



M 2019

DESENVOLVIMENTO DE UMA METODOLOGIA DE APOIO À DECISÃO PARA A MANUTENÇÃO PREDITIVA DE DISJUNTORES DE UMA SUBESTAÇÃO ELÉTRICA

JOÃO SILVA

AUTOR

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO APRESENTADA

À FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

LUÍS GUIMARÃES

ORIENTADOR

PROFESSOR DOUTOR, FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

CANDIDATO	JOÃO ALBERTO FERREIRA FIDALGO BARBOSA DA SILVA	CÓDIGO	UP201302854
TÍTULO	DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE APOIO À DECISÃO PARA A MANUTENÇÃO PREDITIVA DOS ATIVOS DE UMA SUBESTAÇÃO ELÉTRICA		
DATA	9 DE SETEMBRO DE 2019		
LOCAL	FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO - SALA F106		
JÚRI			
PRESIDENTE	LAURA MARIA MELO RIBEIRO DEMM/ FEUP		
ARGUENTE	ARMANDO LUÍS FERREIRA LEITÃO DEGI/FEUP		
ORIENTADOR	LUÍS FILIPE RIBEIRO DOS SANTOS GUIMARÃES DEGI/FEUP		

*“O que impede de saber não são nem o tempo nem a inteligência,
mas somente a falta de curiosidade”*

-Agostinho da Silva

RESUMO

A nova conjuntura económica, criada pela liberalização dos mercados de eletricidade e pela introdução da concorrência, fez agravar de forma drástica a pressão que a administração das empresas energéticas sente relativamente à gestão dos ativos da sua rede elétrica. Uma potencial falha poderia encaminhar para um conjunto de problemas difíceis de gerir, tais como, lapsos na interrupção do fornecimento de energia, redução da fiabilidade da rede e, por parte do cliente, grandes perdas económicas, assim como impactos a nível ambiental. Desta forma, a projeção e manutenção da rede de energia elétrica evoluem de forma a primarem pela excelência.

Neste contexto, o conceito de gestão de ativos assume um papel bastante pertinente, quer em termos de pesquisa, quer a nível prático, pois permite uma mais eficiente coordenação por parte da organização perante o valor dos seus ativos, extraíndo destes as máximas potencialidades.

O objetivo da presente dissertação foi propor uma alteração do plano anteriormente estabelecido para vida gestão dos ativos e que se passe a adotar uma abordagem baseada no risco.

Para tal, é sugerida uma metodologia de apoio à decisão para a manutenção preditiva do risco, associado às avarias dos disjuntores. A estratégia de manutenção baseado no risco, foca-se nas consequências do evento e na forma como a manutenção/substituição pode trazer benefícios na redução do risco.

É expectável que a metodologia proposta permita determinar com mais clarividência e segurança, como e quando realizar a operação de manutenção, de modo a ser possível o estabelecimento de um equilíbrio entre o desempenho, os custos e os riscos. Com recurso às simulações realizadas é expectável que a metodologia proposta promova uma diminuição do valor das consequências de falha, do número de avarias e que tenha um impacto positivo de 500 € por disjuntor testado.

PALAVRAS-CHAVE

Gestão de Ativos, Risco, Disjuntores, Probabilidade de Falha, Ações de Manutenção

ABSTRACT

The new economic conjuncture, created by the liberalization of electricity markets and the introduction of competitors, aggravated the pressure that energy companies goes through, while managing their assets, in a drastic way. A potential flaw could lead to numerous problems, such as lack of energy supply, reduced network credibility, large economical deficits, as well as any environmental impact. Therefore, the projection and maintenance of the electric power network evolves in order to increase its excellence.

In this context, the concept of asset management assumes a very relevant role, both in terms of research and in practice, as it allows for a more efficient coordination by the organization regarding the value of its assets, extracting from them the maximum potentialities.

The objective of the present dissertation was to propose the change of the previously established plan for the asset life cycle and adopt a more holistic position for each asset.

To this end, a decision support methodology for predictive maintenance of circuit breaker risk is suggested. The risk-based maintenance strategy focuses on the consequences of the event and how maintenance / replacement can bring benefits in risk reduction.

It is expected that the proposed methodology will make it possible to determine more clearly and safety, how and when to carry out the maintenance operation so that a balance can be struck between performance, costs and risks. Using the simulations performed, it is expected that the proposed methodology will promote a decrease in the value of failure consequences, number of failures and have a positive impact of € 500 per circuit breaker tested.

KEY - WORDS

Asset Management, Risk, Circuit Breaker, Probability of Failure, Maintenance Actions

AGRADECIMENTOS

O finalizar desta dissertação é o fim de uma longa batalha de 5 anos de muito trabalho, de vivências, de entrega e sobretudo de grande desenvolvimento pessoal.

Este objetivo só foi possível de concretizar, por estar rodeado das pessoas que mais amo.

Gostaria de começar com um agradecimento muito especial aos meus pais, por todos os valores que me transmitiram, pela educação que me proporcionaram, pelo apoio incondicional, por toda atenção e dedicação com o meu bem-estar e por todos os momentos felizes que partilhamos.

Uma palavra de eterna gratidão também à minha irmã, que fez de mim um ser mais humilde e que contribuiu sem comparação para o meu sucesso e para a minha “construção” como pessoa.

Não posso deixar de lembrar, com grande estima, os meus amigos e companheiros desta aventura. A todos eles, um sincero obrigado pelos laços de amizade e pelo seu apoio sem limites.

Por fim, ao meu orientador, Professor Luís Guimarães, agradeço reconhecidamente a oportunidade proporcionada de fazer parte deste projeto e por todas as contribuições para a realização do trabalho.

ÍNDICE

1. Introdução.....	1
2. Enquadramento do Problema.....	4
2.1. Gestão de Ativos.....	4
2.2. Manutenção.....	7
2.3. Estratégias de Substituição e Reforma de Ativos numa Subestação Elétrica	8
2.4. Sistema de Apoio à Decisão	9
2.4.1. Apresentação ao Sistema de Apoio à Decisão	9
2.4.2. Modelo de dados	10
2.4.3. Sistema de Apoio à Decisão numa Subestação Elétrica	11
2.5. Análise Crítica.....	13
3. Disjuntores	15
3.1. Identificação do Sistema	15
3.2. Fenómenos Associados à Operação do Dispositivo	16
3.3. Parâmetros	17
3.4. Modo de Falha.....	18
3.5. Ações de Manutenção	20
4. Conceitos Relevantes	21
4.1. Avaliação do Risco na Gestão de um Ativo.....	21
4.1.1. Visão Geral	21
4.1.2. Áreas de Negócio Chave na Avaliação do Risco	21
4.1.3. Exemplo da avaliação do risco na gestão de um ativo por uma energética	23
4.2. Índice de Saúde	24
4.2.1. Introdução	24

4.2.2.	Cálculo do HI no caso da EDP	25
4.3.	Avaliação da Condição e Adequação Operacional	27
4.3.1.	Modelo de Deterioração	28
4.4.	Risco	28
4.4.1.	Definição	28
4.4.2.	Desenvolvimento de modelos de Gestão de Risco baseados na condição	29
4.5.	Probabilidade de Falha	30
4.5.1.	Visão atualmente implementado na EDP	30
4.5.2.	Sugestão de uma nova visão a adotar	31
4.6.	Índice de Criticidade	32
4.6.1.	Definição	32
4.6.2.	Classificação em bandas	32
4.7.	Quantificação do Risco.....	33
5.	Metodologia de Apoio à Manutenção preditiva.....	34
5.1.	Introdução	34
5.2.	Abordagem Proposta	34
5.3.	Análise Detalhada das Etapas de Consequência, Risco e Redução de Evento e Otimização	35
5.3.1.	Consequência do evento.....	35
5.3.2.	Risco de evento e Redução de Risco	36
5.3.3.	Otimização.....	37
6.	Modelo Numérico	39
6.1.	Preparação dos Dados.....	39
6.2.	Apresentação dos Resultados	42
6.2.1.	Excerto de uma simulação	42
6.2.2.	Resumo de todas as simulações	45

7. Discussão de Resultados	48
8. Conclusões e Sugestões Futuras	50
9. Referências Bibliográficas	52

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - As cinco principais questões numa gestão de um ativo [5]	5
Figura 2 - Ciclo de decisões e atividades a ter em conta na Gestão de Ativos [8]...	6
Figura 3 - Diagrama de classes para modelação dos algoritmos [16]	10
Figura 4 - Diagrama de classes da rede de ativos [16]	12
Figura 5 - Página de Ativo - Vista detalhada dos indicadores [16]	12
Figura 6 - Página de Ativo - Histórico [16]	13
Figura 7 - Função da probabilidade de falha [16]	16
Figura 8 - Processo de gestão de riscos implementado atualmente na Iberdrola e ScottishPower [7]	23
Figura 9 - Estrutura do algoritmo desenvolvido pela EDP [16].	25
Figura 10 - Curva de deterioração de um disjuntor [8]	28
Figura 11 - Fórmula de cálculo do Risco [13]	29
Figura 12 - Principais etapas a ter em conta no Desenvolvimento de Modelos de Gestão de Risco baseado na condição [13]	30
Figura 13 - Fórmula de obtenção do Overall da consequência de falha [8]	32
Figura 14 - Exemplo da aplicação da nova visão de risco num disjuntor secundário numa subestação de 11KV da energética Iberdrola e ScottishPower [8]	33
Figura 15 - Abordagem proposta para a estratégia de manutenção do sistema baseada no risco. Adaptado de [17].	34
Figura 16 - Gráfico que permite a associação de uma Idade a um HI	40
Figura 17 - Gráfico que permite a associação de um HI a uma PoF	41
Figura 18 - Etapas do Modelo Numérico	42

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Tempo de vida máxima por tecnologia do disjuntor [16].	16
Tabela 2- Relação entre a probabilidade de falha [16].	16
Tabela 3 - Parâmetros impactantes no Índice de Saúde da Câmara de corte [16].	17
Tabela 4 - Parâmetros impactantes no Índice de Saúde dos Comandos [16].	18
Tabela 5 - Modos de falha de um disjuntor [16].	18
Tabela 6 - Fatores impactantes nos modos de falha de um Disjuntor [16].	19
Tabela 7- Peso atribuídos a cada modo de falha [16].	19
Tabela 8 - As 5 possíveis categorias para a caracterização do IS [8].	25
Tabela 9 - Bandas 1 -4 para a definição de um Índice de Criticidade [8]	33
Tabela 10 - Atuação com base no HI	39
Tabela 11 - Pontos que serviram de referência para o gráfico de deterioração do disjuntor.	40
Tabela 12 - Pontos que serviram de referência para o gráfico que converte o HI para PoF	41
Tabela 13 - Banda de Criticidade associada a um valor de Consequência de Falha.	41
Tabela 14- Excerto de uma simulação do Cenário A (Anos 1,7,8,19).	43
Tabela 15 - Excerto de uma simulação do Cenário B (Anos 1,7,8,19)	44
Tabela 16 - Excerto de uma simulação do Cenário C (Anos 1,7,8,19)	45
Tabela 17 - Custo esperado total de cada Cenário.	46
Tabela 18- Custo das variáveis fixas no ciclo de vida de um Disjuntor	46
Tabela 19 - Resultados das 10 simulações. Somatório das consequências das avarias, número de falhas e de substituições/ intervenções para o período de 20 anos	46

LISTA DE NOMENCLATURAS

ERSE - Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos

RND - Rede Nacional da Distribuição

MT - Média Tensão

AT - Alta Tensão

BT - Baixa tensão

HI/ IS - Índice de Saúde

PoF - probabilidade de falha

OPF - Optimal Power Flow

1. INTRODUÇÃO

No âmbito do 5º ano do Mestrado Integrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, para a obtenção do Grau de Mestre, é proposta a elaboração de uma dissertação.

A escolha do tema “Desenvolvimento de uma Metodologia de Apoio à Decisão para a Manutenção Preditiva de Disjuntores de uma Subestação Elétrica”, surgiu pelo interesse pessoal em trabalhar num projeto que envolvesse a área de gestão de ativos. Com a minha ingressão no projeto nesta área tão particular espero expandir os meus conhecimentos neste âmbito, de forma a adquirir experiência que me possa ser útil num futuro próximo.

A energia elétrica é um recurso fundamental e imprescindível para o quotidiano da sociedade atual, sendo mesmo um dos fatores estratégicos para o desenvolvimento socioeconómico. Ao longo dos anos, tem-se assistido a um investimento na expansão das redes elétricas, convencionalmente impulsionado pela tecnologia, o que permitiu a sua rápida difusão a nível mundial. Este investimento é direcionado de forma a garantir o máximo de segurança, de confiabilidade da rede e de satisfação por parte do cliente.

Nos dias de hoje, as empresas enfrentam uma pressão cada vez maior para aumentar a sua eficiência operacional. Desta forma, a projeção e a manutenção da rede de energia elétrica evoluem de forma a estruturar-se um equilíbrio entre o investimento/substituição, com vista à obtenção de um maior nível de funcionamento e consequente eficiência. Para tal, é necessário proceder à análise dos principais riscos sob os quais a rede opera, bem como prever e avaliar as adversidades e riscos futuros.

O envelhecimento e a extensão dos ativos da rede elétrica são, neste momento, uma das questões que mais *stress* tem causado à administração da empresa estudada, uma vez que poderão potencialmente levar a desempenhos ineficientes da rede, assim como à falta de conformidade com os padrões de legislação das concessionárias, e ter, como consequência, um enorme impacto económico e mesmo, em última instância um impacto ambiental.

Desta forma, tendo em conta as dificuldades que existem na monitorização destas situações menos positivas e inevitáveis, torna-se evidente a pertinência desta questão, no que se refere à sua pesquisa e avaliação de função de forma a extrair o máximo valor deste ativo.

Para tal, é sugerida uma metodologia de apoio à decisão para a manutenção preditiva do risco dos disjuntores. A estratégia de manutenção proposta basear-se-á no risco, focando nas consequências do evento e na forma como a manutenção/substituição pode trazer benefícios na redução do risco. É expectável que a metodologia proposta permita, de forma mais rigorosa e fiável, determinar como e quando realizar a operação de manutenção, de modo a ser possível o estabelecimento de um equilíbrio entre o desempenho, os custos e os riscos.

Para atingir os objetivos da empresa, e tendo em consideração a qualidade do serviço, o estado físico dos ativos, a sustentabilidade futura e a responsabilidade social, estabeleceu-se um novo rigor, visando a melhoria contínua, relativamente às metodologias usadas na gestão dos seus ativos. É neste âmbito que se insere a presente dissertação, que pretende melhorar o plano anteriormente estabelecido para o ciclo de vida dos ativos, e se passe a adotar uma posição mais holística por parte de cada ativo.

Esta dissertação está estruturada de modo a permitir ao leitor entender a sequência de passos realizada, com vista a alcançar-se os objetivos propostos. Para sua melhor compreensão, este trabalho foi dividido em 8 Capítulos, iniciando com um resumo que sintetiza o alcance do trabalho desenvolvido.

No Capítulo 1, é apresentado o motivo de relevância para o desenvolvimento do trabalho, expondo também a motivação por parte da empresa na realização do trabalho. Neste capítulo também são apresentadas algumas considerações gerais e traçados os principais objetivos a tentar alcançar com o trabalho.

O Capítulo 2 apresenta o enquadramento do problema, oferecendo uma contextualização de conceito de gestão de ativos, das estratégias de substituição e reforma de ativos numa subestação. Neste capítulo é apresentada a estratégia de substituição e reforma por parte da EDP, onde se demonstra o protótipo construído de forma a auxiliar na tomada de decisão. No final do capítulo é realizada uma análise crítica dos aspetos mais interessantes e dos aspetos a melhorar neste protótipo.

O Capítulo 3 apresenta o ativo “Disjuntores”. Neste capítulo é feita uma apresentação extensiva deste ativo, desde a sua identificação, os fenómenos que estão associados à sua operação, os parâmetros que podem ser monitorizados, os modos de falha e as ações manutenção.

O Capítulo 4 apresenta conceitos importantes a ter em conta na delineação de modelos de gestão de risco baseado na condição. Este capítulo pretende ser seletivo e capturar o conhecimento atual, analisando-se de forma crítica os principais processos de negócio e as suas abordagens.

O Capítulo 5 apresenta a metodologia sugerida para a manutenção preditiva do risco dos disjuntores. A estratégia de manutenção baseado no risco, foca-se nas consequências do evento e na forma como a manutenção/substituição pode trazer benefícios, na busca pela melhoria contínua.

O Capítulo 6 demonstra o modelo numérico realizado para se testar o alcance da metodologia proposta no Capítulo 5. O modelo proposto propõe determinar o número de falhas, de intervenções e/ou de substituições e prever o impacto económico dos anteriores números determinados e do risco. Os objetivos anteriores mencionados, quando corretamente determinados, podem ser úteis na tomada de decisão de previsão/atuação a uma falha, tendo por base a criticidade e integridade do ativo.

