação à outra
7	Importância muito forte ou já demonstrada	Uma actividade é favorita em relação à outra de uma forma muito evidente, ou a sua preponderância é demonstrada na realidade
9	Importância extrema	A evidência da preponderância de uma actividade em relação à outra é a mais alta possível

Este tipo de comparações são preferidas pelos responsáveis quando vários critérios intangíveis têm de ser tratados/avaliados, como acontece com a escolha da política de manutenção (Bevilacqua & Braglia, 2000).

2.3.2.2 Avaliação dos resultados

O AHP é a única metodologia multicritério que permite medir a consistência do decisor. Isto porque as avaliações feitas pelo AHP são baseadas em suposições que, se o decisor é racional, prefere a opção A quando comparada com a B, e se B é preferida em relação a C, então A é a preferida relativamente a C. O índice de consistência (CI) permite então medir quão aleatórias são as decisões, permitindo que o analista possa avaliar a qualidade da avaliação.

Encontra-se definido pela equação 1, onde $\lambda_{\max}$ é o valor médio máximo do vector de probabilidade da matriz, sendo n a dimensão desta.

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$$

Equação 1 – índice de consistência

Já o índice de inconsistência, I_r , é definido pela equação 2, onde RI é o valor médio aleatório de consistência de uma matriz $n * n$, valores estes representados na Tabela 3 e definidos por Saaty, para cada ordem das matrizes de comparação.

$$I_r = \frac{CI}{RI}$$

Equação 2 – índice de inconsistência

Tabela 3 – Valores de RI para diferentes ordens de matrizes

n	1	2	3	4	5
RI	0	0	0,52	0,89	1,11

As avaliações são consideradas aceitáveis quando $I_r \leq 0.1$, sendo que em casos de inconsistência o processo de avaliação da matriz é repetido.

3 Análise da situação actual

De acordo com resultados estatísticos (Mahoney 1998), as tubagens são os componentes presentes em maior número em refinarias e instalações/unidades petroquímicas, especialmente porque são de grandes dimensões e muito mais complicadas do que qualquer outro tipo de equipamento (Chang, et al. 2005). Para além disso, o tipo de equipamentos mais importantes para controlar o risco de perda de activos são, por ordem decrescente de importância, tubagens, reactores, tanques e colunas processuais (Timmins 1996). Este *ranking* indica a ordem preferencial de realização de inspecção e manutenção.

Embora o panorama operacional tenha mudado e continue a evoluir, os conceitos básicos de montagem e manutenção de tubagens continuam os mesmos (Holt 2003). As tubagens podem ter incorporadas na sua estrutura válvulas, acessórios de tubagem, juntas de expansão, purgadores, etc., sendo estes componentes ligados da mesma forma como eram ligados hoje à tubagem basicamente da mesma forma como eram ligados há décadas. Ou seja, a integridade da maioria dos sistemas de tubagem depende de métodos de selagem, soldadura e aperto que foram desenvolvidos quase há um século atrás (Holt 2003).

3.1 Causas de degradação/falha das linhas

As tubagens podem falhar de diversas formas e por causa de diversos mecanismos de degradação, associados ou não, sendo que a sua falha principal e mais preocupante é a perda de contenção, tal como se verifica na Figura 6.

No entanto, no caso da refinaria de Matosinhos, o mecanismo actuante que mais falhas origina é a corrosão sob isolamento térmico, devido à sua proximidade de um ambiente extremamente agressivo como é a costa atlântica, associado ou não, a perdas de protecção anticorrosiva e algumas deficiências de projecto, ao nível das soluções adoptadas para apoio de linhas.



Figura 6 – Exemplo de uma falha mecânica numa linha

Apesar da ocorrência de falhas das linhas ser registada e mantida em histórico, num relatório correspondente, o seu tratamento posterior ao nível estatístico, apresenta ainda campo para progressão.

O fenómeno da corrosão atmosférica pode dar-se em todas as estruturas e equipamentos existentes numa refinaria, para além das tubagens, como por exemplo, tanques, colunas de destilação, permutadores, estruturas metálicas, etc. Tubagens nas quais circulem fluidos que tenham na sua composição compostos de enxofre, assim como linhas sujeitas à presença de água, cloretos e outros contaminantes, têm normalmente uma taxa de corrosão mais elevada. Esta taxa é também influenciada pela gama de temperaturas a que circula o fluido, pois existe um intervalo de temperatura crítico (40 a 120°C), em que a humidade permanece entre a tubagem e o isolamento, originando forte corrosão.

A corrosão externa é normalmente identificada pela ocorrência de um fenómeno electroquímico de oxidação-redução, que origina a formação de camadas de óxidos de ferro, tal como se pode ver na figura 7.



Figura 7 – Linha de parafina com traçagem, desisolada com camadas de óxidos visíveis

A corrosão pode também resultar de fenómenos tão aleatórios como, no caso dos das passagens inferiores de pontões que permitem a infiltração e a formação de gotas de água sempre em cima da mesma área das tubagens, resultando em fenómenos localizados de degradação/corrosão.

Para além da escolha adequada do material da tubagem, tipo e condição do isolamento para as diversas temperaturas de funcionamento, existem também métodos que previnem e protegem as tubagens da corrosão, tais como a aplicação de uma pintura adequada e utilização de protecção catódica.

O *output* da inspecção ao nível da corrosão baseia-se numa *run-repair-replace decision*. A importância da inspecção abrangendo todos os tipos possíveis de mecanismo de corrosão / degradação presentes nas tubagens justifica-se, pois as consequências podem ser desastrosas, a diversos níveis, humanos, ambientais e processuais (uma paragem devido à perda de contenção de uma tubagem pode custar milhões de euros).

O gráfico 3 mostra a evolução dos acidentes devido à corrosão nos últimos anos. Isto porque uma das consequências dos mecanismos de corrosão das linhas, descritos no anexo C, é a perda de espessura gradual até à perda de contenção da tubagem. E sendo muitas vezes veiculados fluidos perigosos, uma pequena fuga pode provocar uma situação perigosa (Mokhtar, Ismail, & Muhammad, 2010).

É preciso também referir que podem existir outros defeitos e necessidade de reparações das linhas, devido às condições de projecto ou operação, mas também como resultado de danos ocorridos durante a construção ou provocados por terceiros. No entanto, estes não são significativos, até porque ao nível da construção existe um controlo inicial por lotes da condição de fornecimento das tubagens, durante e após o pré fabrico e a instalação.

Normalmente é na montagem ou instalação das tubagens que se verificam mais problemas, devido a pancadas ou deficiências de montagem, que podem provocar, por

exemplo, danos na pintura da linha, e consequentemente acelerar a acção dos mecanismos de corrosão.

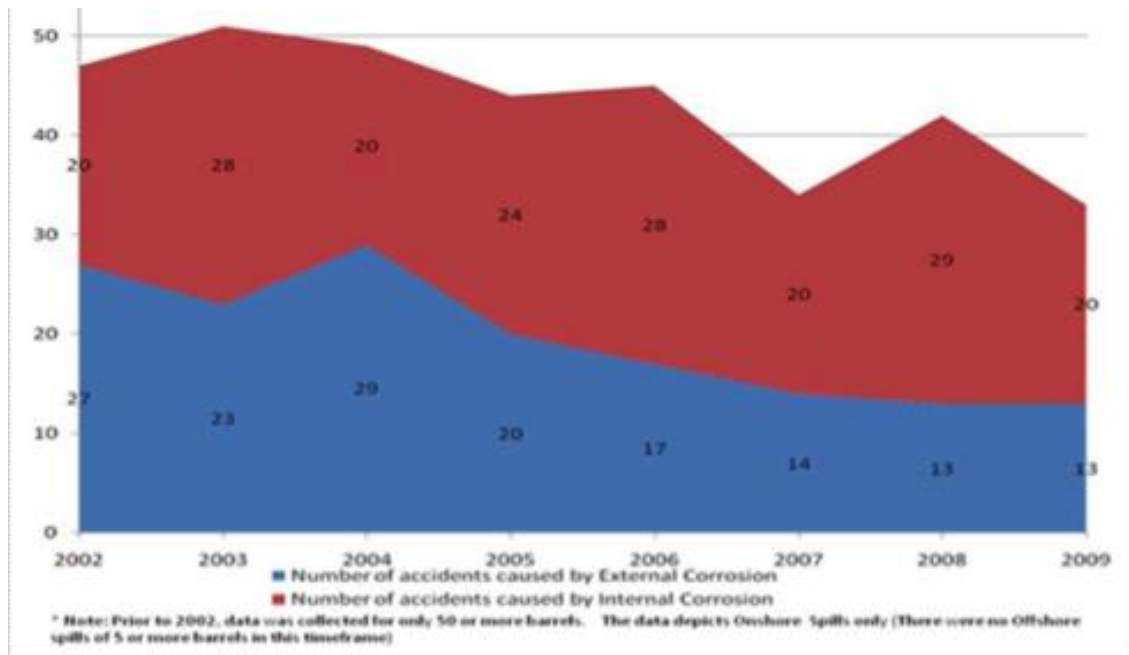


Gráfico 3 – Acidentes Perigosos causados por corrosão – interna vs. Externa (The oil drum, 2010)

3.2 Inspeção de linhas de tubagem

Para um funcionamento seguro e eficiente das tubagens requer-se que cada componente estático seja inspeccionado em intervalos regulares, de forma a monitorizar a taxa de corrosão do componente, para que este possa ser reparado ou retirado de serviço, antes que a perda de contenção resulte numa paragem da unidade, com resultados potencialmente catastrófico (M. T. Sparago 2000).

A causa mais frequente para substituição de linhas de tubagens é a perda de espessura devido à corrosão (American Petroleum Institute 1998). Por isso mesmo, um programa eficaz de inspecção passa por controlar as perdas de espessura, estabelecimento das taxas de corrosão e das datas das próximas inspecções, ou para substituição da tubagem.

A área da inspecção estática da RM segue actualmente o procedimento presente no anexo B para inspeccionar as tubagens da refinaria. Neste anexo é possível também consultar um exemplo de um relatório de inspecção estática, com o resultado das inspecções efectuadas e conclusões/recomendações daí resultantes.

A selecção adequada da técnica de inspecção será função do mecanismo de degradação esperado. Todas as técnicas de ensaios não destrutivos deverão ser efectuadas de acordo com os procedimentos em vigor. Os diferentes tipos de técnicas encontram-se também descritos no anexo B.

3.3 Estratégia actual na refinaria de Matosinhos

A refinaria tem já implementadas medidas de monitorização, nomeadamente do tipo periódica, muito pela necessidade de aderência destas acções às paragens de 4 em 4 anos das unidade. Estas traduzem-se, por exemplo, nas medições por ultra-sons dos TML's.

A estratégia de manutenção dominante na refinaria de Matosinhos para estes componentes é maioritariamente baseada em políticas de manutenção preditiva, sendo dada uma grande importância à análise de risco feita pelo RBI - *Risk-based inspection*. Isto porque esta metodologia permite definir um plano de manutenção e ensaios, guardar registos e partilhar informação (Chang, et al. 2005). Deste modo, é possível prever a melhor data para inspecionar determinados circuitos ou levar a cabo as substituições, de forma a manter o nível de risco aceitável definido pela organização.

A metodologia RBI inclui na sua análise parâmetros tais como a composição dos fluidos (o que implica a recolha de amostras e a sua e a análise laboratorial), temperaturas e pressões de funcionamento, as medições de espessura dos TML's para definir os seus *outputs*. Inclui também uma grande variedade de técnicas de inspecção, como sejam a inspecção visual, utilização de partículas magnéticas, correntes induzidas, radiografias, ultra-sons, ondas guiadas, etc.

O processo de avaliação do risco pelo RBI encontra-se representado na Figura 8 e tem como objectivo obter uma resposta para as seguintes perguntas:

- O que pode correr mal?
- Qual a probabilidade de correr mal?
- Quais as consequências se algo correr mal? (K. Nalli 2007)

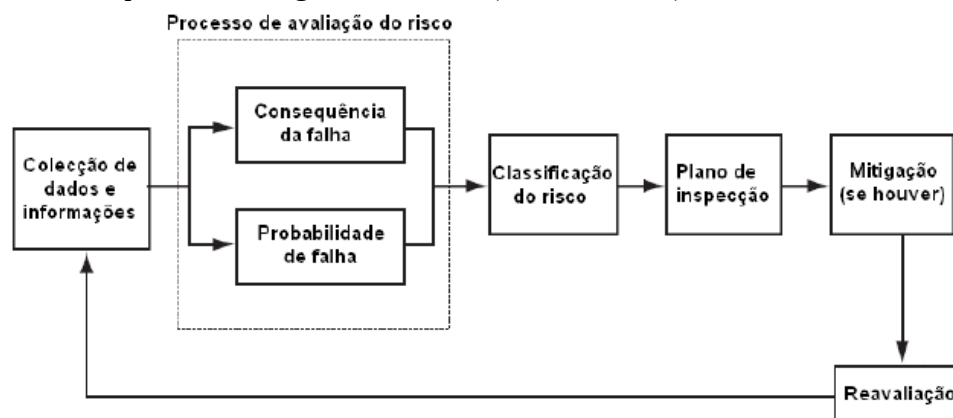


Figura 8 – Esquema de funcionamento do RBI (American Petroil Institute, 2002)

Embora as acções recomendadas pelo RBI sejam demasiado conservativas, como metodologia de análise de risco, o RBI revela-se evoluído e essencial, devido à determinação dos dois parâmetros usados no processo de avaliação do risco – probabilidade e consequência de falha. A importância da análise do risco justifica-se pela elevada pressão existente, e com tendência a aumentar cada vez mais, para redução de custos, assim como pela legislação ambiental cada vez mais rígida.

Todos os parâmetros e funcionamento do RBI estão descritos no anexo E.

3.3.1 Benefícios e limitações da metodologia RBI

O resultado da utilização do RBI é um programa de inspecção estruturado com datas e planos de inspecção e ensaios, que apresenta diversas vantagens, entre outras, o aumento da fiabilidade dos equipamentos e neste caso concreto das tubagens, assim como a possível redução dos custos operacionais (Otero e Turrubiartes 2003).

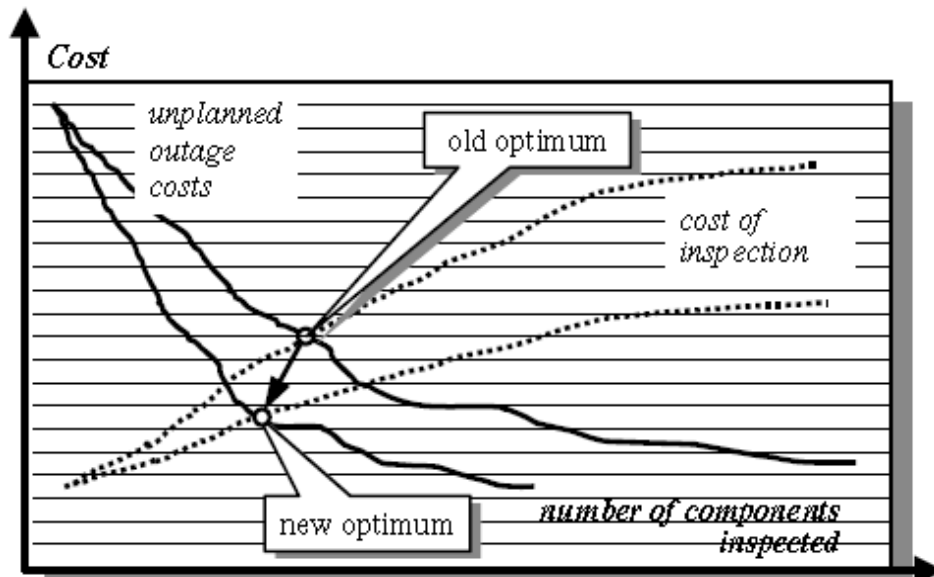


Gráfico 4 - Diferenças entre planos de inspecção com e sem RBI (Jovanovic 2003)

A análise do Gráfico 4 demonstra que a introdução do RBI leva a um novo “ponto ótimo” no planeamento de inspecções e acções de manutenção de uma unidade, através da redução da necessidade de inspecções e aumento da disponibilidade/fiabilidade através da redução das paragens não planeadas (Jovanovic, 2003).

O RBI apresenta-se então como uma boa ferramenta de análise do risco, em comparação com os melhores métodos existentes, tais como a distribuição Weibull⁸. Esta distribuição estatística permite prever a degradação de sistemas, o que no caso das tubagens tem em conta um parâmetro monitorizável, neste caso a medição de espessura. Ou seja, a análise Weibull é usada com a informação dos TML’s recolhidos para determinar intervalos de inspecção e classificar riscos para quando se excede a espessura mínima permitida (Barringer).

A adopção de uma frequência anual rígida das medições, para além de representar elevados custos (que envolvem o custo horário de mão de obra dos inspectores e montagem de acessos, que pode ser muito aumentado caso os TML’s se situem em localizações remotas, tais como em linhas com cotas elevadas), não é viável devido à grande quantidade de tubagens existentes na refinaria. Portanto, embora esta já seja uma

⁸ A distribuição Weibull foi concebida por Waloddi Weibull em 1937, apresentando-se como uma ferramenta de escolha de fiabilidade para engenheiros em todo o Mundo. A introdução de *user-friendly software* expandiu a utilização da Weibull para fora das organizações de pesquisa, tornando-a uma ferramenta essencial usada por várias organizações. (Barringer)

opção melhor do que as tabelas usadas em manutenção preventiva para determinação dos intervalos de inspecção, há sempre a possibilidade de melhorar com o aumento dos parâmetros incluídos na previsão da degradação futura das tubagens, daí a opção pelo RBI.

No entanto, o RBI apresenta algumas limitações, pois como os sistemas estão sempre a mudar com o tempo, qualquer estudo de risco só pode reflectir o estado da linha de forma extremamente precisa na altura em que os dados são recolhidos (sendo esta a vantagem da manutenção condicionada quando comparada com a preditiva, isto porque embora a aplicação da manutenção condicionada seja economicamente mais dispendiosa, é mais completa a nível de definição da taxa de corrosão, por exemplo).

3.3.2 Melhorias Possíveis da estratégia actual

Koppen (1998) afirma que na maioria das instalações/unidades, apenas 20% dos componentes contribuem para cerca de 80% do risco total (também conhecida por lei de Pareto), tal como se verifica na Figura 9.

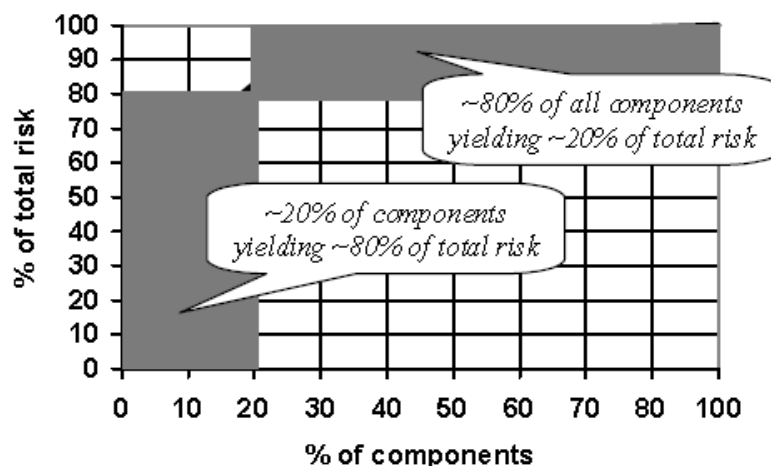


Figura 9 - Contribuição típica dos equipamentos para o risco de uma unidade/installação (Koppen 1998)

As empresas não conseguem suportar os custos associados a demasiada ou reduzida fiabilidade, tendo esta de estar harmonizada com as questões económicas, através da definição dos itens prioritários pela análise de *Pareto* (Barringer).

O objectivo de uma boa estratégia de manutenção será pois conseguir classificar as linhas para que apenas 20% dos equipamentos representem 80% do risco da unidade. Ou seja, normalmente é suficiente concentrar as acções nos 10% a 20% dos componentes críticos para que seja possível eliminar a maior parte do risco, de modo a ser possível atingir dois objectivos à partida incompatíveis:

- A redução de custos, pois visto as inspecções se concentrarem em apenas 20% dos componentes os custos dos restantes 80% são reduzidos;

- O aumento da fiabilidade, segurança e disponibilidade, devido à concentração de esforços de inspecção nos 20% de componentes críticos que, consequentemente, faz baixar a probabilidade de falha.

Uma análise aos dados do RBI, mostrou que em todas esta percentagem está longe da recomendada, situando-se sempre nos 40% de equipamentos a representar apenas 50% do risco, tal como demonstra o Gráfico 5.

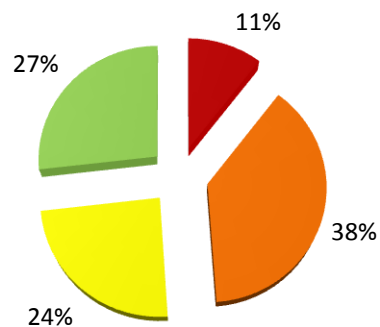


Gráfico 5 – Análise de risco RBI efectuada para a data futura

Considerou-se, para efeito deste estudo, que o risco seria representado por duas das 4 categorias de risco definidas pelo RBI, nomeadamente pelas categorias de risco elevado e médio-alto, representadas com a cor vermelha e castanha no gráfico 5, pois segundo a matriz de gestão do risco da refinaria, apenas estas categorias de risco têm trabalhos justificados de forma a diminuir o risco calculado. A Tabela com dados que deram origem a este gráfico encontra-se no anexo E.

Para além da análise RBI não cumprir com os requisitos a nível de percentagens de Pareto, torna-se necessário melhorar esta análise de risco efectuada pelo RBI, pois a análise do risco revela-se incompleta ao nível dos parâmetros considerados, considerando apenas a probabilidade e a consequência material de falha na linha. Actualmente, torna-se essencial ter em conta os factores económicos quando se define a estratégia de manutenção e/ou inspecção, assim como se deve considerar a importância da linha para a unidade – linhas que ao falharem parem o funcionamento da unidade terão de ter prioridade em relação às restantes linhas. Este facto é reconhecido pela refinaria que tem, no entanto, dificuldade em associar a cada componente registado no RBI um custo económico associado à sua falha.

De modo a demonstrar a importância deste parâmetro, considere-se uma linha classificada pelo RBI como 3C. Seguindo os princípios do RBI, esta linha tem uma classificação média de ambos os parâmetros, não sendo considerada crítica, pois apresenta uma classificação inferior a 3E. No entanto, caso esta fosse considerada como sendo de risco elevado pelo parâmetro de importância da linha, a hipótese de não efectuar qualquer manutenção e apenas efectuar operações na linha quando esta falhasse não seria viável, pois a falha da linha implicaria a paragem da unidade, situação que representa sempre elevados custos.

Um caso oposto seria uma linha classificada como 5 A, que teria então grande probabilidade de falhar mas com baixo nível de consequência. Caso esta linha tivesse nível de importância I, dever-se-ia ponderar seriamente se compensava economicamente efectuar manutenção e acções de inspecção na linha ou deixá-la falhar, pois caso se optasse pela última opção, a consequência como os custos relacionados com a perda de funcionalidade da linha seriam baixos.

Daí a necessidade de um novo modo de definição da criticidade das linhas, apontada no ponto 4.2. desta dissertação. Uma vez definido o nível de criticidade de uma linha e/ou grupo de linhas, será possível, através da atribuição de um número de criticidade mais elevado às linhas mais críticas, avaliar quais as melhores acções a implementar, quer de inspecção, quer de manutenção.

No entanto, é preciso referir que decisão final quanto às opções a tomar terão de ser sempre baseadas na intuição e na experiência pessoal do pessoal encarregue (Higgins 2006). O RBI, assim como as restantes metodologias desenvolvidas, servem apenas para auxiliar a tomada de decisão.

4 Nova metodologia para a estratégia de manutenção

Como é impossível produzir um sistema que nunca falhe, têm de se considerar medidas para manter os custos de manutenção no mínimo, mas que assegurem a disponibilidade, segurança e integridade do sistema (Kumar, Crocker, Knezevic, & El-Haram, 2000). Existem diversos factores que afectam os custos de manutenção de um sistema. Enquanto que a concepção original será um factor determinante nestes custos, os operadores e responsáveis pela manutenção do sistema podem fazer muito para minimizar o custo através da adopção da política mais adequada de manutenção, tendo em conta as condições existentes (Kumar, Crocker, Knezevic, & El-Haram, 2000).

A gestão da análise das falhas tem uma importância estratégica numa refinaria, quer do ponto de vista organizacional, de engenharia, assim como económico. A opção por uma metodologia que permita uma abordagem metódica e o mais automatizada possível para a gestão das falhas, pode traduzir-se em melhorias significativas na organização do trabalho e nos processos de tomada de decisão (Bertolini M. , Bevilacqua, Ciarapica, & Giacchetta, 2009).

Cada equipamento, de acordo com a sua taxa de falha, custo e impacto de falha no sistema, tem de ser estudado de modo a determinar a melhor solução – se é melhor deixá-lo falhar ou prevenir a ocorrência da falha (Bevilacqua & Braglia, 2000). Isto porque um bom programa de manutenção tem de definir diferentes estratégias para diferentes sistemas, neste caso linhas. Pois algumas afectam directamente o funcionamento normal das instalações/unidades, enquanto outras podem estar relacionadas com questões importantes de segurança ou então podem envolver elevados custos de manutenção (Bevilacqua & Braglia, 2000).

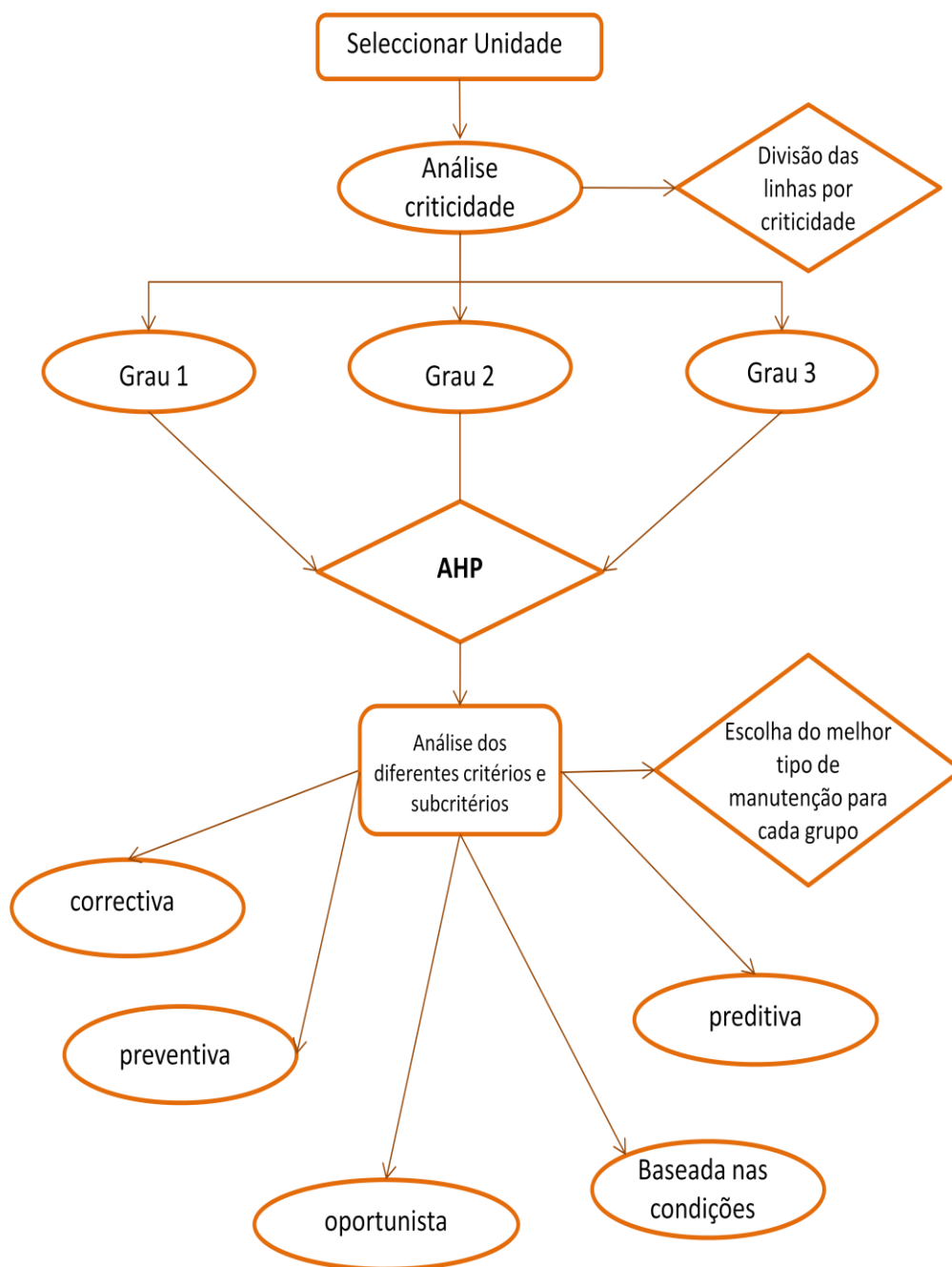
Uma boa estratégia e gestão do risco das tubagens revela-se pois essencial na gestão da fiabilidade e desempenho da refinaria, nomeadamente ao nível da segurança, eficiência e produtividade. Para atingir estes objectivos, é necessário encontrar o equilíbrio entre sobre e sub inspeccionar, sabendo que a primeira hipótese acarreta demasiado custos desnecessários, enquanto que a falta de inspecção resulta em riscos elevados, e possíveis custos ainda mais elevados do que os do primeiro caso. O mesmo acontece ao nível da manutenção.

4.1 Justificação para o estudo feito

Um bom plano de manutenção não tem em conta apenas os procedimentos *standard* e recomendados de inspecção das tubagens. Nos dias de hoje, torna-se essencial efectuar uma análise da parte económica da manutenção dos componentes, pois cada vez mais existe pressão para reduzir custos. As margens de lucro das empresas são actualmente muito baixas em muitos sectores da actividade (Andrade 1998). Assim, compreende-se facilmente o interesse numa organização racional e económica da Manutenção.