O Capítulo 7 discute os principais resultados obtidos no capítulo anterior e retira conclusões sob os mesmos.

O Capítulo 8, sintetiza e proporciona uma perspetiva unificadora de todo o trabalho desenvolvido e aponta algumas sugestões de trabalhos futuros de forma a gerar novo conhecimento nesta área.

2. ENQUADRAMENTO DO PROBLEMA

Este capítulo pretende documentar o que está a ser feito atualmente no campo de estudo no contexto do problema em questão. Este capítulo será fundamental para explicar os acréscimos da tese ao problema a abordar. O capítulo oferecerá uma contextualização ao conceito de Gestão de ativos e das estratégias de substituição e reforma de ativos numa subestação. Para além disso será apresentada a estratégia de substituição e reforma aplicada pela EDP, onde se demonstra o protótipo construído de forma a auxiliar na tomada de decisão. No final do capítulo é realizada uma análise crítica dos aspetos mais interessantes e dos aspetos a melhorar neste protótipo.

2.1. GESTÃO DE ATIVOS

A EDP é uma das maiores empresas de gestão de ativos em Portugal, sendo a terceira maior empresa de produção de eletricidade e uma das maiores distribuidoras de gás na Península Ibérica. Em Portugal é responsável, por fornecer eletricidade a quase 10 milhões de clientes e por empregar mais de 12 mil colaboradores em todo o mundo. Como tal, a administração da empresa enfrenta inúmeros desafios na gestão de ativos, quer pela sua quantidade, quer pela diversidade de ativos que possui. No que se refere ao setor da eletricidade, a gestão de ativos em grandes quantidades, com diferentes funcionalidades, distintos no que diz respeito a condições ambientais, tipos de geografia, localização de implementação ou diferentes condições de exploração, é sempre um desafio preponderante para empresas como a EDP Distribuição, exigindo um controlo preciso para evitar riscos nas diversas áreas deles indissociáveis. Assim, uma gestão eficaz destes ativos requer uma compreensão robusta do seu comportamento e ações mais apropriadas a realizar para cada ativo particular, de forma a atenuar a degradação ou uma potencial falha [1-3].

De acordo com os autores investigados (Cardoso, J.P.M e DMN - MNPC) define-se a gestão de ativos físicos como uma metodologia que permite gerir o ciclo de vida de um equipamento com o melhor grau de eficiência ao menor custo possível. A sua implementação está dependente de um Sistema de gestão de ativos que, neste caso particular, assenta maioritariamente no desempenho dos ativos tangíveis, resumido pela Figura 1 [4,5]. Uma gestão de ativos baseia-se então em cinco questões principais: Estado Atual dos Ativos; Níveis de Serviço; Ativos Críticos; Mínimo Custo do Ciclo de Vida e Plano de Financiamento a longo prazo.

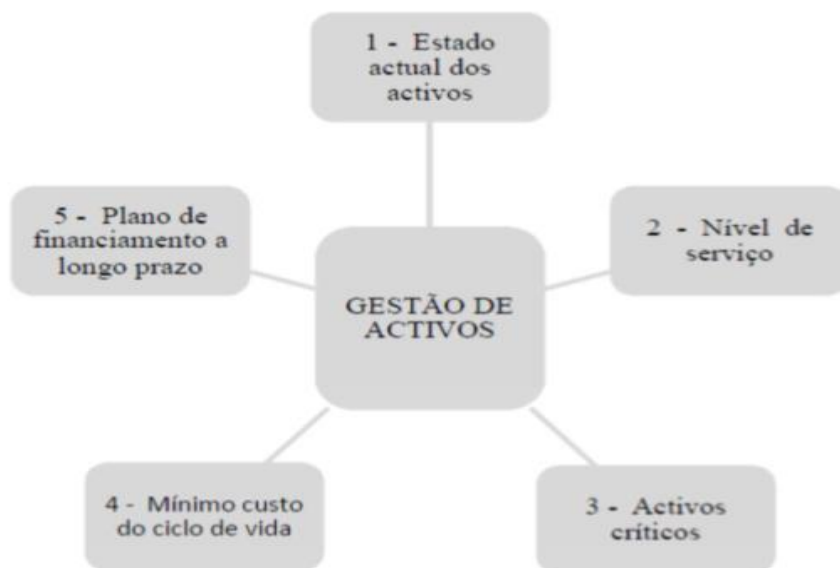


Figura 1 - As cinco principais questões numa gestão de um ativo [5]

“Um Sistema de Gestão de Ativos proporciona uma abordagem estruturada e coordenada para o desenvolvimento e controlo das atividades relacionadas com os ativos, tendo em conta todo o seu ciclo de vida técnico, de forma a garantir o retorno adequado, assegurando os padrões de qualidade e a segurança do serviço” [4]. Uma eficiente gestão de ativos tem um impacto significativo nas diversas áreas de negócio, na medida em que há uma melhoria no acompanhamento dos ativos e consequentemente ocorre uma melhoria na gestão de risco empresarial, e na melhoria da imagem corporativa, incluindo maior valor para os acionistas e maior satisfação dos colaboradores da empresa [1,2,4].

A integração da tomada de decisão no seio de uma organização é um dos princípios-chaves para uma boa política de gestão de ativos. Tal facto, requer uma visão bastante clara e objetiva, de como uma decisão flui desde os mais altos objetivos até uma simples ação de manutenção. Esta linha de visão permite um entendimento mais claro do papel e do objetivo de cada indivíduo, ou de uma equipa, no Sistema de Gestão de Ativos [6-15].

A Figura 2 apresenta o ciclo de decisões e atividades que devem ser tidos em conta na gestão de ativos baseados numa estrutura de Planear-Fazer-Rever. Esta estrutura é consistente com os propósitos da norma ISO 55000 e PAS55, apresentando uma terminologia bem estabelecida nos negócios e alinhada com o atual desenvolvimento da estrutura organizacional [6,8,13,14,15].



Figura 2 - Ciclo de decisões e atividades a ter em conta na Gestão de Ativos [8].

A análise da estrutura apresentada na Figura 2 permite fornecer uma representação simplificada das diferentes funções a ter em conta na gestão de ativos e as principais interfaces entre elas. Cada função deve ser definida através de um mapeamento detalhado de todo o processo que deve ser registado e integrado nos sistemas de dados da Gestão de Ativos. Um Sistema de Gestão de Ativos inclui todas as informações de um ativo que juntamente com as ferramentas de análise, as competências do *staff* e os processos, permitirá constituir todo o conhecimento necessário para as principais componentes de decisão e atividade, das intervenções de inspeção, manutenção e renovação de cada disciplina de ativos [8,13,14,15].

Neste momento, a EDP encontra-se a reavaliar a sua metodologia para melhorar as estratégias de substituição de ativos numa subestação elétrica, tendo em conta a necessidade de quantificar com uma maior eficiência os impactos que podem advir de uma potencial falha ou mesmo de uma falha real. Esta tarefa, porém, é complexa, por haver um baixo grau de previsibilidade de alguns parâmetros. Os parâmetros devem ser vistos de uma forma holística, ou seja, a compreensão integral dos fenómenos, e não a análise isolada dos seus constituintes. O estudo deste fenómeno (probabilidade causa) é fulcral, uma vez que as consequências ou severidades da falha englobam as componentes:

- Financeira - que advém da necessidade de reparação/substituição do ativo;
- Qualidade de serviço - resultante da energia não fornecida e dos impactos que tal causa ao cliente;
- Segurança - Toma em consideração os potenciais efeitos de uma falha, tanto para os colaboradores da EDP, como para a população em geral;

- Ambiental e Sociedade.

A EDP Distribuição tem como objetivo que a sua gestão de ativos seja assertiva, isto é, que haja um equilíbrio consciente entre desempenho, custo e risco. Para tal é uma aposta da empresa que correta identificação e caracterização das falhas inerentes. Desta forma, o controlo e monitorização do risco é feito com uma maior eficácia, concedendo informações acerca do tipo e do timing de ações de manutenção e investimento a realizar [1,2].

2.2. MANUTENÇÃO

A administração da EDP Distribuição tem como um dos objetivos maioritários da empresa melhorar o modelo de gestão de ativos. Para tal, desenvolveu um conjunto de políticas, procedimentos e sistemas que garantem a gestão efetiva do ativo desde o momento da instalação, até ao seu abate físico e financeiro.

Para alcançar esta máxima, é de extrema importância pôr em prática uma eficiente manutenção, na medida de prolongar a longevidade de um ativo, sem descurar o seu desempenho e compromisso técnico/económico. Um ato de manutenção deve focar-se na obtenção do melhor rendimento possível do ativo, com a maior capacidade de operabilidade dos mesmo e com a diminuição das paragens por avaria. Estas duas condições contribuem para a correta continuidade do serviço. Neste ato, deve procurar-se o maior estado de conservação do ativo, tendo sempre em consideração condições ambientais, de segurança e de higiene. Qualquer intervenção de manutenção deve garantir o mínimo custo global, através da análise dos custos de produção, dos custos originados pela manutenção ou ausência dela [1,2].

Uma definição mais técnica, é apresentada em definindo a manutenção como “a combinação de ações técnicas, administrativas e de gestão, realizadas durante o ciclo de vida de um bem, destinadas a mantê-lo, ou a repô-lo num estado em que possa desempenhar, com fiabilidade, a função requerida” [2].

O conceito de manutenção é mutável com o tempo, tendo evoluído de uma forma congruente, de um regime de lógica corretivo para um regime reativo e de carácter preventivo. Porém, é importante salientar que esta transição seja completa para apenas um conceito. Existe uma necessidade de coexistência das diversas abordagens, porque haverá sempre falhas associadas intempestivas.

Atualmente, a política de gestão de ativos da EDP é assente numa estratégia de manutenção e substituição de ativos baseada fundamentalmente na análise de históricos de indicadores de qualidade de serviço e avarias. Porém, e em conformidade com as novas regras de práticas de gestão de ativos baseadas no risco, o foco passou para a aplicação de metodologias de controlo e monitorização dos ativos, de forma a ser possível prever quando e como os ativos irão falhar. Desta forma, evitam-se intervenções desnecessárias e antecipa-se a ocorrência de falhas, atuando-se *a priori* da sua provável existência. Esta abordagem permite estabelecer, em qualquer circunstância, o tipo de manutenção mais

adequada para o efeito. Nesse sentido, a EDP Distribuição para alcançar uma abordagem focada na monitorização e controlo da condição, adotou um modelo de manutenção que inclui a Manutenção Preventiva e Corretiva. A presente dissertação foca na Manutenção Preventiva, mais concretamente a Manutenção Preventiva Preditiva, que é baseada na projeção da evolução da condição do ativo, determinada a partir dos dados disponíveis da monitorização de grandezas que possam traduzir a evolução da condição técnica, ou de possíveis sintomas que podem perspetivar a falha do ativo [1,2].

2.3. ESTRATÉGIAS DE SUBSTITUIÇÃO E REFORMA DE ATIVOS NUMA SUBESTAÇÃO ELÉTRICA

Nos dias de hoje, com uma nova circunstância económica implementada, existe uma maior pressão nas empresas energéticas, que exige um investimento mais racionalizado, eficiente economicamente e operacionalmente e uma maior fiabilidade da rede. Desta forma, o projeto, a manutenção e o fim de vida económica do ativo, são conceitos preponderantes na gestão, uma vez que é nestas fases que se analisam os principais riscos sob os quais a rede opera e operará no futuro.

A infraestrutura das subestações da EDP é responsável por fornecer a eletricidade a clientes domésticos, comerciais e industriais. Os principais ativos existentes numa subestação elétrica, tendo em conta a sua função e importância, são os Transformadores de potência, os Disjuntores, os Sistemas de Proteção de Comando e de Controlo e os Sistemas de Alimentação. O foco deste trabalho incidirá sob o ativo Disjuntores.

Durante a vida útil económica, os disjuntores costumam apresentar um elevado nível de fiabilidade, apesar de não apresentarem condições homogêneas durante a sua normal operação. A incerteza sobre o seu desempenho aumenta à medida que se aproxima ou excede o tempo original do projeto, normalmente de 30 a 40 anos. Alguns estudos consultados (Lopes, M.V. F. e Networks S. E. - Asset Health and Criticality Strategy), apontam que uma percentagem muito significativa dos disjuntores já estarão a aproximar-se ou até mesmo já ultrapassaram a vida útil projetada, de 40 anos. Com isto, a gestão destes ativos tem agravado o stress sentido pela administração da empresa, uma vez que estes estão a ficar envelhecidos. Este envelhecimento pode potenciar um desempenho infrutífero, levando à baixa da conformidade para com os padrões da legislação das concessionárias. Como consequência mais grave, poderá ainda surgir a necessidade de contrapartidas económicas, ou até um impacto ambiental negativo [1,2,8].

Para alcançar os parâmetros de excelência ao nível dos resultados operacionais, foi necessário desenvolver um plano priorizado, que fosse totalmente justificado e eficiente para os ativos de uma subestação. Assim a estratégia de substituição e reforma de ativos de uma subestação baseia-se em dados de desempenho, relatórios técnicos detalhados e pesquisas específicas, de forma a alcançar a condição e criticidade de um ativo de uma subestação. Uma correta aplicação desta estratégia permitirá uma abordagem mais

direcionada de forma a gerir o risco do negócio, garantir um investimento económico e preservar a sustentabilidade a longo prazo os ativos de uma subestação, através de intervenções de engenharia apropriadas. Mais especificamente a estratégia desenvolvida visa:

- Manter a segurança, a integridade e o desempenho da rede, garantindo a sustentabilidade a longo prazo e apoiar o crescimento da rede.
- Intervir antes da falha do ativo: quando o desempenho e a fiabilidade do ativo estiverem abaixo do aceitável, em termos dos limites operacionais, e não poder ser restaurado sem um risco financeiro inaceitável.
- Minimizar falhas, por meio de intervenções direcionadas a ativos ou que se aproximam de uma condição crítica (Índice de Saúde (HI) (5)).
- O investimento é realizado com base numa avaliação das consequências de uma falha usando a probabilidade de falha (determinado a partir do HI) e criticidade: levando em consideração fatores como a segurança pública e da equipa, importância estratégica, sensibilidade do cliente a distúrbios no fornecimento, desempenho de ativos e considerações ambientais [6,8,9,10,11].

2.4. SISTEMA DE APOIO À DECISÃO

Neste subcapítulo é apresentada a implementação do protótipo do Sistema de Apoio à Decisão, por parte da EDP, que permitiu a automatização do cálculo do Índice de Saúde (HI), da Probabilidade de Falha (PoF) e do tempo restante de vida dos ativos.

Para uma mais fácil compreensão deste capítulo é apresentada uma definição simplificada dos conceitos de HI e PoF. Posteriormente no Capítulo 5 será dada uma maior ênfase a estes conceitos.

- Índice de Saúde é um indicador que nos fornece informações acerca da condição técnica do ativo, tendo por base as suas características.
- Probabilidade de Falha indica a probabilidade de um ativo parar de desempenhar a sua função.

2.4.1. Apresentação ao Sistema de Apoio à Decisão

O Sistema de Apoio à Decisão apresentado permitiu não só a definição dos algoritmos a aplicar, como também criar um registo de todos os ativos existentes. Para tal foi desenvolvida para ser de fácil navegação, tornando possível uma rápida seleção do ativo específico que procuramos, levando à obtenção de toda a informação que possa ser

necessária. Para além disso, possui uma plataforma que permite o registo dos valores medidos, sendo bastante útil, por exemplo, na visita de um técnico ao ativo.

A implementação deste Sistema de Apoio à Decisão permitiu a identificação dos fatores de risco, o que viabilizou o estabelecimento de uma ordem de prioridade das intervenções de manutenção a realizar, de acordo com a condição do ativo. Desta forma, é expectável que haja uma contribuição para a diminuição dos custos, não só pelo decréscimo da ocorrência de falhas, mas também pela diminuição de intervenções desnecessárias.

2.4.2. Modelo de dados

O modelo de dados do Sistema de Apoio corresponde à modelação do algoritmo, sendo definidos os tipos de ativos e os parâmetros necessários para caracterizar a sua condição. Na Figura 3 apresenta-se o diagrama de classes utilizado para definir a modelação de cada tipo de ativo.