Também a definição de linhas prioritárias como resultado da análise de risco tem de ser melhorada, tal como foi referido no ponto 3.3.2.. Um método alternativo de definição da criticidade das linhas, nomeadamente através do cálculo do índice de criticidade destas, será utilizado, adaptando a metodologia proposta por Bevilacqua & Braglia.

O esquema 2 indica então o procedimento proposto para analisar as tubagens da refinaria de Matosinhos.



Esquema 2 – Representação esquemática da metodologia proposta para analisar as tubagens da refinaria

Tal como se verifica no esquema 2, após a divisão das linhas consoante o nível de criticidade, alocando-as a um dos 3 diferentes grupos possíveis, é feita uma análise para determinar qual o melhor tipo de manutenção a adoptar.

A escolha e justificação da estratégia de manutenção é uma tarefa crítica e complexa devido ao grande número de atributos a serem considerados, muitos dos quais são

intangíveis (Bevilacqua e Braglia 2000). Cada componente deve ser analisado de acordo com a sua taxa de falha, custo e impacto no sistema em caso de falha, de modo a decidir qual a melhor solução: ou seja, se é melhor esperar que falhe ou se deve ser evitada esta situação. Neste último caso, a área da manutenção deve avaliar se é melhor optar por inspecções periódicas ou pelo uso de um sistema de monitorização das condições operacionais (Bevilacqua e Braglia 2000).

4.2 Índice de criticidade

Tal como já havia sido referido em 3.3.2. (Melhorias da estratégia actual), existe a necessidade de criar uma escala mais adequada e completa para definir prioridades de acção nas linhas da unidade em estudo. Isto porque quando se quer determinar a melhor alternativa de alocação de recursos, é necessário definir prioridades (Saaty, 2008). No caso em estudo, o objectivo é definir a estratégia de manutenção mais adequada para cada linha, daí a opção por uma avaliação individual da criticidade. Tradicionalmente, esta avaliação é feita através de (Braglia, 2000):

- Cálculo de um índice de criticidade (CN), em que através da determinação do efeito de falha, modo de falha, taxa de falha e tempo operacional, é possível calcular um valor de CN para cada item, através da multiplicação dos 4 parâmetros;

- Determinação do número de risco prioritário (RPN), no qual é atribuído um valor de uma escala de 1 a 10 a cada um dos 3 seguintes parâmetros: tipo de modo de falha, severidade das suas consequências e probabilidade da falha não ser detectável. Existem depois Tabelas para “converter” o resultado do produto destes 3 parâmetros, numa escala em que cada intervalo de valores do RPN corresponde a certas características. A metodologia do cálculo do *Risk priority number* (RPN) é usada num dos passos da análise FMECA.

O número de criticidade é mais usado nas indústrias nucleares, aeroespaciais e químicas, enquanto o RPN é adoptado preferencialmente pelas indústrias transformadoras tais como empresas de automação (Ford, 1988) e empresas de pneus (Pirelli, 1988) (Braglia, 2000). Justifica-se então a adopção do número de criticidade para a análise das linhas da refinaria de Matosinhos, até porque o parâmetro “probabilidade da falha não ser detectável” não é muito adequado ao caso em estudo.

De modo a tornar o cálculo do número de criticidade mais adaptado à realidade da refinaria de Matosinhos, foram considerados parâmetros mais específicos do que os referidos anteriormente para a definição do número de criticidade. Após a análise de modelização feita para a refinaria de *Falconara Marittima* por (Bevilacqua & Braglia, 2000), foram considerados os seguintes parâmetros:

- a) Segurança: segurança do pessoal, equipamento, construções e meio ambiente no caso de uma falha;
- b) Redundância da linha para o processo: importância da linha para o correcto funcionamento da unidade. Por exemplo, se existir uma outra linha que possa substituir a linha em análise caso esta falhe, o valor deste parâmetro não seria tão elevado;

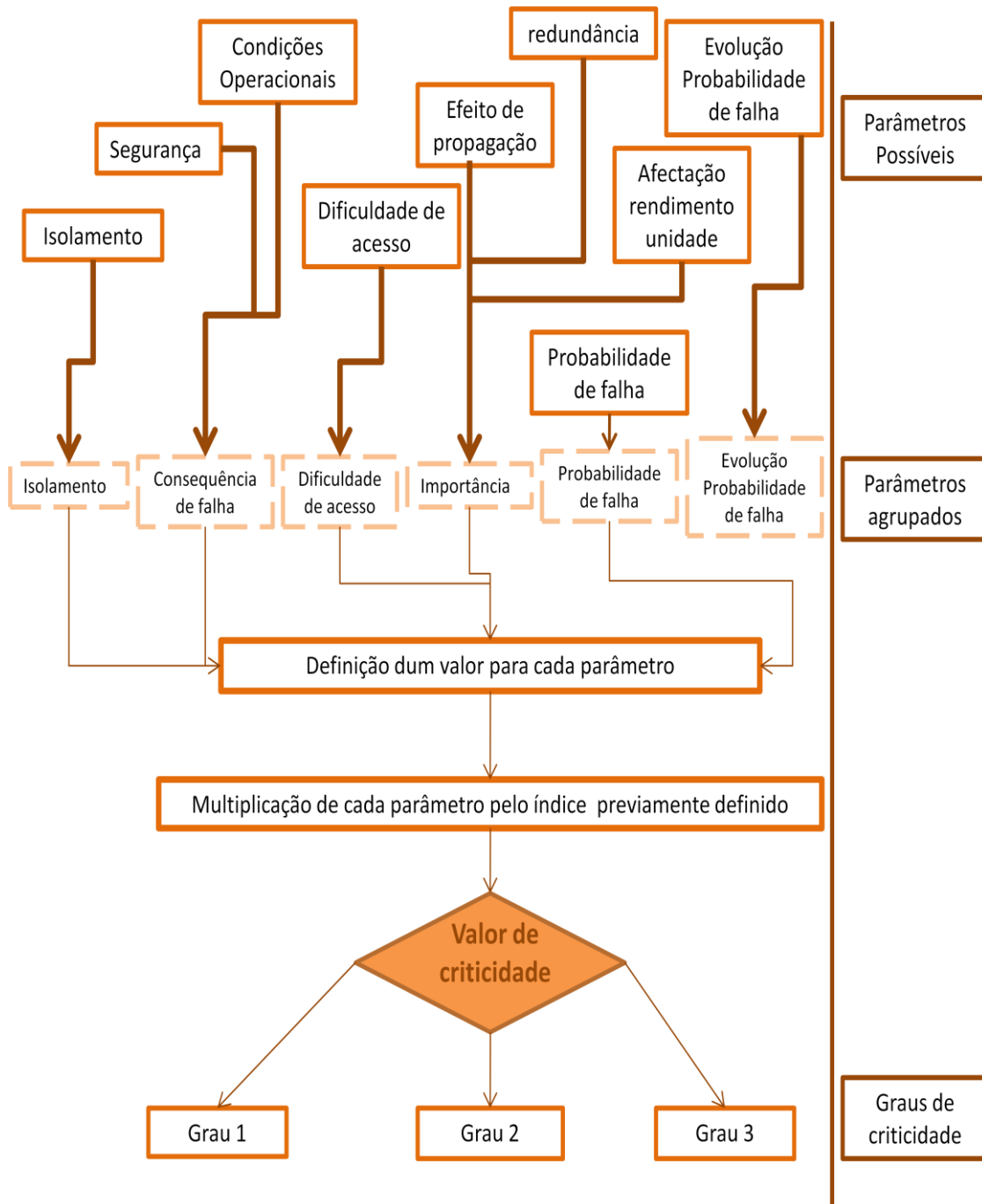
- c) Dificuldade de acesso: as intervenções de manutenção e inspecção são tão mais complicadas e dispendiosas quanto mais elevada em altura estiver situada a linha em estudo;
- d) Probabilidade de falha: através da análise das características do equipamento, é possível prever a sua probabilidade de falha;
- e) Condições operacionais: análise de potenciais condições operacionais que propiciem a probabilidade de degradação ou falha da linha, tais como temperaturas elevadas e fluidos corrosivos;
- f) Efeito de propagação: este efeito tem em conta possíveis consequências da falha da linha no equipamento adjacente, quer no da unidade em que está inserida mas também no equipamento de outras unidades - *efeito dominó*;
- g) Afectação do funcionamento da unidade: quanto mais importante for a linha para o processo, maior será a afectação do funcionamento da unidade no caso da falha da linha;
- h) Isolamento: se a linha for isolada, haverá uma maior propensão à ocorrência de fenómenos de corrosão, como por exemplo CUI, que contribuem para a degradação da linha. Para além disso, os custos de inspecção serão mais elevados, pois será necessário remover parte do isolamento (normalmente em zonas críticas pré definidas) para que seja possível fazer uma inspecção adequada;
- i) Evolução da probabilidade de falha: se a degradação da linha tiver um crescimento acentuado nos últimos anos, este efeito tem de ser considerado.

Para restringir a complexidade da análise a ser efectuada, o número de parâmetros relevantes é reduzido através da junção dos parâmetros semelhantes em grupos e da eliminação dos menos relevantes para este processo de análise. Isto porque com um elevado número de parâmetros a análise exigirá um elevado esforço em termos de necessidades de informação, o que pode aumentar o risco de estimativas incorrectas (Bevilacqua e Braglia 2000)

Existirão, então, 6 grandes grupos de parâmetros considerados na definição de criticidade da linha. O primeiro, consequência de falha, agrupará os parâmetros “segurança” e “condições operacionais”, e será obtido através da análise efectuada pelo software RBI, que já foi exposto anteriormente. A probabilidade de falha também será um *output* deste mesmo *software*, enquanto que a importância da linha agrupará os parâmetros “redundância da linha”, “efeito de propagação” e “afectação do funcionamento da unidade”. Estes parâmetros podem ser todos reunidos num só, pois cada um deles tem influência nos outros dois. Ou seja, por exemplo, para definir a afectação do funcionamento da unidade, é preciso ter em conta se existem outras linhas que possam substituir a linha em análise caso esta falhe, e como é que a unidade será afectada pela falha. Ou seja, se não houver uma linha que a possa substituir e se a linha se revelar de extrema importância para o funcionamento da unidade (como no caso de linhas às unidades), a importância da linha será muito elevada. Já a “dificuldade de acesso” será definida dependendo da média de alturas a que se encontra posicionada a linha, através da análise das isométricas desta. Para o parâmetro “isolamento”, apenas

existirão duas possibilidades para o definir: sim ou não, caso a linha seja ou não isolada. O parâmetro “evolução do risco” será então o último factor a ter em conta no cálculo do índice de criticidade.

Uma representação da metodologia proposta para o cálculo do índice de criticidade encontra-se representada no esquema 3.



Esquema 3 – Metodologia para o cálculo do índice de criticidade

4.2.1 Parâmetros incluídos no índice de criticidade

Uma classificação racional dos 6 factores foi definida baseada em tabelas, sendo que cada parâmetro está definido por níveis. Todas as tabelas que definem a

correspondência entre os valores definidos para cada parâmetro e o valor a utilizar no cálculo do número de criticidade encontram-se no anexo G.

- Probabilidade de falha (PF)

Inicialmente, foi posta a possibilidade de determinação da probabilidade de falha através da análise Weibull, já referida no ponto 3.3.1. da dissertação. No entanto, a dificuldade em definir os parâmetros tornou necessário a definição de métodos alternativos de cálculo da probabilidade de falha.

Foi então considerada a realização de uma análise PHA (*Preliminary hazard analysis*), através do diagrama que se encontra no anexo F. Este tipo de análise é realizado para identificar potenciais perigos e eventos que possam originar acidentes, assim como para classificar potenciais eventos de acordo com a sua severidade (Rausand, 2004).

Tipicamente, as avaliações de risco PHA focam a concepção da unidade de processo, práticas operacionais e a sua adequação, antecipando as condições de funcionamento (Correia, 2008). O RBI completa a análise PHA, incidindo sobre a integridade mecânica relacionada com a deterioração dos mecanismos e gestão do risco através da inspecção (American Petroil Institute, 2002). Ou seja, o RBI tira partido da análise dos dados feita para obter a avaliação do risco, enquanto a PHA apenas analisa *à priori* os potenciais riscos.

Daí a escolha do RBI para a definição destes parâmetros, até porque este software é usado actualmente na refinaria, nomeadamente na área da Inspecção Estática. Embora o RBI possa ser utilizado como uma ferramenta para uma possível definição total da estratégia de manutenção, no modelo proposto apenas irão ser considerados os *outputs* definidos pelo software para definição de dois dos parâmetros definidos para a análise da criticidade da linha, tal como foi referido previamente.

A metodologia RBI determina a probabilidade de falha da tubagem, (PdF), ou seja, a probabilidade desta libertar fluido para o exterior, usando uma escala de 1 a 5, sendo 5 o grau de probabilidade mais elevado. O nível de PdF é calculado através de diversos factores, presentes no anexo E, entre eles os possíveis mecanismos de degradação da tubagem, a eficácia de inspecções anteriores, condições actuais do equipamento, assim como a natureza do fluido e o design do equipamento.

A Tabela 12, que se encontra no anexo G, representa a correspondência entre o valor definido pelo RBI e o valor que irá ser utilizado no cálculo do nº de criticidade.

- Consequência de falha (CF)

O RBI determina ainda a consequência da falha (CdF) caso esta venha a ocorrer. A quantificação do risco de consequência de falha estrutural desenvolve-se a partir da modelização de cenários de fuga num qualquer evento, com origem na falha de um equipamento (Coelho 2002).

Para calcular a consequência de vazamento de fluido, são tidas em conta diversas categorias de consequências, entre elas: impacto ambiental, impacto humano, danos causados por incêndio/explosão e custos de manutenção e reconstrução, estando estas descritas em pormenor no anexo G (Tabelas 13, 14, 15) (Otero & Turrubiartes, 2003). O grau de consequência definido pelo RBI será a conjugação de todas estas categorias de

consequência, fazendo o RBI a correspondência entre as características da linha em estudo e um grau para cada tipo de categoria de consequência. Por exemplo, a consequência de uma fuga pode provocar danos de nível 5, ambientais e na saúde dos funcionários, não tendo necessariamente de danificar componentes da unidade na qual a linha está inserida, sendo por exemplo classificada com o nível 1 nesta categoria. Segundo o API 581, o grau de consequência final é calculado através de uma média pesada das probabilidades das categorias das consequências individuais. A Tabela 16 no anexo G demonstra a correspondência entre o grau de consequência de falha definido pelo RBI e o valor a utilizar no cálculo do número de criticidade.

- Importância da linha (IL)

Tal como se demonstra no esquema 3, a importância da linha agrupará os parâmetros “importância da linha”, “efeito de propagação” e “afecção do funcionamento da unidade”. As linhas da unidade em estudo serão divididas em 3 possíveis classificações de importância da linha – elevada, média ou baixa – dependendo das suas características. Para isso, as linhas foram classificadas por diversos parâmetros, entre eles o circuito em que as linhas estão inseridas, o previsível tamanho da fuga caso a linha falhe e o grau de afecção do rendimento da unidade caso a linha falhe (isto porque ao falhar uma linha não tem necessariamente de parar a unidade, podendo apenas afectar o seu rendimento). O método proposto para a classificação da importância das linhas da unidade 3000 encontra-se no anexo H, sendo que a correspondência entre a descrição da importância da linha e o grau de importância desta também se encontra no anexo G (Tabela 17).

No ponto 5.1. encontra-se a aplicação deste método de cálculo a algumas linhas da unidade 3000. A definição do modo como o circuito afecta o rendimento e funcionamento da unidade foi feita com a ajuda do pessoal da FCO, e também se encontra explicada no anexo H.

De referir que mesmo que uma linha seja classificada com um grau baixo de importância, é preciso não esquecer que se a linha existe, é porque é necessária para algum processo, tendo uma função específica atribuída. Consequentemente, salvo raras excepções, uma linha nunca pode estar muito tempo fora de funcionamento, sob o risco de, por exemplo, afectar a eficiência dos processos da unidade. Daí que na definição das correspondências na Tabela 17 entre o grau de importância da linha e o respectivo factor a ser usado no cálculo do número de criticidade, não exista o valor 1 (mais baixo) na escala.

- Dificuldade de acesso (DA)

O índice de criticidade também terá de ter em conta a cota a que se encontra a linha, pois quanto mais elevada for, maior dificuldade de acesso existirá, e consequentemente mais tempo dispendido pelos inspectores para realizar a inspecção e custos mais elevados existirão. A Tabela 18 do anexo G representa as correspondências deste parâmetro.

Embora à primeira vista este parâmetro não pareça muito significativo, este pode revelar-se muito significativo a nível económico, superando mesmo os custos de

operações metalomecânicas. Exemplo disto mesmo encontra-se na Tabela 23 no anexo I.

- Isolamento (IS)

A existência ou não de isolamento é um parâmetro muito importante a considerar, pois caso exista, a probabilidade de CUI aumenta de uma forma elevada. Para além disso, a existência de isolamento resulta num aumento de custos de inspecção, entre outros, devido à necessidade de por exemplo ter de retirar isolamento para inspecionar a linha de forma adequada. A Tabela 19 do anexo G define então a relação entre a existência ou não de isolamento com o valor a ser utilizado no cálculo do número de criticidade.

- Evolução do risco (ER)

Na figura 10, que representa o output do RBI para uma linha, verifica-se que a probabilidade de falha passa do nível mínimo para o máximo em apenas 10 anos (nível 1 em 2010 para nível 5 em 2020) caso não seja efectuada nenhuma acção de inspecção e/ou manutenção. Esta elevada evolução do risco, nomeadamente através do aumento da probabilidade de falha, tem de ser considerada aquando da decisão do tipo de medidas, primeiro de inspecção e depois de manutenção a adoptar, pois não é viável, por exemplo, estar a beneficiar grande parte da linha para passados alguns anos ter de substituir tudo devido ao mau estado extremo desta, devido à rápida evolução dos danos.

Component		RBI Date 2010-10-16		Target Date No Inspection			Plan Date No Insp	Plan Date w/ Insp		
							2020-06-15			
L-P-33403-1-1.5inch S31	De D-3308 para 1 5 -P-33404	1C	MEDIUM	2014-09-28	3C	MEDIUM	5C	MED-HIGH	5C	MED-HIGH

Figura 10 - Exemplo do RBI da linha L-P-33403-1-1.5inch S31

A Tabela 20 do anexo G representa a divisão da classificação das linhas consoante o aumento do grau de probabilidade de falha definido pelo RBI.

4.2.2 Definição dos pesos dos parâmetros

Dos parâmetros previamente referidos, alguns revelam-se com maior importância para a definição da criticidade da linha do que outros. Daí a necessidade de definir diferentes pesos consoante a importância dos parâmetros.

Adaptando a classificação proposta por (Bevilacqua & Bragliab, 2000), e tendo em conta os dados e a experiência obtida no terreno, definiram-se pesos para cada parâmetro, tal como se demonstra na Tabela 4.

Tabela 4 – Peso dos parâmetros significantes para a análise da criticidade da linha

Parâmetro	Peso
Consequência de falha (CF)	3
Importância da falha (IF)	3
Probabilidade de falha (PF)	2

Dificuldade de acesso (DA)	1.5
Isolamento (IS)	1.5
Evolução do Risco	1

A atribuição dos pesos mais elevados aos parâmetros de consequência de falha e importância de falha justifica-se pois são os mais importantes na análise da criticidade da linha. O primeiro define as consequências a nível ambiental e de segurança, por exemplo, enquanto a importância de falha fará correspondência entre as consequências de uma falha na linha e as consequências económicas resultantes em custos de downtime, directos e indirectos.

Já a probabilidade de falha também terá um peso elevado pois este parâmetro conjugado com um grau de consequência de falha elevado resultará num grande risco para a linha em estudo.

A criticidade da falha para cada linha será então calculada pela equação 3, tendo em conta o valor definido para cada um dos 6 parâmetros.

$$N_{\text{criticidade}} = (CF * 3) + (IF * 3) + (PF * 2) + (DA * 1.5) + (IS * 1.5) + (ER * 1)$$

Equação 3 – Cálculo do número de criticidade da uma linha

Após se obter o resultado desta análise, é possível dividir as linhas em 3 grupos diferentes, dependendo da sua criticidade (Tabela 5). O nível máximo de criticidade será 60, situação na qual todos os parâmetros são definidos pelo nível 5 (mais importante/elevado).

Tabela 5 – Classificação dos três graus do índice de criticidade

Índice de criticidade	Grau	Classificação
> 35	I	Elevado
20- 34	II	Médio
< 19	III	Baixo

Uma falha numa linha pertencente ao grupo I resultará, em princípio, em consequências sérias em termos de segurança dos trabalhadores e da refinaria e em danos ambientais, perdas de produção, entre outros. Um bom plano de manutenção resultará em valor acrescentado para a empresa.

Já as consequências de uma falha de uma linha do grupo 2 serão sérias, embora não comparáveis a uma falha de uma linha do grupo I. Uma redução dos custos pode ser obtida com uma eficaz, mas dispendiosa, manutenção, que só será justificável se o esforço económico compensar a melhoria obtida.

No grupo 3 as falhas não são relevantes, pois não representam riscos para o funcionamento da unidade ou apresentam baixa consequência de falha, não sendo necessário optar por uma política de manutenção dispendiosa ao nível dos recursos utilizados, quer tangíveis quer intangíveis.

As 3 categorias de criticidade da linha podem então corresponder a 3 categorias de risco de acordo com um princípio geralmente adoptado de aceitação de risco, neste caso o ALARP. Muito usado no Reino Unido, o denominado princípio de “o mais baixo risco quanto razoavelmente praticável”, define 3 regiões de risco e as medidas a implementar em cada uma delas, (NP EN 50126, 2000) , tal como demonstra a Figura 11. As linhas de grau 1 correspondem então à zona vermelha da figura 11.

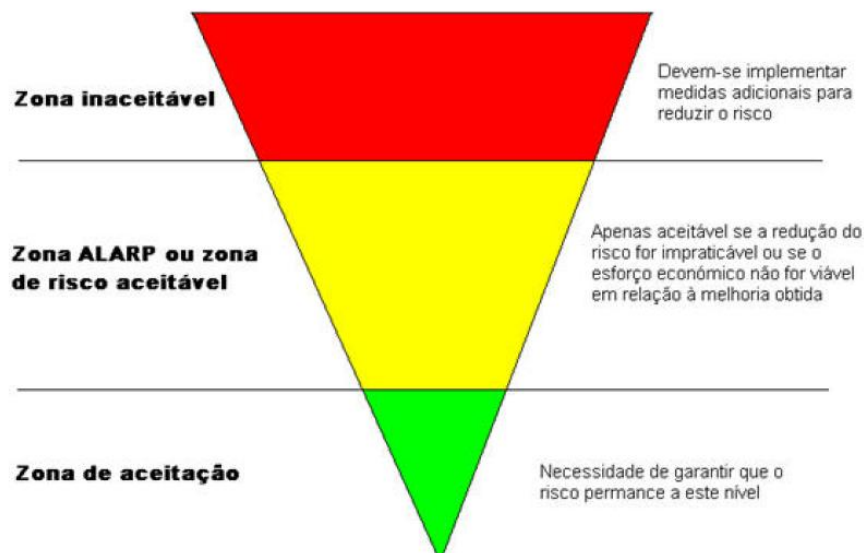


Figura 11 – Classificação ALARP para zonas de risco

4.3 Implementação da AHP

Após a divisão das linhas consoante o seu grau de criticidade, torna-se necessário definir qual o tipo de manutenção mais adequado a cada um dos 3 grupos de criticidade definidos. Será então necessário implementar a metodologia AHP para cada um dos 3 graus de risco, através da elaboração de matrizes *pairwise* de comparação da importância dos diferentes critérios e subcritérios, como já foi previamente exposto no ponto 2.3.2..

Uma das vantagens deste método, tal como já foi previamente referido, é permitir julgar a importância de critérios subjectivos, ou seja, critérios cujo valor seja difícil de calcular ou quantificar.

Numa primeira fase desta dissertação, tentou-se definir uma metodologia para relacionar todos os custos envolvidos na manutenção de tubagens, de modo a obter um modelo que tendo em conta as características da linha e a parte económica, permitisse definir qual a melhor opção a nível de intervenções/inspecções na linha. No entanto, esta tarefa revelou-se muito subjectiva, e embora para alguns parâmetros tivesse sido possível modelizar um método de cálculo do seu comportamento económico, tais como custos de *indisponibilidade* ou ambientais (consultar anexo J), havia parâmetros, como por exemplo, os custos de danos de equipamento ou danos humanos, em que o seu cálculo se revelava de extrema dificuldade devido à falta de dados e informação.

Assim se justifica a opção pelo AHP, pois os critérios e os subcritérios vão ser comparados e classificados após a pesquisa junto dos colaboradores da refinaria, que

permitiu concluir não só sobre a sua importância quando comparados com outros critérios, mas também como estes são influenciados pelo grau de criticidade. Poder-se-ia ter optado pela entrega de questionários aos colaboradores da refinaria, para que estes pudessem individualmente avaliar e comparar os critérios em estudo. No entanto como o esquema hierárquico da metodologia em análise é extenso (tal como demonstra o esquema 3) e complicado de explicar na sua totalidade, decidiu-se fazer pesquisa no terreno, através do contacto directo com o pessoal de diferentes áreas da refinaria para depois então tirar conclusões, de modo a aplicar a informação obtida na construção das matrizes de comparação. Para além disso, todo este processo da metodologia tem de ser aplicado a cada um dos 3 graus de criticidade, o que tornaria o processo ainda mais moroso caso se optasse pela opção dos questionários.

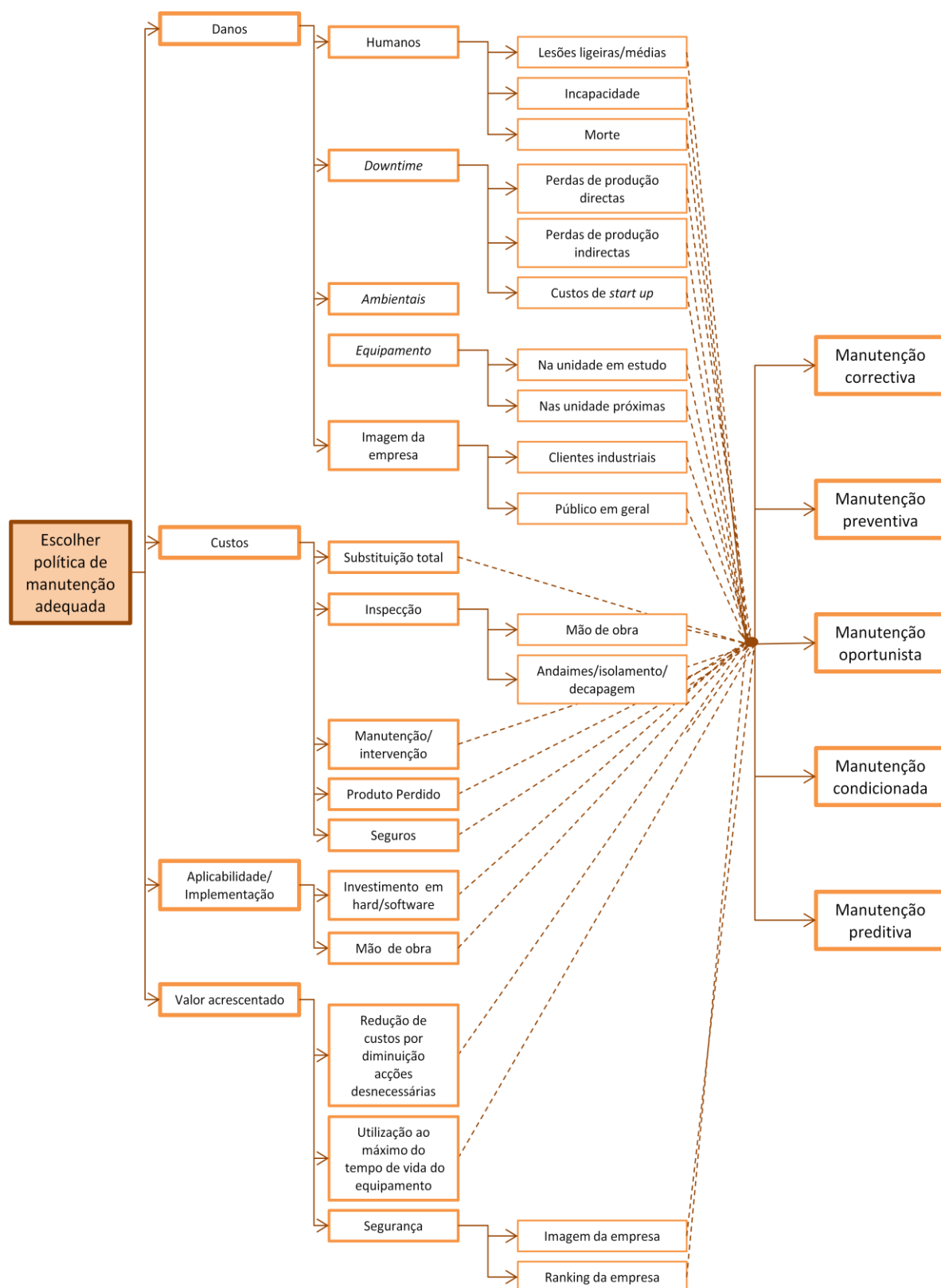
4.3.1 Graus da hierarquia

É necessário estruturar a hierarquia da decisão desde o topo, com o objectivo final, até às diferentes alternativas para este mesmo objectivo final – através da definição de critérios e subcritérios, que representam os graus da hierarquia. Estes critérios e subcritérios apresentados podem ser objectivos e subjectivos, quando não se podem calcular de uma forma directa. O esquema de hierarquização adoptado encontra-se representado pelo esquema 4, sendo este constituído por 5 níveis.

O primeiro nível da hierarquia define o objectivo final da decisão que se pretende obter através da implementação da AHP. No caso em estudo, esta decisão passa pela escolha da melhor política de manutenção para cada grupo de linhas pré definido pelo cálculo do número de criticidade. Já no nível 2 estão representados os subcritérios que se julgam de maior importância para a definição da política de manutenção mais adequada, sendo estes:

1. Danos;
2. Custos;
3. Aplicabilidade;
4. Valor acrescentado.

Modelização do processo de decisão para manutenção de tubagens industriais numa refinaria



Esquema 4 – esquema de hierarquia AHP adoptado

O nível 3 apresentará então os subcritérios dos critérios do nível 2, sendo que o mesmo acontece com os subcritérios do nível 4 relativamente ao 3. As alternativas, nomeadamente as diferentes políticas de manutenção, já se encontram descritas no estado de arte – ponto 2.1.. Os 4 critérios principais – do nível 2 – serão explicados de seguida.

1.Danos

Os danos provocados por uma falha na linha vão ser directamente proporcionais ao aumento do número de criticidade da linha. Estes podem ser divididos em várias categorias, neste caso, subcritérios (de nível 3).

Danos humanos

Incluem uma gama de possíveis consequências na saúde dos trabalhadores da refinaria, que podem ir desde um grau mais baixo, com lesões ligeiras/médias, até ao grau mais elevado possível de consequência, neste caso a perda da vida humana. Quanto mais elevado for o grau de criticidade, à partida maiores serão estes danos. A opção pela manutenção correctiva também irá propiciar o aumento da importância destes danos, pois ao deixar que o equipamento falhe sozinho, irão ocorrer consequências, que se podem traduzir em danos ligeiros ou graves.

Danos devido à indisponibilidade (*downtime*)

Os danos ao nível da produção, na ocorrência de uma falha da linha, traduzem-se em custos da interrupção da produção, ou seja, o custo por não se produzir durante o tempo requerido para que a unidade volte à sua produção normal desde do momento que a linha falha (*downtime*). A Tabela 6 representa a produção diária da unidade.

Tabela 6 - Capacidade de produção diária da U3000

Produção	LPG	236 ton./dia
	Gasolina Leve	425 ton./dia
	Gasolina Pesada	1404 ton./dia
	Petróleo	806 ton./dia
	Gasóleo	2015 ton./dia
	Resíduo	4716 ton./dia

Estes custos serão então maiores quanto maior for a importância para a linha, e consequentemente quanto maior for o número de criticidade. No caso da unidade em estudo, a 3000, os produtos produzidos por esta unidade são utilizados no funcionamento de outras unidades, daí que também existam custos de perda de produção indirectas, que também serão mais elevados quanto mais elevado for o índice de criticidade. Apresentam-se então algumas utilizações da produção da U3000:

- Efluente de LPG, obtido no acumulador de topo D-3005, e enviado como alimentação parcial à unidade de recuperação de gases U3600;
- Efluente líquido de gasolina leve, saído do fundo da coluna de estabilização T3005 e enviado como carga de alimentação à Unidade 3400 (Merox), ou para a armazenagem intermédia;
- Efluente líquido de gasolina pesada, proveniente do fundo da Coluna de fraccionamento de gasolina T3004, encaminhado como carga da alimentação para a Unidade 1200 (*Unifining*) ou para armazenagem intermédia;

- Efluente líquido de petróleo obtido no rectificador de petróleo T3002 e bombeado para a alimentação da unidade de tratamento de petróleo - U3100 ou para a armazenagem;

- Efluente líquido de gasóleo, vindo do rectificador de gasóleo T3003 e enviado para as unidades de dessulfuração de gasóleo (U1400 e U3700) ou armazenagem intermédia;

- Efluente líquido de resíduo, proveniente do fundo da coluna de destilação atmosférica T3001 e conduzido para a armazenagem final como componente de fuel óleo ou para as novas unidades de vácuo e visbreaking.

Uma possível modelização para o método de cálculo dos custos de *downtime* encontra-se no anexo J. A importância dos custos de *arranque* também será directamente proporcional à criticidade da linha, pois embora o valor destes custos seja independente do grau de criticidade da linha, quanto mais crítica esta for, maior será a probabilidade destes acontecerem, como consequência da paragem da unidade.

Danos ambientais

Um grande efeito colateral das tecnologias modernas de processo químico e dos seus produtos é o aumento dos danos causados ao ambiente, resultantes da contaminação por eles produzida. A sociedade deu resposta à crescente preocupação com os efeitos ambientais adversos causados pelos acidentes que ocorrem anualmente, introduzindo um rigoroso quadro legislativo (Vassiliadis & Pistikopoulos, 2000).

Por exemplo, a refinaria da Shell da Califórnia foi multada em 2007 em 2,9 milhões de dólares, pela emissão de 925 toneladas de monóxido de carbono para a atmosfera (Full Oil Incident list).

As consequências ambientais podem incluir diversos factores, entre os quais a quantidade de material/gás tóxico e perigoso libertado para o solo e ar, e consequente custo de limpeza dos derrames, e multas. No entanto, nem todos os danos ambientais são possíveis de determinar na prática para que seja possível serem considerados na metodologia proposta, como é o caso das multas. Isto porque é muito difícil prever estas quantidades assim como possíveis correspondências com as consequências económicas, o que não aconteceria, por exemplo, se estivessem a ser analisadas as chaminés da refinaria. Uma possível modelização para o método de cálculo dos custos ambientais encontra-se no anexo J. Através da análise deste mesmo método de cálculo é possível concluir que quanto maior for a consequência da linha, o que à partida corresponderá a um aumento do número de criticidade, maiores serão os danos ambientais.



Figura 12 – Exemplo de uma fuga de uma linha, neste caso durante um ensaio

Danos no equipamento

Este tipo de danos ocorre quando há uma falha com consequências graves, especialmente ao nível de incêndios e explosões. Num caso extremo, estes podem envolver a perda total da instalação, e consequente necessidade de reconstrução integral. Embora existam inúmeros registos de danos causados em refinarias devido a incêndios provocados por fugas nas linhas, o seu custo é muito difícil de calcular, pois envolve muitos factores, só podendo ser avaliada a propensão de gravidade da ocorrência, dependendo do seu grau de risco.

É também necessário determinar os danos que podem ocorrer não só na unidade em que está inserida a linha (danos directos), mas também nas unidades próximas (danos indirectos), pois quanto maior foi a consequência de falha, e consequente grau de risco, maior será a probabilidade das unidades próximas serem danificadas.

Exemplo de danos directos pode ser uma linha de parafina que quando fura, solidifica o material e entupindo imediatamente todas as tubagens frias, por exemplo de drenos.

Danos na imagem da empresa

Caso a linha seja caracterizada como tendo uma criticidade elevada, uma falha pode originar um incidente com alguma gravidade, e consequentemente afectar a imagem da empresa perante o público e clientes. Acidentes em refinarias têm sempre uma maior propensão para um maior mediatismo por parte dos média, favorecendo a argumentação de quem defende que as refinarias não são seguras.

Já quanto aos clientes, estes podem ser afectados caso o potencial acidente provoque quebras de stock, e não satisfaça a procura do público em geral por combustíveis ou por outras matérias-primas industriais. Isto resultaria numa perda de confiança por parte dos clientes, que consequentemente faria com que estes procurassem outros fornecedores.

2. Custos

Custos de substituição total

Envolvem diferentes tipos de operações, não só de retirada do material a substituir, tais como remoção do isolamento, colocação de juntas cegas e cortes a frio, mas também operações de colocação da nova tubagem, envolvendo custos do novo material assim como de realização de ensaios hidrostáticos e radiografias, entre muitos outros.

Estes custos serão fixos, ou seja, serão independentes do tipo de manutenção adoptado para a linha. A sua importância para a escolha do objectivo final é que pode variar consoante a relevância atribuída aos outros tipos de custos.

Custos de Inspeção

Estes serão custos associados à mão de obra do inspector, assim como custos de possíveis acções necessárias para a realização da inspecção, tais como:

- Colocação de andaimes, caso as linhas estejam localizadas em altura;
- Limpeza e decapagem da linha, de modo a reunir as condições para a medição dos TML's;
- Remoção de isolamento, quando a linha é isolada e para que se possa avaliar o seu estado, através da medição de TML's por exemplo, se torna obrigatório desisolá-la ou cortar partes do isolamento nas zonas consideradas críticas.

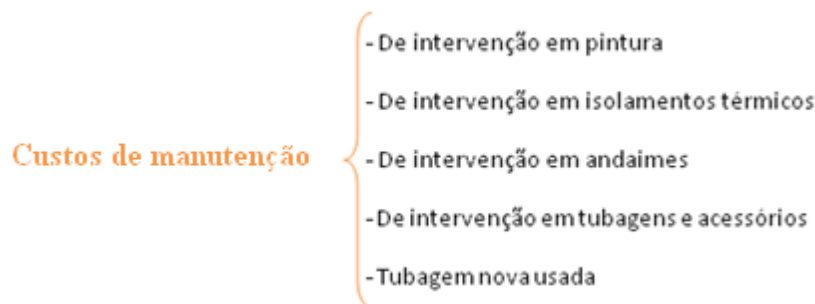
$$\text{Custo}_{\text{inspecção}} = \text{M.O.} + \text{andaimes} + \text{intervenção de isolamento} + \text{limpeza e decapagem}$$

Equação 4 – Custos de inspecção

Estes custos serão então mais importantes quanto maiores forem as exigências de inspecção da política de manutenção a implementar.

Custos de manutenção/intervenção

As acções de intervenção englobam diferentes operações, exemplificadas no esquema 5. A explicação destas operações encontra-se no anexo I.



Esquema 5 – Categorias de custos de manutenção/inspecção

Tal como os custos de inspecção, linhas com um número de criticidade mais elevado não só exigem uma maior frequência de manutenção/intervenção, como têm à partida mais actividades associadas, tais como intervenções em andaimes e isolamento. Daí que quanto mais crítica for a linha, maior será a importância deste tipo de custos, muitas vezes igual aos de substituição total.

Consequentemente justifica-se o interesse pela análise da parte económica da manutenção das tubagens da refinaria, que deveria ser analisada com mais atenção porque embora muitas vezes a beneficiação da linha conjugada com substituição parcial desta seja a opção mais utilizada, esta pode por vezes não ser a opção mais rentável para a refinaria. Isto porque por vezes o custo de substituição total da linha pode ser mais económico do que substituir e beneficiar grande parte do troço desta, devido à grande quantidade de custos associados. Para além disso, por vezes é mais dispendioso colocar andaimes e tirar isolamento do que a nova tubagem em si, tal como se verifica na Tabela 23 do anexo I.

Custos de produto perdido

Embora na maior parte das vezes estes custos não sejam significativos, pois normalmente no caso da refinaria de Matosinhos o derrame tem sido pequena dimensão, estes custos podem ser importantes. No caso extremo, pode-se referir a situação da fuga no poço da BP no golfo do México, na qual a quantidade de petróleo libertada foi o equivalente a 60 mil barris por dia, ou seja, o equivalente a 2.5 milhões de galões por dia (Bussiness Week, 2010). Multiplicando esta quantidade pelo preço de mercado do petróleo, é possível ter uma ideia do prejuízo sofrido pela companhia só em custos directos com o petróleo bruto.

A modelização do cálculo aproximado do produto perdido no caso de falha de uma linha encontra-se também no anexo J. Concluiu-se assim que linhas com nível de consequência mais elevado têm em princípio custos de produto perdido também mais elevados.

Custos dos seguros

Acidentes ocorridos na refinaria de Matosinhos estão sempre seguros por alguma companhia de seguros, sendo que quanto mais grave for o acidente mais agravamento terá o prémio pago pela refinaria à seguradora, aumentando assim a importância deste critério para o objectivo final.

Esta categoria de custos é também muito difícil de determinar na prática, só podendo também ser avaliada por níveis, ou seja, quanto maior o grau de criticidade da linha, maiores os custos relacionados com seguros.

3. Aplicabilidade/implementação

Diferentes políticas de manutenção exigem diferentes recursos ao nível de hardware, software e mão-de-obra (Wang, Chu, & Wu, 2006).

Por exemplo, um tipo de política pode exigir a implementação de um software específico, o que consequentemente resultaria em custos de aquisição da licença assim como o custo da mão-de-obra especializada necessária para a sua implementação/utilização. Ou seja, quanto mais evoluída for uma política de manutenção, mais importante será o critério da aplicabilidade/implementação, pois irão ser necessários mais recursos. Consequentemente, apenas linhas críticas justificam este investimento elevado, pois por exemplo, não é viável estar a monitorizar continuamente uma linha de fornecimento de água.

Outro caso de possíveis custos com implementação é o caso já referido da manutenção condicionada, na qual pode, por exemplo, ser necessário colocar sensores para analisar a taxa de corrosão da linha. Ao nível da mão-de-obra, apenas com o treino apropriado o pessoal da manutenção pode usufruir de todas as vantagens das técnicas e ferramentas usadas pela manutenção condicionada e preditiva, de modo a atingir os seus objectivos (Wang, Chu, & Wu, 2006). Logo, a importância deste critério também aumenta com o nível de evolução das políticas de manutenção.

4. Valor acrescentado

Actualmente é dado muito ênfase ao *valor acrescentado*, pois grande parte das empresas são cotadas em bolsa e consequentemente têm de rentabilizar o investimento feito a nível financeiro, especialmente na área da manutenção (ASME, 2003). Daí que se espere que a estratégia de manutenção implementada resulte em melhorias em vários campos, entre eles o da segurança, redução de custos/actividades desnecessárias e utilização ao máximo da vida da tubagem.

A redução de actividades desnecessárias passará pela optimização da política de manutenção a adoptar para cada grau de criticidade das linhas, que resultará na redução do número de inspecções e intervenções desnecessárias, entre outros. Também será importante escolher a política que aumente o tempo de vida da tubagem, sempre tendo em conta o risco existente, pois provavelmente as linhas com baixa criticidade poderão ser utilizadas até ao fim da sua vida útil - *run to fail*.

Já em relação à segurança, uma estratégia apropriada permitirá melhorar a imagem da empresa perante o público em geral, por evitar os possíveis danos referidos no ponto *danos de imagem*. Melhorias da segurança podem também resultar na subida da classificação da Refinaria de Matosinhos/Galp Energia no *ranking* das “melhores empresas nacionais para trabalhar”.

4.3.2 Matrizes de comparação dois-a-dois

Após a divisão das linhas pelo número de criticidade, irão então ser obtidos 3 grupos de linhas, cada um com um grau diferente de criticidade das linhas. A metodologia AHP será então aplicada individualmente a cada um destes graus, através da definição de todas as matrizes de comparação *dois-a-dois* necessárias. Estas matrizes assim como as escolhas dos valores das comparações feitas encontram-se no anexo K.

Será no entanto necessário definir 34 matrizes para cada grau de criticidade das linhas. Para os critérios do nível 2 da hierarquia definida, apenas será necessário definir uma matriz, em que são definidas as importâncias dos diferentes critérios principais para a decisão final. No caso em estudo, serão comparadas as importâncias dos danos, custos, aplicabilidade e valor acrescentado de cada grau de criticidade para a escolha da política de manutenção adequada. Já no nível 3, existem 4 matrizes, cada uma a definir a importância dos subcritérios de cada critério principal para este mesmo critério. Ou seja, será definida a importância dos danos humanos, de *indisponibilidade*, ambientais, de equipamento e de imagem para os danos em geral, sendo que, por exemplo nas linhas com criticidade mais elevadas os danos humanos terão uma importância maior do que nas linhas de grau 3, e assim sucessivamente.

No nível 4, será necessário definir 6 matrizes, correspondentes aos subcritérios do nível 3 que têm subcritérios no nível 4 – consultar esquema 4 para melhor compreensão desta divisão. Uma destas matrizes será então a definição da importância das diferentes categorias de possíveis danos humanos no grau de criticidade em estudo. Por exemplo, nas linhas críticas, os danos humanos por morte serão os mais importantes, pois são bastante prováveis de acontecer devido às características das linhas.

Já as restantes 23 matrizes comparam as 5 alternativas de manutenção possíveis com os critérios do nível imediatamente inferior, quer seja do nível 3 ou 4. Serão comuns aos três tipos de graus de criticidade das linhas, por exemplo, a manutenção correctiva será sempre a que menos contribuirá para a redução de danos humanos por morte, quer a linha seja de grau 1 ou 3.

4.4 Análise dos resultados

Após a aplicação da metodologia proposta, irar-se-á analisar os resultados obtidos, nomeadamente o tipo de manutenção definida para cada um dos três graus de criticidade de linhas. Para isto, os resultados deverão ser comparados com os previstos pela bibliografia analisada, justificando potenciais diferenças caso estas existam.

Uma ferramenta de ajuda a esta análise pode ser a análise gráfica, que permite mais facilmente concluir que critérios têm mais influência no resultado final. Para além disso, é recomendada a realização de uma série de análises de sensibilidade de modo a concluir como a mudança dos índices de prioridades dos 4 principais critérios (danos, custos, aplicabilidade e valor acrescentado) afecta o resultado final.

Também deve ser calculado o índice de inconsistência, já referido no ponto 2.3.2., de modo a avaliar a consistência e validade da informação recolhida.

5 Aplicação da metodologia AHP num caso prático

In any moment of decision the best thing you can do is the right thing, the next best thing is the wrong thing, and the worst thing you can do is nothing.

Theodore Roosevelt

5.1 Cálculo do índice de criticidade

Na impossibilidade de calcular o índice de criticidade para todas as linhas da U3000 (devido ao elevado número existente, cerca de 300 linhas), optou-se pelo cálculo deste para algumas linhas, nomeadamente as apresentadas na Tabela 7. As linhas escolhidas pertencem a diferentes circuitos e apresentam uma grande variedade nos valores dos parâmetros usados para calcular o número de criticidade, daí a opção por estas.

Tabela 7 – Cálculo do índice de criticidade para algumas linhas da U3000

Nome linha	circuito	PF	CF	importância	Dif. acesso	isolamento	evolução	nº crit	grau
L-ER-30360-1-1" Lm	Arrefecimento	5	1	3,5	3	0	5	33	II
L-ER-30361-1-1" Lm	Arrefecimento	4	1	3,5	2	5	3,5	35,5	III
L-ET-30256-1-4" Af	Água Tratada Arrefec/Resíduo	5	1	2	1	5	2	30	II
L-ET-30257-1-12" Af	Água Tratada Arrefec/Resíduo	1	1	2	3	0	1	16,5	I
L-FG-30968-1-8" Ac	Fuel Gás	1	2	1	4	0	1	18	I
L-FG-30978-1-1,5" Ac	Fuel Gás	5	1	3,5	3	0	2	30	II
L-VB-30168-1-0,75" Af	Vapor B.P.	1	1	2	5	0	3	21,5	II
L-P-3002-6" A1r	Fuel Óleo	5	4						
L-P-30105-1-14" B1r	Petróleo Bruto 1	4	2	2	4	5	5	38,5	III
L-P-30305-1-8" A1r	Petróleo Bruto 1	4	4	5	3	5	1	48	III
L-P-30508-1-14" A1r	Produto Topo T-3001	5	2	5	3	0	3	38,5	III
L-P-30419-1-4" A1s	Água de Dessalificação	5	1	3,5	2	0	2	28,5	II
L-P-30423-1-3" A1s	Gasolina Efluente D-3001	5	1	5	3	0	3	35,5	III
L-P-30424-1-8" A1r	Gasolina Efluente D-3001	1	2	2	4	0	2	22	II
L-P-30444-1-6" Ac	Efluente Gasoso D-3001	5	2	2	2	0	4	29	II
L-ZS-30173-1-1" Ac	Produtos Químicos	3	2	2	1	0	1	20,5	I

De modo a explicar o funcionamento deste método do cálculo do índice de criticidade – explicado em pormenor no ponto 4.2. desta dissertação - pode-se referir a linha L-ER-30360-1-1" Lm. Esta linha pertence ao circuito de arrefecimento da unidade, tendo sido classificada na análise de risco pelo RBI como 5 A, ou seja, pela metodologia proposta, com um valor de probabilidade de falha 5 e de consequência de falha 1. Já o valor correspondente na escala de importância será 3,5 pois a linha pertence ao circuito de arrefecimento, que tal como se verifica no anexo H, afecta de forma média o rendimento da unidade. Através da análise das isométricas, foi possível concluir que a

linha tem uma cota média de 3,2 metros, daí a classificação pelo nível 3 no parâmetro *dificuldade de acesso*. Como não tem isolamento, este parâmetro é classificado como 0, e como a evolução da probabilidade de falha da linha é acentuada, passando este de uma probabilidade de falha na data actual de 2 para 5 na data futura, classificou-se a evolução do risco como 5. A multiplicação destes valores definidos para cada um dos 6 parâmetros tem como resultado 33, e pode-se então dizer que esta linha tem um grau de criticidade de valor 2.

A diferença na atribuição do valor da importância a linhas do mesmo circuito (como o de petróleo bruto 1), explica-se porque muitas vezes o tamanho da fuga altera o grau de importância do circuito. Por exemplo, neste caso, se a fuga for pequena, pode ser feita uma reparação temporária, nomeadamente a colocação de uma braçadeira, e a linha pode continuar a funcionar normalmente. No entanto, se a fuga já for maior, a linha terá obrigatoriamente de ser colocada fora de serviço, daí a classificação com o nível 5 ao parâmetro *importância*. O método de definição dos possíveis tamanhos das fugas das linhas em caso de falha encontra-se no anexo H.

5.2 Resultados obtidos e análise

Após a elaboração de todas as matrizes de comparação *dois-a-dois* necessárias, que se encontram no anexo K, foi possível determinar o índice de inconsistência individual para cada matriz, assim como o geral para cada nível. Tal como se pode verificar na última parte do anexo K, todos os índices são inferiores a 0.1, o que demonstra a validade e consistência dos resultados obtidos.

Analizando os resultados, verifica-se, na Tabela 8, que, para as linhas mais críticas, nomeadamente as de grau 1, a manutenção condicionada é a mais adequada, muito embora o valor da classificação da manutenção preditiva seja muito próximo. Isto porque, para linhas críticas, as políticas financeiramente mais dispendiosas e sofisticadas (preditiva e condicionada) são mais adequadas do que as restantes, devido aos aspectos críticos de potenciais falhas. Consequentemente, é justificável investir mais nas políticas de manutenção deste tipo de linhas, daí a classificação mais baixa (com uma diferença de prioridades muito elevada) ter sido atribuída à manutenção correctiva, tal como era de esperado.

Tabela 8 – Classificações finais dos tipos de manutenção para cada grau de criticidade

	Manutenção correctiva	Manutenção preventiva	Manutenção oportunista	Manutenção condicionada	Manutenção preditiva
Grau 1	0,0940	0,1512	0,1506	0,3038	0,3005
Grau 2	0,1301	0,1660	0,1629	0,2743	0,2668
Grau 3	0,2059	0,2090	0,2069	0,1946	0,1836

Já para as linhas de grau 2, os resultados também indicam a manutenção condicionada, logo seguida da preditiva, como as mais adequadas para este tipo de linhas com criticidade média. No entanto, estes resultados podem estar sujeitos a críticas, pois

devido aos seus elevados custos de implementação, entre outros, pode-se argumentar que este tipo de políticas, especialmente a condicionada, não são viáveis de serem aplicadas neste tipo de linhas. Prova disso é a bibliografia consultada, que na sua maioria indica a opção oportunística e/ou preventiva como a melhor opção para este tipo de linhas.

Em princípio linhas com criticidade média não afectam o ambiente externo, pois nesse caso teriam um número de criticidade suficientemente elevado para pertencerem ao grau 1 de criticidade. Consequentemente, pode não ser viável aplicar/implementar políticas de manutenção mais elaboradas neste tipo de linhas, pois apenas é obtida uma redução de custos média como resultado de elevados custos de implementação e aplicação destes tipos de manutenção. Recomenda-se uma análise de custos/benefícios pormenorizada de modo a limitar os investimentos em manutenção deste tipo de linhas, até a um limite considerado razoável. Ou então uma análise das linhas com números de criticidade perto das fronteiras entre diferentes graus, tal como sugerem (Bevilacqua & Bragliab, 2000).

Isto porque uma possível explicação para os resultados obtidos para este tipo de linhas pode também ser baseada no facto da dificuldade existente em definir as características das linhas deste grupo, sendo este muito mais difícil de especificar do que o grupo de linhas de grau 1 e 3. Ou seja, linhas de elevado grau de criticidade têm à partida uma importância e consequências de falha elevadas, sendo estes os parâmetros com maior peso no cálculo do número de criticidade que define o grau de criticidade a que as linhas pertencem. Já o oposto acontece com as linhas com grau de criticidade baixa. Já nas linhas com um grau de criticidade médio, não é possível especificar quais destes parâmetros têm uma maior importância, pois por exemplo, tal como se verifica na Tabela 9, uma linha pode ter o nível de importância máximo (5) e ser considerada de criticidade média, bastando para isso que os restantes parâmetros tidos em conta no cálculo do número de criticidade sejam baixos.

Um caso oposto acontece na linha de circuito de vapor B.P., também representada na Tabela 9, que também é considerada de grau 2 mesmo não tendo níveis de consequência e importância elevados. Daí que seja justificável que se opte por uma perspectiva mais conservadora, pois a metodologia tem de considerar os piores e os melhores casos dentro do grau de criticidade médio. E tendo em conta a importância extrema da segurança e da parte económica nos dias de hoje, não se pode definir uma política menos conservadora havendo o risco de ter linhas que afectem gravemente estes parâmetros. Consequentemente, as políticas de manutenção preditiva e condicionada são favorecidas quando comparadas com as restantes, até porque, tal como foi referido no estado da arte, o futuro indica a adopção de medidas de manutenção condicionada.

Tabela 9 – Exemplo de linhas com grau 2 de criticidade

Nome linha	circuito	PF	CF	importância	Dif. acesso	isolamento	evolução	nº crit	grau
L-P-30423-1-3" A1s	Gasolina Efluente D-3001	5	1	5	1	0	3	32,5	II
L-VB-30168-1-0,75" Af	Vapor B.P.	1	1	2	5	0	3	21,5	II

Contudo, estes resultados podem ser justificados pela crescente importância na tomada de decisões, desde há alguns anos, do critério da redução dos danos que podem vir a acontecer, de forma a seguir todos os regulamentos de segurança. O resultado será então um favorecimento inevitável destes tipos de políticas, pois são as políticas de manutenção condicionada e preditiva as que mais favorecem a redução de todo o tipo de danos, devido às suas características.

Aliás, tal como se pode visualizar no Gráfico 6, será o critério dos danos, nomeadamente a potencial redução destes, que contribuirá maioritariamente para que as políticas de manutenção condicionada e preditiva tenham classificações tão elevadas, sendo que a nível dos custos as políticas de manutenção são relativamente semelhantes. O factor da aplicabilidade/implementação favorece as políticas correctivas, preventivas e condicionadas, devido aos baixos recursos necessários para aplicar este tipo de políticas (quer a nível de mão de obra, quer pelo hardware e software necessário). Já o valor acrescentado será maior com as políticas condicionadas e preventivas.

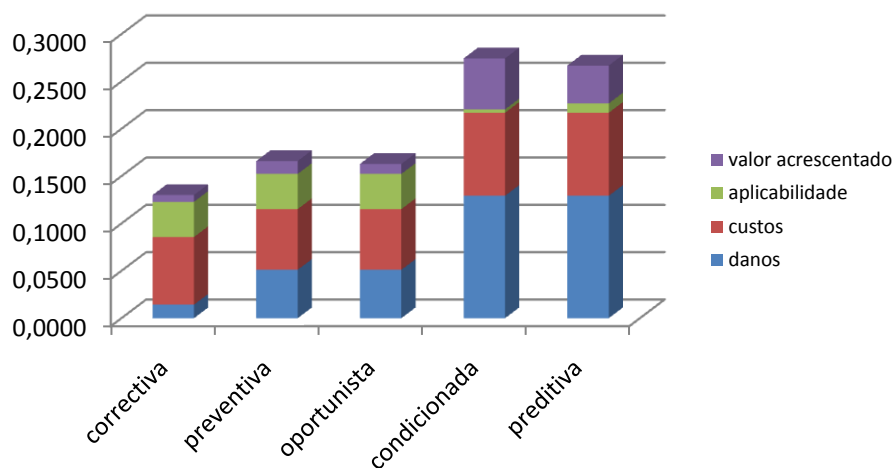


Gráfico 6 – Influência dos principais parâmetros de decisão da definição da política de manutenção adequada para as linhas com grau 2 de criticidade

Para as linhas de grau 3, a política de manutenção recomendada é a do tipo preventivo, logo seguida, a nível de prioridades, pela correctiva e oportunística. Estes resultados são explicados pela não justificação a nível económico da implementação de políticas elaboradas e dispendiosas, pois a importância e consequência de falha das linhas deste grau à partida não serão elevadas.

Tal como se verifica no Gráfico 7, é a potencial redução na necessidade de recursos para implementar as políticas correctivas, preventivas e oportunísticas que faz com que estas políticas tenham maiores prioridades. Também se demonstra no gráfico a pouca importância dos danos para este tipo de linhas.

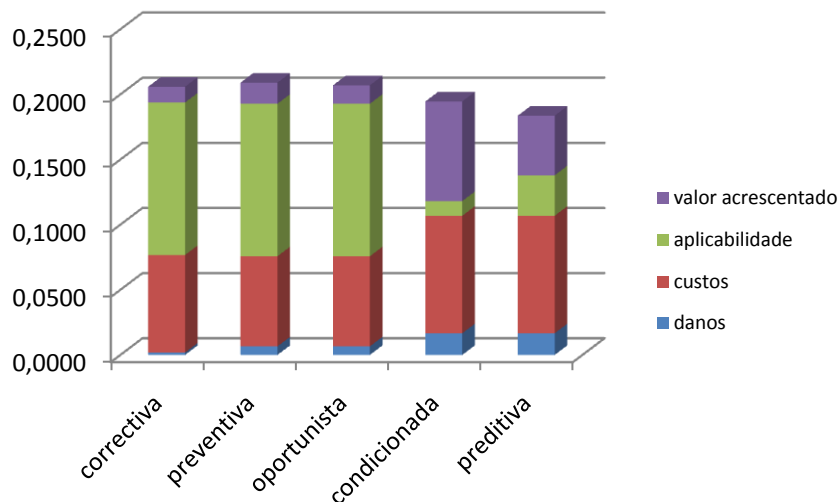


Gráfico 7 – Influência dos principais parâmetros de decisão da definição da política de manutenção adequada para as linhas com grau 3 de criticidade

Concluindo, tal como seria expectável, é possível verificar pela análise dos resultados que à medida que as linhas se tornam mais críticas, o nível de prioridade da manutenção correctiva diminui – passou de 0,2059 nas linhas de grau 3 para 0,0940 nas linhas de grau 1. No sentido inverso, a prioridade das políticas de manutenção condicionadas e preditivas aumentou com o aumento da criticidade da linha, pois torna-se mais justificável o investimento feito.