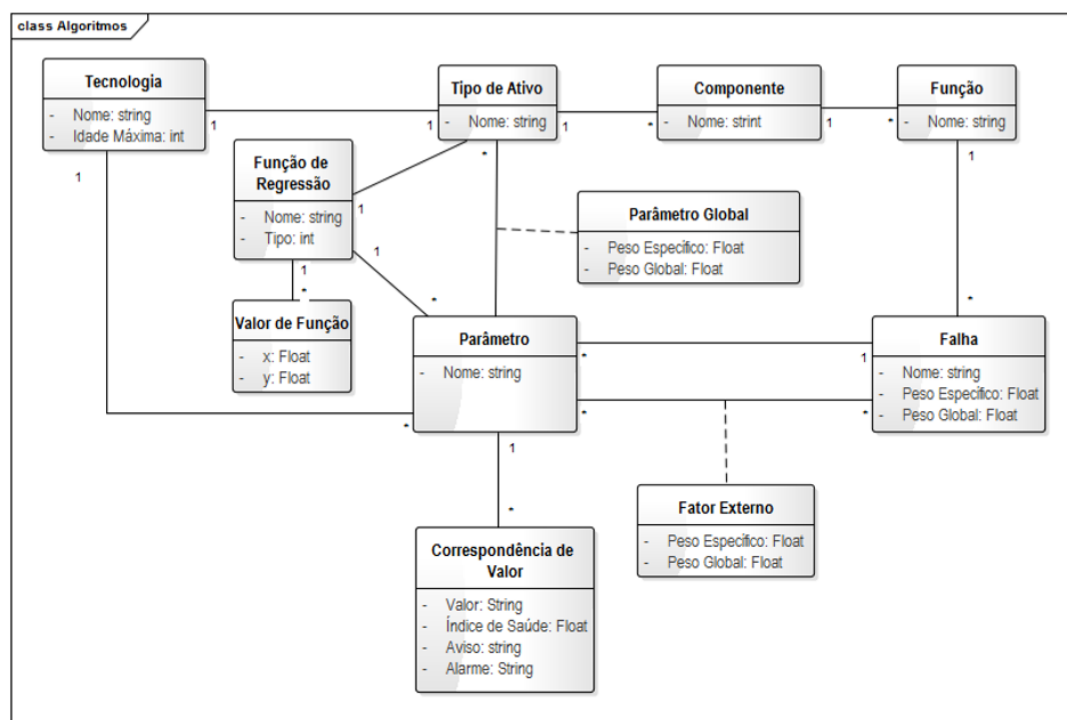


Figura 3 - Diagrama de classes para modelação dos algoritmos [16]

Para uma melhor compreensão do conteúdo da Figura 3, é realizada uma análise mais minuciosa a este diagrama. A classe “Tipo de Ativo” representa todos os ativos que a EDP tem ao seu dispor. Um ativo pode ser decomposto em componentes que, por sua vez, podem ter uma ou mais funções com os seus respetivos modos de falha. Estas entidades são representadas no diagrama através das classes “Componente”, “Função” e “Falha”.

Alguns ativos possuem ainda mais do que uma tecnologia, como no caso específico dos disjuntores, onde é previsto que esteja disponível a tecnologia SF6, Vácuo e Óleo,

pelo que é necessário diferenciar estes ativos. As tecnologias são associadas através da Classe “Tecnologia” onde também é definido o seu tempo de vida máximo.

Na base deste diagrama, os parâmetros assumem um papel decisivo, estando representado na classe “Parâmetro”. Para permitir a atribuição de Índices de Saúde aos estados ou intervalos de valores que um parâmetro pode tomar, é utilizada a classe “Correspondência de Valor”. É possível, inclusive, atribuir uma mensagem de alarme ou de aviso a um dado valor.

Se, por acaso, o Índice de Saúde de um parâmetro for calculado a partir de uma função, esta é gerada através da classe “Função de Regressão”. É realizada uma escolha dos pontos que relacionem os valores numéricos que o parâmetro pode assumir com o respetivo Índice de Saúde. Por exemplo, 0 anos de idade têm um Índice de Saúde máximo. Estes pontos são criados através da classe “Valor de Função”, e a regressão utilizada para estimar o Índice de Saúde a partir dos pontos definidos é identificada através do atributo “Tipo” da tabela “Função de Regressão”. Foram implementados os seguintes tipos de regressão: Linear, Exponencial, Quadrática de 2º Grau e Quadrática de 3º Grau.

No total podem existir quatro tipo de parâmetros:

- Parâmetros que influenciam o Índice de Saúde uma falha;
- Fatores externos, utilizados para estimar a probabilidade falha ocorrer. Estes estão incluídos na classe “Fator Externo” onde é atribuído o seu peso específico e global;
- Parâmetros de envelhecimento, associados a uma tecnologia e representam os fatores que influenciam o tempo de vida útil do ativo;
- Parâmetros Globais, associados diretamente a um tipo de ativo através da classe “Parâmetro Global” e que afetam o seu Índice de Saúde global, assim como o específico de cada componente [16].

2.4.3. Sistema de Apoio à Decisão numa Subestação Elétrica

Apresentamos, neste ponto, a modelação do protótipo do Sistema de Apoio à Decisão que foi implementado pela EDP para a automatização do cálculo do índice de Saúde, da probabilidade de Falha e do tempo restante de vida dos ativos de uma subestação elétrica. A solução desenhada permite das Subestações Elétricas e dos seus respetivos ativos. Na Figura 4 estão apresentadas as classes que devem ser tidas em conta, para se representar um conjunto de ativos a avaliar.

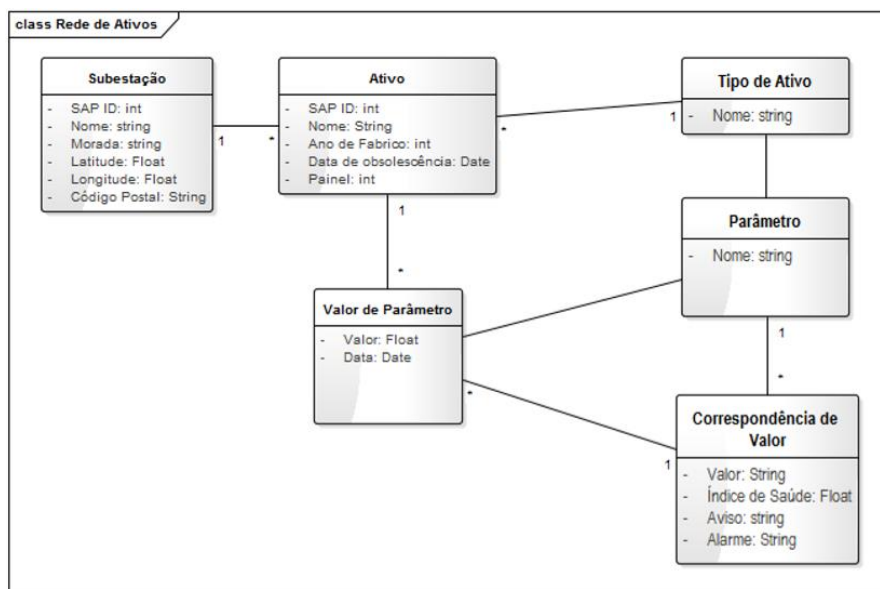


Figura 4 - Diagrama de classes da rede de ativos [16]

A classe “Subestação” apresenta uma subestação elétrica, sendo guardados o seu SAP ID, que é o seu número identificativo na Rede de Subestações, o seu nome, a morada e posição geográfica. Os ativos que pertencem à subestação elétrica encontram-se na classe “Ativo”, onde é definido o nome, ano de fabrico e a data em que se prevê que se torne obsoleto.

Cada ativo específico está associado a uma família de ativo, sendo os valores registados para a caracterização dos parâmetros correspondentes guardados na classe “Valor de Parâmetro”. Se o valor do Parâmetro for um intervalo ou um estado, então é atribuído o Índice de Saúde correspondente na classe “Correspondência de Valor”. Caso seja definido por uma função, é usado o campo “Valor” e o Índice de Saúde é obtido através da função atribuída ao parâmetro correspondente. O desenho proposto pelas Figuras 3 e 4 permite que seja fácil expandir ou modificar, de forma simples, os algoritmos de cada tipo de ativo. Os pesos atribuídos a cada parâmetro e os seus valores correspondentes podem ser facilmente alterados. Desta forma, é possível acompanhar o desenvolvimento tecnológico, prevenindo o aparecimento de novas tecnologias ou até mesmo de novo tipo de ativos [16].

A Figura 5 e 6 demonstram a aplicação dos diagramas propostos na Figura 3 e 4, para o ativo “Bateria Alcalina” de uma subestação elétrica.

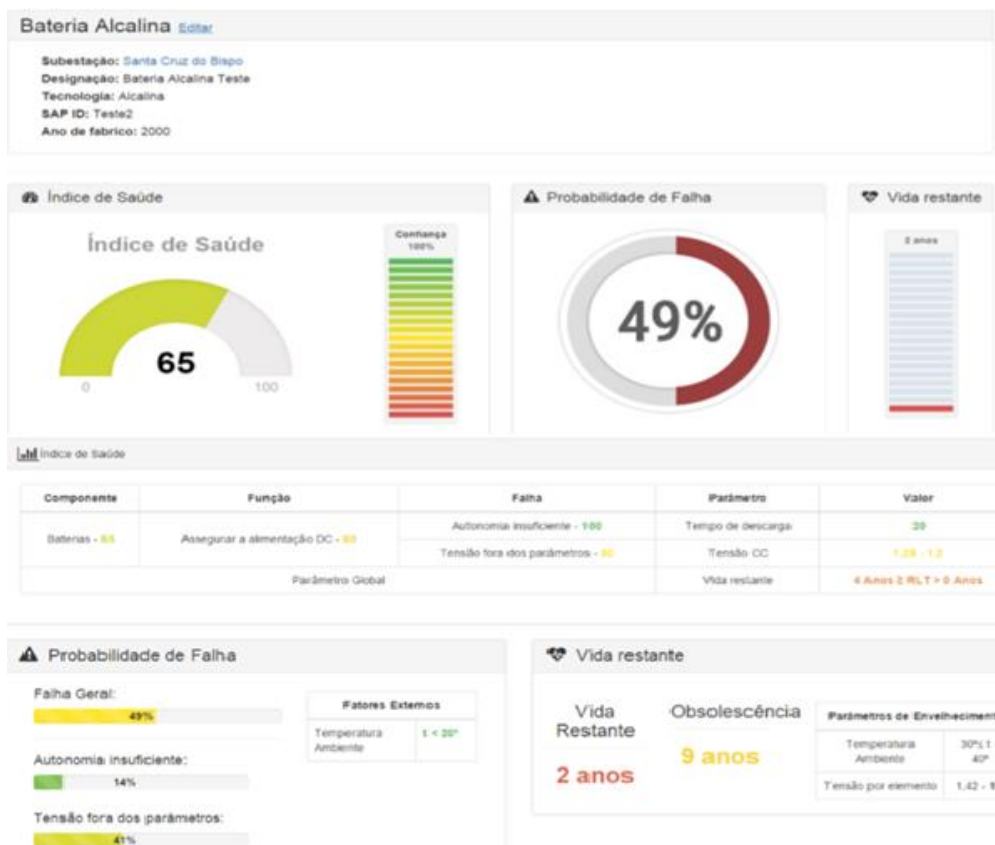


Figura 5 - Página de Ativo - Vista Detalhada dos Indicadores [16]



Figura 6 - Página de Ativo - Histórico [16]

2.5. ANÁLISE CRÍTICA

O Sistema de Apoio à Decisão estudado foi desenvolvido e construído após um estudo intensivo do contexto da EDP e dos processos de gestão em uso. Tal facto permitiu uma

caracterização fundamentada e objetiva da condição de ativos através do Índice de Saúde, probabilidade de falha e tempo de vida restante. A aplicação deste protótipo no seio da EDP permitiu uma maior rapidez e facilidade no acesso da condição de um ativo. Como consequência direta da vantagem anterior, permite a alteração do algoritmo tendo em consideração uma reflexão da experiência adquirida no ato da manutenção, pela possibilidade de inserção direta dos parâmetros necessários a ser recolhidos pelo técnico de manutenção, pela centralização da informação das Subestações existentes e dos seus respetivos ativos, pela redução do tempo gasto em decisão na gestão de ativos, melhorando a recolha e análise dos dados e, por fim, pela possibilidade de acompanhamento da evolução dos indicadores, permitindo identificar os processos de degradação.

Porém, existe espaço de melhoramento a esta implementação do protótipo de Apoio à Decisão.

- O próximo grande passo a dar dependerá fortemente de sistema informático mais abrangente, que seja capaz de adquirir de forma automática os parâmetros necessários para o cálculo dos indicadores. Obrigatoriamente, tal facto exigiria um investimento no processo de informatização dos ensaios existentes e na implementação de novas tecnologias de monitorização.
- O melhoramento contínuo do sistema, é um pensamento instaurado na EDP, com o intuito de maximizar a vida dos seus ativos e as ações de manutenção. Desta forma, seria uma adição interessante a este Sistema de Apoio a inclusão do cálculo de risco de um ativo através da avaliação da relação entre a probabilidade de este falhar e as consequências dessa falha. Esta nova abordagem, será o principal foco de trabalho nesta dissertação, que irá focar na otimização do Sistema de Apoio à Decisão estudado num conjunto de disjuntores de uma subestação.
- Para além disso, o planeamento económico sobre as ações de manutenção a realizar nos equipamentos do sistema de energia tem ganho uma preponderância cada vez maior, especialmente depois da liberalização do mercado energético. Para além do plano a longo prazo da política de manutenção, é necessário ter em conta que também devem constar no plano, estratégias a curto prazo, uma vez que a otimização da alocação orçamental é cada vez mais uma prioridade. Desta forma, devem ser revistos e analisados fatores como mão de obra, horas de trabalho, restrições orçamentais e realizar-se uma avaliação mais concreta das decisões de manutenção [16].

3. DISJUNTORES

Neste capítulo é apresentado o ativo “Disjuntores”, sendo feita uma apresentação extensiva deste ativo, desde a sua identificação, os fenómenos que estão associados à sua operação, os parâmetros que podem ser monitorizados, os modos de falha e as ações manutenção.

3.1. IDENTIFICAÇÃO DO SISTEMA

O disjuntor é um dispositivo eletromecânico que tem como função permitir manobras em carga e efetuar o corte de energia quando ocorrem curto-circuitos ou sobrecargas. No momento em que ocorre uma falha é necessário interromper a corrente para evitar que esta se propague até aos restantes equipamentos e os danifique. Desta forma, é protegido o circuito elétrico, uma vez que as pressões térmicas e mecânicas foram suspendidas antes de se tornarem prejudiciais.

Os principais componentes de um disjuntor são os seus mecanismos de operação, os contatos, o circuito de controlo e o meio de interrupção. A função do mecanismo de operação é assegurar que abre e fecha os contactos do disjuntor sob o efeito de um comando. Os mecanismos de operação são constituídos por haste de operação, molas, válvulas, rolos, parafusos, etc. Os contatos são um componente de metal que carrega a corrente quando o disjuntor está em posição fechada. O circuito de controlo emite um comando para o disjuntor, permitindo que o mecanismo reaja e abra os contatos do disjuntor. Os contatos por sua vez, estão localizados na câmara de interrupção onde a extinção do arco ocorre.

Os disjuntores em estudo são trifásicos, pois possuem três polos. Em cada um dos polos encontram-se dois pontos de contato que são separados quando é necessário efetuar um corte. Os polos têm que suportar elevadas pressões quando o corte ocorre, pois é gerado um arco de eletricidade que tem de ser extinto. Este processo deverá ter uma duração bastante reduzida e existem ao dispor várias tecnologias para o conseguir:

- Óleo, imergindo os pontos de contacto para suprimir o arco elétrico;
- Ar comprimido, extinguindo o arco através de jatos de ar;
- Vácuo, não havendo matéria para o arco ionizar sem ser o material isolante;
- SF₆, utilizando o gás hexafluoreto de enxofre (SF₆) como meio isolante e de extinção do arco [17-20].

Os tempos de vida máximo de para cada tecnologia, estando apresentados os valores na Tabela 1.

Tabela 1 - Tempo de vida máxima por tecnologia do disjuntor [16].

Vácuo	SF6	Óleo
40 Anos	35 Anos	40 Anos

A valorização da idade do disjuntor por parte da EDP, é feita através de uma função, que relaciona a probabilidade de falha com pontos específicos do ciclo de vida do disjuntor (Tabela 2), sendo depois feita uma regressão exponencial para gerar a função, conforme demonstrado na Figura 7 [16].

Tabela 2- Relação entre a probabilidade de falha [16].

Idade	PF
0	0.025
10	0.1
15	0.15
20	0.2
25	0.32
30	0.5
40	1

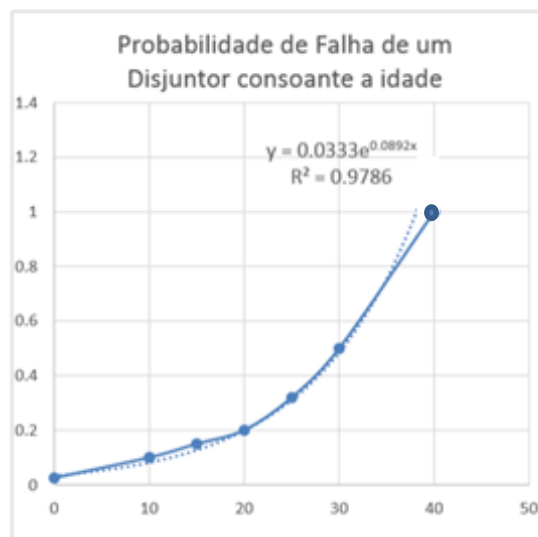


Figura 7 - Função da probabilidade de falha [16].