5.2.1 Análise de sensibilidade

Embora os resultados finais possam demonstrar um possível cenário onde, por exemplo, o critério dos danos é claramente o mais importante para as linhas de grau 1, tal como se pode verificar na Tabela resumo do anexo K, a solução final do AHP pode mudar de acordo com mudanças na lógica do analista. Para explorar a resposta das soluções do modelo (p.e., a robustez da solução) a potenciais mudanças nas prioridades das estratégias de manutenção, podem-se efectuar uma série de análises de sensibilidade através da mudança da prioridade – importância relativa – dos pesos dos critérios e subcritérios (Bevilacqua & Braglia, 2000).

O problema é determinar, dentro do grande número de critérios utilizados no problema em estudo, quais é que tendo a sua importância relativa alterada resultam em grandes alterações nos resultados finais. Seguindo o método utilizado por Bevilacqua e Braglia (2000) optou-se por analisar as prioridades dos 4 critérios do nível 2 da hierarquia, de modo a demonstrar como a mudança de prioridade de um critério afecta os restantes três. Isto porque é claro que à medida que a prioridade de um critério aumenta, as prioridades dos restantes têm de diminuir proporcionalmente.

Os resultados da análise de sensibilidade feita aos resultados do AHP encontram-se no anexo L.

Após a análise destes resultados, é possível concluir que a decisão da política de manutenção indicada para as linhas de grau 3 pode ser aceite com um elevado nível de

confiança, pois mesmo com a mudança das prioridades dos outros critérios, deixando de considerar os danos como o factor mais importante, a política mais adequada será sempre a condicionada, com o valor da manutenção preditiva sempre muito próximo.

Já a decisão quanto ao tipo de manutenção a adoptar nas linhas de grau 3 é muito influenciada pelas prioridades atribuídas aos principais critérios. Pois, tal como se verifica na análise de sensibilidade aos resultados deste grau de criticidade, uma mudança das prioridades muda os resultados finais quanto à decisão sobre o tipo de manutenção a adoptar.

Consequentemente, torna-se muito importante a definição das comparações entre os critérios com o maior nível de rigor possível, durante a elaboração das matrizes de comparação *dois-a-dois*.

De referir também que ao realizar apenas a análise de sensibilidade para os 4 critérios principais, apenas os *efeitos principais* foram considerados. Ou seja, os *efeitos de interacção* das mudanças feitas nas prioridades dos critérios principais não foram considerados. Esta opção pode ser justificada pelo facto de a solução final ser muito sensível às prioridades do nível mais alto da hierarquia, nomeadamente o segundo, mas também porque a introdução de efeitos de interacção torna a análise de sensibilidade muito complexa para o caso em estudo (Bevilacqua & Braglia, 2000). Para além disso, numa análise de sensibilidade os *efeitos principais* são sempre os mais importantes.

6 Conclusões e perspectivas de trabalho futuro

A escolha da metodologia AHP revelou-se adequada pois tornou possível definir a estratégia de manutenção de uma forma mais completa, tendo sido considerados inúmeros factores, o que seria difícil e pouco viável usando técnicas mais convencionais, como a FMECA. Sem o suporte de metodologias de decisão como o AHP, os decisores/responsáveis apenas baseiam as suas decisões em critérios, não entendendo as interações e as importâncias relativas destes para a decisão final. A utilização do AHP permite que o decisor trabalhe de forma sistemática e analítica, analisando quer os parâmetros mais fáceis de julgar, os objectivos, como os subjectivos.

Após a implementação do método proposto para a divisão das linhas por 3 graus de criticidade, tendo em conta parâmetros como a consequência e probabilidade de falha, importância da linha para o funcionamento da unidade, existência de isolamento, localização em altura e evolução do risco, foi possível definir qual a melhor política de manutenção para cada grau de criticidade. Deste modo, tal como tinha sido definido como objectivo, foi possível adequar o esforço necessário e suficiente aos equipamentos de menor risco, aumentando a cobertura dos equipamentos de maior risco. Isto através da implementação de políticas de manutenção mais ou menos elaboradas e dispendiosas a cada um dos 3 grupos de linhas.

Segundo a análise AHP, para as linhas mais críticas a manutenção condicionada é a mais adequada, logo seguida da manutenção preditiva, sendo que a análise de sensibilidade efectuada sustenta estes resultados. Já para as linhas de grau 2, a manutenção condicionada também foi considerada a mais adequada pelo AHP, embora com um nível de prioridade mais reduzido. Quanto às linhas de grau 3 – menos críticas – a política de manutenção recomendada foi a preventiva, o que se justifica, entre outros motivos, pela não necessidade de implementação de políticas muito evoluídas e dispendiosas em linhas pouco importantes para o funcionamento da unidade e com consequências económicas, ambientais e pessoais baixas. Podia ser expectável a opção pela manutenção correctiva neste tipo de linhas, no entanto pelos motivos explicados ao longo desta dissertação, até mesmo para estas as desvantagens superam as vantagens deste tipo de manutenção.

A definição de uma estratégia adequada de manutenção permitirá então otimizar o calendário de inspecções e manutenções, pois este tipo de acções também irá ser adequado às condições e características da linha, consoante o grupo de criticidade que esta está inserida. Deste modo, será possível aumentar a eficiência, produtividade e lucro da refinaria.

Em relação a possíveis trabalhos futuros, pode-se referir o que inicialmente era um objectivo desta dissertação (abandonado devido à falta de tempo): o cálculo do número de criticidade para a totalidade das linhas da unidade em estudo (e não apenas para algumas, tal como foi feito), de modo a verificar se este critério proposto de divisão do risco/criticidade das linhas cumpria a *regra de Pareto*. Isto porque, como foi referido anteriormente, o critério adoptado actualmente (RBI) não é totalmente satisfatório, quer ao nível do critério de *Pareto*, quer devido ao número insuficiente de parâmetros incluídos na análise. No entanto, a classificação das linhas por este método é bastante

morosa, devido por exemplo à necessidade de analisar as isométricas de cada linha, de modo a determinar a sua cota – essencial para a definição do parâmetro *dificuldade de acesso*.

Também relativamente ao AHP, este apresenta algumas limitações, pois assume a independência linear dos critérios e alternativas. Quando existe dependência entre estes, pode-se optar pela utilização do ANP – *analytic network process* (Bayazit, 2005). Através de uma estrutura em rede organizada, esta metodologia que também é multicritério, permite analisar as interdependências entre os critérios em estudo.

Embora a aplicação desta metodologia nas tubagens da refinaria seja um possível trabalho futuro, esta técnica requer ainda mais comparações, que podem ser difíceis de obter, pois já o número de comparações usadas no AHP é bastante elevado. Claro que quanto maior número de comparações existir, menor será a incerteza e maior a aproximação do problema analisado à realidade, o que se apresenta como uma enorme vantagem. Também de modo a verificar a consistência dos resultados, no futuro poder-se-ia aplicar aos equipamentos em estudo outros métodos de implementação do AHP usados para definição de uma estratégia de manutenção, alguns dos quais já referidos no ponto 4.1. da dissertação.

Lista de referências

- American Petroleum Institute. (1998). *API 570 - Piping Inspection Code* (2ª edição ed.).
- American Petroleum Institute. (1998). *API 574 - Inspection Practices for Piping System Component* (2ª edição ed.).
- American Petroleum Institute. (2002). *API 580 - Risk-based Inspection* (1ª Edição ed.).
- American Petroleum Institute. (2000). *API 581 - Risk-Based Inspection Base Resource Document* (1ª edição ed.).
- Anderson, R., & Fuloria, S. (n.d.). Security Economics and Critical National Infrastructure.
- Aoudia, M., Belmokhtar, O., & Zwingelstein, G. (2008). Economic impact of maintenance management ineffectiveness of an oil and gas company. *Journal of quality in Maintenance Engineering* , 14, pp. 237-261.
- ASME. (2003). *Risk-Based Methods for equipment life management: an application handbook* (Vol. 41). Nova Iorque: ASME International.
- Barringer, H. O. (n.d.). Pipe Wall Thickness Decisions Using Weibull Analysis.
- Bayazit, O. (2005). Use of AHP in decision making for flexible manufacturing systems. *Journal of manufacturing technology management* , 7, 808-819.
- Bertolini, M., & Bevilacqua, M. (2006). A combined goal programming - AHP approach to maintenance selection problem. *Reliability Engineering and system safety* , 839-828.
- Bertolini, M., Bevilacqua, M., Ciarapica, F., & Giacchetta, G. (2009). Development of risk based inspection and maintenance procedures for an oil refinery. *Journal of loss prevention in the process industries* , 22, 244-253.
- Bevilacqua, M., & Braglia, M. (2000). The analytic hierarchy process applied to maintenance strategy selection. *Reliability Engineering and System Safety* .
- Braglia, M. (2000). MAFMA: multi-attribute failure mode analysis. *International Journal of quality & reliability management* , 17, 1017-1033.
- Business Week*. (2010-16-06). Retrieved 2011-30-05 from <http://www.businessweek.com/news/2010-06-16/bp-gulf-well-gushing-as-much-as-60-000-barrels-a-day-update3-.html>
- Chang, M.-K., Chang, R.-R., Shu, C.-M., & Lin, K.-N. (2005). Application of risk based inspection in refinery and processing piping. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* , 18.
- Coelho, J. M. (2002). *Desenvolvimento de estudo RBI para a Refinaria do Porto da Petrogal – relatório base*. Porto.

Correia, A. J. (2008). *Aplicação do conceito de Risk Based Inspection (RBI) em equipamentos dinâmicos*. Dissertação para obtenção do grau de mestre, Faculdade de Engenharia de Universidade do Porto, Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial da U.P., Porto.

Dey, P. (2001). A risk based model for inspection and maintenance of cross-country petroleum pipeline. *Journal of quality in maintenance engineering* , 7, 25-41.

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

Ferreira, L. A. (1998). *Uma Introdução à Manutenção* (1ª edição ed.). Porto: Publindústria, Edições Técnicas.

Figuera, J., Greco, S., & Ehr Gott, M. (2005). *Multiple Criteria Decision Analysis, State of the art surveys*. Nova Iorque: Springer.

Full Oil Incident list. (n.d.). From http://webcache.googleusercontent.com/search?hl=pt-PT&q=cache:u2ybqllsXPwJ:http://www.nwf.org/News-and-Magazines/Media-Center/News-by-Topic/Global-Warming/2010/~/_media/PDFs/Global%20Warming/Reports/Full-Oil-Incident-List.ashx+installation+damage+costs+acc

Galp Energia. (n.d.). Procedimento Operativo GALP para inspecção de CUI.

Golmakani, H., & Fattahipour, F. (2011). Age based inspection scheme for condition-based maintenance. *Journal of quality in Maintenance Engineering* , 17.

Higgins, L. R. (2006). *Maintenance Engineering Handbook* (6ª edição ed.). McGraw-Hill Professional.

Holt, R. (2003-December). Consider tubing solutions to enhance plant efficiency. *Hydrocarbon Processing magazine* .

Hunt, T. M. (1996). *Condition monitoring of mechanical and hydraulic plant*. Londres: Chapman & Hall.

Industry Standards & Regulations. (2006). Analysis techniques for system reliability – Procedure for failure mode and effects analysis (FMEA). *International Standard 60812* .

Jardine, A., Lin, D., & Banjevic, D. (2006). A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition based maintenance. *Mechanical Systems and Signal Processing* , 20.

Jovanovic, A. (2003 Junho). Risk-based inspection and maintenance in power and process plants in Europe. *Nuclear Engineering and Design* .

K. Nalli, M. (2007 dezembro). Risk based inspection - an efficient maintenance tool. *Hydrocarbon Processing Magazine* .

Kelly, A., & Harris, M. (1978). *Management of industrial maintenance*. Newnes-Butterworths (London and Boston).

Koppen, G. (1998). *Development of risk-based inspection*. Amsterdão: Woodhead Publishing Ltd.

Kumar, U., Crocker, J., Knezevic, J., & El-Haram, M. (2000). *Reliability, maintenance and logistic support - a life cycle approach*. Kluwer Academic Publishers.

Kumar, U., Crocker, J., Knezevic, J., & El-Haram, M. (2000). *Reliability, maintenance and logistic support - a life cycle approach*. Kluwer Academic Publishers.

Mahoney, D. (1998). *Large property damage losses in the hydrocarbon chemical industries—a thirty years review* (17^a ed.). New York: J and H Marsh and McLennan.

Mobley, R. K. (2002). *An introduction to preventive maintenance*. Amsterdão: Butterworth-Heinemann.

Mokhtar, A. A., Ismail, M. C., & Muhammad, M. (2010). Comparative Study between Degradation Analysis and First Order Reliability Method for Assessing Piping Reliability for Risk-Based Inspection. *International Journal of Engineering & Technology IJET*, 9, p. 99.

Nataraj, S. (2006). Analytic hierarchy process as a decision support system in the petroleum pipeline industry. *Issues in Information Systems*, VI.

Nilsson, K. (2009). *Preliminary Hazard analysis of the natural gas delivery pipeline between young and bomen in NSW*. APA Group. Planager - Risk Management Consulting.

Nolan, D. P. (2011). *Handbook of fire and explosion protection engineering principles, for oil, gas, chemical and related facilities* (2^a edição ed.).

NP EN 50126. (2000). Aplicações ferroviárias - Especificação e demonstração da fiabilidade, disponibilidade, manutenibilidade e segurança. ISQ.

Otero, J., & Turrubiarres, J. (2003). Consider a RBI program to improve safety and availability paper. (E. Publishing, Ed.) *Hydrocarbon Processing*.

Petrogal. (2000 29-Junho). Espessura de Isolamento para conservação de linhas quentes. *Manual de Procedimentos - Especificações de Engenharia*, 01. (B. 1300-107, Ed.)

Procedimento interno para realização de ensaios hidrostáticos. Norma. (2001).

Rausand, M. (2004). *System Reliability Theory* (2^a edição ed.). Willey.

Rausch, M. T. (2006). *Condition based maintenance of a single system under spare part inventory constraints*. tese, Wichita State University.

Reliable Plant. (n.d.). *New maintenance strategy delivers many benefits*. Retrieved 2011 31-05 from <http://www.reliableplant.com/Read/10112/maintenance-strategy>

Saaty, T. L. (2008). Decision making in the analytic hierarchy process. *Int. J. Services Sciences* , 1, p. 83.

Sanders, R. E. *Chemical Process safety learning from case histories book - an eight inch elbow rupture from internal corrosion and a blast results in worldwide feedstocks disruptions.*

Sherwin, D. (2000). A review of overall models for maintenance management. *Journal of quality in Maintenance Engineering* , 6, pp. 138-164.

Slovic, P. (2000). *The perception of risk*. London: Earthscan Publications.

Spampinato, M., & Curcio, G. (2008 Novembro). Aged interconnecting piping integrity management. *Hydrocarbon Processing Magazine* , pp. 93-96.

Sparago, M. T. (2000). *Patent No. 6,047,241*. EUA.

Sutherland, R. B. (1997 Outubro). Prevent piping failures. *Hydrocarbon Processing* , 76.

The oil drum. (2010 14-agosto). *The enbridge michigan pipeline oil spill - some clues as to what may have happened*. Retrieved 2011-24-Maio from <http://www.theoil drum.com/node/6848>

Timmins, P. (1996). *Predictive corrosion and failure control in process operations: as applied to the refining, petrochemical and process industries*. (A. International, Ed.)

Tino, A., Wiryolukito, D., & Abduh, M. (2008 Fevereiro). Corrosion short course. *Petroenergy Magazine* .

Vanderpooten, D., & Roy, B. (1996). The European School of MCDA: Emergence, Basic Features and Current Works. *Journal of Multi-criteria Decision Analysis* , 5, pp. 22-38.

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

Veldman, J., Klingenberg, W., & Wortmann, H. (2011). Managing condition-based maintenance technology. *Journal of quality in maintenance engineering* , 17, pp. 40-62.

Wang, L., Chu, J., & Wu, J. (2006). Selection of optimum maintenance strategies based on a fuzzy analytic hierarchy process. *Internatinal journal of production economics* , 151-163.

Anexos

Anexo A – Refinaria de Matosinhos



Figura 13 – Imagem da refinaria de Matosinhos

Com a reestruturação do sector energético em Portugal, é constituída em 22 de Abril de 1999, a Galp Energia. A Galp Energia agrupou a Petrogal – a empresa refinadora e principal distribuidora de produtos petrolíferos – e a GDP - sociedade responsável pela importação, transporte e distribuição de gás natural em Portugal. Actualmente, a Galp Energia é a principal empresa integrada de produtos petrolíferos e gás natural do país, com uma presença crescente em Espanha e uma actividade em desenvolvimento no sector da produção e de fornecimento de energia eléctrica e térmica.

O conjunto refinador da Galp Energia é constituído por dois pólos, as refinarias do Matosinhos e de Sines. Estas refinarias garantem uma capacidade de destilação total de 15,2 milhões de toneladas por ano, o que representa 21 por cento da capacidade de refinação na Península Ibérica. Sob a marca Galp, é comercializado em Portugal e em Espanha um volume correspondente a 70 por cento da actual produção das refinarias do Grupo.

<i>Instalação de Processo</i>	<i>Capacidade de Tratamento (toneladas / ano)</i>	<i>Unidades de Processo</i>
▪ FCO: Fábrica de Combustíveis	3.230.000 de petróleo bruto	17
▪ FOB.: Fábrica de Óleos Base	1.180.000 de petróleo bruto	8
▪ F.L.: Fábrica de Lubrificantes		3
▪ Óleos Lubrificantes (FLT)	80.000+ de óleos base parafínicos	
▪ Massas Lubrificantes (FML)	2.000+ de óleos base parafínicos	
▪ FAR: Fábrica de Aromáticos	440.000+ de produtos da FCO	7
▪ FUT: Fábrica de Utilidades	---	7
▪ MOV: Movimentação de Produtos	---	8
▪ EXP: Expedições	---	4
▪ TER: Terminal	---	1
▪ FLAR: Flares	---	3
▪ ETAR: Estação Tratamento Águas Residuais	---	1
▪ ETA: Estaç. Tratam. Águas de Vilarinho	---	1

Figura 14 – Capacidade de Tratamento da Refinaria de Matosinhos

Principais Fábricas da Refinaria de Matosinhos

Sigla	Nome	Função	Matéria Prima
FCO	Fábrica de Combustíveis	Dada a flexibilidade e interligação das suas instalações, trata uma grande variedade de petróleos brutos, permitindo adequar a qualidade da matéria-prima a processar às necessidades do mercado. Produz grande parte de matéria-prima que alimenta a Fábrica de Aromáticos e Solventes. 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.	Utiliza o petróleo bruto e outras matérias-primas, para obter toda a gama de produtos combustíveis. O petróleo bruto é transportado por via marítima e, posteriormente, descarregado no Terminal do porto de Leixões, sendo conduzido até à armazenagem da Refinaria de Matosinhos pelo respectivo <i>pipeline</i> .
FAR	Fábrica de Aromáticos	Complementa a indústria de refinação do Complexo, produzindo matéria-prima para a para a indústria petroquímica e solventes de uso geral.	Localiza-se a jusante da Fábrica de Combustíveis da qual recebe a respectiva carga.
FOB	Fábrica de Óleos Base	Fracciona o resíduo mais pesado, após uma separação prévia das fracções dos hidrocarbonetos mais leves, que são enviados para a Fábrica de Combustíveis. Tem como objectivo produzir destilados que são o primeiro estágio da produção de óleos base.	Materiais que resultam do aproveitamento de subprodutos das diversas fases de refinação dos óleos, como: parafinas, betumes, etc.

Na Fábrica de Utilidades são produzidas as necessidades de ar comprimido, vapor e de energia eléctrica para o complexo, enquanto que a fábrica de lubrificantes tem uma capacidade de produção de óleos lubrificantes de 80.000 toneladas por ano. Na Movimentação de Produtos, Expedição e Terminal procede-se à armazenagem e movimentação de matérias-primas e produtos. São ainda da responsabilidade da Refinaria de Matosinhos as Estações de Tratamento de Águas Residuais– ETAR – e de Águas de Vilarinho– ETA – bem como as instalações de libertação das emissões gasosas do Complexo – Flares.

A localização destas instalações dentro do complexo da refinaria encontra-se na Figura 15.

Em breve está prevista a entrada em funcionamento de duas novas unidades na refinaria – a de cogeração na fábrica de utilidades e a de *vacuum visbreaker* na FCO.

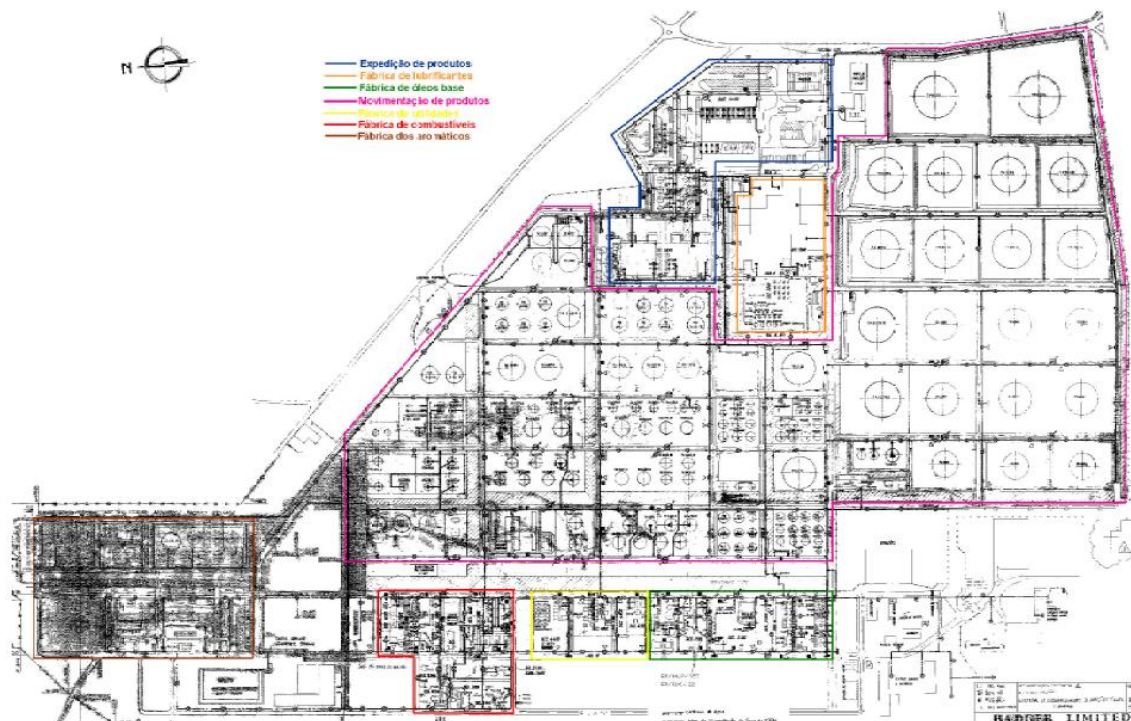


Figura 15 – Mapa da Refinaria de Matosinhos

Unidade 3000

A Unidade 3000 inclui três secções: Destilação Atmosférica, Fraccionamento de Gasolina (desexanizador) e Estabilização da Gasolina Leve (desbutanizador). Nesta unidade de processo, submete-se a carga (petróleo bruto) a uma destilação fraccionada de onde se obtêm produto de topo (gases, gasolina leve e gasolina pesada), petróleo, gasóleo e resíduo atmosférico. O produto de topo é então submetido a um fraccionamento (“splitting”) para produzir gasolina leve e gasolina pesada, seguindo esta como carga da Unidade de Dessulfuração de Gasolina Pesada (*Unifining*). Por outro lado, a gasolina leve será submetida a uma desbutanização, com produção de LPG para a Unidade de Recuperação de Gases. Os restantes produtos são enviados para a armazenagem.

A alimentação da unidade é normalmente constituída por uma mistura de diversos petróleos brutos com diferentes características, de modo a optimizar e ajustar as produções obtidas às necessidades do mercado. A alimentação á unidade é feita directamente a partir da armazenagem de petróleo bruto.

A secção de rectificação desta unidade é também alimentada com o produto de topo do topping da Unidade 2000 da Fábrica de Óleos Base. Este constitui a fracção destilada mais leve do petróleo bruto com um ponto final de destilação de 165°C.

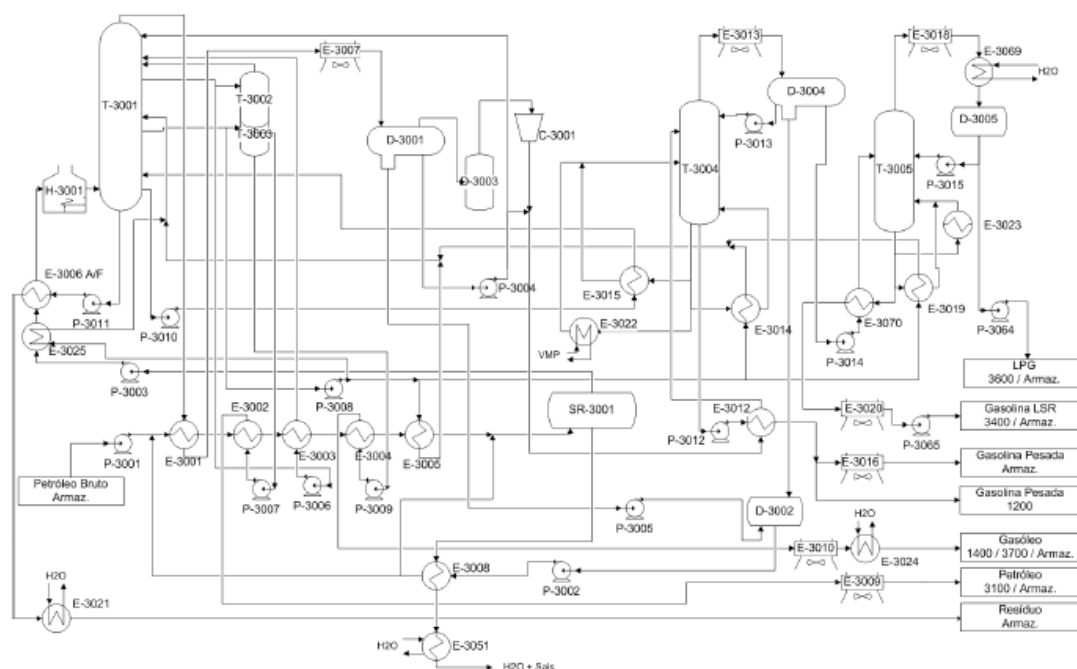


Figura 16 – Representação esquemática da unidade 3000

Anexo B - Inspeção de tubagens

Procedimento inspeção de tubagens

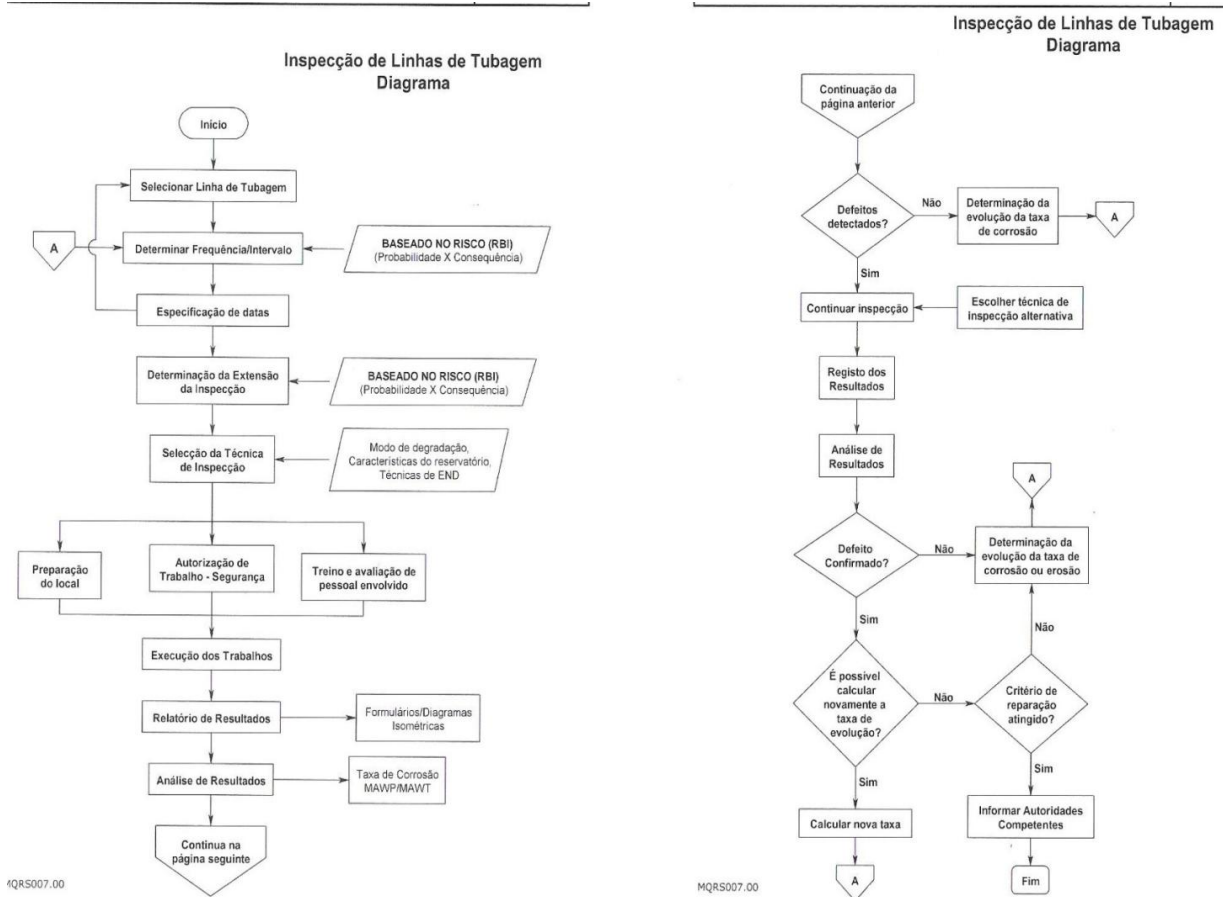


Figura 17 – Procedimento de inspeção de tubagens na refinaria de Matosinhos

Técnicas de Inspeção em serviço

1. Tecnologias de aplicação externa

a) Inspeção visual

Inspeções visuais externas de linhas de tubagem sobre o solo são extremamente importantes em qualquer procedimento de inspeção. A experiência dos técnicos é fundamental, pois permite detecção de sintomas, tais como fugas, desaperto de componentes, fissuras, etc. São rápidas e económicas, e envolvem a análise por parte dos inspectores do estado exterior da linha, nomeadamente através da análise de mecanismos de corrosão, como possível formação de óxidos, por exemplo.

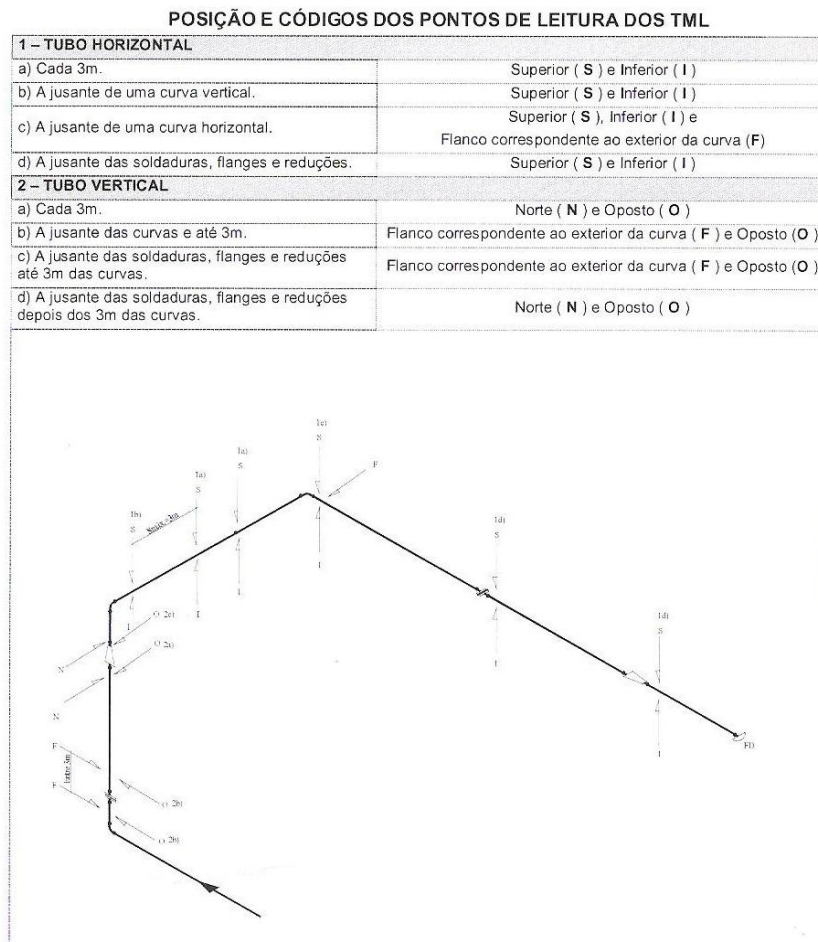
b) Medição de espessuras: Os TMLs (*Thickness monitoring locations*) são essenciais para monitorizar as espessuras das linhas. São pontos pré definidos ao longo da linha, onde a medição de espessuras é realizada aquando da inspecção da tubagem, tal como se verifica na coluna *valor medido* da Figura 18, para depois ser comparada com a espessura prevista do projecto.

Ponto medido	Espessura de projecto [mm]	Espessura mínima adm. [mm]	Valor medido [mm]	Fotos	Observações
13	4,9	3,8	3,0	Foto 3	Corrosão generalizada com formação de lamelas espessas, que se destacam com martelagem.
14	4,9	3,8	2,8	Foto 3	
15	4,9	3,8	2,5	Foto 3	
66	4,9	3,8	3,3	Foto 2	
67	4,9	3,8	3,2	Foto 2	
68	4,9	3,8	2,9	Foto 2	

Figura 18 - Inspeção à linha de petróleo 3: 4-P30-3091-1-B1R e 4-P30-3091-2-B1R

Ao serem pontos estratégicos e posicionados de acordo com procedimentos elaborados, é possível comparar as medições por ultra-sons realizadas na inspecção mais recente com as realizadas anteriormente, e deste modo comparar valores e calcular taxas de corrosão – consultar exemplo de relatório de inspecção, no fim deste anexo.

Um exemplo do posicionamento dos TML's em troços horizontais e verticais encontra-se na Figura 19.



Na prática, a corrosão nunca é verdadeiramente uniforme, sendo que possível que uma linha fure milímetros ao lado do ponto onde foi efectuada uma medição de espessura válida. Para atenuar este efeito, pode então ser necessário, de acordo com o API 570, medir até 4 TML's por ponto, como é o caso de joelhos, curvas e tês, pois são locais muito propícios a corrosão, tanto uniforme, externa assim como sob isolamento. De forma a ajudar à inspecção, os TML's devem estar marcados na isométrica do desenho aquando da inspecção, de modo a não permitir subjectividade por parte do inspector na decisão da localização dos TML's.

c) Queda de potencial

Determina a profundidade de fissuras por fadiga, pois a corrente alterna pelo seu efeito superficial é bastante sensível a fissuras superficiais

2. Tecnologias de aplicação interna

a) Fuga de fluxo magnético

Em uso há mais de 40 anos e a mais utilizada para inspecção de pipelines, apresenta falhas na precisão. Permite detectar corrosão, defeitos de fabrico, danos mecânicos e defeitos longitudinais.

b) TFI (*Transversal Field Inspection*): Inspeção por campo transversal.

Permite detectar fissuras, falta de fusão em soldaduras longitudinais, zonas de corrosão sob tensão. Falta ainda alguma precisão, falha na detecção devido ao ar existente no vazio das fendas mais profundas. É melhor para corrosão sob tensão em meios com “quase pH neutro” devido ao espaço intragranular ser tipicamente menor.

3. Ensaios não destrutivos

A realização de ensaios não destrutivos permite avaliar o estado do equipamento no momento do ensaio. São ensaios do tipo “passa” ou “não passa”, ou seja, apenas dá a indicação da existência ou não de problemas durante o ensaio. Estes ensaios são realizados após a construção dos equipamentos e tubagem, de acordo com os códigos de construção, e periodicamente durante a vida dos mesmos, quando há intervenção no equipamento, ou suspeitas da sua integridade para aguentar as pressões que lhe são impostas em serviço. (Galp Energia)

a) Teste hidrostático

Aplicação de uma carga (pressão), utilizando um liquido de teste, maior que a carga máxima gerada em serviço, mas menor que uma carga que causaria danos físicos, de forma a demonstrar que este equipamento ou tubagem é capaz de suportar a carga de serviço com segurança.

b) Teste de fuga

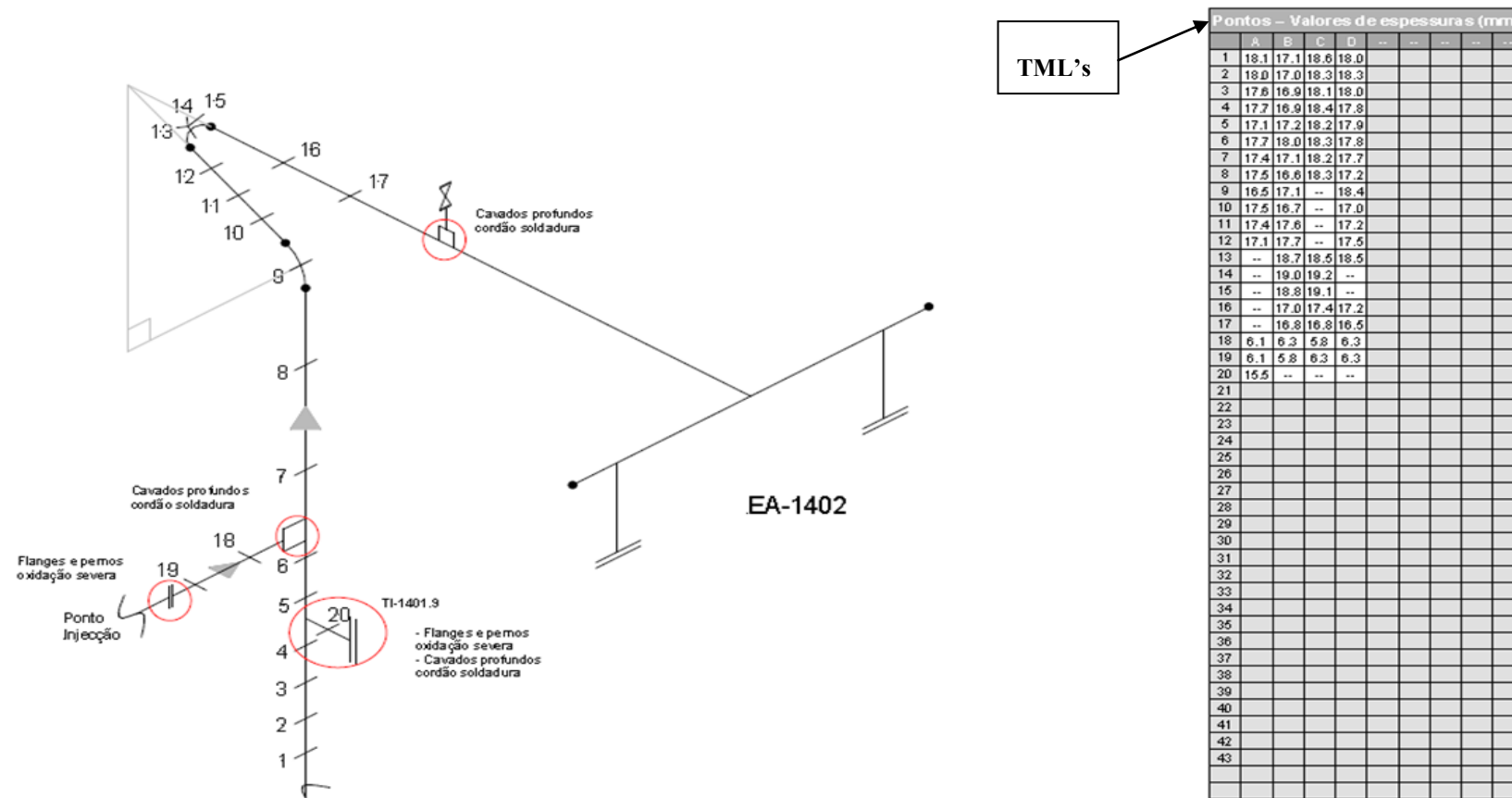
Aplicação de uma pressão diferencial para detectar locais de fuga e taxas de fuga. A pressão a aplicar, através de líquido ou gás, pode ser muito mais baixa que a máxima pressão de trabalho.

c) Teste pneumático

O mesmo que o teste hidrostático, mas utilizando um meio compressível de teste como ar, gás natural ou azoto.

Relatório modelo de inspecção

		RELATÓRIO DE INSPECÇÃO INSPECTION REPORT ESTÁTICA STATIC EQUIPMENT		
Página 1 de 4				
LISTA DE VERIFICAÇÃO PARA INSPECÇÃO EM PARAGEM SHUTDOWN INSPECTION CHECKLIST				
LINHAS PIPELINE				
N.º relatório	Equipamento	Unidade	Origem do pedido	Nota
EE 100190	6" P 0211-Dvt	1400		
Assunto				Ordem
INSPECÇÃO EM PARAGEM À LINHA 6" P 0211-Dvt				
1 Sumário				
Inspeção programada de pontos críticos, inserida na paragem sectorial do complexo de 10/2010. Linha efluente do R-1401, Gasóleo Sulfurado. Injecção de Água de Lavagem. Inspeção visual e medição de espessuras de pontos críticos, com vista à avaliação do estado de conservação e espessuras actuais da linha.				
2 Referências				
- Especificação Petrogal - API 570 – Piping Inspection Code - Desenhos do arquivo - Isométrica PRC-3049-3-52-105				
3 Âmbito da Inspeção				
Esta inspeção tem por âmbito o controlo de pontos críticos por inspeção visual da linha, controlo visual das soldaduras e suportes e medição de espessuras para avaliação da sua conformidade para o serviço a que se destina.				
4 Condição observada				
A linha apresenta protecção anti-corrosiva degradada, oxidação severa de flanges e pernos, corrosão severa em cordões de soldadura na picagem do ponto de injecção. Os pontos medidos representados na isométrica anexa, apresentam os valores de espessura indicados.				
5 Observações complementares				
Linha efluente do R-1401, Gasóleo Sulfurado. Efectuada inspeção às zonas acessíveis, na zona de injecção.				
6 Conclusões				
Substituir troço inspeccionado, do T1 (inclusive) até ao colector do aero-arrefecedor.				
7 Anomalias / Recomendações				
Prioridades: Emergência / Urgência / P1 / P2 / P Com base nos resultados da inspeção efectuada, recomendam-se as seguintes acções correctivas:				
Nº	Local	Anomalia	Recomendação	Pr
1	Linha	Cordões soldadura das picagens cavados profundos.	Substituir linha desde ponto 3 ao aero AE-1402	
2	Linha	Flanges e pernos severamente oxidados	Substituir flanges e pernos entre T1 (inclusive) e aero	
Data da Inspeção		Elaborado por :	Data:	Visto por : Data:
10/2010		 João Serra	11/2010	



DADOS DA LINHA:		Especificação:	Dvt			
Produto:	Gasóleo Sulfurado	Schedule:	160	--		
Isométrica:	PRC-3049-3-S2-105	Diâmetro: [pol]	6"	1 1/2"		
Identificação da linha:	6"P-0211-Dvt	Espessura nominal: [mm]	18.26	5.08		
Pressão de serviço: [kg/cm²]		Sobresspesura de corrosão: [mm]	6.0			
Temperatura de serviço: [°C]	145°C	Isolamento:	Não			

Anexo C – Tipos de corrosão

A corrosão sempre foi um problema importante para as refinarias, que se tem vindo a agravar com o uso de químicos mais agressivos e temperaturas e pressões mais altas, que resultam no agravamento das taxas de corrosão. (Hydrocarbon Processing, 1997) Cada linha irá sofrer corrosão a uma taxa específica que é função de várias variáveis, incluindo por exemplo o tipo de fluido transportado, materiais de construção e temperaturas e pressões operacionais. (Sparago 2000)

As tubagens com o passar do tempo tendem a ser afectadas pelos seguintes mecanismos de corrosão (Spampinato e Curcio 2008) :

-CUI (*corrosion under isolation*)

-corrosão nos suportes

-corrosão no contacto com o solo

-corrosão interna resultante das características do fluido

-corrosão atmosférica

-corrosão nas zonas mortas

Corrosão é então a tendência natural dos materiais em voltarem ao seu estado termodinâmico mais estável, sendo normalmente este processo de degradação para os materiais. (Tino, Wiryolukito e Abduh 2008). Torna-se então essencial o controlo deste fenómeno, normalmente por três maneiras diferentes: controlo do ambiente, design dos materiais e design duma barreira entre o material e o meio envolvente.

O objectivo da inspecção de linhas de tubagens é sempre determinar a evolução da taxa de corrosão. De modo a atingir um valor mais conservador, tem-se vindo a adoptar a análise laboratorial do fluido circulante na linha de tubagem, que torna possível de uma forma mais acurada a definição de um valor para a taxa de corrosão. Este método, denominado calculado, apresenta também outra vantagem comparativamente ao tradicional, pois permite obter taxas de corrosão de linhas isoladas. Isto porque a medição através de ultra-sons não pode ser realizada em tubagens com temperaturas operacionais elevadas, pois estas para além de não fornecerem medições fiáveis, danificam também as sondas por causa do calor excessivo.

A explicação dos diferentes tipos de corrosão apresenta-se de seguida, na Tabela 10.

Tabela 10 – Descrição dos diferentes tipos de corrosão

Tipo de corrosão	Descrição
CUI – Corrosão sob isolamento	Separar um material facilmente afectado por um ambiente corrosivo através do uso de uma camada de isolante é a resposta mais frequente para controlar a corrosão atmosférica. No entanto, embora este método permita resolver alguns problemas, também provoca outros. O aparecimento de CUI dá-se na parede externa em aços da tubagem, sendo o resultado da permanência prolongada das superfícies metálicas isoladas em contacto com a humidade. Este tipo de corrosão é um motivo de preocupação em unidades industriais, na medida em que as consideráveis perdas de espessura daí resultantes podem dar origem a uma súbita falha no equipamento isolado. Isto porque torna-se mais difícil, e consequentemente menos frequente, a inspecção de linhas isoladas, devido à necessidade de retirar o isolamento para que este tipo de linha possa ser analisada correctamente. Daí que a extensão da degradação por CUI possa por vezes não ser detectada numa fase inicial, de forma a permitir a tomada de medidas preventivas, acabando muitas vezes por ocorrerem vazamentos com elevado grau de perigosidade, levando a indústria a despendar avultadas somas em reparações e substituições de materiais (Galp Energia s.d.).  Figura 20 - Fenómeno de CUI Segundo a API 571, alguns dos factores para o aparecimento deste tipo de corrosão são então: - Design do sistema de isolamento, tipo de isolamento, meio envolvente (humidade, chuvas e cloretos (especialmente presentes em ambientes marítimos, tais como o da refinaria de Matosinhos); - Gama de temperaturas entre os 100-121°C, onde a água tem mais dificuldade em evaporar, ficando então o isolamento húmido durante mais tempo; - Operações cíclicas ou intermitentes; - Tubagens que operem abaixo do ponto de orvalho da água, tornando-se mais propícia a condensação de água na superfície do metal; - Deficiências ao nível da protecção por pintura do isolamento.

	Ao longo de todo o comprimento da tubagem, existem áreas de maior vulnerabilidade à degradação por CUI, sendo estas as que oferecem maiores dificuldades para garantir a hermeticidade do isolamento, em virtude das formas irregulares dos componentes a isolar. Consequentemente, pode ocorrer infiltração de água que vai manter-se em contacto permanente com as superfícies metálicas, particularmente nas secções horizontais das linhas de tubagens, e em especial junto a suportes, picagens, ligações para instrumentação, flanges, válvulas e vents. Por exemplo, o aparecimento de CUI verifica-se frequentemente nas zonas de apoio/patins das linhas. Daí o uso de meias canas, para que sejam estas a sofrerem o fenómeno de corrosão e não as tubagens e apoios. À medida que nos afastamos da zona de contacto há menos incidência de CUI. Para além disso, são consideradas zonas de risco aquelas localizadas em zonas cujo isolamento seja susceptível de degradação mecânica por passagem de trabalhadores.
Corrosão atmosférica	Tipo uniforme de corrosão geral, que tem como variáveis críticas para o seu desenvolvimento a presença de oxigénio, uma determinado gama de temperaturas e a existência de água. Este fenómeno é muito recorrente em linhas de aço ao carbono em funcionamento sem isolamento exterior – caso das linhas de vapor, por exemplo.  Figura 21 - Pitting com 1,5 mm no troço horizontal
Corrosão galvânica	É uma forma de corrosão localizada que ocorre nas juntas de metais diferentes quando estes são postos em contacto, sendo que, segundo o API 571, o metal menos nobre sofre de perdas generalizadas de espessura,



Figura 22 - Fenómeno de corrosão galvânica entre a linha e o suporte

Ou seja, o metal mais nobre, catódico, é protegido devido à corrosão *sacrificial* do material menos nobre – ânodo. Este último irá então sofrer corrosão a uma taxa mais elevada do que caso não estivesse ligado electricamente ao metal mais nobre.

Anexo D – Estratégias de manutenção

Nome da estratégia	Princípios base
Terotecnologia	Metodologia que 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 actuais, dando ainda ênfase à necessidade de utilização de FME(C)A's. (Sherwin 2000)
Total quality maintenance (TQM)	Este modelo aposta na recolha de dados dos diferentes equipamentos, avaliando o sucesso destes através do OPE – <i>Overall Process Effectiveness</i> – que permite o cálculo da eficiência de todo o processo e não apenas de uma máquina. Necessita de dados que não são possíveis de obter no estudo das tubagens, tais como o número de paragens, a taxa de reparações ou nº de defeitos que aparecem logo a seguir às paragens. É portanto mais adequado a equipamentos dinâmicos.
Total productive maintenance (TPM)	Parte do princípio que operadores devem ser consciencializados para a realização de cuidados primários nos equipamentos, tais como limpeza, lubrificação e eliminação de fugas, responsáveis pela degradação acelerada do equipamento. No entanto o número de linhas é demasiado elevado na refinaria para que estas medidas sejam aplicáveis. Para além disso, não tem em conta a parte económica da manutenção.
Reliability centered maintenance (RCM)	Estabelece um calendário de programas de manutenção. Técnica pré eminente de manutenção programada.

Anexo E – RBI**Inputs e outputs do RBI**

De modo a ser possível ao software ter a informação necessária para calcular todos os outputs necessários, existe necessidade de um levantamento de dados inicial sobre as características da linha, de acordo com o exemplificado na Figura 23.

		1. EQUIPAMENTO ESTÁTICO SOB PRESSÃO 2. R.B.I. – LEVANTAMENTO DE DADOS				PÁG. DE		
D.R.P. – ÁREA DE INSPECÇÃO								
Complexo Industrial		Instalação de Processo		Unidade Processual				
Equipamento N°		Designação do Equipamento				Sistema de Inventário		
1. Dados do Equipamento								
1.1	Temp. [°C]	Pressão [Kg/cm ²]	Caudal [m ³ /h]	Data início serviço	Ø Exterior	Comprimento	Espessura	Sobressess. Corr.
1.2	Equipamento bocais / tubuladuras (≥ 2")		Tubagem N° válvulas (excepto PSVs)		N° picagens	N° ligações flangeadas	Anos Vida Projecto	Média de paragens / ano programadas não-programadas
1.2	Projecto Temp. [°C] Pressão [Kg/cm ²]		S/N	Isolamento Condição abaixo média acima		Complexidade abaixo média acima	Pintura S/N Condição Boa? Data de Pintura	
1.3	Material Base Especificação		That Normalização	PWHT	S/N	Especificação	Revestimento (Lining) Condição má média boa	
1.4	Outras informações relevantes							

Figura 23 - Levantamento de dados para mecanismos de degradação específicos de linhas de tubagem

Para apoio ao desenvolvimento do plano de inspecções, o RBI disponibiliza cinco grandes painéis de análise específica, directamente relacionados com os principais módulos técnicos de degradação.

No caso das tubagens, os módulos de interesse do RBI serão então o Planeamento de Inspecção para a Perda de Espessura (*Inspection Planning – Thinning*) e o Planeamento de Inspecção para Corrosão Externa (*Inspection Planning – External*). Para determinar a perda de espessura, que inclui fenómenos como a corrosão geral, localizada e *pitting*, são necessários, é utilizado o layout representado na Figura 24.

2. Informação relativa a Mecanismos de Degradação									
2.1 PERDA DE ESPESSURA (THINNING)									
Tipo de corrosão		Taxa de corrosão		Monitorização em linha					
Localizada		Estimada	mm/ano	Inexistente		Sondas de corrosão (p.ex. hidrogénio)			
Generalizada		Medida	mm/ano	Controle variáveis chave do processo		Coupons de corrosão			
Suplementos (Questionário Despiagem)				Parâmetros requeridos pela metodologia					
Corrosão por Ácido Clorídrico		pH		%Cl ⁻ peso			O ₂ ?		
Corr. Ác. Sulfid. / Naftén. alta temp ^a		%S peso		TAN			vel. m/s		
Corrosão por H ₂ S / H ₂ alta temperatura		% H ₂ S mole							
Corrosão por Ácido Sulfúrico		% H ₂ SO ₄ peso		vel. m/s					
Corrosão por Ácido Fluorídrico		% HF na água		vel. m/s			O ₂ ?		
Corrosão por Águas Ácid. (Sour Water)		% NH ₄ HS na ág		ou Kp			vel. m/s		
Corrosão por Amina(s)		Tipo		% HSAS peso			vel. m/s		Gás ác.
Oxidação a altas temperaturas									
2.2 DEGRADAÇÃO EXTERNA (EXTERNAL DAMAGE)									
Taxa de corrosão		Suportes (tubagem)		Interface Ar / Solo ou água		Isolamento livre de chreiros			
Estimada	mm/ano	Permite manutenção pintura		Sim		Sim			
Medida	mm/ano	Dificulta manutenção pintura		Não		Não			

Figura 24 – Inputs para o cálculo do modo de perda de espessura

O RBI também tem em conta as inspecções feitas no terreno, usando, por exemplo, o pior valor dos *TML*'s medidos na linha como input para calcular a taxa de corrosão. Ou seja, de cada vez que existem actualizações do estado da linha resultado de inspecções ou mudança dos parâmetros iniciais, tais como a pressão e temperatura operacionais, é feita uma reavaliação do estado do equipamento pelo RBI.

De referir também que as acções de mitigação do risco tomadas apenas podem afectar a probabilidade de falha da linha, não a consequência de falha. Pois por mais medidas de inspecção efectuadas, a consequência mantêm-se inalterável. (Otero e Turrubiarres 2003)

O *output* desta análise será então a determinação da consequência e probabilidade de falha, e do consequente risco associado, calculado através da multiplicação destes factores. O risco da linha é calculado através do produto PdF x CdF. O nível de risco calculado poderá pertencer a uma das 4 categorias pré definidas: alto, médio-alto, médio-baixo e baixo, representadas pela Figura 25.

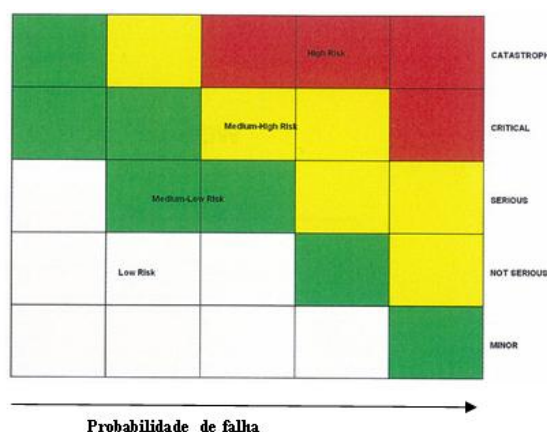


Figura 25 – Matriz da análise do risco do RBI

Cada empresa pode definir os seus níveis de risco aceitáveis, dependendo dos níveis considerados prudentes de risco de segurança, ambientais e financeiros. (American Petroil Institute, 2002) O risco elevado corresponde a um trabalho sempre justificado, médio alto a um trabalho geralmente justificado e médio-baixo a um trabalho não justificável no qual se deve mitigar o risco.

Outro *output* do RBI serão também as possíveis datas para manutenção/inspecção da linha, que serão então 3: a data actual (quando se realiza a análise feita pelo RBI), a data planeada (definida pela refinaria como data de paragem da unidade em que está inserida a linha), e a data antecipada, calculada pelo RBI quando o risco definido na data planeada é considerado elevado.

Para isto, em primeiro lugar, o RBI tem em conta uma data escolhida pela refinaria para possível paragem da unidade em que está inserida a linha. Esta seria a data em que se efectuariam a manutenção oportunística à linha, ou seja, já que a unidade está parada pode-se aproveitar para inspecionar as linhas.

Existem então 3 possíveis situações que podem vir a acontecer, segundo o API 581:

1. O risco admissível é excedido num ponto anterior à data planeada pela refinaria. Este é o caso mais comum, representado pelo gráfico 8. A data antecipada será então a data onde é expectável que o risco admissível seja atingido, sendo portanto nesta data recomendada a realização de uma inspecção/monitorização do equipamento, de modo a confirmar a avaliação do estado da tubagem prevista pelo software.

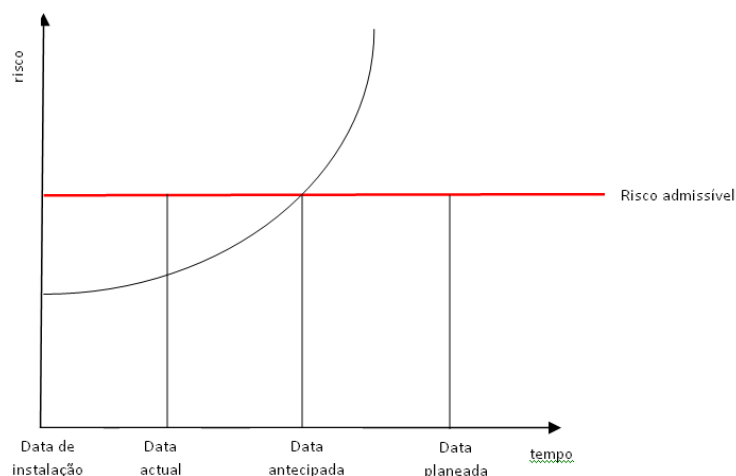


Gráfico 4 – Situação em que o risco admissível é excedido antes da data planeada

O critério passará por definir uma data antecipada para inspecção/monitorização caso o risco na data planeada pela refinaria seja igual ou superior a 3E – ou seja, nível 3 na probabilidade de falha e grau E, o mais perigoso, nas possíveis consequências. Sendo que 3E foi definido previamente como o grau a partir do qual a linha é considerada perigosa. Isto porque, por exemplo, se a linha tiver um valor de consequência do risco elevado, não pode sequer ser ponderada a possibilidade de efectuar manutenção correctiva, pois mesmo que os custos deste tipo de opção sejam inferiores aos outros dois, as consequências são demasiado graves para que a hipótese de acontecerem seja

correctiva. Outro caso pode ser o de uma linha em que embora a consequência de falha seja baixa – nível A por exemplo – a importância da linha para a unidade é bastante elevada (IV). Neste caso, a possibilidade de só efectuar manutenção correctiva também não poderá ser equacionada, não só devido à importância da linha mas também porque os custos de parar uma unidade (150 000/ 200 000 € por dia) são superiores a qualquer tipo de custos de manutenção preventiva que possa ser efectuada.