3.2. FENÓMENOS ASSOCIADOS À OPERAÇÃO DO DISPOSITIVO

A generalidades das falhas dos disjuntores está relacionada com a falha nos mecanismos de operação. O mecanismo de operação é constituído por vários componentes móveis, e todos estes devem operar corretamente para que o desempenho do disjuntor seja o desejado. Como consequência direta, as etapas de inspeção e manutenção tornam-se vitais para um desempenho otimizado do disjuntor. A formação de óxidos durante a extinção do arco resulta na deterioração de contatos e do óleo. Se a manutenção realizada não for a adequada aos componentes e/ou se por outro lado nem sequer for agendada, a deterioração pode resultar na falha do dispositivo [17-19].

3.3. PARÂMETROS

A manutenção preventiva depende fortemente da recolha de informações obtidas através do monitoramento da condição do ativo. Recentemente, tem vindo a assistir-se a um desenvolvimento tecnológico, como sistemas de aquisição de dados, técnicas de processamento de sinais e sistemas de monitoramento muito mais refinados, que oferecem diversas possibilidades de monitorização das condições técnicas que afetam, direta ou indiretamente, as políticas de manutenção existentes. Uma monitorização de uma condição técnica é geralmente projetada para avaliar uma única condição e as informações recolhidas para avaliar essa determinada condição são designados por parâmetros de monitorização. A monitorização da condição assume, cada vez mais, um papel preponderante na tomada de decisões mais eficientes na manutenção. Tal é conseguido porque a equipa de manutenção possui uma imagem clara da condição do disjuntor que, por sua vez, permite a criação de mais programas de manutenção ideais [6,7,8,10,11,16,18,19].

No caso da EDP Distribuição, atualmente, o disjuntor é dividido em “Câmara de Corte” e “Comando”. Na Tabela 3 e 4, estão identificados os parâmetros que tem impacto, respetivamente, no Índice de Saúde da “Câmara de Corte” e “Comando”. Para cada parâmetro estão identificados os níveis previstos e o seu método de aquisição. Para cada modo de falha o seu peso específico e global.

Tabela 3 - Parâmetros impactantes no Índice de Saúde da Câmara de corte [16].

Componente	Função	Modo Falha	Parâmetro	Tecnologia Disjuntor	Graus de Valorização					Crítico	Ponderações IS			
					Nível 0	Nível 1	Nível 2	Nível 3			Majorante	Global	Bloco Funcional	Aquisição
			Idade	Todas	Função					-	NA	10.0%	10.0%	Gestor Activos
Comando	Garantir Estabelecimento Circ. Eléctrico.	Falha operação ligar	Tempo Fecho	SF6	65ms ≥ TF	65ms < TF ≤ 90ms	90ms < TF ≤ 120ms	120ms < TF ≤ 180ms	TF > 180ms		NA	5.0%	10.0%	Ensaio local / SPCC
				Óleo	65ms ≥ TF	65ms < TF ≤ 90ms	90ms < TF ≤ 120ms	120ms < TF ≤ 180ms	TF > 180ms					
				Vácuo	65ms ≥ TF	65ms < TF ≤ 90ms	90ms < TF ≤ 120ms	120ms < TF ≤ 180ms	TF > 180ms					
	Garantir Isolamento Circ. Eléctrico.	Falha operação desligar	Tempo Abertura	SF6	50ms ≥ TA	50ms < TA ≤ 80ms	80ms < TA ≤ 120ms	120 ms < TA ≤ 180 ms	TA > 200ms		NA	15.0%	35.0%	Ensaio local / SPCC
				Óleo	50ms ≥ TA	50ms < TA ≤ 80ms	80ms < TA ≤ 120ms	120 ms < TA ≤ 180 ms	TA > 200ms					
				Vácuo	50ms ≥ TA	50ms < TA ≤ 80ms	80ms < TA ≤ 120ms	120 ms < TA ≤ 180 ms	TA > 200ms					
	Garantir Estabelecimento Circ. Eléctrico. Garantir Isolamento Circ. Eléctrico.	Falha operação ligar-desligar	Nº Manobras	SF6	NM ≤ 2000	2500 < NM ≤ 6000	6000 < NM ≤ 10000	NM > 10000	-		X	15.0%	35.0%	Inspeção Visual
				Óleo	NM ≤ 2500	2500 < NM ≤ 6000	6000 < NM ≤ 10000	NM > 10000	-					
				Vácuo	NM ≤ 2500	2500 < NM ≤ 6000	6000 < NM ≤ 10000	NM > 10000	-					
			Estado das tubagens de acoplamento aos polos ou existência de fugas	Todas	Sem Degradação	Degradação ligeira	Pontos Corrosão	Degradação geral ou com fugas	-					Inspeção Visual
			Estado dos acoplamentos mecânicos comando aos polos	Todas	Sem Degradação	Degradação ligeira	Pontos Corrosão	Degradação geral	-					Inspeção Visual
			Atraso após a data da manutenção prevista		Atraso até 20%	Atraso até 50%	Atraso até 80%	Atraso > 80%	-		NA	10.0%	10.0%	SAP-PM

Tabela 4 - Parâmetros impactantes no Índice de Saúde dos Comandos [16].

Componente	Função	Modo Falha	Parâmetro	Tecnologia Disjuntor	Graus de Valorização					Majorante	Ponderações IS		
					Nível 0	Nível 1	Nível 2	Nível 3	Critico		Global	Bloco Funcional	Aquisição
Câmara de corte	Garantir Estabelecimento Cir. Elétrico Garantir Isolamento Circ. Elétrico	Perda de isolamento interno	Idade	Todas		Função			-	NA	10.0%	10.0%	Gestor Activos
			Corrente cortada	Todas	$\Sigma < 0,9$ limite máx.			limite máx $\Sigma \geq 0,9$ limite máx.	$\Sigma \geq$ limite máx.				SPCC
			Resistência Contacto	SF6	$RC \leq 50 \mu\Omega$	$50 \mu\Omega \leq RC \leq 200 \mu\Omega$	$200 \mu\Omega \leq RC \leq 400 \mu\Omega$	$400 \mu\Omega \leq RC \leq 600 \mu\Omega$	$RC > 600 \mu\Omega$				Ensaios local
				Óleo	$RC \leq 100 \mu\Omega$	$100 \mu\Omega \leq RC \leq 400 \mu\Omega$	$400 \mu\Omega \leq RC \leq 700 \mu\Omega$	$700 \mu\Omega \leq RC \leq 1000 \mu\Omega$	$RC > 1000 \mu\Omega$				
				Vácuo	$RC \leq 40 \mu\Omega$	$40 \mu\Omega \leq RC \leq 60 \mu\Omega$	$60 \mu\Omega \leq RC \leq 100 \mu\Omega$	$100 \mu\Omega \leq RC \leq 200 \mu\Omega$	$RC > 200 \mu\Omega$				
			Resistência Isolamento	Todas	$RI \geq 1 \text{ G } \Omega$		$0,5 \text{ G } \Omega < RI < 1 \text{ G } \Omega$	$RI < 0,5 \text{ G } \Omega$					Ensaios local
			Fugas do meio de corte (PVO e SF6)	PVO e SF6	Sem fuga		Alarme	Abaixo do nível mínimo					SF6 - TC PVO - Inspeção Visual
			Termografia (PQ interno)	Todas	$PQ = 0$	$PQ \geq 1$	$PQ \geq 1$	$PQ \geq 1$	$PQ \geq 100 \text{ }^{\circ}\text{C}$				Termografia
		Perda de isolamento externo	Resistência Isolamento	Todas	$RI \geq 1 \text{ G } \Omega$		$0,5 \text{ G } \Omega < RI < 1 \text{ G } \Omega$	$RI < 0,5 \text{ G } \Omega$					Ensaios local
			Estado dos isoladores (fissuras e contornamentos)	Todas	Sem danos	Sujidade	Fugas de óleo / isoladores lascados	Fissuras / contornamentos	Isolador partido	X	22.5%	40.0%	Inspeção Visual
			Termografia (PQ externo)	Todas	$PQ = 0$	$PQ \geq 1$	$PQ \geq 1$	$PQ \geq 1$	$PQ \geq 100 \text{ }^{\circ}\text{C}$				Termografia
			Atraso após a data da manutenção prevista	Todas	Atraso até 20%	Atraso até 50%	Atraso até 80%	Atraso > 80%	-	NA	10.0%	10.0%	SAP-PM

3.4. MODO DE FALHA

No caso da EDP Distribuição, a decomposição de um disjuntor em componentes, as suas funções e correspondentes modos de falha estão apresentados na Tabela 5 [16].

Tabela 5 - Modos de falha de um disjuntor [16].

Componente	Função	Modo Falha
Câmara de corte	Garantir Estabelecimento Cir. Elétrico Garantir Isolamento Circ. Elétrico	Perda de isolamento interno
		Perda de isolamento externo
Comando	Garantir Estabelecimento Circ. Elétrico.	Falha operação ligar
	Garantir Isolamento Circ. Elétrico.	Falha operação desligar
	Garantir Estabelecimento Circ. Elétrico. Garantir Isolamento Circ. Elétrico.	Falha operação ligar- Falha operação desligar.

No caso dos disjuntores, os fatores identificados para cada modo de falha são apresentados na Tabela 6 e os pesos atribuídos a cada um na Tabela 7 [16].

Tabela 6 - Fatores impactantes nos modos de falha de um Disjuntor [16].

Modo de Falha	Características Técnicas	Condição Técnica (HI Modo Falha)	Factores Externos - I	Factores Externos - II	Condições operação
Perda Isolamento Interno	Idade	Índice de Saúde Isolamento Interno	Nível Cerâmico	Risco Incêndio (45%) Risco Eventos Atmosféricos Extremos (45%) Risco Sísmico (10%)	-
Perda Isolamento Externo	Idade	Índice de Saúde Isolamento Externo	Nível Cerâmico (45%) Poluição ou Contaminação (45%) Avifauna (10%)	Risco Incêndio (30%) Risco Inundações (20%) Risco Eventos Atmosféricos Extremos (20%) Risco Sísmico (30%)	-
Falha Operação ligar	Idade	Índice de Saúde Comando	Nível Cerâmico (30%) Poluição ou Contaminação (70%)	Risco Incêndio (30%) Risco Inundações (20%) Risco Eventos Atmosféricos Extremos (20%) Risco Sísmico (30%)	Tempo sem manobra
Falha Operação desligar	Idade	Índice de Saúde Comando	Nível Cerâmico (30%) Poluição ou Contaminação (70%)	Risco Incêndio (30%) Risco Inundações (20%) Risco Eventos Atmosféricos Extremos (20%) Risco Sísmico (30%)	Tempo sem manobra

Tabela 7- Peso atribuídos a cada modo de falha [16].

Modo de Falha	Características Técnicas	Condição Técnica (HI Modo Falha)	Factores Externos - I	Factores Externos - II	Condições operação
Perda Isolamento Interno	10.00%	80.00%	7.50%	2.50%	-
Perda Isolamento Externo	10.00%	80.00%	7.50%	2.50%	-
Falha Operação ligar	10.00%	70.00%	7.50%	2.50%	10.00%
Falha Operação desligar	10.00%	70.00%	7.50%	2.50%	10.00%

3.5. AÇÕES DE MANUTENÇÃO

Existem inúmeras ações de manutenção de referência para os disjuntores, estando agrupadas da seguinte forma:

Mecanismo Operacional:

- Limpar todas as partes isolantes de pequenas poeiras ou resíduos de fumo;
- Limpar e lubrificar o mecanismo de operação e aplicar uma generosa camada de lubrificação sob a superfície de rolos, rolamentos, etc;
- Ajustar o mecanismo de operação do disjuntor conforme descrito no manual de instruções do fabricante;
- Certificar de que todos os parafusos, porcas, anilhas, contrapinos, ou outros componentes similares, estão devidamente apertados;
- Após esta etapa de manutenção, verificar se os contactos se conseguem mover, ou não, para as posições totalmente abertas e fechadas

Contatos:

- Verificar o alinhamento e a condição dos contatos e realizar ajustamentos conforme o manual de instruções do fabricante;
- Verificar se o desgaste do contato e o tempo de viagem cumprem as especificações.

Meio Isolante e Extinção do arco:

- Verificar se há vazamentos e remover qualquer teor de água. Verificar se o regulador e o compressor possuem a pressão necessária;
- Recondicionar o óleo através da filtração.
- Para além disso, caso necessário, substituir os seguintes componente de acordo com a condição: a) Corpo do arco caso este danificado, b) Regulador e compressor caso estejam desgastado ou com mau funcionamento, c) Contatos caso estejam desgastados ou queimados e d) Óleo caso a rigidez dielétrica cair abaixo do limite permitido e se houver algum produto do arco for encontrado no óleo [17,19,20].

4. CONCEITOS RELEVANTES

Este capítulo aborda conceitos importantes a ter em conta na delineação de modelos de gestão de risco baseado na condição. Este capítulo pretende ser seletivo e capturar o conhecimento atual, analisando-se de forma crítica os principais processos de negócio e as suas abordagens.

4.1. AVALIAÇÃO DO RISCO NA GESTÃO DE UM ATIVO

4.1.1. Visão Geral

A capacidade de identificar os riscos e incertezas existentes na operação do negócio é crucial para todas as empresas de sucesso. Sempre que possível, mais do que a sua identificação, deve existir a mitigação dos potenciais impactos. Para tal, as empresas desenvolvem o seu plano de negócios baseado numa gestão de risco que permite:

- Identificar os principais riscos e incertezas que podem/poderão vir a afetar o plano de negócios e identificar a magnitude do impacto desse risco;
- Determinar quais os controlos que estão ou podem ser implementados para gerir esses riscos e incertezas;

É importante salientar, que o desenvolvimento de uma gestão de riscos num plano de negócios, colocará a empresa numa melhor posição para atuar durante o ciclo de vida de um ativo. Porém, existirão sempre exceções, nas quais o risco possa estar só parcialmente ou até mesmo completamente fora do controlo das ações de manutenção. Tal facto, nunca deve ser descartado e deve ser tido sempre em consideração [7,8,12,15].

4.1.2. Áreas de Negócio Chave na Avaliação do Risco

As principais empresas energéticas com o propósito de definir os princípios fundamentais para a gestão de risco, dividiram a abordagem em 5 pontos relevantes para o plano de negócios, com o intuito de atenuar e controlar os principais riscos sob os quais a rede opera. Os 5 pontos relevantes encontram-se resumidos em baixo:

- Gestão de Ativos

A estratégia de gestão de ativos é projetada num conceito de gestão em todo o ciclo de vida dos ativos da rede. Na abordagem a desenvolver é criada uma priorização da gestão de ativos com base na sua criticidade. A criticidade é calculada através da

combinação das informações de condição e da avaliação de risco do ativo. É expectável que o cálculo da criticidade, permita determinar qual o ativo que se deve substituir ou reformar com base no investimento de capital projetado e em quais se deve manter o programa de manutenção de ativos. A abordagem a desenvolver é sustentada pelas ações de inspeção e pela recolha de dados que registará a condição contínua do ativo, ao longo de todas as etapas do seu ciclo de vida. Desta forma, é assegurada a integridade do sistema de ativos e a gestão do risco pelo menos dentro do que é considerado razoável.

- **Saúde e Segurança**

A Saúde e Segurança está no centro das preocupações de negócios de todas as empresas energéticas. É um objetivo constante, a minimização do impacto de riscos nos funcionários e no público. Desta forma, é necessário a adoção das melhores práticas, seguindo sempre o princípio de reduzir os riscos para as pessoas “ao nível mais baixo possível”. Na prática, tal significa que se pretende garantir um investimento que permita a gestão do risco para um intervalo considerado aceitável. Sempre que possível, deve apostar-se na redução do risco até ao ponto em que o custo de tal operação já pode ser considerado desproporcional face à melhoria que iria trazer. Resumindo, é possível afirmar que Saúde e Segurança são fatores-chave no processo de risco e criticidade dos ativos a ser geridos.

- **Gestão Operacional**

A Gestão Operacional incluir funções importantes, como a inspeção e manutenção. Para além destas funções, também está incluída neste ponto da abordagem, a resposta a falha de interrupções, causadas por intempéries, como por exemplo, tempestades. É objetivo desta abordagem garantir a otimização da utilização dos recursos de forma a que os requisitos operacionais sejam entregues com eficiência e que consigam ter uma certa flexibilidade de forma a ser possível fornecer respostas as mudanças repentinas, como as climatéricas.

- **Satisfação do Cliente**

Esta abordagem é garantida graças a um serviço implementado na empresa que oferece um atendimento direcionado as necessidades reais dos clientes. Para tal, a equipa de atendimento é treinada de forma a impulsionar a estratégia imposta na empresa. Com isto, a equipa de atendimento ao cliente deve ser capaz de reconhecer possíveis problemas que afetam a experiência do cliente e corrigi-los antes que estes se materializem, de forma a garantir que as operações estejam alinhadas com os objetivos de satisfação do cliente, particularmente em interrupções e falhas não planeadas.