No caso da Figura 10, visto que o grau de risco é elevado na data referida pela refinaria (5C em 2020), o RBI definiu uma nova data 6 anos antes do previsto (2014) para que a linha fosse inspecionada.

2. O risco na data planeada não excede o risco admissível. É necessário avaliar se é justificável efectuar medidas de inspecção, dependendo de factores como a importância da linha.

3. O risco é excedido e considerado crítico já na data actual, aquando da realização do RBI. Neste caso é recomendada uma inspecção imediata, para determinar as medidas de mitigação do risco a implementar, de modo a baixar o nível de risco.

De referir que caso se opte por uma manutenção baseada na substituição de grande parte da linha, o RBI terá de ser calculado novamente, assim como as referidas datas, pois estaremos perante uma situação em que a linha será considerada como nova.

Dados do RBI da unidade 3000

a) Excerto da Tabela sumário

Tabela 11 – Excerto da Tabela resumo dos outputs do RBI para a U3000

nome linha	RBI actual		RBI antecipado			Plan Date No Insp		Plan Date w / Insp	
	15-05-2008					15-06-2015			
	RBI actual			rbi antecipado		rbi sem		rbi com	
L-CB-30156-1-4in Af	4B	MEDIUM-LOW	2008-05-15	4B	MEDIUM-LOW	5B	MED-HIGH	5B	MED-HIGH
L-CB-30993-1-2in Af	5A	MEDIUM-LOW	2008-05-15	5A	MEDIUM-LOW	5A	MEDIUM-LOW	5A	MEDIUM-LOW
L-ED-30154-1-4in Bb	4A	LOW	2008-05-15	4A	LOW	5A	MEDIUM-LOW	4A	LOW
L-ED-30283-1-1in Bb	5A	MEDIUM-LOW	2008-05-15	5A	MEDIUM-LOW	5A	MEDIUM-LOW	5A	MEDIUM-LOW
L-ED-30967-1-3in Bb	4A	LOW	2008-05-15	4A	LOW	5A	MEDIUM-LOW	4A	LOW
L-EP-30990-1-1in La	5A	MEDIUM-LOW	2008-05-15	5A	MEDIUM-LOW	5A	MEDIUM-LOW	5A	MEDIUM-LOW
L-EP-30995-1-1in La	5A	MEDIUM-LOW	2008-05-15	5A	MEDIUM-LOW	5A	MEDIUM-LOW	5A	MEDIUM-LOW
L-ER-30151-1-4in Lm	1A	LOW	2015-06-15	1A	LOW	1A	LOW	1A	LOW
L-ER-30152-1-4in Lm	1A	LOW	2012-07-25	3A	LOW	4A	LOW	4A	LOW
L-ER-30161-1-0.75in Lm	4A	LOW	2008-05-15	4A	LOW	5A	MEDIUM-LOW	5A	MEDIUM-LOW
L-ER-30164-1-0.75in Lm	5A	MEDIUM-LOW	2008-05-15	5A	MEDIUM-LOW	5A	MEDIUM-LOW	5A	MEDIUM-LOW
L-ER-30170-1-0.75in Lm	5A	MEDIUM-LOW	2008-05-15	5A	MEDIUM-LOW	5A	MEDIUM-LOW	5A	MEDIUM-LOW
L-ER-30360-1-1in Lm	2A	LOW	2008-10-23	3A	LOW	5A	MEDIUM-LOW	5A	MEDIUM-LOW
L-ER-30361-1-1in Lm	1A	LOW	2013-05-14	3A	LOW	4A	LOW	3A	LOW
L-ER-30363-1-0.75in Lm	1A	LOW	2009-11-12	4A	LOW	5A	MEDIUM-LOW	4A	LOW

b) Matriz de risco

Unit: FCO-3000						
Likelihood Category	Consequence Category					
	A	B	C	D	E	
5	63	23	9	21	7	123
4	11	4	1	4	1	21
3	0	0	0	0	0	0
2	0	5	1	1	1	8
1	41	28	14	36	5	124
	115	60	25	62	14	

	Nº equipamentos	%
High	29	11%
Medium High	106	38%
Medium	67	24%
Low	74	27%

Anexo F – Análise PHA (Preliminary hazard analysis)

Evento	Causa	Consequências Possíveis	Prevenção/Protecção
Impacto mecânico na linha causa uma fuga de fluido	Obras ou actividades de manutenção na área circundante à linha	Vazamento de fluido. Se este for inflamável e houver fonte de ignição, podem ocorrer incêndios e/ou explosões. Possibilidades de lesões humanas e danos na propriedade, dependendo das características da linha.	- Protecção mecânica das linhas - Responsabilização severa das empresas responsáveis pelos danos caso estes aconteçam
Fuga provocada por corrosão	- Danos no isolamento que não foram mitigados de forma a reparar o estado deste; - Meio envolvente do equipamento, propicio à ocorrência de fenómenos de corrosão - Falta de acções de inspecção e/ou manutenção	Libertação de fluido para o exterior, com as potenciais consequências resultantes, dependendo das características da linha	- Protecção catódica para prevenir a corrosão externa; - Uso de inibidores de corrosão para prevenir corrosão interna - Colocação de isolamento na parte exterior das linhas - Inspecções de rotina, usando várias técnicas de inspecção
Incêndio em instalação/equipamento próximo à linha	- Acontecimento grave ocorrido perto da linha, devido a algum problema num qualquer tipo de equipamento	Possíveis danos na linha, que a podem danificar não só a nível mecânico mas podem também originar consequências graves caso este derrame fluido para o exterior.	Cumprimento dos procedimentos de segurança aprovados; Adopção de uma estratégia adequada para inspecção e manutenção de todos os equipamentos da refinaria.
Perda espontânea de integridade da linha	- Erro de construção ou erro operacional repetitivo	Vazamento de fluido para o exterior, com as consequências resultantes	- Existência de um bom plano de acção para o caso da ocorrência de uma fuga; - Monitorização contínua da linha de modo a avaliar uma potencial deterioração das condições
Danos no equipamento resultantes de erosão	- Condições Operacionais não apropriadas	Danos no isolamento e consequente aparecimento de fenómenos de corrosão. Se não forem corrigidos podem levar a linha a falhar	Monitorização das condições da linha

Anexo G – Parâmetros considerados no cálculo do número de criticidade

Probabilidade de falha

Tabela 12 - Correspondência entre o valor definido pelo RBI e o que irá ser utilizado no cálculo do número de criticidade

Grau definido pelo RBI	Grau de probabilidade de falha	Correspondência
5	5	Elevado
4	4	Médio-elevado
3	3	Médio
2	2	Médio-baixo
1	1	Baixo

Consequência de falha

Categorias de consequências

1. Categoria de consequências pessoais/perdas humanas

Esta categoria define o grau de consequência dependendo da possibilidade de lesões para os trabalhadores da refinaria e para a população envolvente

Tabela 13 – Graus de consequência a nível pessoal

Consequência	Grau	Danos
E	5	Muitas fatalidades/mortes
D	4	Pelo menos uma morte
C	3	Lesões graves que requerem hospitalização
B	2	Pequenas lesões que requerem primeiros socorros
A	1	Nada acontece

2. Categoria de consequências na instalação

A quantidade de tarefas de manutenção e/ou substituição de componentes em caso de acidente é avaliado nesta categoria

Tabela 14 – Escala de consequências ao nível dos danos no equipamento

Consequência	Grau	Danos
E	5	Perda total da instalação, necessidade de substituir a unidade na totalidade
D	4	Grandes reparações com importantes substituições de equipamentos
C	3	Necessária manutenção não planeada e reparação

B	2	Alguns problemas operacionais
A	1	Nada acontece

3. Categoria de consequências ambientais

Para avaliar os danos ambientais, os efeitos considerados ultrapassam as fronteiras da refinaria.

Tabela 15 – escala de consequências ao nível de danos ambientais

Consequência	Grau	Danos
E	5	Liberação significativa de gás tóxico ou grande incidente ambiental não contido
D	4	Liberação de gás tóxico e/ou vazamento de grandes dimensões
C	3	Vazamento tóxico não contido, originando danos ambientais
B	2	Vazamento tóxico contido
A	1	Vazamento pequeno de gás ou líquido sem impacto para o meio ambiente

Correspondência entre os parâmetros de consequência de falha

Após a definição, consoante as características da linha, do valor em cada uma das categorias de consequências e cálculo do valor médio, é possível definir um grau final de consequência de falha, numa escala de A a E. A tabela 16 indica a correspondência entre esta escala e os valores a serem utilizados no cálculo do número de criticidade.

Tabela 16 – correspondência entre o grau de consequência definido pelo RBI e o valor de consequência a utilizar no cálculo da criticidade da linha

Grau definido pelo RBI	Grau de consequência de falha	Correspondência
E	5	Elevado
D	4	Médio-elevado
C	3	Médio
B	2	Médio-baixo
A	1	Baixo

Importância da falha

Tabela 17 – correspondência entre a descrição da importância da linha e o grau de importância desta

Descrição da importância da linha	Grau de importância da linha	Correspondência
-----------------------------------	------------------------------	-----------------

Ao falhar, a linha pára a unidade, e afecta unidades adjacentes.	elevado	5
Em caso de falha não para a unidade, mas afecta o seu rendimento.	médio	3,5
Falha da linha tem uma afectação baixa no rendimento da unidade e nas unidades adjacentes	baixo	2

Dificuldade de acesso

Tabela 18 - correspondência entre a cota média em que se encontra a linha e o grau de dificuldade de acesso desta

Altura média da linha	Grau de dificuldade de acesso
Superior a 8 metros	5
Dos 5 aos 8 metros	4
Dos 2,5 aos 4	3
Dos 1,5 aos 2,5 metros	2
Até 1,5 metros	1

Isolamento

Tabela 19 - correspondência entre o parâmetro da existência de isolamento e o valor a ser considerado nos cálculos do número de criticidade

Existência de isolamento	Grau
Sim	5
Não	0

Evolução do risco

Tabela 20 - correspondência entre a evolução do risco da linha e o factor a ser considerado nos cálculos

Evolução do risco	Grau de evolução
Aumento acima de 3 desde data actual até futura	5
Aumento de 2 graus desde data actual até futura	3,5
Aumento de 1 grau desde data actual até futura	2
Risco não sofre alterações	1

Anexo H – Definição da importância da linha

O parâmetro da importância da linha define não só como o funcionamento da linha em estudo afecta a unidade em que está inserida, assim como nas unidades adjacentes, isto porque como já foi referido, a unidade 3000 fornece matéria-prima para várias unidades da refinaria.

A unidade 3000 é então constituída por vários circuitos, tal como se verifica no Figura 16 do anexo A. De modo a definir a importância das linhas, é necessário dividi-las então por circuitos, e através da determinação do tamanho da fuga, é possível determinar se o funcionamento da unidade pára caso a linha fure, assim como o modo como é afectado o rendimento da unidade. Na Tabela 21 encontram-se então os diferentes circuitos e as suas características, assim como alguns comentários exemplificativos. De referir que esta classificação foi obtida após a análise dos circuitos com o pessoal da fábrica dos combustíveis.

Tabela 21 – Características dos diferentes circuitos da unidade 3000

Circuitos	Tamanho fuga	Unidade pára?	Grau de afectação do rendimento da unidade	Comentários
Água Desmineralização Quente		não	médio	não obriga a paragem imediata, porque existem outras fontes de arrefecimento
Arrefecimento		não	médio	se fosse por exemplo na entrada dos BL's, tinha de ser reparada rapidamente ou teria de parar
Água Tratada Arrefecimento/ Resíduo		não	baixo	Não é essencial, porque pode ser trocada excepcionalmente por RAI
Fuel Gás	Grande	sim	médio	Se fuga for grande teria de parar devido à emissão de gases para atmosfera
	Pequeno	não	baixa	Depende local da fuga. Se for a jusante poderia-se seccionar o queimador. Fuga pequena é possível colocar braçadeira
Fuel Óleo		não	baixo	Está fora de serviço
Petróleo Bruto 1	Grande	sim	alto	Essencial para o funcionamento da unidade. Se fuga for grande e não poder ser seccionada, tem de parar
	Pequeno	não	baixo	Fuga pequena é possível colocar braçadeira
Gasóleo Armazenagem		não	médio	Depende se tem válvula de seccionamento ou não.
Gasóleo Pesado T-3001		sim	alto	
Petróleo 3		sim	alto	Paragem afecta rendimento da unidade e características do produto.
Produto Topo T-3001	Grande	sim	médio	
	Pequeno	não	baixo	Possível colocar braçadeira
Gasolina Efluente D-3001	Grande	sim	médio	
	Pequeno	não	baixo	Possível colocar braçadeira
Água de Dessalificação		não	médio	Afecta rendimento pois não havendo arrefecimento não há lavagem do petróleo
Efluente Gasoso D-3001		não	baixo	Gases podem ser redireccionados para a flare, embora não seja recomendável
Produtos Químicos		não	baixa	

Tal como se verifica na Tabela 21, existem circuitos nos quais a sua importância é modificada pelo tamanho do furo da linha, em caso da falha. De modo a ser possível classificar as linhas, adoptou-se a classificação feita pelo API, através da qual é possível prever o tamanho do furo consoante o nível de risco definido pelo RBI, tal como demonstra a Tabela 22.

Tabela 22 – Previsão do tamanho do furo da linha consoante o nível de risco (American Petroil Institute, 2000)

Nível	Tamanho do furo	Nível risco
1	Pequeno	Low
2	Médio	Medium
3	Grande	Med-high
4	Ruptura	high

Anexo I – Acções de Manutenção

O cálculo dos custos de manutenção consiste na soma dos custos de 4 diferentes intervenções, sendo que o custo total de cada uma é calculado através do sistema de preço por pontos. Este sistema consiste num preço por ponto fixo, igual para tubagens de diferentes materiais e diâmetros. O que varia é então o número de pontos atribuído a cada operação, que ao ser multiplicado pelo preço por ponto, resulta no custo de cada operação. Existirá então um *borderaux* (listagens) com o nº de pontos necessários para cada operação numa intervenção de pintura, andaimes, isolamento e metalomecânicas.

A Tabela 23 mostra o custo destes 4 tipos de intervenção para 3 diferentes linhas. De referir a situação da linha um, em que o custo de montagem dos andaimes é superior ao da própria manutenção. Daí a justificação da inclusão do parâmetro dificuldade acesso no cálculo do número de criticidade da linha.

Tabela 23 - Custos dos 4 tipos de acções de intervenção/manutenção em 3 linhas da unidade 3000

		Metalomecânica					Andaimes		Pintura	Isolamento	
Linha	Designação	Pontos pré-fabrico	Valor pré-fabrico	Pontos montagem	Valor montagem	Total pontos	Valor tub	Total pontos	Valor	Valor	Valor
16" P30115 B1r1 SR-3001 para P-3005-A/B	Subst do T contendo pontos 17,18 e 19 até à flange, pintura da linha R4 e subst. Integral do isolamento térmico	884,00	327,96 €	3.260,30	1.209,57 €	4.144,30	1.537,54 €	1.595,26	3.055,62 €	869,30 €	5.077,64 €
18" P30522.1.B1r, fundo T-3005	Substituição integral da linha até ao E-3019	2.682,00	995,02 €	1.460,30	541,77 €	4.142,30	1.536,79 €	273,00	522,92 €	76,41 €	404,51 €
2" FG 30968 Ac, D-3008 para PSV-3019	Substituição parcial da linha	459,20	170,36 €	702,50	260,63 €	1.161,70	430,99 €	12.306,80	23.572,94 €	1.091,17 €	0,00 €

Pintura

A pintura das linhas é um dos mecanismos de prevenção de corrosão, pois esta apresenta-se como uma primeira barreira defensiva da linha ao desenvolvimento de corrosão. A corrosão custa à indústria biliões de dólares por ano em custos de substituição de equipamento e estruturas, a maioria dos quais poderiam ser evitados com boas práticas de manutenção de pintura. (Higgins, 2006)

Na refinaria de Matosinhos, existem procedimentos de pintura que variam consoante se queira pintar uma linha já existente, ou uma linha nova. Tal como se pode verificar na Tabela 24, os esquemas N são para linhas novas que irão ser pintadas pela primeira vez, enquanto que os R serão pinturas de linhas reparadas ou beneficiadas.

Tabela 24 – Alguns esquemas de Pintura adoptados pelo Petrogal

	Novo		Reparação
II1	Decapagem a jacto abrasivo ao Grau SA 2 1/2 1 - Silicato inorgânico de Zinco (SSPC-Paint 20 - nível 2) 2 - Epoxi Poliamida Alta Espessura 3 - Poliuretano alta espessura	R1	Decapagem meios mecânicos ao Grau St3 1 - Epoxi primário de alumínio alta espessura 1 - Epoxi Poliamida Alta Espessura 1 - Acabamento poliuretano Alta Espessura
		R1.A	Lixagem e desengorduramento 1 - Acabamento poliuretano Alta Espessura
II2	Decapagem a jacto abrasivo ao Grau SA 2 1/2 1 - Silicato inorgânico de Zinco (SSPC-Paint 20 - nível 2) 2 - Alumínio Acrílico AT 3 - Alumínio Acrílico AT	R2	Decapagem meios mecânicos ao Grau St3 1 - Alquídico com Zinco para AT 2 - Alumínio Acrílico AT 3 - Alumínio Acrílico AT
II3	Decapagem a jacto abrasivo ao Grau SA 2 1/2 1 - Silicato inorgânico de Zinco (SSPC-Paint 20 - nível 2) 2 - Alumínio Silicone AT 3 - Alumínio Silicone AT	R3	Decapagem meios mecânicos ao Grau St3 1 - Alumínio Silicone AT 2 - Alumínio Silicone AT
II4	Decapagem a jacto abrasivo ao Grau SA 2 1/2 1 - Epoxi fenólico 2 - Epoxi fenólico	R4	Decapagem meios mecânicos ao Grau St3 1 - Epoxi primário de alumínio alta espessura 2 - Epoxi primário de alumínio alta espessura
II5	Decapagem a jacto abrasivo ao Grau SA 2 1/2 1 - Silicato inorgânico de Zinco (SSPC-Paint 20 - nível 2) 2 - Alumínio Silicone AT	R5	Decapagem meios mecânicos ao Grau St3 1 - Alumínio Silicone AT
II6	Lavagem e desengorduramento e lixagem manual para despolimento 1 - Primário Epoxi Poliamida de aderência 2 - Poliuretano alta espessura	R6	Lavagem e desengorduramento e lixagem manual para despolimento 1 - Epoxi primário de alumínio alta espessura 2 - Poliuretano alta espessura
II7	Lavagem e desengorduramento e lixagem manual para despolimento 1 - Primário Epoxi Poliamida de aderência 2 - Primário Epoxi Poliamida de aderência 3 - Epoxi Poliamida multifuncional	R7	Lavagem e desengorduramento e lixagem manual para despolimento 1 - Primário Epoxi Poliamida de aderência 2 - Primário Epoxi Poliamida de aderência 3 - Epoxi Poliamida multifuncional

Isolamento

Um bom programa de manutenção mantém o isolamento em perfeitas condições pois deste modo os custos de perdas de rendimento da linha são reduzidos, pois menos energia é desperdiçada sob a forma de calor, aumentando consequentemente a eficiência da instalação, através da diminuição das perdas energéticas. Para além disso, o bom estado do isolamento previne o aparecimento de CUI.

Um bom trabalho de isolamento de linhas quentes terá de ter em conta não só o diâmetro nominal do tubo mas também a temperatura operacional da linha, de modo a determinar a espessura do isolamento, tal como se verifica na Figura 26. Quanto maior temperatura operacional, maior será a espessura do isolamento.

NOMINAL PIPE SIZE OR VESSEL DIAMETER (INCHES)	OPERATING TEMPERATURE IN °C					
	< 100	< 200	< 300	< 400	< 500	< 600
½	25	30	40	50	60	70
¾	25	40	40	50	60	70
1	25	40	50	50	60	80
1½	30	40	50	60	70	80
2	30	40	50	60	70	90
3	30	40	50	70	80	90
4	30	50	60	70	80	100
6	40	50	60	70	90	110
8	40	50	60	80	90	110

Figura 26 – Espessura de isolamento para conservação de calor nas linhas (mm) (Petrogal 2000)

Os materiais mais usados para o isolamento a quente de tubagens incluem *calcium silicate*, *laminated asbestos-felt*, e várias formas de mineral *wool*, que incluem *glass wool* assim como outros materiais.

Andaimes

O número de pontos necessários para a montagem de andaimes aumenta proporcionalmente à altura e à superfície (projecção horizontal em m²) destes. Terão também de ser tidos em conta factores de correcção, nomeadamente para andaimes com rodas, andaimes suspensos e circulares, entre outros.

Operações metalomecânicas

Este tipo de operações pode envolver um grande número de operações, entre elas soldadura de tubagens, corte e remoção da tubagem a substituir, montagem de juntas cegas e da nova tubagem, tratamentos térmicos, entre outros.

O tipo e a quantidade de operações a efectuar depende das recomendações feitas no relatório de inspecção, tal como se pode verificar relatório de inspecção exemplo que se encontra no anexo B. A partir destas recomendações, são orçamentadas as operações, através da estimativa do número de metros de tubos a desmontar ou da quantidade de soldaduras necessárias, tal como se pode verificar na Figura 27.

15-Mai-10			DESCRIMINATIVO DE PONTOS DE TUBAGEM					1
ITEM	QUANT.	UNID.	OPERAÇÃO	K	K Kg	K	PTS UNI	TOTAL
			TUBAGEM REPARAR C/ EI100263					
			Desmontar					
1	6	Mts	Tubo $\varnothing 1\frac{1}{2}$ "			1,1	11	72,6
2	2	Mts	Tubo $\varnothing 1\frac{1}{2}$ "				11	22,0
			Montar					
3	6	Mts	Tubo $\varnothing 1\frac{1}{2}$ "			1,1	16	105,6
4	2	Mts	Tubo $\varnothing 1\frac{1}{2}$ "				16	32,0
5	2	U	Soldadura $\varnothing 1\frac{1}{2}$ " pre-fab.	0,8			71	113,6
6	1	U	Soldadura $\varnothing 1\frac{1}{2}$ " local			1,1	71	78,1
7	5	U	Soldadura $\varnothing 1\frac{1}{2}$ " local				71	355,0

Figura 27 – Exemplo de um orçamento de operações metalomecânicas para intervenção numa linha

Por exemplo, para o item 1, o preço final da operação de desmontagem de tubo com $1\frac{1}{2}$ “, será o produto da quantidade (em metros) * pontos necessários para a operação * coeficiente de agravamento. Neste caso, este coeficiente é igual a 1,1 pois o trabalho a executar é executado em altura, nomeadamente através de plataformas fixas já existentes (caso tivessem de ser montados andaimes para esta operação, este coeficiente seria portanto maior).

Anexo J – Métodos para cálculo dos diferentes custos de falha/ danos

Custos ambientais

Tal como já foi previamente explicado, o valor monetário das multas poderia ser incluído nos custos ambientais, no entanto a sua determinação é muito subjectiva. Nesta categoria de danos também podem ser incluídos custos de remoção de terras contaminadas por derrames resultantes de fugas das linhas, por exemplo. No entanto, estes custos não são aplicáveis às linhas da unidade em estudo, isto porque na fábrica não há terra por baixo das linhas mas sim cimento.

As características dos derrames são mais fáceis de determinar, pois dependem das propriedades/características do material contido na linha, pois por exemplo quanto maior for a viscosidade, mais tempo demorará o líquido a espalhar-se. Dependendo da viscosidade dos fluidos não voláteis, estes podem-se espalhar imediatamente e formar uma “piscina” de líquido localizada na área adjacente. Como regra geral, 3.8 litros de líquido confinado numa superfície nivelada podem cobrir 1.8 metros quadrados, independentemente da viscosidade. (Nolan, 2011)

Segundo o API 580, as consequências ambientais de um vazamento de fluido numa tubagem podem ser calculados através de diversos factores, entre os quais o volume de fluido libertado, a tendência para este se evaporar, e as consequências ao nível da legislação em vigor, que se podem traduzir em multas, ou num caso extremo, num potencial fecho de certas unidades por parte das autoridades. Os danos ambientais serão directamente proporcionais ao grau de risco da linha definido.

De modo a determinar os custos ambientais, é preciso então calcular a quantidade de fluido derramada, de modo a determinar a dimensão do derrame. Esta dimensão pode então dividir-se em três categorias: pequeno, médio e grande. A partir da definição destas categorias é possível o número necessário de horas de mão-de-obra para limpar o derrame. Um exemplo de um orçamento para limpeza de um derrame encontra-se na Figura 28.

Nº 01: 11029302

TRABALHOS EXTRAS		
CLIENTE: GALP ENERGIA	LOCAL: REFINARIA DO PORTO	
DATA: 11-03-28 A 11-03-29	OBRA: MOV. PRODUTOS	
DESCRIÇÃO DE OBRA: Limpar derrame de parafina no pipe-way da rua 7.		
28-03-2011 (Segunda-feira)		
3 Indiferenciados x 8 h x 7,40 € = -----	177,600 €	
29-03-2011 (Terça-feira)		
4 Indiferenciados x 8 h x 7,40 € = -----	236,800 €	
1 Camião cx/aberta x 2 h x 41,20 € = -----	82,400 €	
1 Empilhador x 2 h x 32,10 € = -----	64,200 €	
TOTAL		561,000 €

Figura 28 – Exemplo de um orçamento para limpeza de um derrame provocado por uma fuga numa linha

Embora não tendo um elevado nível de precisão, é possível prever as características de uma fuga, determinando parâmetros tais como o diâmetro do orifício de fuga e o tempo de duração desta, e a quantidade de fluido libertada na ocorrência de uma fuga.

- Diâmetro do furo da linha

O API 581 relaciona então o nível de risco definido pelo RBI para cada linha com um diâmetro previsto da fuga no caso de a linha falhar, tal como se demonstra na Tabela 25.

Tabela 25 – Relação entre o nível de risco da linha e o diâmetro da fuga em caso de falha (American Petroil Institute, 2000)

Nível	Nível risco	Tamanho do furo	Gama de diâmetros	Φ da fuga (mm)
1	Low	Pequeno	0-6.4	6.4
2	Medium	Médio	6.4-51	25
3	Med-high	Grande	51-152	102
4	high	Ruptura	>152	152

- Tempo de duração da fuga

A duração da fuga depende dos sistemas/métodos disponíveis para isolar a fonte da fuga, da natureza desta e dos procedimentos e gestão da instalação. Enquanto que em alguns casos pode ser possível isolar a fuga num minuto, a mesma fuga em circunstâncias diferentes pode demorar mais tempo. (Nilsson, 2009) Exemplo disto mesmo são linhas em funcionamento a altas temperaturas. Daí a necessidade de classificação do sistema de detecção e isolamento.

A metodologia usada pelo API 581 para cenários de falha assume que uma vez que se dá a ocorrência de uma fuga, esta será contínua. Esta é uma perspectiva conservativa, especialmente para fugas de maiores dimensões e rupturas, que rapidamente perdem pressão e vazam com menor intensidade. É no entanto a forma encontrada mais aproximada de prever o tempo de fuga.

No caso da refinaria de Matosinhos, segundo a Tabela 26, o sistema de detecção de fuga foi classificado como C, pois as fugas só podem ser detectadas através de detecção visual. Também o sistema de isolamento é classificado com a categoria C, pois em caso de fuga o sistema só pode ser isolado através de válvulas operadas manualmente. Consequentemente, também segundo o API 581 (Tabela 27), um derrame com estas características demorará 1 hora numa linha com uma fuga de 6.4mm, 50minutos numa de 25 mm e 20min numa de 102 mm.

Tabela 26 – Sistema de classificação de detecção e isolamento de fugas (American Petroil Institute,

Tipo de detecção do sistema	Classificação do tipo de detecção
Instrumentação com funções específicas para detectar perdas de material através de mudanças nas condições operacionais do sistema (p.e. perda de pressão)	A
Detectores ou sensores que determinam quando o material se encontra no exterior da tubagem	B
Detecção visual, câmaras ou sensores com cobertura marginal	C
Tipo de sistema de isolamento	
Sistemas de isolamento e paragem de funcionamento das linhas activados	A

automaticamente em caso de fuga, sem intervenção de nenhum operador	
Sistemas de isolamento ou paragem activados por operadores na sala de controlo	B
Isolamento dependente de válvulas operadas manualmente	C

Tabela 27 - Duração das fugas baseado no sistema de detecção e isolamento existente (American Petroil Institute, 2000)

Classificação do sistema de detecção	Classificação do sistema de isolamento	Duração máxima da fuga
A	A	20 min para fugas de 6,4 mm 10min para fugas de 25mm 5min para fugas de 102mm
A	B	30min para fugas de 6,4mm 20min para fugas de 25mm 10min para fugas de 102mm
A	C	40min para fugas de 6,4 mm 30min para fugas de 25mm 20min para fugas de 102 mm
B	A ou B	40min para fugas de 6,4 mm 30min para fugas de 25mm 20min para fugas de 102 mm
B	C	1 hora para fugas de 6,4mm 30min para fugas de 25mm 20min para fugas de 102mm
C	A,B ou C	1hora para fugas de 6,4 mm 40min para fugas de 25mm 20min para fugas de 102mm

- Cálculo da quantidade de fluido libertada em caso de fuga

Para gases ou vapores, a Equação 5 é apropriada para o cálculo da quantidade de matéria libertada em caso de fuga (Nilsson, 2009).

$$\dot{m} = 0.8AP\sqrt{\frac{M\gamma}{zRT}}\left(\sqrt{\frac{2}{\lambda+1}}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}$$

No entanto, como nas tubagens em estudo os fluidos não se encontram unicamente no estado gasoso, optou-se por uma abordagem mais geral, através do uso da Equação 6.

$$P_1 + \frac{\rho \times V_1^2}{2} = P_2 + \frac{\rho \times V_2^2}{2}$$

Equação 6 – Equação de *Bernoulli*

Simplificando os termos da energia potencial ($\rho \times g \times z$), considerando V_1 aproximadamente 0, conhecendo-se a densidade do fluido, sabendo-se a pressão operacional da linha (P_1) e sendo P_2 a pressão atmosférica, tem-se que:

$$V_2 = \sqrt{\frac{(P_1 - P_2) \times 2}{\rho}} \times C_d$$

Equação 7 – Equação de *Bernoulli* simplificada (m/s)

Sendo que C_d é o coeficiente de descarga, que pode variar entre 0,6 e 0,8, sendo que quando maior for a densidade mais perto de 0,6 estará este valor. Após se ter calculado os valores da quantidade libertada usando ambos os valores e se ter verificado que a diferença era mínima, optou-se pelo valor mais conservador, ou seja, 0,6.