- **Gestão de compras e contratos**

A estratégia de compras e de contratos, deve garantir que existem recursos suficientes para fornecer os nossos serviços, com os melhores preços possíveis. A estratégia definida deve primar pela eficiência e sustentabilidade [6,7,8,15].

4.1.3. Exemplo da avaliação do risco na gestão de um ativo por uma energética

O diagrama apresentado na Figura 8 representa o processo de gestão de riscos aplicados dentro da Iberdrola e ScottishPower.

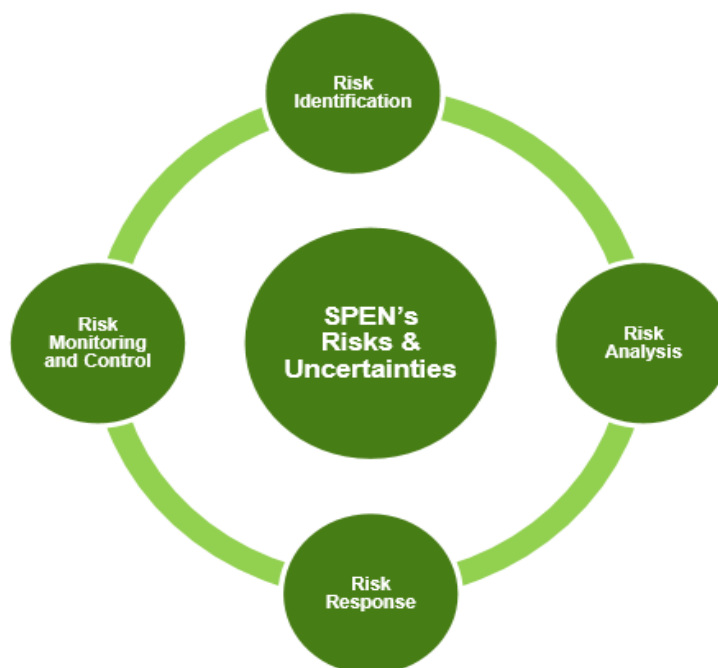


Figura 8 - Processo de gestão de riscos implementado atualmente na Iberdrola e ScottishPower [7]

Uma análise rápida da figura acima representada permite a identificação de 4 fases durante o processo de gestão de riscos implementadas nestas empresas energéticas:

- **Identificação de riscos**

É realizada uma análise a todas as áreas de negócio, sendo identificadas as principais funções nas quais o negócio opera. Desta forma, estão identificados todos os parâmetros a ter em conta pela administração. Posteriormente toda esta recolha de informação servirá para criar uma ordem de priorização nas ações a realizar. Devem ser criados registos de todos os riscos num Relatório de Riscos.

- **Análise de risco**

A segunda etapa do ciclo tem em conta as principais funções comerciais e tem em consideração fatores como a frequência do evento, gravidade do impacto e o cálculo de como seria o pior Cenário, isto é, de perda máxima.

- **Resposta ao Risco**

Depois de ser avaliado o risco, este é alocado no plano negócio, no qual é criado um plano de resposta onde está definido como atuar sob determinado valor de risco. Tal plano permite a priorização das ações e a distribuição de forma fluída e eficiente das tarefas a aplicar, desde os mais altos quadros da empresa até a um funcionário da manutenção. A aplicação desta abordagem permitirá uma melhor resposta à mitigação das consequências que podem advir de uma falha.

- **Monitoramento e Controlo de Riscos**

Os riscos encontram-se devidamente identificados e são regularmente revistos a todos os níveis de gestão. Desta forma, todo o risco e resposta efetuada é registado Relatório de Riscos Chaves. A monitorização da gestão de riscos permite coordenar toda a estrutura organizacional, de forma a garantir que se cumpram as políticas de risco estabelecidas por estas empresas energéticas.

A abordagem padrão das políticas de risco, utiliza no Relatório de Riscos Chaves uma escala de cinco ponto (de muito baixo a muito alto) para avaliar a probabilidade de ocorrência de determinada falha e do seu potencial impacto. A combinação destas pontuações produzirá a pontuação geral de risco um ativo (HI) [7].

4.2. ÍNDICE DE SAÚDE

O Índice de Saúde é um indicador que nos dá informações acerca da condição técnica do ativo, tendo por base as suas características. É fundamental que este indicador seja calculado da forma mais objetiva possível, para que a comparação de ativos iguais seja executada segundo as mesmas condições.

4.2.1. Introdução

Existem dois tipos de metodologia para descrever o Índice de Saúde:

- Classificação numa escala de 5 classes, exemplificado na Tabela 8. Este caso é aplicado pelas energéticas Iberdrola e ScottishPower [8].
- No caso da EDP é adotada uma escala de 0 a 100, por uma questão de facilidade de análise de valor, na qual o 100 representa um ativo na condição ótima e 0 um ativo no estado crítico [16].

Tabela 8 - As 5 possíveis categorias para a caracterização do IS [8].

HI Category	Description
HI1	New or as new
HI2	Good or serviceable condition
HI3	Deterioration requires assessment and monitoring
HI4	Material deterioration, intervention requires consideration
HI5	End of serviceable life, intervention required

O HI é determinado através da combinação de vários fatores como, o local de implementação do projeto, deterioração (através da análise indicadores específicos), questões operacionais (restrições operacionais, níveis de falha, procedimento de trabalho seguro), taxa de falha, problemas críticos e peças de reposição para a manutenção [8,12,16].

4.2.2. Cálculo do HI no caso da EDP

Cada um dos ativos deve ser devidamente identificado, decompondo-se nos diversos componentes, nos quais estarão representados os blocos funcionais. Cada bloco funcional será responsável por assegurar uma ou mais funções. Para cada função devem ser identificadas as possíveis falhas a existir e que impeçam o ativo de cumprir a sua função. Por fim, é associado um grupo de parâmetros a cada falha. A Figura 9 ilustra esta estrutura [16]:

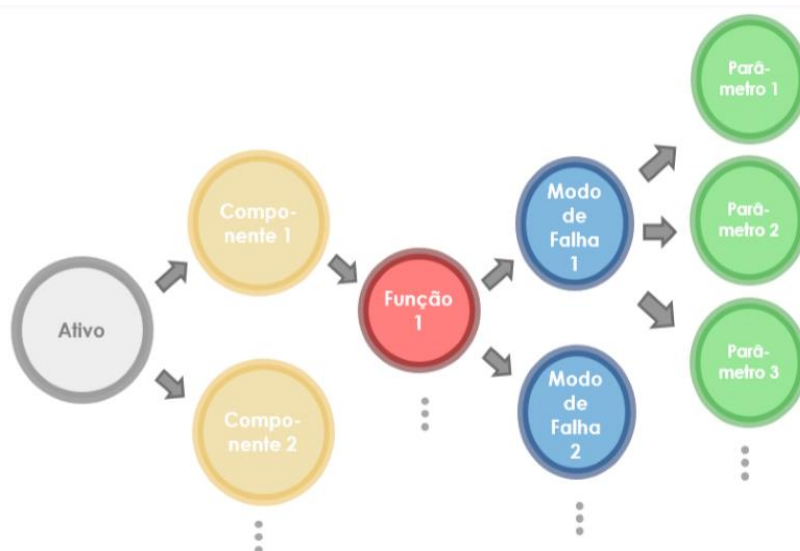


Figura 9 - Estrutura do algoritmo desenvolvido pela EDP [16].

Um parâmetro revela uma propriedade mensurável do ativo, podendo ser obtido através de diagnósticos e ensaios, inspeções visuais ou termográficas, monitorização online ou sinais de alarme que podem ser ativados. O método de obtenção de um parâmetro tem obrigatoriamente de estar devidamente identificado.

O valor de um parâmetro é transformado para um Índice de Saúde através de uma das seguintes formas:

- Por escalões, em que os valores possíveis são divididos em intervalos que por sua vez correspondem a um Índice de Saúde;
- Por uma função, que recebe o valor do parâmetro e devolve o Índice correspondente. Esta alternativa permite uma valorização mais precisa do parâmetro.

Em seguida, para mais fácil compreensão, apresenta-se na forma de tópicos, inúmeros outros fatores que devem ser considerados para a obtenção do Índice de saúde:

- Tendo em conta a natureza do ativo, é necessário reconhecer que este possa ter inúmeras tecnologias disponíveis, o que irá condicionar que alguns parâmetros tenham valores de referência diferentes, e até mesmo que nem todos os parâmetros se apliquem a todas as tecnologias.
- Existem parâmetros globais que não pertencem a nenhum modo de falha específico, mas que, influenciam o Índice de Saúde de todos os componentes. Estes parâmetros são características mais gerais do ativo, como por exemplo, a sua idade ou atrasos que tenham ocorrido na sua manutenção.
- Para se saber o peso específico que um modo de falha irá ter nas implicações no Índice de Saúde, é feito um majorante de todos os parâmetros a ele associado, e é escolhido o pior cenário. Desta forma, está salvaguardado que um parâmetro que indique que o ativo se encontra num estado degradado seja anulado pelos restantes parâmetros que não identificam essa degradação.
- Cada modo de falha está associado um peso específico e um peso global. Estes pesos correspondem a percentagens que são utilizadas para valorizar a contribuição desse modo de falha para o Índice de Saúde do componente de que este faz parte, no caso do peso específico. No caso do peso global para a contribuição desse modo de falha para o Índice de Saúde Global do ativo. A soma dos pesos dos modos de e falha e parâmetros envolvidos no cálculo do Índice é igual a 100%.
- É de ter em conta, que pode não ser possível obter algum valor específico de um parâmetro. Tal pode acontecer, devido a alguma característica específica do ativo ou por falta de recursos. Este fator tem de ser introduzido no algoritmo e é conseguido através de um indicador de Confiança, que irá refletir o grau de certeza no valor Índice de Saúde, face aos parâmetros

conhecidos. Em suma, quando não se conhece o peso de um parâmetro, este passa a não ser considerado, fazendo que o peso total seja inferior a 100%. O Índice de Saúde é dividido pelo peso total para que seja normalizado em relação aos outros ativos, devendo o gestor responsável avaliar se o nível de confiança é suficiente para representar o estado do ativo.

- A organização modular do algoritmo facilita a incorporação de novos parâmetros, que surjam com a evolução das tecnologias de monitorização e do know-how dos operadores. Além disso, é expectável que, com o tempo de utilização deste tipo de manutenção e a estimativa da condição seja refinada, sendo relativamente simples ajustar o cálculo do Índice de Saúde através da valorização dos parâmetros e do peso atribuído a cada modo de falha [16].

4.3. AVALIAÇÃO DA CONDIÇÃO E ADEQUAÇÃO OPERACIONAL

Os planos de investimento para o ativo Disjuntores utilizam a metodologia descrita no capítulo 2.3 deste trabalho. A aplicação desta metodologia permite obter documentos que fornecem a avaliação da pontuação que permitirá determinar as intervenções a realizar de acordo com a integridade atual do ativo. A estratégia de investimento proposta visa recuperar sempre que o IS do ativo for avaliado com a nota 4 e substituir os ativos de IS com nota 5 de acordo com a pontuação baseada na condição operacional. Em suma, os passos desta estratégia definem-se por:

- A adequação operacional de toda a planta da subestação é avaliada anualmente por engenheiros especialistas na área de gestão de ativos, utilizando modelos probabilísticos para pontuar os diferentes ativos pelos quais é constituída a subestação.
- As inspeções destes locais são realizadas por técnicos de manutenção altamente competentes nesta atividade.
- Qualquer resultado deve integrar o relatório de defeitos da subestação, incluindo a diminuição da performance operacional ou da condição de ativos.
- Os itens da avaliação são classificados como Crítico, Maior, Significativo ou Menor, conforme as pontuações obtidas em cada categoria do documentos de adequação operacional.
- A pontuação da subestação é acumulada de forma a alcançar o HI.
- A subestação ou ativo que obtiver maior pontuação move-se em direção ao topo da tabela, indicando a prioridade mais elevada para a substituição.

- As intervenções priorizadas devem explorar o avanço de novas tecnologias, quando apropriado, de forma a procurar uma simples alternativa à básica substituição do ativo [8].

4.3.1. Modelo de Deterioração

Além da avaliação da saúde atual dos ativos, também é necessário prever o índice futuro de saúde dos ativos. Para cada categoria de ativo, é aplicada uma curva de deterioração específica. O ponto final é determinado pela vida útil esperada do ativo e o formato da curva de tendência de deterioração dessa categoria de ativo. A curva de deterioração de um disjuntor é apresentada na Figura 10 [8].

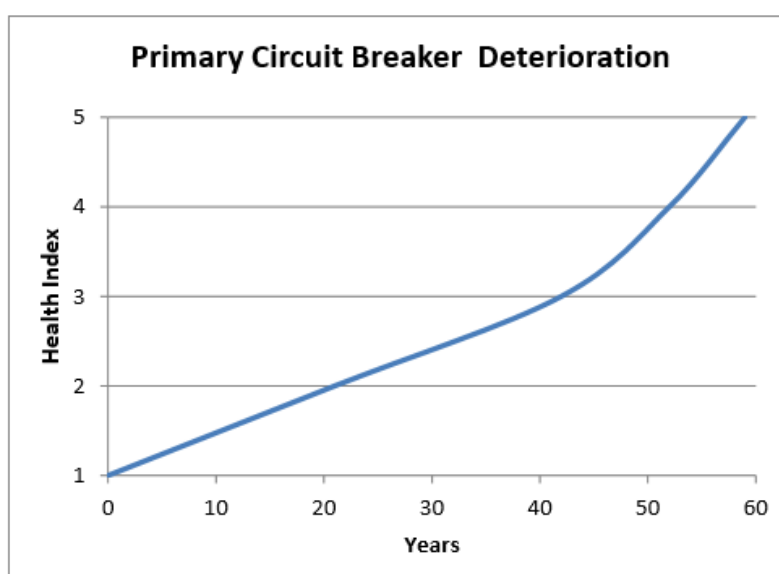


Figura 10 - Curva de deterioração de um disjuntor [8]

A modelação do HI e de criticidade tem em consideração que existem ativos em melhores ou piores condições do que a sua idade sugere e modela a sua condição futura de acordo com HI (futuro) [8].

4.4. RISCO

O termo “risco” é termo bastante amplo e é aplicado em inúmeras áreas, incluindo finanças e indústria da energia.

4.4.1. Definição

Usualmente, a análise de risco inclui um processo de identificação do risco, uma gestão de riscos, um *hedging* (investimento para reduzir o risco de movimentos adversos na manutenção de um ativo) e um processo de mitigação de risco. No sector financeiro, a

análise de risco é fulcral na avaliação entre o *trade-off*, entre o risco e o retorno. A sua aplicação estende-se na avaliação de risco associada a obrigações, novos e futuros projetos. Para além disso, o conceito é usado no setor energético com o intuito de planeamento baseado no risco, técnica de gestão de ativos, programas de manutenção, etc [2,18,21].

Este trabalho em concreto propõe uma abordagem baseada no risco para a manutenção de disjuntores. Porém, é importante salientar que pode ser extensível aos restantes ativos de uma subestação.

Na Figura 11 encontram-se exemplificadas todas as variáveis necessárias para se alcançar o valor de risco.



Figura 11 - Fórmula de cálculo do Risco [13]

A análise da Figura 11, permitiu entender que o cálculo do risco se inicia com a determinação do HI do ativo. Esse valor recolhido de HI corresponderá a uma probabilidade de falha que por sua vez terá determinada consequência. Assim, o risco associado a cada evento é definido como:

$$Risk(E) = p(E) \times Con(E) \quad (1)$$

Evento, E: Falha de um componente ou grupo de componentes para o correto funcionamento do disjuntor. Os componentes podem ser linha, disjuntor ou barramento.

Probabilidade de evento, p (E): Probabilidade de que um componente ou grupo de componentes falhe para uma correta operação.

Consequência do evento, Con (E): Impacto da falha de um componente ou grupo de componentes no sistema.

4.4.2. Desenvolvimento de modelos de Gestão de Risco baseados na condição

A EDP pretende afastar a sua gestão de ativos da mera avaliação tradicional baseada na idade de vida útil do ativo e começar a determinar a condição atual e prever a condição futura dos ativos através de um modelo numérico e lógico. O objetivo primordial deste modelo é alcançar a melhor decisão possível e para tal o modelo a construir tem como base a consequência da falha e a otimização do timing das intervenções.

A gestão de risco baseada na condição é um processo estruturado que combina as informações sob os ativos, com os conhecimentos de engenharia e a experiência prática. Este processo permitirá definir a atual condição e prever a condição futura, desempenho

e risco que cada ativo representa. Esta identificação fará sobressair a necessidade e os benefícios da substituição e/ou reforma [6,13,21].

O diagrama representado na Figura 12 descreve as principais etapas que devem ter sido em conta no desenvolvimento de um modelo de gestão de riscos baseado na condição.

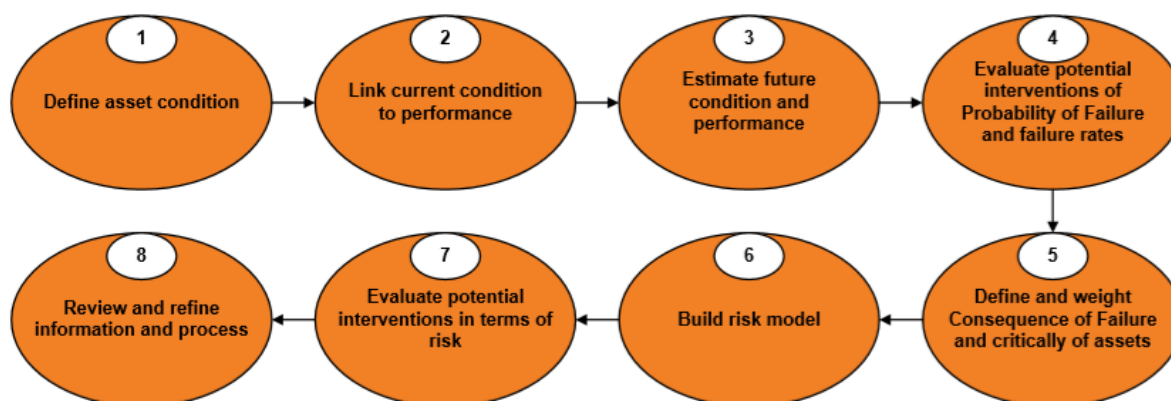


Figura 12 - Principais etapas a ter em conta no Desenvolvimento de Modelos de Gestão de Risco baseado na condição [13]

4.5. PROBABILIDADE DE FALHA

A probabilidade de falha de um ativo indica a probabilidade do ativo parar de desempenhar a sua função. Apesar de estar relacionado com o Índice de Saúde, visto que representa uma probabilidade, este indicador é representado por uma percentagem de 0 a 100.

4.5.1. Visão atualmente implementado na EDP

Tal como demonstrado anteriormente, os ativos estão repartidos em componentes, sendo identificáveis os seus possíveis modos de falha. Para cada modo de falha é avaliada a probabilidade de falha, e a probabilidade geral de o ativo falhar incorpora essas percentagens.

No algoritmo desenvolvido pela EDP, capítulo 3.3, foram tidos em conta quatro componentes para o cálculo da probabilidade de um modo de falha:

- As características técnicas do ativo, normalmente a sua idade;
- O Índice de Saúde associado ao modo de falha;
- Os Fatores externos, relativos à localização do ativo como o risco de incêndio ou inundação, que podem também desencadear um modo de falha;
- Condições de operação a que o ativo esteve sujeito.

A cada um destes componentes é atribuído um peso percentual que representa a sua contribuição para a probabilidade de falha.

Após a avaliação das probabilidades de falha, é necessário proceder ao cálculo da probabilidade de falha geral do ativo. Para se atingir este objetivo utiliza-se o princípio da inclusão-exclusão. Considerando que as diversas falhas não são eventos mutuamente exclusivos como, por exemplo, a perda de isolamento externo de um disjuntor não impede a perda de isolamento interno, a probabilidade de acontecer uma falha é igual à união de todas as falhas possíveis. Desta forma, segundo o princípio utilizado, a união dos eventos é igual à soma da sua probabilidade menos a sua interseção, como se pode verificar na fórmula seguinte, num caso em que existem dois modos de falha:

$$P(A \cup B) = P(A) + P(B) - P(A \cap B) \quad (2)$$

No caso de três modos de falha deve utilizar-se a equação seguinte.

$$P(A \cup B \cup C) = P(A) + P(B) + P(C) - P(A \cap B) - P(A \cap C) - P(B \cap C) + P(A \cap B \cap C) \quad (3)$$

Desta forma, a probabilidade de falha geral do ativo nunca ultrapassa os 100% e é sempre, no mínimo, igual à probabilidade mais elevada dos modos de falha. Teoricamente é expectável que um disjuntor em condição crítica tenha uma maior probabilidade de falha [16,17].

4.5.2. Sugestão de uma nova visão a adotar

Na nova abordagem sugerida neste trabalho, será complementada a metodologia implementada na EDP que permite o cálculo do Índice de Saúde. Através do valor obtido do Índice de Saúde será derivada a probabilidade de falha associada a cada Categoria específica de Índice de Saúde. Esta associação, foi baseada nos dados anuais de Nafirs e no documento de estratégias de integridade e criticidade de ativos das energéticas Iberdrola e ScottishPower, e relacionada com o HI onde possível. É importante reconhecer que os valores de probabilidade de falha para uma categoria de ativos podem variar ligeiramente, em grande parte por possuírem variedades na marca ou modelo e pelos fatores ambientais a que estão sujeitos, por exemplo o clima [8,21].

4.6. ÍNDICE DE CRITICIDADE

4.6.1. Definição

Índice de Criticidade é uma medida da Consequência de Falha (COF) para um determinado ativo específico de uma categoria de ativos e também fornece uma comparação relativa da consequência da falha para ativos em diferentes categorias de HI. Mais importante ainda, o índice de criticidade fornece um método para uma organização priorizar atividades e investimentos de trabalho.

Uma estrutura que define a criticidade de ativos foi definida pelo Health & Criticality Working Group. Nesse documento a criticidade foi dividida em quatro categorias principais, que se combinam para fornecer uma visão geral do ativo. Para cada ativo, a consequência geral da falha é definida como a soma das categorias individuais. Essas categorias individuais incluem [8]:

- **Segurança** - Avaliação de Fatalidades, Lesões Maiores e Menores.
- **Desempenho da rede** - Impactos nos ativos de distribuição, incluindo avaliação CML.
- **Ambiental** - Avaliação de contaminação e emissões fugitivas decorrentes de petróleo e SF₆.
- **Consequência financeira do reparo/substituição** - Custo para retornar a rede ao normal [8].

Em suma, o resultado final da consequência da falha, é apresentado na Figura 13.



Figura 13 - Fórmula de obtenção do Overall da consequência de falha [8]

4.6.2. Classificação em bandas

Para alocar um Índice de Criticidade a cada ativo, é necessário calcular a criticidade geral para cada ativo dessa categoria. Uma pontuação média de criticidade pode ser obtida para cada categoria de ativos e os ativos são alocados ao Índice de Criticidade com base no desvio face à média. As diferentes bandas de 1 a 4 de criticidade, encontram esquematizadas na Tabela 9 [8].

Tabela 9 - Bandas 1 -4 para a definição de um Índice de Criticidade [8]

Criticality Index	Description	Definition
C1	'Low' criticality	<75% of the Average Overall Consequence Of Failure
C2	'Average' criticality	75%-125% of the Average Overall Consequence Of Failure
C3	'High' criticality	125%-200% of the Average Overall Consequence Of Failure
C4	'Very High' criticality	>200% of the Average Overall Consequence Of Failure

Por exemplo, a criticidade média do disjuntor primário é dependente de fatores focalizados e cada disjuntor primário é categorizado com base na sua criticidade geral em comparação com a criticidade média dos disjuntores primários.

4.7. QUANTIFICAÇÃO DO RISCO

Para fornecer uma visão geral do risco, é demonstrada a estratégia aplicada pela Iberdrola e ScottishPower. Nesta visão a probabilidade de falha associada a cada pontuação do HI foi multiplicada pela consequência da falha, de forma a tornar o risco mensurável. Na Figura 14 está ilustrada um exemplo aplicada num disjuntor secundário numa subestação de 11kV [8,10].

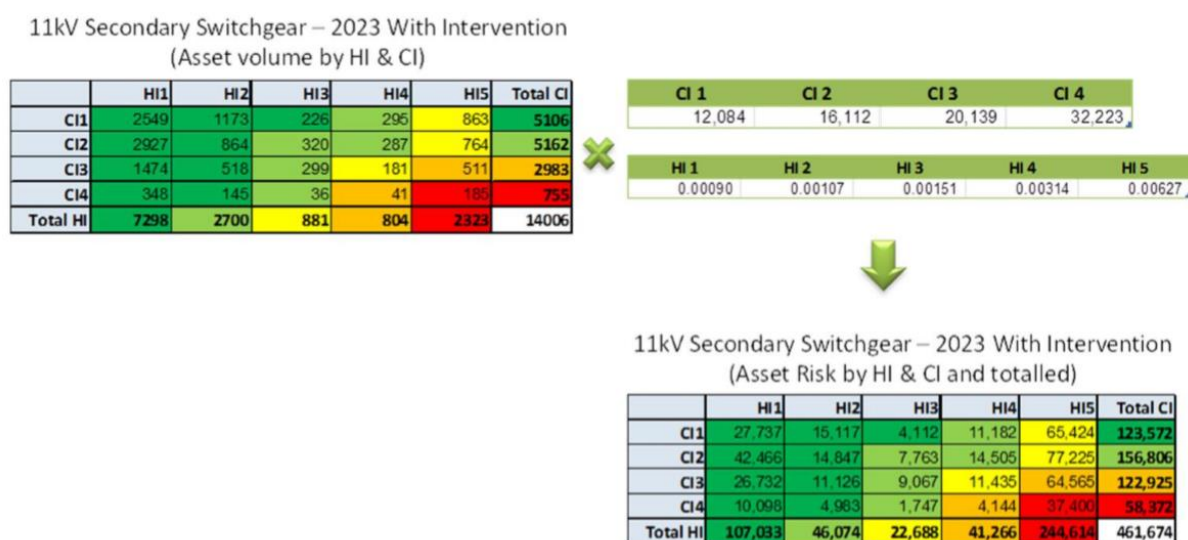


Figura 14 - Exemplo da aplicação da nova visão de risco num disjuntor secundário numa subestação de 11KV da energética Iberdrola e ScottishPower [8]

5. METODOLOGIA DE APOIO À MANUTENÇÃO PREDITIVA

O capítulo 6 apresenta a metodologia sugerida para a manutenção preditiva do risco dos disjuntores. A estratégia de manutenção baseado no risco, foca-se nas consequências do evento e na forma como a manutenção/substituição pode trazer benefícios, visando a melhoria contínua.

5.1. INTRODUÇÃO

Após a implementação do protótipo do sistema de apoio à decisão, a EDP Distribuição, sentiu que era uma necessidade continuar o melhoramento deste sistema, com o intuito de maximizar o tempo de vida dos seus ativos e as ações de manutenção. Assim, desta forma, é proposta uma nova metodologia baseada no risco que se espera complemente o protótipo desenvolvido anteriormente e que aumente as suas potencialidades. Nesta nova abordagem, a aplicar num conjunto de disjuntores de uma subestação, o valor da probabilidade de falha utilizado está intimamente ligado à categoria específica de Índice de Saúde do ativo.

5.2. ABORDAGEM PROPOSTA

A abordagem proposta para a estratégia de manutenção do sistema baseada no risco encontra-se esquematizada na Figura 15.

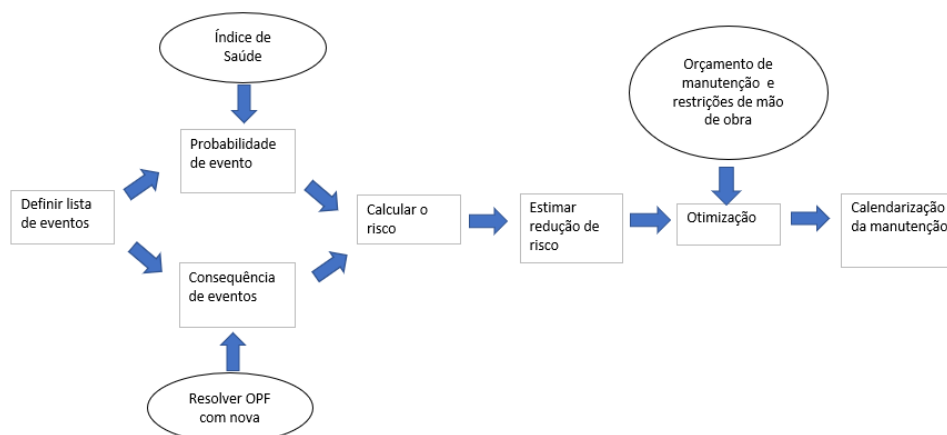


Figura 15 - Abordagem proposta para a estratégia de manutenção do sistema baseada no risco. Adaptado de [17].

Uma análise mais detalhada da Figura 15, permite entender que a abordagem proposta possui as seguintes etapas:

- Identificação da lista de eventos como falha na linha, disjuntor, barramento ou a combinação das falhas anteriores;
- O cálculo da probabilidade de falha que deriva da ponderação da lista de eventos combinada com o HI específico obtido pelo ativo;
- Estimar as consequências do evento, através da nova tipologia *Optimal Power Flow* (OPF);
- Cálculo do risco;
- Definir uma ação de manutenção a realizar no disjuntor e estimar o quanto essa ação pode afetar nos índices de performance e na probabilidade da falha.
- Estimar a redução de risco associado a cada evento;
- Formulação da função objetivo como redução máxima de risco, tendo em conta duas restrições: orçamento e mão de obra;
- Identificação do conjunto de disjuntores que necessitam de atenção imediata e a quantidade de orçamento que se gastará na reparação [17].

5.3. ANÁLISE DETALHADA DAS ETAPAS DE CONSEQUÊNCIA, RISCO E REDUÇÃO DE EVENTO E OTIMIZAÇÃO

5.3.1. Consequência do evento

A consequência do evento pode ser dividida em quatro componentes: (i) perda de carga, (ii) perda de linha, (iii) perda do gerador e (iv) custo de reparação.

Perda de Carga: A perda de carga tem um impacto direto nos clientes que estejam conectados ao sistema. Uma maneira de estimar o impacto da perda de carga é utilizar uma função (CCDF) que meça o dano composto causado ao cliente. Isto é, uma medida do custo de interrupção para um conjunto de clientes causado por um barramento. O CCDF fornece o custo de interrupção em €/MW por um determinado período de tempo. A consequência devido à perda de carga pode ser calculada:

$$Con(carga) = \text{Custo da Interrupção (€ / MW)} \times \text{Perda de Carga (MW)} \quad (4)$$

Perda do Gerador: Quando ocorre a perda do gerador, os outros geradores no sistema podem partilhar a carga do gerador perdido. Podem ocorrer alguns custos adicionais nesta

situação, isto se o custo de ter os outros geradores a atuar for dispendioso. O impacto deste cenário pode ser calculado se correr o OPF sem se considerar o gerador. O custo adicional (€/h) é o resultado do impacto da perda do gerador. A consequência é calculada:

$$Con(ger) = \text{Custo Adicional (€ / h)} \times \text{Tempo de troca (h)} \quad (5)$$

Perda do Gerador: Se a linha está fora de serviço, a configuração do sistema é alterada. O fluxo de carga é recalculado de acordo com a nova topologia do sistema. Se o sistema estiver seguro, o fluxo de energia é redistribuído sem sobrecarregar as outras linhas. Nesse caso, a perda de linha resulta na troca de um ou mais componentes para colocar a linha de novo no sistema. Se o sistema não estiver seguro, isto é, a redistribuição do fluxo de energia pode causar sobrecarga em qualquer linha, ocorre o corte de carga.

O OPF é usado para estimar o impacto da perda da linha. Qualquer custo adicional (€/h) é o resultado da perda da linha. A consequência da perda de linha devido à ação de troca é calculada por:

$$Con(linha) = \text{Custo Adicional (€ / h)} \times \text{Tempo de troca (h)} \quad (6)$$

A consequência da perda de linha devido à contingência de carga é calculada por:

$$Con(linha) = \text{Custo da Interrupção (€ / MW)} \times \text{Perda de Carga (MW)} \quad (7)$$

Custo da reparação do disjuntor: Este inclui o preço da reparação/manutenção dos componentes envolvidos no evento. Para além disso, inclui qualquer custo para eliminar a falha, incluindo o custo da mão de obra.

- O total da consequência corresponde à soma das diferentes consequências: perda de carga, perda de linha e gerador e custos de reparação.

$$Con(E) = Con(carga) + Con(linha) + Con(ger) + \text{custo de reparação} \quad (8)$$

5.3.2. Risco de evento e Redução de Risco

Agora que sabemos que o risco associado a cada evento pode ser calculado, tal como indicado na equação (1), podem ser utilizadas ações de manutenção de forma a reduzir o risco associado a cada evento. A implementação de novas práticas e desta nova metodologia baseada no risco, elevará a qualidade das políticas de manutenção.