Após o cálculo da área do furo, tendo em conta o diâmetro do furo definido pela Tabela 25, é possível calcular o caudal, tanto mássico como volúmico.

Ao multiplicar este caudal volúmico pelo tempo de fuga, previamente definido pela Tabela 27 e dependente do diâmetro da falha, é possível então ter a quantidade de fluido libertado, em m^3 para exterior no caso de uma fuga. A determinação desta quantidade será então útil não só para os cálculos de perdas económicas resultantes de produto desperdiçado, mas também para determinar a dimensão do derrame, de modo a calcular os custos de limpeza.

Custos de downtime

Quando a circulação de produto tem de ser interrompida, o tempo até que o funcionamento da linha volte ao normal depende da urgência como é classificada a necessidade de manutenção de linha. Esta classificação será também mais urgente quanto mais elevada for a classificação dos parâmetros e importância da linha.

Calcular o tempo necessário para reparar uma linha em caso de fuga é uma tarefa muito complexa, devido aos inúmeros parâmetros que têm de ser tidos em conta e à incerteza e relatividade do resultado final, pois não existem linhas com comportamentos exactamente iguais. Exemplos destes parâmetros são então o diâmetro da linha, o fluido transportado por esta ou o facto de a linha ter patins de suporte, pois caso tenha e a fuga ocorra no contacto entre o patim e a linha, o número de operações necessárias para a reparação será maior, o que consequentemente aumentará o tempo em que a linha está fora de funcionamento.

Como exemplo da variabilidade existente ao nível de tempos de *outage*, pode-se dar o exemplo de uma linha de 4" de água, em que a colocação de uma braçadeira para tapar a fuga demorará cerca de meia hora. No entanto, com o aumento do diâmetro e do grau de perigosidade do fluido, este tempo aumenta, não havendo maneira de o prever. Daí a opção

pela Tabela 28 elaborada pelo *American Petroleum Institute*, que prevê tempos de paragem tendo em conta o diâmetro da linha e o diâmetro do orifício de fuga da linha. Tal como se verifica na Tabela 28, os inputs para esta estimativa são o diâmetro da linha e o diâmetro do furo originado na falha da linha, que foi previamente calculado pela Tabela 22.

Tabela 28 - tempos de *outage* das linhas (dias) (American Petroleum Institute 2000)

Diâmetro linha (")	Pequeno	Médio	Largo	Ruptura
1	0	0	0	1
2	0	0	0	1
4	0	1	1	2
6	0	1	2	3
8	0	2	3	3
10	0	2	3	4
12	0	3	4	4
16	0	3	4	5

A Tabela 28 exprime então as diferentes possibilidades de tempo de paragem da linha dependendo do diâmetro do furo. O custo previsto por cada dia de paragem da unidade multiplicado pela nº de dias de paragem permitirá obter o custo de downtime de uma falha numa linha.

Os custos de downtime devem também incluir custos de perdas de amortização do equipamento, assim como potenciais custos de *start-up* da unidade.

Custos de perda de produto

De modo a calcular o custo de fluido/produto perdido em caso da ocorrência de um furo, para além da quantidade de fluido derramada previamente calculada, é necessário determinar o preço por litro de compra e/ou venda no mercado. O custo de perda de produto será então o produto destes dois factores.

Anexo K – Aplicação da Metodologia AHP**Grau 1**Matrizes

Na matriz 1 é determinada a importância dos 4 principais critérios da avaliação das linhas relativamente à sua importância para o objectivo principal - a escolha da política de manutenção mais adequada. No caso das linhas com grau 1, ou seja, as mais críticas, o factor mais importante serão os danos, pois uma política de manutenção não adequada resultará em valores muito elevados deste parâmetro, como por exemplo ao nível de danos humanos e de equipamento, o que não é de todo desejável. Os danos têm então um índice de prioridade de 0,557.

Matriz 1 - matriz de comparação entre os principais critérios (nível 2) e o objectivo principal

	danos	custos	aplicabilidade	valor acrescentado	prioridade
danos	1	3	7	5	0,557892475
custos	1/3	1	5	3	0,263345111
aplicabilidade	1/7	1/5	1	1/3	0,056889801
valor acrescentado	1/5	1/3	3	1	0,121872613
Total	1,6762	4,5333	16,0000	9,3333	1

O segundo critério mais importante para as linhas de grau 1 serão então os custos, pois só uma política de manutenção adequada permitirá reduzir os custos desnecessários, nomeadamente os de inspecção, produto perdido e seguros, que são os mais propícios a verem o seu valor aumentado no caso destas linhas. O critério do valor acrescentado é o terceiro mais importante pois uma linha de grau 1 caso tenha manutenção adequada resultará em enormes benefícios ao nível da segurança, assim como diminuição do número de acções desnecessárias (e consequentes custos) e aumento da utilização do tempo de vida útil do equipamento – pois uma boa política evita a propicia degradação acentuada destas linhas devido à propensão para mecanismos de corrosão, devido, por exemplo, às condições de funcionamento e características do fluido circulante. Por fim, neste grau de linhas a aplicabilidade é o factor menos importante pois a sua importância para a escolha do tipo de manutenção neste tipo de linhas é baixa relativamente a qualquer um dos outros critérios – por exemplo, os custos de falha serão sempre superiores a custos de aplicação/implementação da política de manutenção.

Matriz 2 - Matriz de comparação entre os subcritérios dos danos (nível 3) e a sua importância para os dados em geral (nível 2)

	Humanos	Downtime	Ambientais	Equipamento	imagem	prioridade
Humanos	1	3	7	1	3	0,344714345
Downtime	1/3	1	5	1/3	1	0,136238115
Ambientais	1/7	1/5	1	1/7	1/5	0,038095081
Equipamento	1	3	7	1	3	0,344714345
Imagem	1/3	1	5	1/3	1	0,136238115
Total	2,8095	8,2000	25,0000	2,8095	8,2000	1

No caso de linhas com grau 1, os danos mais importantes serão os danos humanos e de equipamento, pois para serem consideradas linhas de grau 1, à partida estas linhas têm um

grau de consequência alto, o que consequentemente faz com que uma potencial falha possa resultar num acidente grave com potenciais danos elevados não só no equipamento como nos trabalhadores, especialmente ao nível do efeito *dominó* no equipamento adjacente. Considerou-se que os segundos danos mais importantes seriam os de downtime em conjunto com os danos de imagem, pois linhas de grau 1 em princípio também terão um nível de importância elevado, pois aquando do cálculo do índice de criticidade o peso deste parâmetro é igual ao de consequência de falha. Consequentemente, os custos de downtime neste tipo de linhas serão à partida elevados, assim como as potenciais repercussões na imagem da empresa, quer a nível industrial quer para o público em geral. Por fim, os custos ambientais serão os menos importantes relativamente aos danos em gerais, pois embora sejam importantes, as outras 4 categorias de custos já referidas revelam-se muito mais importantes do que estes (para este grau de criticidade).

Matriz 3 - Matriz de comparação entre os subcritérios dos custos (nível 3) e a sua importância para os custos em geral (nível 2)

	subs. Total	inspeção	manut/interv.	produto perdido	seguros	prioridade
subst. Total	1	3	1	9	3	0,345913876
inspeção	1/3	1	1/3	7	1	0,139547049
manut/intervenção	1	3	1	9	3	0,345913876
produto perdido	1/9	1/7	1/9	1	1/7	0,02907815
seguros	1/3	1	1/3	7	1	0,139547049
Total	2,7778	8,1429	2,7778	33,0000	8,1429	1

No caso das linhas de grau 1, os custos de manutenção/intervenção serão tão importantes como os custos de substituição total, pois muitas vezes pode ficar mais dispendioso economicamente estar a fazer uma manutenção de grande dimensão do que substituir a linha na sua totalidade, devido às inúmeras operações necessárias, tais como montagem de andaimes e retirada de isolamento (linhas de grau 1 têm uma maior probabilidade de terem cota elevada e estarem isoladas).

Os custos de inspeção também são importantes pois quanto mais crítica for uma linha, mais frequência de inspeção esta terá, assim como possíveis custos extra de andaimes e retirada de isolamento, pois muitas vezes para inspeccionar também é necessário montar andaimes e tirar troços de isolamento nas zonas críticas, caso a linha esteja isolada. Os custos de seguros também terão uma importância elevada como os custos de inspeção, pois tendo este grau de linhas em princípio uma consequência de falha elevada, um potencial acidente grave agravará seriamente os custos dos seguros. O custo do produto perdido revela-se insignificante nesta situação, devido à importância dos outros custos analisados. Este tipo de custos só se revelaria bastante importante se o caso da tubagem em estudo fosse por exemplo um *pipeline* de petróleo fora da refinaria, nas quais os custos de produto perdido poderiam ascender aos milhares de euros.

Matriz 4 - Matriz de comparação entre os subcritérios da aplicabilidade (nível 3) e a sua importância para a aplicabilidade em geral (nível 2)

	Investimento	M.O.	prioridade
Investimento H/s	1	5	0,8333
M.O.	1/5	1	0,1667
Total	1,2000	6,0000	1

Quanto maior for a criticidade/importância da linha, maior será o peso da importância da aplicabilidade/implementação, pois linhas críticas requerem políticas de manutenção evoluídas, nomeadamente políticas de manutenção condicionada e preditiva – que por sua vez exigem investimento em hardware e software, e consequentemente em mão de obra. Considerou-se então que o investimento em hardware e software é mais importante que em mão de obra, pois a nível económico o primeiro critério é mais dispendioso.

Matriz 5 - Matriz de comparação entre os subcritérios do valor acrescentado (nível 3) e a sua importância para o valor acrescentado em geral (nível 2)

	Acções desn	Tempo vida	Segurança	Probabilidade
Redução Acções desnecessárias	1	3	1/5	0,1932
Utilização tempo vida	1/3	1	1/7	0,0833
Segurança	5	7	1	0,7235
Total	6,3333	11,0000	1,3429	1

No caso das linhas de grau 1, o valor acrescentado ao nível da segurança será o subcritério mais importante, pois as consequências de uma política de manutenção que resulte numa grande probabilidade de falhas de segurança serão muito más, que se traduziriam em danos na imagem da empresa.

O subcritério das acções desnecessárias será o que tem a segunda maior ordem de importância pois uma política de manutenção adequada resultará numa calendarização adequada das actividades, não havendo por isso inspecções e acções de intervenção desnecessárias, o que resultará numa diminuição dos custos.

Matriz 6 - Matriz de comparação entre os subcritérios dos danos humanos (nível 4) e a sua importância para os danos humanos (nível 3)

	lesões lig/medias	incapacidade	morte	Probabilidade
lesões ligeiras/medias	1	1/7	1/9	0,0550
incapacidade	7	1	1/7	0,2162
morte	9	7	1	0,7288
Total	17,0000	8,1429	1,2540	1

O critério dos danos por morte é mais importante pois neste tipo de linhas é mais provável de acontecer do que nos outros dois graus. Daí considerar-se que relativamente aos danos de incapacidade “a evidência de um parâmetro sobre o outro seja favorável de uma forma muito evidente, demonstrada na prática”, e que “a evidência de um parâmetro sobre o outro seja da maior ordem possível” quando comparado com as lesões ligeiras/médias.

Matriz 7 - Matriz de comparação entre os subcritérios dos danos de downtime (nível 4) e a sua importância para os danos de downtime (nível 3)

	perdas directas	perdas indirectas	start up	Probabilidade	
perdas directas	1	5	7	0,7231	
perdas indirectas	1/5	1	5	0,2157	
custos start up	1/7	1/5	1	0,0612	
Total	1,3111	6,2000	15,0000	1	

Linhas de grau 1 têm consequentemente um número de criticidade elevado, que em princípio será resultado de um factor de importância elevado (em conjunto com outros factores). Daí que os custos de perdas directas sejam os mais importantes, seguindo-se os custos de perdas de produção indirectos, sendo os directos classificados perante os indirectos como “experiência e opiniões favorecem bastante um em relação ao outro”, pois os danos nas unidades adjacentes nunca serão tão graves como na própria unidade que pára (o rendimento das unidades adjacentes pode ser afectado mais em princípio há sempre maneira de não ter de parar a unidade, através de processos alternativos).

Os custos de start up são sempre elevados, se bem que no grau de linhas em análise a sua importância será reduzida comparada com os custos de perdas de produção.

Matriz 8 - Matriz de comparação entre os subcritérios dos danos de equipamento (nível 4) e a sua importância para os danos de equipamento (nível 3)

	na unidade	unid. Adjac.	Probabilidade
na unidade	1	3	0,7500
unidades próximas	1/3	1	0,2500
Total	1,3333	4,0000	1

Linhas classificadas com graus 1 são mais propícias a consequências graves, nomeadamente explosões e incêndios, daí que a diferença entre a importância dos danos de equipamento na unidade em estudo e nas unidades adjacentes seja apenas definida por 3, ou seja, “a experiência apenas favorece ligeiramente um parâmetro sobre o outro”. Isto porque no caso de um acidente grave, o possível fogo alastraria facilmente às unidades próximas

Matriz 9 - Matriz de comparação entre os subcritérios dos danos de imagem da empresa (nível 4) e a sua importância para os danos de imagem da empresa (nível 3)

	Industriais	Geral	Probabilidade
clientes industriais	1	1	0,8333
público em geral	1	1	0,1667
Total	2,0000	2,0000	1

Normalmente, na escolha da política de manutenção adequada, os danos de imagem da empresa perante os clientes industriais são mais importantes, pois a imagem da refinaria

perante o público em geral só é afectada caso exista um acidente muito grave, que ajude a justificar as opiniões de quem afirma que a refinaria não é segura e que por exemplo, deveria encerrar. No entanto, nas linhas de grau 1, esta situação de possível acidente é mais provável, daí que a importância dos dois parâmetros seja classificada como igual.

Matriz 10 - Matriz de comparação entre os subcritérios dos custos de inspecção (nível 4) e a sua importância para os custos de inspecção da empresa (nível 3)

	actividades	mão de obra	prioridade
actividades	1	7	0,8750
mão de obra	1/7	1	0,1250
Total	1,1429	8,0000	1

O custo das actividades necessárias a uma inspecção adequada das linhas de grau 1 é mais importante a nível económico das actividades necessárias do que o parâmetro da mão-de-obra, pois envolve montagem de andaimes, remoção de isolamento e decapagem da linha. A escala da importância só não é considerada mais elevada porque nas linhas críticas a necessidade de inspecção é mais elevada, o que consequentemente requer bastante mão-de-obra comparativamente a linhas de outros graus.

Matriz 11 - Matriz de comparação entre os subcritérios do aumento de valor acrescentado em segurança (nível 4) e a sua importância para o aumento do valor acrescentado ao nível da segurança (nível 3)

	imagem	ranking	Probabilidade
Imagem da empresa	1	7	0,8750
Ranking da empresa	1/7	1	0,1250
Total	1,1429	8,0000	1

Nas linhas de grau 1 a imagem da empresa é muito importante, pois um potencial acidente seria extremamente amplificado pelos *media*. Daí a importância deste parâmetro para o valor acrescentado devido às melhorias ao nível da segurança como consequência de uma política de manutenção adequada.

Matrizes de comparação entre as 5 alternativas e todos os 23 subcritérios do nível imediatamente anterior às alternativas

As 5 alternativas existentes, nomeadamente os tipos de políticas de manutenção, têm ser comparadas relativamente à sua influência nos critérios que se encontram no nível imediatamente inferior, quer sejam no nível 4 ou 3 (caso não existam subcritérios deste nível).

Serão avaliadas, por exemplo, a importância/influência de cada tipo de manutenção para uma potencial redução do número de lesões ligeiras (critério de nível 4), ou então para uma potencial redução do número de acções desnecessárias (nível 3).

Matriz 12 – Influência dos tipos de manutenção na probabilidade de redução da ocorrência de lesões ligeiras

	correctiva	preventiva	oportunística	condicionada	predictiva	prioridade
correctiva	1	1/5	1/5	1/7	1/7	0,038095081
preventiva	5	1	1	1/3	1/3	0,136238115
oportunística	5	1	1	1/3	1/3	0,136238115
condicionada	7	3	3	1	1	0,344714345
predictiva	7	3	3	1	1	0,344714345
Total	25,0000	8,2000	8,2000	2,8095	2,8095	1

A manutenção correctiva é a mais propícia à ocorrência de danos humanos, daí que a matriz 12 seja adoptada para a definição da importância de todas as alternativas da metodologia, nomeadamente das políticas de manutenção, relativamente à possibilidade de ocorrência de danos humanos. Considerou-se que a manutenção preventiva e oportunística têm igual importância para este critério, sendo por isso a manutenção correctiva classificada com o valor 1/5 relativamente a estes tipos de manutenção, pois contribui menos para a redução dos danos. Já as políticas de manutenção condicionada e predictiva, como são as mais evoluídas, têm menor risco de danos, contribuindo por isso para a redução dos possíveis danos, sendo por isso as mais importantes nestes critérios.

Ao nível dos subcritérios de downtime, a importância das alternativas será a mesma que a definida para os subcritérios dos danos humanos, expressas também pela matriz 12, pois mais uma vez é a manutenção correctiva a mais propícia à ocorrência de perdas de produção directas e indirectas. Resumidamente, a classificação da matriz 12 será aplicada a todos os subcritérios do critério danos, nomeadamente aos subcritérios dos danos humanos, de downtime, ambientais, equipamento e imagem da empresa, pois a manutenção correctiva será sempre a que provocará mais danos em qualquer tipo de categoria, sendo por isso atribuída uma menor importância a este tipo de manutenção, enquanto que as políticas de manutenção condicionada e predictiva serão sempre as menos críticas para esta categoria, sendo por isso as mais importantes.

Matriz 13 – Influência do tipo de manutenção nos custos de substituição total

	correctiva	preventiva	oportunística	condicionada	predictiva	prioridade
correctiva	1	1	1	1	1	0,2
preventiva	1	1	1	1	1	0,2

oportunística	1	1	1	1	1	0,2
condicionada	1	1	1	1	1	0,2
predictiva	1	1	1	1	1	0,2
Total	5,0000	5,0000	5,0000	5,0000	5,0000	1

Os tipos de manutenção não têm influência no custo de substituição total da linha, pois estes são fixos. Daí o preenchimento da matriz 13 apenas com o valor 1, pois todas as comparações são idênticas.

Matriz 14 – comparação entre a importância dos custos de mão-de-obra para inspecção relativamente às diferentes políticas de manutenção

	correctiva	preventiva	oportunística	condicionada	predictiva	prioridade
correctiva	1	5	5	7	7	0,5661803
preventiva	1/5	1	1	3	3	0,155902727
oportunística	1/5	1	1	3	3	0,155902727
condicionada	1/7	1/3	1/3	1	1	0,061007124
predictiva	1/7	1/3	1/3	1	1	0,061007124
Total	1,6857	7,6667	7,6667	15,0000	15,0000	1

Ambos os subcritérios de nível 4 do critério da inspecção serão classificados pela matriz 14. Considerou-se que o tipo de política que exige mais actividades de inspecção, quer a nível de mão-de-obra, quer a nível de colocação de andaimes e decapagem da linha, por exemplo, será a condicionada, seguindo-se da predictiva, e consequentemente estas foram consideradas as menos importantes para a potencial redução de custos de inspecção. As políticas de manutenção preventiva e oportunística estão colocadas no mesmo nível de importância, sendo que a manutenção correctiva, como não envolve qualquer tipo de inspecção no seu procedimento, é a mais importante para esta categoria.

A matriz de comparação de importância entre os custos de manutenção/intervenção relativamente às políticas de manutenção adoptada será igual à matriz 12. Isto porque, por exemplo, caso se opte pela manutenção correctiva, só será efectuada manutenção quando a linha falhar. Consequentemente, é provável que a linha já se apresente bastante degradada nesta altura, e consequentemente será necessário efectuar mais acções de manutenção, devido ao mau estado da linha. Deste modo, a manutenção correctiva é a menos importante para uma potencial redução dos custos de manutenção/intervenção das linhas. De modo análogo, como a manutenção condicionada e predictiva têm em conta o estado actual da linha, à partida serão as mais importantes para esta categoria dos custos, pois não só não deixarão à partida a linha falhar, como controlarão o estado de degradação da linha.

As matrizes de comparação dos subcritérios dos custos de produto perdido e custos de seguro também irão tomar a forma da matriz 12, pois quando maior probabilidade da linha falhar, maiores serão estes custos, sendo então esta probabilidade maior na manutenção correctiva e menor na manutenção predictiva e condicionada, ou seja, estas últimas têm maior importância na redução dos custos destes critérios.

Matriz 15 – comparação da importância do tipo de manutenção relativamente à potencial redução do investimento em software

	correctiva	preventiva	oportunistica	condicionada	predictiva	prioridade
correctiva	1	1	1	9	5	0,297481903
preventiva	1	1	1	9	5	0,297481903
oportunistica	1	1	1	9	5	0,297481903
condicionada	1/9	1/9	1/9	1	1/5	0,02866397
predictiva	1/5	1/5	1/5	5	1	0,07889032
Total	3,3111	3,3111	3,3111	33,0000	16,2000	1

As políticas de manutenção correctiva, preventiva e oportunística têm igualmente o nível de importância máxima na redução dos recursos necessários para a aplicabilidade da política de manutenção, pois não necessitam nenhum software ou hardware em específico. Já a manutenção predictiva pode usar software específico, tal como é o caso da refinaria de Matosinhos com o RBI, que consequentemente envolverá custos de aquisição da licença. Os custos de aplicabilidade da manutenção condicionada serão ainda maiores do que a manutenção predictiva.

A matriz de comparação dos tipos de manutenção relativamente à potencial redução da necessidade de mão-de-obra para a aplicação da política de manutenção será igual à matriz 15, pois quanto mais evoluído for o tipo de manutenção, mais mão-de-obra especializada é necessário contratar para a aplicar e implementar. Daí que as políticas de manutenção correctiva/preventiva/oportunística sejam a que têm maior peso pois não necessitam de mão-de-obra especializada.

Matriz 16 – Comparação entre os tipos de políticas e a potencial redução de acções desnecessárias

	correctiva	preventiva	oportunistica	condicionada	predictiva	prioridade
correctiva	1	1	1	1/5	1/3	0,088568443
preventiva	1	1	1	1/5	1/3	0,088568443
oportunistica	1	1	1	1/5	1/3	0,088568443
condicionada	5	5	5	1	3	0,496175549
predictiva	3	3	3	1/3	1	0,238119122
Total	11,0000	11,0000	11,0000	1,9333	5,0000	1

A política de manutenção condicionada será a que terá maior potencial em reduzir o número de acções desnecessárias, e consequentemente aumentar o valor acrescentado da empresa, pois ao ter acesso às condições actuais das linhas, permite planear eficazmente as acções de inspecção e manutenção, não sendo por isso feitas inspecções não necessárias, tal como por vezes acontece com políticas preventivas e oportunísticas. Para além disso, este tipo de manutenção permite ter maior controlo da curva P-F (Figura 5), sendo as medidas de manutenção e inspecção aplicadas mais tarde, e não antecipadamente, tal como acontece com a manutenção predictiva. A manutenção predictiva será então a segunda mais importante pois embora também permita planear adequadamente as acções, não é tão eficaz como a manutenção condicionada.

Já as políticas de manutenção oportunística e preventiva foram colocadas ao mesmo nível da correctiva porque embora as primeiras, em princípio, tenham um reduzido número de acções de manutenção em caso de falha, têm um maior número de acções de manutenção e de

inspecção, sendo por vezes estas últimas não justificadas. Já a manutenção correctiva, embora não tenha acções de manutenção geral e inspecção, terá acções de manutenção correctiva.

Matriz 17 – comparação da importância das políticas de manutenção relativamente ao potencial aumento do tempo de vida do equipamento

	correctiva	preventiva	oportunística	condicionada	preditiva	prioridade
correctiva	1	1/5	1/3	1/9	1/9	0,032623234
preventiva	5	1	3	1/5	1/5	0,119705609
oportunística	3	1/3	1	1/7	1/7	0,062197559
condicionada	9	5	7	1	1	0,392736799
preditiva	9	5	7	1	1	0,392736799
Total	27,0000	11,5333	18,3333	2,4540	2,4540	1

Mais uma vez, a manutenção condicionada e preditiva serão as mais importantes, pois ao serem os tipos de manutenção que têm em conta as condições reais da linha, podem ser implementadas medidas que permitirão aumentar e maximizar o tempo de vida do equipamento. A manutenção correctiva, ao não efectuar quaisquer medidas de mitigação do risco e de inspecção, será a menos importante para o potencial aumento do tempo de vida. Isto porque os mecanismos de degradação ocorrem a uma taxa mais elevada pois nunca são efectuadas qualquer tipo de acções para os prevenir/mitigar.

Matriz 18 – comparação dos tipos de políticas de manutenção relativamente ao aumento do valor acrescentado ao nível dos subcritérios da segurança

	correctiva	preventiva	oportunística	condicionada	preditiva	prioridade
correctiva	1	1/5	1/5	1/7	1/7	0,038095081
preventiva	5	1	1	1/3	1/3	0,136238115
oportunística	5	1	1	1/3	1/3	0,136238115
condicionada	7	3	3	1	1	0,344714345
preditiva	7	3	3	1	1	0,344714345
Total	25,0000	8,2000	8,2000	2,8095	2,8095	1

Quanto mais segura for uma política de manutenção, ou seja, quanto menos falhas forem prováveis com a implementação de uma política, maior será o aumento do valor acrescentado ao nível da segurança. Ou seja, a ordem crescente de aumento de segurança das políticas de manutenção, e consequentemente de aumento de importância do critério em análise, será inversa à ordem definida para os tipos de políticas de manutenção mais propícios à ocorrência de danos, ou seja, manutenção condicionada e preditiva, manutenção preventiva e oportunística e por fim, e menos importante, manutenção correctiva.

Modelização do processo de decisão para manutenção de tubagens industriais numa refinaria

Tabela resumo grau 1

nivel 2		nivel 3		nivel 4		nivel 5					TOTAIS				
						correctiva	preventiva	oportunística	condicionada	predictiva	correctiva	preventiva	oportunística	condicionada	predictiva
danos	0,5579	humanos	0,3447	ligeiros/ médios	0,0550	0,0381	0,1362	0,1362	0,3447	0,3447	0,0004	0,0014	0,0014	0,0036	0,0036
				incapacidade	0,2162	0,0381	0,1362	0,1362	0,3447	0,3447	0,0016	0,0057	0,0057	0,0143	0,0143
				morte	0,7288	0,0381	0,1362	0,1362	0,3447	0,3447	0,0053	0,0191	0,0191	0,0483	0,0483
		downtime	0,1362	perdas directas	0,6965	0,0381	0,1362	0,1362	0,3447	0,3447	0,0020	0,0072	0,0072	0,0182	0,0182
				perdas indirectas	0,2316	0,0381	0,1362	0,1362	0,3447	0,3447	0,0007	0,0024	0,0024	0,0061	0,0061
				custos start up	0,0719	0,0381	0,1362	0,1362	0,3447	0,3447	0,0002	0,0007	0,0007	0,0019	0,0019
		ambientais	0,0381			0,0381	0,1362	0,1362	0,3447	0,3447	0,0008	0,0029	0,0029	0,0073	0,0073
		equipamento	0,3447	na unid em estudo	0,7500	0,0381	0,1362	0,1362	0,3447	0,3447	0,0055	0,0197	0,0197	0,0497	0,0497
				próximas	0,2500	0,0381	0,1362	0,1362	0,3447	0,3447	0,0018	0,0066	0,0066	0,0166	0,0166
		imagem	0,1362	clientes industriais	0,5000	0,0381	0,1362	0,1362	0,3447	0,3447	0,0014	0,0052	0,0052	0,0131	0,0131
publico geral	0,5000			0,0381	0,1362	0,1362	0,3447	0,3447	0,0014	0,0052	0,0052	0,0131	0,0131		
custos	0,2633	subst total	0,3459			0,2000	0,2000	0,2000	0,2000	0,2000	0,0182	0,0182	0,0182	0,0182	0,0182
		inspecção	0,1395	M.O.	0,1250	0,5662	0,1559	0,1559	0,0610	0,0610	0,0026	0,0007	0,0007	0,0003	0,0003
				andaimes/isolam	0,8750	0,5662	0,1559	0,1559	0,0610	0,0610	0,0182	0,0050	0,0050	0,0020	0,0020
		man/inter	0,3459			0,0381	0,1362	0,1362	0,3447	0,3447	0,0035	0,0124	0,0124	0,0314	0,0314
		produto perdido	0,0291			0,0381	0,1362	0,1362	0,3447	0,3447	0,0003	0,0010	0,0010	0,0026	0,0026
		seguros	0,1395			0,0381	0,1362	0,1362	0,3447	0,3447	0,0014	0,0050	0,0050	0,0127	0,0127
aplicabilidade/ implementação	0,0569	investm H/S	0,8333			0,2975	0,2975	0,2975	0,0287	0,0789	0,0141	0,0141	0,0141	0,0014	0,0037
		M.O.	0,1667			0,2975	0,2975	0,2975	0,0287	0,0789	0,0028	0,0028	0,0028	0,0003	0,0007
valor acrescentado	0,1219	acções desneces	0,1932			0,0886	0,0886	0,0886	0,4962	0,2381	0,0021	0,0021	0,0021	0,0117	0,0056
		utilização vida	0,0833			0,0326	0,1197	0,0622	0,3927	0,3927	0,0003	0,0012	0,0006	0,0040	0,0040
		segurança	0,7235	imagem empresa	0,8750	0,0381	0,1362	0,1362	0,3447	0,3447	0,0029	0,0105	0,0105	0,0266	0,0266
				ranking	0,1250	0,0381	0,1362	0,1362	0,3447	0,3447	0,0004	0,0015	0,0015	0,0038	0,0038
											0,0881	0,1507	0,1501	0,3072	0,3040

Grau 2

Matriz 19 – comparação da importância dos 4 critérios principais

	danos	custos	aplicabilidade	valor acrescentado	prioridade
danos	1	1	3	3	0,375
custos	1	1	3	3	0,375
aplicabilidade	1/3	1/3	1	1	0,125
valor acrescentado	1/3	1/3	1	1	0,125
Total	2,6667	2,6667	8,0000	8,0000	1

Nas linhas de grau 2, considerou-se que os critérios dos danos e custos teriam a mesma importância para a escolha da política de manutenção a adoptar. Isto porque, embora à partida as consequências de falha e importância da linha sejam mais baixas do que nas linhas de grau 1, os danos têm sempre um peso importante, especialmente ao nível de danos de downtime. Já a aplicabilidade/implementação terá mais importância do que nas linhas de grau 1, pois o custo dos recursos necessários para aplicar política de manutenção mais elaboradas já serão mais significativos, quando comparados com os critérios com maior nível de prioridade. O potencial valor acrescentado embora já não seja tão importante pelo ao aumento de segurança, justifica-se devido à necessidade de redução das acções desnecessárias.