Uma das maneiras de alcançar a redução de risco num evento é através da determinação da probabilidade de falha, cujo valor é obtido após a uma avaliação sob os índices de desempenho (HI). Sendo possível prever o valor futuro do HI futuro, através do conhecimento adquirido e existente, é realizando a diferença dos dois valores. Desta forma, pode ser apresentada a diferença na probabilidade do evento, $p(E)$. A redução do risco pode ser computada através da seguinte equação [17].

$$\Delta \text{Risco}(E) = \Delta p(E) + \text{Con}(E) \quad (9)$$

5.3.3. Otimização

Obtidos os níveis de risco associados a determinado evento e a redução do risco devido à sugestão de ações de manutenção, o próximo passo é identificar quais os ativos em estado crítico. Os ativos críticos, por outras palavras, são aqueles que possuem um maior nível de risco. O objetivo da abordagem baseada no risco, não é apenas identificar os ativos com maior grau de risco, mas também identificar os ativos que oferecem uma maior redução do mesmo através das ações de manutenção sugeridas. Desta forma, torna-se mais apropriado considerar a redução de risco em formulação da função objetivo em problemas de otimização. Se tivermos em consideração poucos eventos, torna-se uma decisão simples olhar para o risco e redução em cada evento. Porventura, a situação torna-se bastante mais complicada, se tivermos um número considerável de eventos. Nesses casos, seria ideal formular uma otimização do problema da seguinte forma [17]:

$$\begin{aligned} \text{Max} \quad & \sum_{i=1}^N \Delta R_i x_i \\ \text{ST :} \quad & \sum_{i=0}^N c_i x_i \leq C \\ & x = 0 \text{ or } 1 \quad \forall i \end{aligned} \quad (10)$$

Onde,

I: Índice do disjuntor;

N: Número total de disjuntores;

ΔR_i : Redução do risco através da manutenção do disjuntor “i”;

c_i : Custo da manutenção do disjuntor “i”;

C: Orçamento total.

X: Executar ação de manutenção no disjuntor “i” ($x=1$) ou não ($x=0$).

Este problema de otimização é um problema clássico do *knapsack* e pode ser resolvido através dos métodos de programação dinâmica existentes.

6. MODELO NUMÉRICO

Este capítulo demonstra o modelo numérico realizado para se testar o alcance da metodologia proposta no Capítulo 6. O modelo proposto propõe determinar o número de falhas, de intervenções e/ou de substituições e prever o impacto económico dos anteriores números determinados e do risco. Os objetivos anteriores mencionados, quando corretamente determinados, podem ser úteis na tomada de decisão de previsão/atuação de uma falha, tendo por base a criticidade e integridade do ativo.

6.1. PREPARAÇÃO DOS DADOS

Para tornar possível esta experiência, foi necessário proceder a 10 simulações no Microsoft Office Excel, nas quais se testava o número de consequência das avarias durante um período de 20 anos, num conjunto de 1000 disjuntores de uma subestação elétrica. Em cada simulação, foram testados três cenários distintos:

- **Cenário A - Run-to-Failure**

Neste cenário é experimentado como seria a deterioração do conjunto de disjuntores num período de 20 anos, caso não se realizasse qualquer tipo de intervenção.

- **Cenário B - Reparar com base no HI**

Neste cenário o conjunto de 1000 disjuntores é reparado sempre que um disjuntor atinja o HI de 4 ou substituído sempre que atinja HI de 5. A reparação do disjuntor no HI 4, faz reduzir a idade desse ativo em 10 anos. A ação de manutenção pode ser classificada como 0, 1 e 2, conforme a Tabela 10. Quando o valor toma o valor de 0, não existe a operação de manutenção. Quando o valor toma o valor de 1, o disjuntor é substituído e quando o valor toma o valor 2, o disjuntor é reparado.

Tabela 10 - Atuação com base no HI

HI	Atuar IS
1	0
2	0
3	0
4	2
5	1

- **Cenário C - Reparar com base no risco**

Neste cenário o conjunto de 1000 disjuntores é reparado sempre que o seu risco atinja um valor previamente definido.

A idade do conjunto de 1000 disjuntores foi escolhida com base numa escolha aleatória de elementos, entre 15 a 50. A idade determinada na primeira simulação e no Cenário A, foi replicada para todos os cenários e todas as simulações, para posteriormente ser possível retirar as ilações propostas pelo modelo numérico.

A idade determinada para cada disjuntor é convertida num HI, através da função exponencial determinada a partir da Figura 10. A análise dessa figura permitiu a determinação de cinco pontos, expressos na Tabela 11. Através dos dados da Tabela 11, alcançou-se o gráfico expresso na Figura 16. A equação expressa nesta figura permite então passar de um valor idade para HI.

Tabela 11 - Pontos que serviram de referência para o gráfico de deterioração do disjuntor

Anos	IS
0	1
22	2
42	3
50	4
60	5

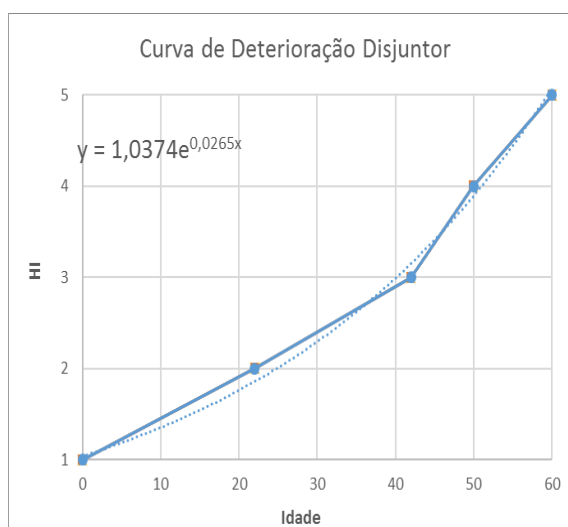


Figura 16 - Gráfico que permite a associação de uma Idade a um HI

O HI determinado para cada disjuntor será convertido numa PoF, através da função exponencial determinada a partir da Figura 14. A análise dessa figura permitiu a determinação de cinco pontos, expressos na Tabela 12. Através dos dados da Tabela 12, alcançou-se o gráfico expresso na Figura 17. A equação expressa nesta figura permite então passar de um valor HI para Pof.

Tabela 12 - Pontos que serviram de referência para o gráfico que converte o HI para PoF

IS	POF
1	0,0009
2	0,00107
3	0,00151
4	0,00314
5	0,00627

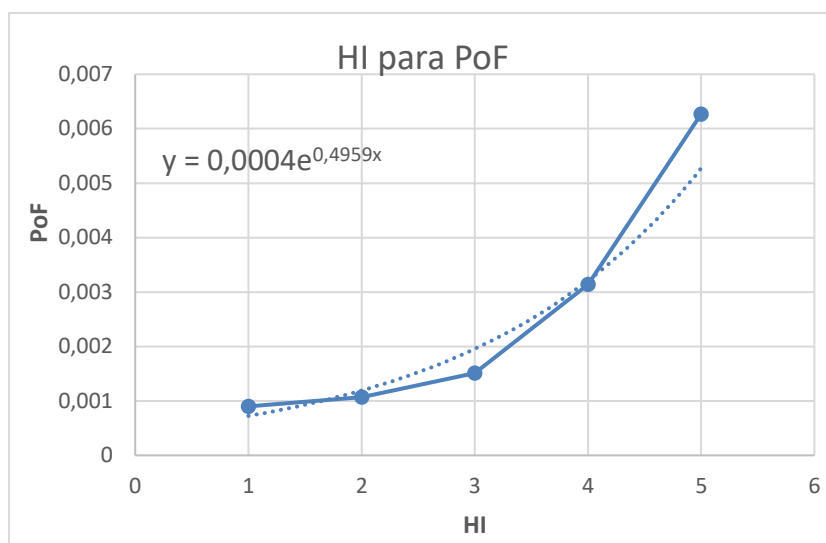


Figura 17 - Gráfico que permite a associação de um HI a uma PoF

Cada disjuntor, terá uma consequência associada, com base numa escolha aleatória de elementos, entre 0 e 3. Cada valor gerado, poderá ser transformado num valor de consequência de falhar (€), através da matriz representada na Tabela 13. A consequência determinada na primeira simulação e no Cenário A, foi replicada para todos os cenários e todas as simulações, para posteriormente ser possível retirar as ilações propostas pelo modelo numérico.

Tabela 13 - Banda de Criticidade associada a um valor de Consequência de Falha

Matriz de Criticidade		
	Banda de Criticidade	Valor (€)
Nulo	0	0
Baixo	1	5000
Médio	2	50000
Alto	3	200000

As 10 simulações realizadas possuem um diferente número aleatório, determinado numa escolha aleatória de elementos entre 0 e 1. O conjunto do número aleatório definido no Cenário A em cada ano do período dos 20, de cada simulação, é replicado para o cenário B e C, dessa mesma simulação. Cada disjuntor, terá então um valor aleatório gerado que será comparado com a sua probabilidade de falha. Se a probabilidade de falha for maior que o número aleatório gerado, o disjuntor avaria. Caso, o número aleatório seja maior que a probabilidade de falha, o disjuntor não avaria e é adicionado 1 ano à sua idade. O

evento “Avaria de Disjuntor” é definido por 0 ou 1. O evento toma o valor de 0, caso não haja avaria, e 1 sempre que o Disjuntor avariar.

O valor do Risco associada a uma avaria, pode ser calculado e desta forma, medir a consequência que adviriam de uma falha. O Risco pode calculado em (€), através da multiplicação da PoF e do valor da consequência de falha.

Em suma, é pretendido que o Modelo Numérico seja capaz de forma automática, proceder às seguintes etapas Ano a Ano, durante o período de 20 anos, conforme esquema da Figura 18.

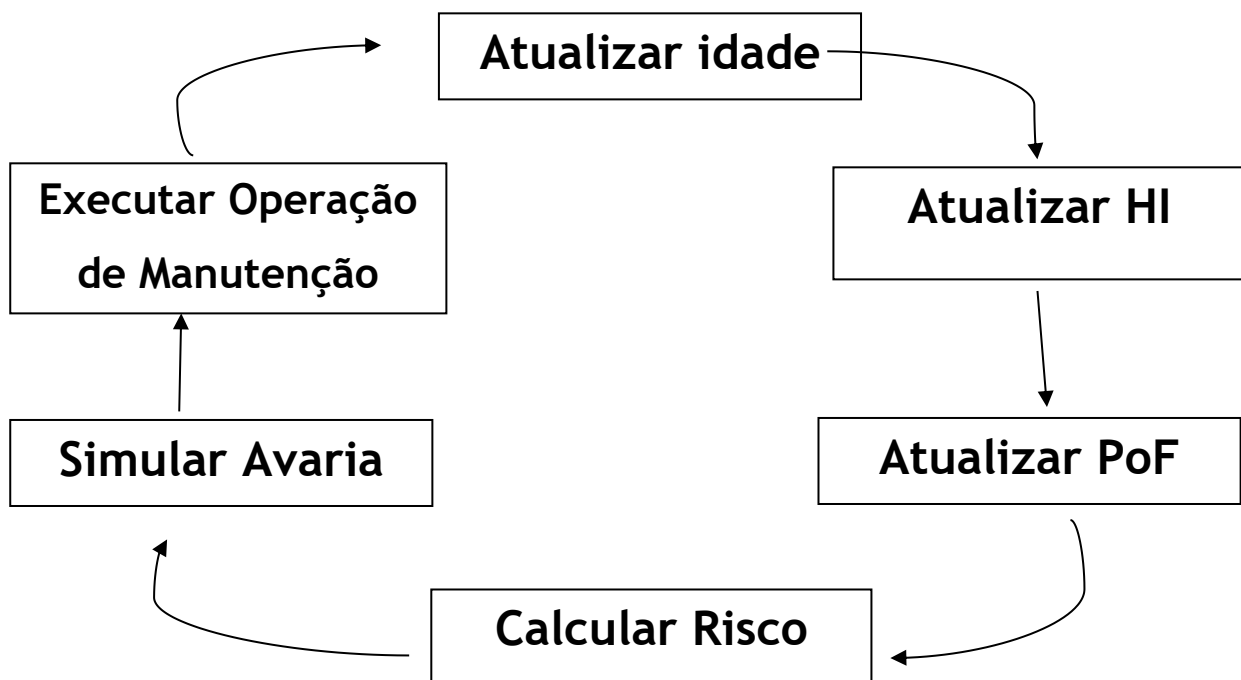


Figura 18 - Etapas do Modelo Numérico

6.2. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

6.2.1. Excerto de uma simulação

Nas seguintes Tabelas 14, 15, 16 são apresentados um excerto de uma simulação para os 3 cenários possíveis, tendo em consideração o mesmo conjunto de 6 disjuntores e analisando-se os mesmos anos.

Cenário A*Tabela 14- Excerto de uma simulação do Cenário A (Anos 1,7,8,19)*

Ano 1									
Disjuntor	Idade	HI	PoF	Consequência	Valor de Cons	Risco	Número Aleatório	Avaria	Cons da Avaria
1	43	3,24209	0,00200311	0	0	0	0,546520326	0	0
2	30	2,29726	0,0012526	1	5000	6,26298066	0,029809431	0	0
3	42	3,1573	0,00192047	3	200000	384,094861	0,859863834	0	0
4	37	2,76549	0,00158072	1	5000	7,90360367	0,194766027	0	0
5	34	2,55415	0,00142314	0	0	0	0,267247332	0	0
6	50	3,90289	0,00278168	1	5000	13,908411	0,694579462	0	0

Ano 7									
Disjuntor	Idade	HI	PoF	Consequência	Valor de Cons	Risco	Número Aleatório	Avaria	Cons da Avaria
1	49	3,800823	0,002644	0	0	0	0,18290395	0	0
2	36	2,693166	0,001525	1	5000	7,62461279	0,727381603	0	0
3	48	3,701424	0,002517	3	200000	503,339136	0,427688401	0	0
4	43	3,242088	0,002003	1	5000	10,0155685	0,166777112	0	0
5	40	2,994321	0,001771	0	0	0	0,141886437	0	0
6	56	4,575507	0,003886	1	5000	19,4280281	0,064277107	0	0

Ano 8									
Disjuntor	Idade	HI	PoF	Consequência	Valor de Cons	Risco	Número Aleatório	Avaria	Cons da Avaria
1	50	3,902891	0,002782	0	0	0	0,145119836	0	0
2	37	2,765489	0,001581	1	5000	7,90360367	0,86458419	0	0
3	49	3,800823	0,002644	3	200000	528,823913	0,033708094	0	0
4	44	3,329152	0,002092	1	5000	10,4583714	0,530110712	0	0
5	41	3,074732	0,001843	0	0	0	0,17650454	0	0
6	57	4,698379	0,00413	1	5000	20,6511657	0,750651064	0	0

Ano 19									
Disjuntor	Idade	HI	PoF	Consequência	Valor de Cons	Risco	Número Aleatório	Avaria	Cons da Avaria
1	61	5,223761	0,005362316	0	0	0	0,564451781	0	0
2	48	3,701424	0,002516696	1	5000	12,5834784	0,703351949	0	0
3	60	5,087149	0,00501039	3	200000	1002,07792	0,276382566	0	0
4	55	4,455849	0,003661308	1	5000	18,3065419	0,215535157	0	0
5	52	4,115324	0,003091368	0	0	0	0,306412103	0	0
6	68	6,288469	0,009101592	1	5000	45,5079598	0,006393051	1	5000

Cenário B*Tabela 15 - Excerto de uma simulação do Cenário B (Anos 1,7,8,19)*

Ano 1										
Disjuntor	Idade	IS	PoF	Atuar HI	Número Aleatório	Consequência	Valor de Cons	Risco	Avaria	Cons da Avaria
1	43	3	0,001776	0	0,546520326	0	0	0	0	0
2	30	2	0,001081	0	0,029809431	1	5000	8,880405	0	0
3	42	3	0,001776	0	0,859863834	3	200000	355,2162	0	0
4	37	3	0,001776	0	0,194766027	1	5000	8,880405	0	0
5	34	3	0,001776	0	0,267247332	0	0	0	0	0
6	50	4	0,002919	2	0,694579462	1	5000	8,880405	0	0

Ano 7										
Disjuntor	Idade	IS	PoF	Atuar HI	Número Aleatório	Consequência	Valor de Cons	Risco	Avaria	Cons da Avaria
1	38	3	0,001776	0	0,18290395	0	0	0	0	0
2	36	3	0,001776	0	0,727381603	1	5000	8,880405	0	0
3	37	3	0,001776	0	0,427688401	3	200000	355,2162	0	0
4	43	3	0,001776	0	0,166777112	1	5000	8,880405	0	0
5	40	3	0,001776	0	0,141886437	0	0	0	0	0
6	45	3	0,001776	0	0,064277107	1	5000	8,880405	0	0

Ano 8										
Disjuntor	Idade	IS	PoF	Atuar HI	Número Aleatório	Consequência	Valor de Cons	Risco	Avaria	Cons da Avaria
1	39	3	0,001776	0	0,145119836	0	0	0	0	0
2	37	3	0,001776	0	0,86458419	1	5000	8,880405	0	0
3	38	3	0,001776	0	0,033708094	3	200000	355,2162	0	0
4	44	3	0,001776	0	0,530110712	1	5000	8,880405	0	0
5	41	3	0,001776	0	0,17650454	0	0	0	0	0
6	46	4	0,002919	2	0,750651064	1	5000	8,880405	0	0