Matriz 20 – importância dos subcritérios dos danos

	Humanos	Downtime	Ambientais	Equipamento	imagem	prioridade
Humanos	1	1/5	3	1	1	0,130244937
Downtime	5	1	7	5	5	0,55710704
Ambientais	1/3	1/7	1	1/3	1/3	0,052158149
Equipamento	1	1/5	3	1	1	0,130244937
Imagem	1	1/5	3	1	1	0,130244937
Total	8,3333	1,7429	17,0000	8,3333	8,3333	1

Os mais importantes serão os danos de downtime, pois são os mais prováveis e significativos. As categorias de danos humanos, no equipamento e de imagem terão todas a mesma importância, sendo os danos no ambiente pouco significativos quando comparados com os restantes.

Matriz 21 – importância subcritérios dos custos

	subs. Total	inspecção	manut/interv.	produto perdido	seguros	prioridade
subst. Total	1	5	3	9	7	0,502819496
inspecção	1/5	1	1/3	5	3	0,134350441
manut/intervenção	1/3	3	1	7	5	0,260231588
produto perdido	1/9	1/5	1/7	1	1/3	0,034820809
seguros	1/7	1/3	1/5	3	1	0,067777667
Total	1,7873	9,5333	4,6762	25,0000	16,3333	1

Os custos de substituição total são os mais importantes, porque ao contrário das linhas de grau 1, à partida os custos de manutenção nas linhas de grau 2 não serão tão elevados, devido à menor frequência destas intervenções, cota inferior e possível não existência de isolamento. Embora importantes, os custos de inspecção são colocados em terceiro na ordem de importância, devido também à menor importância e à redução do número de actividades associadas a este tipo de acção.

Matriz 22 – Subcritérios da aplicabilidade

	Investimento	M.O.	prioridade
Investimento H/s	1	5	0,8333
M.O.	1/5	1	0,1667
Total	1,2000	6,0000	1

O investimento em hardware e software é sempre superior e consequentemente mais importante que o investimento em M.O., pois neste caso as linhas ainda podem justificar a implementação de medidas de manutenção elaboradas que necessitem de recursos extra.

Matriz 23 – Subcritérios de valor acrescentado

	Acções desn	Tempo de vida	segurança	prioridade
acções desnecessárias	1	1	3	0,4286
utilização tempo vida	1	1	3	0,4286
Segurança	1/3	1/3	1	0,1429
Total	2,3333	2,3333	7,0000	1

O factor da segurança já não é tão importante como nas linhas de grau 1, daí que se considere que os outros dois critérios sejam mais importantes para a escolha de uma política de manutenção adequada

Matriz 24 – comparação entre os diferentes critérios dos danos humanos

	lesões lig/medias	incapacidade	morte	prioridade
lesões ligeiras/medias	1	3	7	0,6434
incapacidade	1/3	1	5	0,2828
morte	1/7	1/5	1	0,0738
Total	1,4762	4,2000	13,0000	1

As linhas com grau dois à partida têm consequências de falha médias, logo o critério de danos humanos por morte não será muito viável e consequentemente importante. As lesões ligeiras/médias e as lesões por incapacidade são mais prováveis de acontecer, daí a sua importância mais elevada.

Matriz 25 -

	Perdas directas	Perdas indirectas	start up	prioridade
perdas directas	1	5	5	0,7143
perdas indirectas	1/5	1	1	0,1429

custos start up	1/5	1	1	0,1429
Total	1,4000	7,0000	7,0000	1

As perdas directas, na própria unidade, serão as mais importantes, pois com uma importância média à partida este tipo de linhas não provoca grandes consequências nas unidades adjacentes.

Matriz 26 – subcritérios dos danos no equipamento

	na unidade	unid. Próx	prioridade
na unidade	1	5	0,8333
unidades próximas	1/5	1	0,1667
Total	1,2000	6,0000	1

Pelo mesmo motivo, que os critérios anteriores, os danos de equipamento serão mais importantes na própria unidade em que esta inserida a linha.

Matriz 27 – critérios de danos na imagem da empresa

	industriais	geral	prioridade
clientes industriais	1	5	0,8333
público em geral	1/5	1	0,1667
Total	1,2000	6,0000	1

À partida um acidente neste tipo de linhas não terá consequências visíveis e do conhecimento do grande público, daí que a possível afectação da imagem da empresa a nível industrial seja mais importante.

Matriz 28 – actividades de inspecção

	actividades	mão de obra	prioridade
actividades	1	3	0,7500
mão de obra	1/3	1	0,2500
Total	1,3333	4,0000	1

Quando comparadas com as linhas de grau 1, as actividades extra necessárias para a inspecção das linhas de grau 2 são também mais importantes que a mão de obra, sendo esta no entanto mais baixa. Isto porque à partida linhas deste grau não necessitam de tantas acções de montagem de andaimes e retirada de isolamento, por exemplo.

Matriz 29 – danos na imagem

	imagem	ranking	prioridade
imagem da empresa	1	1	0,5000
ranking da empresa	1	1	0,5000
Total	2,0000	2,0000	1

Modelização do processo de decisão para manutenção de tubagens industriais numa refinaria

Tabela Resumo

						correctiva	preventiva	oportunistic a	condicion ada	predictiva	correctiva	preventiva	oportunistic a	condiciona da	predictiva
danos	0,3750	humanos	0,1302	ligeiros/médios	0,6434	0,0381	0,1362	0,1362	0,3447	0,3447	0,0012	0,0043	0,0043	0,0108	0,0108
				incapacidade	0,2828	0,0381	0,1362	0,1362	0,3447	0,3447	0,0005	0,0019	0,0019	0,0048	0,0048
				morte	0,0738	0,0381	0,1362	0,1362	0,3447	0,3447	0,0001	0,0005	0,0005	0,0012	0,0012
		downtime	0,5571	perdas directas	0,7143	0,0381	0,1362	0,1362	0,3447	0,3447	0,0057	0,0203	0,0203	0,0514	0,0514
				perdas indirectas	0,1429	0,0381	0,1362	0,1362	0,3447	0,3447	0,0011	0,0041	0,0041	0,0103	0,0103
				custos start up	0,1429	0,0381	0,1362	0,1362	0,3447	0,3447	0,0011	0,0041	0,0041	0,0103	0,0103
		ambientais	0,0522			0,0381	0,1362	0,1362	0,3447	0,3447	0,0007	0,0027	0,0027	0,0067	0,0067
		equipamento	0,1302	na unidade em estudo	0,8333	0,0381	0,1362	0,1362	0,3447	0,3447	0,0016	0,0055	0,0055	0,0140	0,0140
				próximas	0,1667	0,0381	0,1362	0,1362	0,3447	0,3447	0,0003	0,0011	0,0011	0,0028	0,0028
		imagem	0,1302	clientes industriais	0,8333	0,0381	0,1362	0,1362	0,3447	0,3447	0,0016	0,0055	0,0055	0,0140	0,0140
publico geral	0,1667			0,0381	0,1362	0,1362	0,3447	0,3447	0,0003	0,0011	0,0011	0,0028	0,0028		
custos	0,3750	subst total	0,5028			0,2000	0,2000	0,2000	0,2000	0,2000	0,0377	0,0377	0,0377	0,0377	0,0377
		inspecção	0,1344	M.O.	0,1667	0,5662	0,1559	0,1559	0,0610	0,0610	0,0048	0,0013	0,0013	0,0005	0,0005
				andaimes/isolam	0,8333	0,5662	0,1559	0,1559	0,0610	0,0610	0,0238	0,0065	0,0065	0,0026	0,0026
		man/inter	0,2602			0,0381	0,1362	0,1362	0,3447	0,3447	0,0037	0,0133	0,0133	0,0336	0,0336
		produto perd	0,0348			0,0381	0,1362	0,1362	0,3447	0,3447	0,0005	0,0018	0,0018	0,0045	0,0045
aplicabilidade/ implementação	0,1250	seguros	0,0678			0,0381	0,1362	0,1362	0,3447	0,3447	0,0010	0,0035	0,0035	0,0088	0,0088
		investm H/S	0,8333			0,2975	0,2975	0,2975	0,0287	0,0789	0,0310	0,0310	0,0310	0,0030	0,0082
		M.O.	0,1667			0,2975	0,2975	0,2975	0,0287	0,0789	0,0062	0,0062	0,0062	0,0006	0,0016
valor acrescentado	0,1250	acções desneces	0,4286			0,0886	0,0886	0,0886	0,4962	0,2381	0,0047	0,0047	0,0047	0,0266	0,0128
		utilização vida	0,4286			0,0326	0,1197	0,0622	0,3927	0,3927	0,0017	0,0064	0,0033	0,0210	0,0210
				imagem empresa	0,5000	0,0381	0,1362	0,1362	0,3447	0,3447	0,0003	0,0012	0,0012	0,0031	0,0031
		segurança	0,1429	ranking	0,5000	0,0381	0,1362	0,1362	0,3447	0,3447	0,0003	0,0012	0,0012	0,0031	0,0031
											0,1301	0,1660	0,1629	0,2743	0,2668

Grau 3

Matriz 30 - matriz de comparação entre os principais critérios (nível 2) e o objectivo principal

	danos	custos	aplicabilidade	valor acrescentado	prioridade
danos	1	1/7	1/7	1/5	0,048290598
custos	7	1	1	3	0,393589744
aplicabilidade	7	1	1	3	0,393589744
valor acrescentado	5	1/3	1/3	1	0,164529915
Total	20,0000	2,4762	2,4762	7,2000	1

As linhas de grau 3 têm à partida consequências baixa assim como um nível de importância baixo, e consequentemente os critérios dos danos serão os menos importantes para a escolha da política de manutenção a adoptar, pois como não são muito prováveis de acontecer, a sua importância irá ser baixa.

Os critérios da aplicabilidade e custos serão então igualmente importantes, com um índice de prioridade de 0,39. Isto justifica-se pois na definição da política de manutenção para linhas pouco críticas, o mais importante será reduzir os recursos necessários para a implementação da política de manutenção, assim como os custos. Pois linhas pouco críticas não necessitam de políticas elaboradas e evoluídas, que requerem elevados recursos de implementação. O objectivo também será reduzir os custos, nomeadamente os de inspecção e manutenção, pois estas linhas não justificam elevados investimentos a este nível, tal como é o caso das linhas da rede de água de incêndio da refinaria.

O valor acrescentado será então o terceiro critério mais importante, pois embora o objectivo na política escolhida seja reduzir o número de acções desnecessárias, qualquer um dos tipos de políticas não irá resultar num grande valor acrescentado ao nível de segurança, pois linhas de grau 3 à partida têm baixas consequências de falha.

Matriz 31 - Matriz de comparação entre os subcritérios dos danos (nível 3) e a sua importância para os dados em geral (nível 2)

	Humanos	Downtime	Ambientais	Equipamento	imagem	Probabilidade
Humanos	1	1/5	3	1/3	3	0,1273519
Downtime	5	1	7	3	7	0,5048624
Ambientais	1/3	1/7	1	1/5	1	0,0545835
Equipamento	3	1/3	5	1	5	0,2586188
Imagem	1/3	1/7	1	1/5	1	0,0545835
Total	9,6667	1,8190	17,0000	4,7333	17,0000	1

Danos mais importantes são os de downtime, porque mesmo que à partida as linhas com criticidade de grau 3 não tenham grande importância no funcionamento da unidade, parte-se do princípio que uma linha para estar em funcionamento terá alguma função e objectivo de funcionamento, caso contrário não estaria a funcionar. Consequentemente, é lógico dizer que nenhuma linha deve parar muito tempo, o que justifica a importância dos custos de downtime.

Estes danos de downtime podem causar danos de equipamento, o que justifica a classificação com a escala 3 dos danos de downtime em relação aos danos de equipamento.

Até uma fuga de água, se for vapor, pode causar lesões ligeiras, sendo por isso os danos de importância os terceiros mais importantes para os danos em geral. Neste tipo de linhas os danos ambientais e de imagem serão insignificantes, salvo raras excepções.

Matriz 32 - Matriz de comparação entre os subcritérios dos custos (nível 3) e a sua importância para os custos em geral (nível 2)

	subs. Total	inspecção	manut/interv.	produto perdido	seguros	prioridade
subst. Total	1	7	5	9	9	0,5858
inspecção	1/7	1	1/3	3	3	0,1085
manut/intervenção	1/5	3	1	5	5	0,2120
produto perdido	1/9	1/3	1/5	1	1	0,0469
seguros	1/9	1/3	1/5	1	1	0,0469
Total	1,5651	11,6667	6,7333	19,0000	19,0000	1

Os custos de substituição são os mais elevados, e consequentemente este tipo de acção é pouco justificável e evitável ao máximo possível, daí a sua importância elevada. Os custos de manutenção serão os segundos mais importantes para este tipo de linha, mas longe de terem a importância dos de substituição total, pois não só a frequência de intervenções neste grau de linhas é baixa (ao contrário das linhas de grau 1), como em princípio a probabilidade de estarem localizadas a uma cota elevada e terem isolamento é inferior.

Como é sempre necessária mão de obra para efectuar acções de inspecção, estes são os terceiros custos mais importantes, mesmo que ao nível de actividades extra para a realização de inspecção estes tipos de custos são sejam importantes. Finalmente, os custos de produto perdido e seguros serão insignificantes nesta categoria.

Matriz 33 - Matriz de comparação entre os subcritérios da aplicabilidade (nível 3) e a sua importância para a aplicabilidade em geral (nível 2)

	Investimento hard/software	M.O.	Probabilidade
Investimento H/s	1	1/5	0,1667
M.O.	5	1	0,8333
Total	6,0000	1,2000	1

O investimento em recursos de hardware/software é sempre à partida mais importante para o critério da aplicabilidade, pois será economicamente mais dispendioso do que a mão-de-obra.

Matriz 34 - Matriz de comparação entre os subcritérios do valor acrescentado (nível 3) e a sua importância para o valor acrescentado em geral (nível 2)

	redução accoes	utilizacao	segurança	prioridade
acções desnecessárias	1	5	9	0,7231
utilização tempo vida	1/5	1	5	0,2157

Segurança	1/9	1/5	1	0,0612
Total	1,3111	6,2000	15,0000	1

A segurança não vai ser importante na definição do valor acrescentado pelo tipo de manutenção deste tipo de linhas, pois à partida linhas com grau 3 não apresentarão problemas de segurança. O objectivo neste tipo de linhas é reduzir as acções desnecessárias, tais como inspecções, de modo a reduzir custos, justificando-se assim a maior importância atribuída a este critério. A maximização do tempo de vida destas linhas também será um objectivo, pois não sendo estas críticas, espera-se tirar o maior aproveitamento do tempo de vida, de modo a amortizar os custos.

Matriz 35 - Matriz de comparação entre os subcritérios dos danos humanos (nível 4) e a sua importância para linhas de grau 3

	lesões lig/medias	incapacidade	morte	prioridade
lesões ligeiras/medias	1	7	9	0,7766
incapacidade	1/7	1	3	0,1549
morte	1/9	1/3	1	0,0685
Total	1,2540	8,3333	13,0000	1

Nas linhas de grau 3 as consequências de falha da linha serão baixas, por isso os danos humanos relacionados com incapacidade e morte terão pouca importância.

Matriz 36 - Matriz de comparação entre os subcritérios dos danos de downtime

	perdas directas	perdas indirect	start up	prioridade
perdas directas	1	3	1/5	0,1932
perdas indirectas	1/3	1	1/7	0,0833
custos start up	5	7	1	0,7235
Total	6,3333	11,0000	1,3429	1

Custos *de start up* são os mais importantes, pois são fixos independentemente do grau de criticidade e como já foi previamente dito, nenhuma linha é concebida para estar fora de serviço muito tempo, pois ao fim de algum tempo (mais ou menos, dependendo da importância da linha) terá de parar a unidade e consequentemente originar custos de *start up*. Para além disso, linhas com criticidade baixa à partida têm importância baixa, por isso ambas as categorias das perdas não terão muita importância.

Matriz 37 - Matriz de comparação entre os subcritérios dos danos de equipamento

	na unidade	unid. Próx	prioridade
Na unidade	1	7	0,8750
Unidades próximas	1/7	1	0,1250
Total	1,1429	8,0000	1

Embora à partida linhas deste grau não provocarem danos no equipamento, estes caso aconteçam serão sempre superiores na unidade em que a linha esta inserida.

Matriz 38 - Matriz de comparação entre os subcritérios dos danos de imagem

	Industriais	Geral	Probabilidade
Clientes industriais	1	7	0,8333
Público em geral	1/7	1	0,1667
Total	1,1429	8,0000	1

Como as linhas de grau 3 não têm consequências elevadas, os danos de imagem serão sempre mais importantes ao nível dos clientes industriais, pois mesmo que algo corra mal, nunca será visível para o público em geral, daí se ter comparado este parâmetro com o valor 7 da escala – “uma actividade é muito mais importante do que a outra, sendo esta evidência demonstrada na prática”.

Matriz 39 – Matriz de comparação entre os subcritérios dos custos de inspecção

	actividades	mão de obra	prioridade
actividades	1	1/7	0,1250
mão de obra	7	1	0,8750
Total	8,0000	1,1429	1

O mais importante para a escolha da politica de manutenção para as linhas de grau 3 serão os custos de mão-de-obra de inspecção, pois em principio não existirão custos elevados de actividades, pois as linhas não estarão isoladas ou em altura.

Matriz 40 - Matriz de comparação entre os subcritérios do valor acrescentado ao nível dos subcritérios da segurança

	imagem	ranking	prioridade
Imagem da empresa	1	5	0,8333
Ranking da empresa	1/5	1	0,1667
Total	1,2000	6,0000	1

Ao nível de linhas com grau 3, não será importante o potencial valor acrescentado ao nível da segurança pela política de manutenção escolhida, pois em princípio mesmo que se opte por uma política correctiva, as consequências de falha da linha não serão graves. No entanto, este critério neste grau de linhas terá sempre mais impacto na imagem da empresa para os próprios trabalhadores do que na imagem da empresa para o exterior (ranking).

Modelização do processo de decisão para manutenção de tubagens industriais numa refinaria

Tabela resumo

nivel 2		nivel 3		nivel 4		nivel 5					TOTAIS				
						correctiva	preventiva	oportunística	condicionada	predictiva	correctiva	preventiva	oportunística	condicionada	predictiva
danos	0,0483	humanos	0,1274	Ligeiros /médios	0,7766	0,0381	0,1362	0,1362	0,3447	0,3447	0,0002	0,0007	0,0007	0,0016	0,0016
				incapacidade	0,1549	0,0381	0,1362	0,1362	0,3447	0,3447	0,0000	0,0001	0,0001	0,0003	0,0003
				morte	0,0685	0,0381	0,1362	0,1362	0,3447	0,3447	0,0000	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
		downtime	0,5049	perdas directas	0,1932	0,0381	0,1362	0,1362	0,3447	0,3447	0,0002	0,0006	0,0006	0,0016	0,0016
				perdas indirectas	0,0833	0,0381	0,1362	0,1362	0,3447	0,3447	0,0001	0,0003	0,0003	0,0007	0,0007
				custos start up	0,7235	0,0381	0,1362	0,1362	0,3447	0,3447	0,0007	0,0024	0,0024	0,0061	0,0061
		ambientais	0,0546			0,0381	0,1362	0,1362	0,3447	0,3447	0,0001	0,0004	0,0004	0,0009	0,0009
		equipamento	0,2586	na unidade em estudo	0,8750	0,0381	0,1362	0,1362	0,3447	0,3447	0,0004	0,0015	0,0015	0,0038	0,0038
				próximas	0,1250	0,0381	0,1362	0,1362	0,3447	0,3447	0,0001	0,0002	0,0002	0,0005	0,0005
		imagem	0,0546	clientes industriais	0,8750	0,0381	0,1362	0,1362	0,3447	0,3447	0,0001	0,0003	0,0003	0,0008	0,0008
				publico geral	0,1250	0,0381	0,1362	0,1362	0,3447	0,3447	0,0000	0,0000	0,0000	0,0001	0,0001
custos	0,3936	subst total	0,5858			0,2000	0,2000	0,2000	0,2000	0,2000	0,0461	0,0461	0,0461	0,0461	0,0461
		inspecção	0,1085	M.O.	0,8750	0,5662	0,1559	0,1559	0,0610	0,0610	0,0211	0,0058	0,0058	0,0023	0,0023
				andaimes/isolam	0,1250	0,5662	0,1559	0,1559	0,0610	0,0610	0,0030	0,0008	0,0008	0,0003	0,0003
		man/inter	0,2120			0,0381	0,1362	0,1362	0,3447	0,3447	0,0032	0,0114	0,0114	0,0288	0,0288
		produto perdido	0,0469			0,0381	0,1362	0,1362	0,3447	0,3447	0,0007	0,0025	0,0025	0,0064	0,0064
seguros	0,0469			0,0381	0,1362	0,1362	0,3447	0,3447	0,0007	0,0025	0,0025	0,0064	0,0064		
		aplicabilidade/ implementação	0,3936	investm H/S	0,1667			0,2975	0,2975	0,2975	0,0287	0,0789	0,0195	0,0195	0,0195
M.O.	0,8333					0,2975	0,2975	0,2975	0,0287	0,0789	0,0976	0,0976	0,0976	0,0094	0,0259
valor acrescentado	0,1645	acções desneces	0,7231			0,0886	0,0886	0,0886	0,4962	0,2381	0,0105	0,0105	0,0105	0,0590	0,0283
		utilização vida	0,2157			0,0326	0,1197	0,0622	0,3927	0,3927	0,0012	0,0042	0,0022	0,0139	0,0139
		segurança	0,0612	imagem empresa	0,8333	0,0381	0,1362	0,1362	0,3447	0,3447	0,0003	0,0011	0,0011	0,0029	0,0029
				ranking	0,1667	0,0381	0,1362	0,1362	0,3447	0,3447	0,0001	0,0002	0,0002	0,0006	0,0006
											0,2059	0,2090	0,2069	0,1946	0,1836

Índices de inconsistência

Matrizes	Ir
1	0,044369
2	0,079938
3	0,026629
4	0
5	0,063287
6	0,337114
7	0,181685
8	0
9	0
10	0
11	0
12	0,021421
13	0,021421
14	0,021421
15	0,021421
16	0,021421
17	0,021421
18	0,021421
19	0,021421
20	0,021421
21	0,021421
22	0,021421
23	0
24	0,021146
25	0,021146
26	0,021421
27	0,021421
28	0,021421
29	0,030115
30	0,030115
31	0,009424
32	0,047652
33	0,021421
34	0,021421
Ir geral	0,036334

Grau 1

Matrizes	Ir
1	0
2	0,016025
3	0,054641
4	0
5	0
6	0,062992
7	0
8	0
9	0
10	0
11	0
12	0,021421
13	0,021421
14	0,021421
15	0,021421
16	0,021421
17	0,021421
18	0,021421
19	0,021421
20	0,021421
21	0,021421
22	0,021421
23	0
24	0,021146
25	0,021146
26	0,021421
27	0,021421
28	0,021421
29	0,030115
30	0,030115
31	0,009424
32	0,047652
33	0,021421
34	0,021421
Ir geral	0,018706

Grau 2

Matrizes	Ir
1	0,02793
2	0,030854
3	0,044571
4	0
5	0,115427
6	0,078982
7	0,063287
8	0
9	0
10	0
11	0
12	0,021421
13	0,021421
14	0,021421
15	0,021421
16	0,021421
17	0,021421
18	0,021421
19	0,021421
20	0,021421
21	0,021421
22	0,021421
23	0
24	0,021146
25	0,021146
26	0,021421
27	0,021421
28	0,021421
29	0,030115
30	0,030115
31	0,009424
32	0,047652
33	0,021421
34	0,021421
Ir geral	0,025394

Grau 3

Anexo L – Análise de sensibilidade*Grau 1*

Após a aplicação da metodologia AHP, esta recomendava a aplicação de uma política de manutenção condicionada ou predictiva para as linhas definidas com grau de criticidade 1, com uma prioridade de 0,3072 e 0,3040, nomeadamente. Ao nível das prioridades dos 4 principais níveis de critérios, a categoria danos era a que reunia maior prioridade, e consequentemente importância, sendo a aplicabilidade o critério menos importante para este tipo de linhas.

Tabela 29 – Diferentes cenários para a análise de sensibilidade de linhas de grau 1

Critério	Valor original do critério	Valor usado na análise de sensibilidade	Correctiva (0,0881)	Preventiva (0,1507)	Oportunística (0,1501)	Condicionada (0,3072)	Preditiva (0,3040)
Danos	0,5578	0,25	0,1303	0,1632	0,1625	0,2733	0,2708
Custos	0,263	0,5	0,1301	0,1637	0,1631	0,2730	0,2719
Aplicabilidade	0,05	0,5	0,1848	0,2163	0,2158	0,1715	0,1916
Valor acrescentado	0,12	0,24	0,0768	0,1486	0,1474	0,3502	0,3382

Diminuindo para metade a importância do critério mais importante, danos, (e aumentando o valor dos restantes para o dobro) foi possível verificar a robustez da decisão quanto aos tipos de políticas a implementar neste tipo de linhas. Isto porque a manutenção condicionada continuará a ser a melhor opção, embora baixa ligeiramente a sua prioridade enquanto a da manutenção correctiva aumenta.

Mesmo que o valor dos custos seja aumentado para o dobro, as decisões finais não serão afectadas, o mesmo acontecendo com a alteração do parâmetro do valor acrescentado, sendo que neste caso a opção pelas políticas de manutenção condicionada e predictiva é ainda mais sustentada.

Apenas quando o factor da aplicabilidade é aumentado para uns improváveis 0,5 é que a decisão quanto ao tipo de manutenção mais adequado é alterada, passando a opção mais válida a ser a manutenção preventiva e/ou oportunística, com uma prioridade de 0,21. No entanto, considerar a aplicabilidade o factor mais importante em linhas críticas não é minimamente viável, pois a sua importância não pode ser comparada com a de possíveis danos e custos destas linhas.

Grau 2

Os resultados na aplicação do AHP definiram que a manutenção condicionada também seria a mais apropriada para linhas de grau 2, ao contrário do que seria previsto. A análise de sensibilidade efectuada confirma esta opinião, pois a decisão é menos estável do que nas linhas de grau 1.

Tabela 30 – Diferentes cenários para a análise de sensibilidade de linhas de grau 2

CrITÉrio	Valor original do critÉrio	Valor usado na análise de sensibilidade	Correctiva (0,1301)	Preventiva (0,1660)	Oportunística (0,1629)	Condicionada (0,2743)	Preditiva (0,2668)
Danos	0,375	0,75	0,0763	0,1511	0,1494	0,3187	0,3145
Custos	0,375	0,75	0,1710	0,1771	0,1756	0,2650	0,2613
Aplicabilidade	0,1275	0,46	0,1883	0,2117	0,2073	0,1948	0,1980
Valor acrescentado	0,1275	0,46	0,1211	0,1589	0,1475	0,3072	0,2654

Como demonstrado na Tabela 30, os resultados indicam que a ordem das prioridades das alternativas não é sensível a mudanças na importância nos danos, custos e valor acrescentado, sendo sempre a manutenção condicionada a melhor opção. No entanto, caso se aumente para mais do triplo a prioridade da aplicabilidade, a melhor alternativa será a preventiva.

Grau 3

A análise AHP definiu a manutenção preventiva como a melhor opção para linhas com um grau de criticidade baixo, logo seguidas das políticas correctivas e oportunísticas. Isto porque neste tipo de linhas, os custos de implementação/aplicabilidade de políticas elaboradas já têm um elevado peso quando comparados com os restantes critérios.

Tabela 31 – Diferentes cenários para linhas de grau 3

CrITÉrio	Valor original do critÉrio	Valor usado na análise de sensibilidade	Correctiva (0,2059)	Preventiva (0,2090)	Oportunística (0,2069)	Condicionada (0,1946)	Preditiva (0,1836)
Danos	0,0482	0,15	0,1874	0,2008	0,1989	0,2116	0,2012
Custos	0,3935	0,7	0,1941	0,1899	0,1889	0,2165	0,2107
Aplicabilidade	0,3935	0,7	0,2499	0,2532	0,2522	0,1123	0,1325
Valor acrescentado	0,1645	0,3	0,1829	0,1972	0,1935	0,2311	0,1953

Quando se triplica o valor da importância dos danos, atribuindo a este critério a mesma importância que o potencial valor acrescentado por uma política de manutenção adequada neste tipo de linhas, a manutenção condicionada volta a ser a mais adequada. No entanto, não é explicável que os danos tenham tanta importância em linhas de grau 3, pois sendo a sua importância e consequências baixas, danos humanos, de equipamento ou ambientais à partida não irão existir.

Também quando a importância dos custos é aumentada quase para o dobro, a manutenção condicionada revela-se a mais adequada, no entanto sempre muito próxima dos restantes tipos de manutenção, sem que existam grandes diferenças nas classificações das prioridades. Atribuindo o mesmo aumento de importância ao critério da aplicabilidade, a posição das manutenções preventivas e oportunísticas sairá reforçada, sendo os valores da manutenção condicionada muito baixos. De referir que os valores das prioridades das manutenções preventivas e oportunísticas nunca atingem um valor tão baixo como este quando se mudam as prioridades dos outros critérios, o que pode demonstrar a sustentabilidade da decisão definida pelo AHP.