Ano 19										
Disjuntor	Idade	IS	PoF	Atuar HI	Número Aleatório	Consequência	Valor de Cons	Risco	Avaria	Cons da Avaria
1	39	3	0,001776	0	0,564451781	0	0	0	0	0
2	37	3	0,001776	0	0,703351949	1	5000	8,880405	0	0
3	38	3	0,001776	0	0,276382566	3	200000	355,2162	0	0
4	44	3	0,001776	0	0,215535157	1	5000	8,880405	0	0
5	41	3	0,001776	0	0,306412103	0	0	0	0	0
6	46	4	0,002919	2	0,006393051	1	5000	8,880405	0	0

Cenário C*Tabela 16 - Excerto de uma simulação do Cenário C (Anos 1,7,8,19)*

Ano 1									
Disjuntor	Idade	HI	PoF	Consequência	Valor de Cons	Risco	Número Aleatório	Avaria	Cons da Avaria
1	43	3,242088	0,002003	0	0	0	0,546520326	0	0
2	30	2,297261	0,001253	1	5000	6,262981	0,029809431	0	0
3	42	3,157301	0,00192	3	200000	384,0949	0,859863834	0	0
4	37	2,765489	0,001581	1	5000	7,903604	0,194766027	0	0
5	34	2,554145	0,001423	0	0	0	0,267247332	0	0
6	50	3,902891	0,002782	1	5000	13,90841	0,694579462	0	0

Ano 7									
Disjuntor	Idade	HI	PoF	Consequência	Valor de Cons	Risco	Número Aleatório	Avaria	Cons da Avaria
1	49	3,800823	0,002644	0	0	0	0,18290395	0	0
2	36	2,693166	0,001525	1	5000	7,624613	0,727381603	0	0
3	48	3,701424	0,002517	3	200000	503,3391	0,427688401	0	0
4	43	3,242088	0,002003	1	5000	10,01557	0,166777112	0	0
5	40	2,994321	0,001771	0	0	0	0,141886437	0	0
6	56	4,575507	0,003886	1	5000	19,42803	0,064277107	0	0

Ano 8									
Disjuntor	Idade	HI	PoF	Consequência	Valor de Cons	Risco	Número Aleatório	Avaria	Cons da Avaria
1	50	3,902891	0,002782	0	0	0	0,145119836	0	0
2	37	2,765489	0,001581	1	5000	7,903604	0,86458419	0	0
3	1	1,065259	0,000679	3	200000	135,8231	0,033708094	0	0
4	44	3,329152	0,002092	1	5000	10,45837	0,530110712	0	0
5	41	3,074732	0,001843	0	0	0	0,17650454	0	0
6	57	4,698379	0,00413	1	5000	20,65117	0,750651064	0	0

Ano 19									
Disjuntor	Idade	HI	PoF	Consequência	Valor de Cons	Risco	Número Aleatório	Avaria	Cons da Avaria
1	61	5,223761	0,005362	0	0	0	0,564451781	0	0
2	48	3,701424	0,002517	1	5000	12,58348	0,703351949	0	0
3	12	1,425778	0,000812	3	200000	162,4704	0,276382566	0	0
4	55	4,455849	0,003661	1	5000	18,30654	0,215535157	0	0
5	52	4,115324	0,003091	0	0	0	0,306412103	0	0
6	68	6,288469	0,009102	1	5000	45,50796	0,006393051	1	5000

6.2.2. Resumo de todas as simulações

Neste subcapítulo será calculado os valores referentes ao somatório das consequências das avarias, do número de falhas e de substituições e/ou intervenções para o período estipulado de 20 anos para as dez simulações realizadas. Para se determinar o preço total de cada cenário, foi necessário recorrer à Tabela 17.

Tabela 17 - Custo esperado total de cada Cenário

Custo do Cenário A	
Cons (F) + (Custo de Falhas * Nº Avarias) + (Nº Avarias * Custo de Substituição)	
Custo do Cenário B	
Cons (F) + (Custo de Falhas * Nº Avarias) + (Nº Manutenções * Custo de Manutenção) + (Nº Avarias * Custo de Substituição)	
Custo do Cenário C	
Cons (F) + (Custo de Falhas * Nº Avarias) + ((Nº Avarias+ Nº Substituições) * Custo de Substituição)	

Anteriormente no trabalho, no Capítulo 6, tinham sido definidos os diferentes custos que podem ocorrer no ciclo de vida de um disjuntor. Os valores utilizados encontram-se dispostos na Tabela 18.

Tabela 18- Custo das variáveis fixas no ciclo de vida de um Disjuntor

Custo de falha	100 000,00 €
Custo de manutenção	1 000,00 €
Custo de Substituição	10 000,00 €

Os valores referentes ao somatório das consequências das avarias, do número de falhas e de substituições e/ou intervenções para o período estipulado de 20 anos para as dez simulações realizadas estão apresentados na Tabela 19.

Tabela 19 - Resultados das 10 simulações. Somatório das consequências das avarias, número de falhas e de substituições/ intervenções para o período de 20 anos

RISCO definido de 500			
Σ consq (F)			
	Cenário A	Cenário B	Cenário C
Simulação 1	3 065 047,00 €	1 790 000,00 €	1 665 000,00 €
Simulação 2	3 720 062,00 €	2 055 000,00 €	2 320 000,00 €
Simulação 3	2 955 000,00 €	1 595 000,00 €	2 155 000,00 €
Simulação 4	4 800 052,00 €	2 690 000,00 €	2 600 000,00 €
Simulação 5	2 885 000,00 €	1 960 000,00 €	2 085 000,00 €
Simulação 6	3 110 054,00 €	2 255 000,00 €	1 910 000,00 €
Simulação 7	2 830 000,00 €	2 155 000,00 €	2 025 000,00 €
Simulação 8	1 810 000,00 €	1 095 000,00 €	1 010 000,00 €
Simulação 9	3 645 000,00 €	2 295 000,00 €	1 800 000,00 €
Simulação 10	3 730 048,00 €	2 320 000,00 €	2 330 000,00 €
Média por Simulação	3 255 026,30 €	2 021 000,00 €	1 990 000,00 €

RISCO definido de 500			
Número Total de Avarias em 20 anos			
	Cenário A	Cenário B	Cenário C
Simulação 1	47	28	40
Simulação 2	62	42	55
Simulação 3	56	40	52
Simulação 4	52	35	41
Simulação 5	38	25	34
Simulação 6	54	39	48
Simulação 7	46	34	42
Simulação 8	38	26	34
Simulação 9	46	32	38
Simulação 10	48	31	41
Média por Simulação	48,7	33,2	42,5

RISCO definido de 500			
Custo Esperado			
	Cenário A	Cenário B	Cenário C
Simulação 1	8 235 047,00 €	5 916 000,00 €	7 515 000,00 €
Simulação 2	10 540 062,00 €	7 707 000,00 €	9 810 000,00 €
Simulação 3	9 115 000,00 €	7 026 000,00 €	9 315 000,00 €
Simulação 4	10 520 052,00 €	7 580 000,00 €	8 560 000,00 €
Simulação 5	7 065 000,00 €	5 759 000,00 €	7 255 000,00 €
Simulação 6	9 050 054,00 €	7 583 000,00 €	8 620 000,00 €
Simulação 7	7 890 000,00 €	6 927 000,00 €	8 075 000,00 €
Simulação 8	5 990 000,00 €	4 996 000,00 €	6 200 000,00 €
Simulação 9	8 705 000,00 €	6 853 000,00 €	7 410 000,00 €
Simulação 10	9 010 048,00 €	6 772 000,00 €	8 270 000,00 €
Média por Simulação	8 612 026,30 €	6 711 900,00 €	8 103 000,00 €

7. DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Neste capítulo serão discutidos os principais resultados obtidos no presente estudo e serão retiradas ilações sob os mesmos.

A análise das tabelas apresentadas no subcapítulo 7.2.1 e de todas as simulações realizadas permitem compreender que:

- No Cenário A, ao não ser realizada nenhum tipo de operação de manutenção, o estado de deterioração do disjuntor é agravado com o decorrer dos anos. Desta forma, a probabilidade de falha do disjuntor será maior nos últimos anos e consequentemente o número de avarias aumentará nestes períodos.
- No Cenário B, ao ser definida a condição se o HI = 4, realizar a operação de manutenção ou se HI = 5, substituir o disjuntor, está garantida que a idade do disjuntor nunca ultrapassará os 46 anos de idade, a não ser no Ano 1 (número aleatório gerado ter sido entre 46 e 50). Desta forma, é garantido que a probabilidade de falha será inferior a 3%.

Porventura, a imposição deste tipo de condições faz crescer drasticamente o número de intervenções a realizar. Por exemplo, focando no disjuntor 6 ao longo dos anos analisados é visível que este é intervencionado 3 vezes em 20 anos.

- No Cenário C, a operação de manutenção é realizada com base na criticidade em vez da integridade (HI), isto é, a operação de manutenção é realizada só nos disjuntores que apresentem o maior grau de risco (maior impacto caso a avaria aconteça). Nas simulações realizadas o valor definido de risco foi de 500 €. Sempre que ultrapassado esse valor de risco, o ativo deve ser substituído. O valor 500 € foi definido com base em que 5% dos ativos mais críticos estavam localizados acima deste valor no Ano 1 da Simulação. A substituição de 5 % de um conjunto de 1000 disjuntores aparenta ser um valor razoável tendo em atenção as restrições como mão-de-obra e os orçamentos de manutenção.

Após se realizar as dez simulações, foram agrupados os valores referentes ao somatório das consequências das avarias, do número de falhas e de substituições e/ou intervenções no subcapítulo 7.2.2.

Para se determinar o preço total de cada cenário, recorreu-se à Tabela 17 e 18, que apresenta a fórmula de cálculo para cada cenário e os custos das variáveis fixas no ciclo de vida de um Disjuntor, respetivamente.

A análise das tabelas apresentadas no subcapítulo 7.2.2 e de todas as simulações realizadas permitem compreender que:

- Quando comparado o valor do somatório da consequência de falha, é visível que o Cenário A, é o que apresenta o maior valor de todos os cenários. Tal facto, é justificado pela não realização da operação de manutenção. Os valores obtidos no Cenário B e C são praticamente os mesmos, sendo registado uma melhoria em ambos, de aproximadamente de 38% face ao Cenário A. Tal facto é justificado, pela atuação num caso pelo HI, que irá fazer com que a probabilidade de falha seja sempre inferior a 3%, e noutro pela atuação face ao valor de risco que fará com que os disjuntores que avariem, não apresentem uma consequência tão elevada.
- Atentando ao número total de falhas em 20 anos, o Cenário A, como era previsível foi o que obteve piores resultados. Porém, desta vez o Cenário B tem um desempenho superior face ao Cenário C. O que pode ajudar a justificar este facto é, o número de intervenções realizados no Cenário B ser aproximadamente 5-6 vezes maior do que o número de substituições realizadas no Cenário C. O Cenário C, apresentou uma melhoria de aproximadamente 12% face ao Cenário A, isto é aproximadamente, menos 6 avarias. O Cenário B, apresentou uma melhoria de 32% em média face ao Cenário A e de 22% quanto ao Cenário B.
- Quando se tem em conta, os preços totais dos Cenários, o Cenário A, volta a ser aquele com pior resultado. Como consequência da implementação do Cenário C é expectável que ao final de 20 anos em média haja um impacto positivo de 6% em termos económicos (aproximadamente meio milhão de euros melhor por conjunto de 1000 disjuntores). O Cenário B, é aquele que apresenta melhores resultados, uma vez que foi neste, que se verificou um menor número de falhas. Comparativamente ao Cenário A, é cerca de 22% melhor (1,9 milhões de euros por conjunto de 1000 disjuntores) e quanto ao C, melhor cerca de 18% melhor (1,4 milhões de euros por conjunto de 1000 disjuntores).
- O Cenário B, apesar de ter obtido os melhores resultados quer em termos de consequência de falha, número de avarias e impacto económico, convém salientar que é um cenário utópico, uma vez que não possui qualquer restrição no modelo. Isto é, no mundo real era impossível realizar um número tão elevado de intervenções, tendo em conta restrições como mão-de-obra e orçamentos de manutenção, por exemplo.

8. CONCLUSÕES E SUGESTÕES FUTURAS

A evolução e o desenvolvimento da presente dissertação só foram possíveis depois de se realizar um estudo aprofundado do contexto da EDP Distribuição e dos processos de gestão em curso. O objetivo primordial desta dissertação era a proposta de uma metodologia que permitisse a modelação da condição de diferentes ativos, com foco nos disjuntores, permitindo o auxílio da tomada de decisões para a gestão dos principais ativos de uma subestação elétrica, e identificasse as melhores ações de manutenção a executar, com base no risco.

Durante o progresso do trabalho, foi estudado o Protótipo de Apoio à Decisão implementado pela EDP, que caracterizava de forma fundamentada e objetiva a condição dos ativos, através da avaliação de três indicadores: Índice de Saúde, Probabilidade de Falha e Tempo de vida restante. A determinação destes indicadores é realizada através de algoritmos desenvolvidos pela empresa. Estes indicadores, quando são corretamente estimados, são a base para um modelo de manutenção preditiva, com vista a atuar antes que as falhas ocorram e a evitar custos desnecessários. Porém, uma adição interessante que faltava a este protótipo era a inclusão do cálculo do risco através da avaliação da relação entre a probabilidade de falha e as consequências dessa falha.

Após uma análise extensiva a este Protótipo de Apoio à Decisão e de forma a colmatar uma das suas maiores lacunas, propôs-se uma metodologia que pode ser complementar a este Protótipo. A metodologia proposta sugere uma abordagem de decisão baseada no risco para o planeamento das ações de manutenção a realizar.

Para se atingir este objetivo foi proposto um modelo numérico para se testar o alcance da metodologia proposta. O modelo proposto propõe determinar o número de falhas, de intervenções e/ou de substituições e prever o impacto económico dos anteriores números determinados e do risco. Os objetivos anteriores mencionados, quando corretamente determinados, podem ser úteis na tomada de decisão de previsão/atuação de uma falha, tendo por base a criticidade e integridade do ativo.

Os principais resultados obtidos pelo modelo numérico foram que a implementação da metodologia baseada no risco (Cenário C) resultou numa descida média por disjuntor, de 38% no valor consequência de falha, 12% no número de avarias esperadas, o que se traduziu numa redução no impacto económico de 500€ por disjuntor, quando comparado com o Cenário A, onde não se realiza qualquer operação de manutenção. No modelo numérico também foi testado um Cenário B, cenário que se atuaria com base no HI. Este Cenário traduz uma situação utópica, uma vez que a sua aplicação não possui nenhuma restrição, como mão-obra-disponível ou disponibilidade do componente para fins de manutenção, por exemplo. Porém caso fosse possível a sua aplicação, 38% no valor consequência de falha, 32% no número de avarias esperadas, o que se traduziu numa redução média no impacto económico de 1800 € por disjuntor, quando comparado com o Cenário A, onde não se realiza qualquer operação de manutenção. Quando comparado o

Cenário B, ao cenário proposto (Cenário C), o valor da consequência de falha é praticamente igual, porém existe uma redução no número de falhas de 22%, o que se traduziu numa redução no impacto económico de 1300€ por disjuntor.

O próximo grande passo a dar será a implementação de um sistema informático mais abrangente, que seja capaz de adquirir os parâmetros necessários para o cálculo dos indicadores referidos de forma automática. Tal facto, iria exigir um processo de informatização dos dados de ensaios existentes e o investimento e implementação de novas tecnologias de monitorização, tal como sensores capazes de registar os parâmetros relativos a cada ativo.

A metodologia proposta deve ser formulada como um problema em que a função objetivo fosse a redução dos custos operacionais, com restrições ao nível da segurança, manutenção e mão de obra. Porém, esta tarefa pode assumir-se como complexa, tendo em conta, que o sistema é constituído por vários disjuntores de diferentes fabricantes. Tal facto, envolveria a modelação de diferentes funções objetivo tendo em conta os diferentes disjuntores, ao nível dos componentes.

A metodologia de otimização baseada no risco pode ser melhorada caso se adicionem restrições adicionais, tais como a disponibilidade do componente para fins de manutenção. Caso seja alcançada, esta abordagem seria muito útil face ao atual cenário da indústria, onde o orçamento de manutenção tem diminuído.

Este estudo pode ser extensível a outros equipamentos do sistema de energia, como as linhas de transmissão e aos transformadores. Contudo esta tarefa adivinha-se como sendo difícil, uma vez que é complicado estimar a probabilidade e as consequências destes eventos.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Lopes, M.V.F., Desenvolvimento de um modelo para determinação do índice de saúde e respetiva probabilidade de falha para disjuntores AT e MT - Estágio na EDP Distribuição in Departamento de Engenharia Eletrotécnica, 2014, Instituto Superior de Engenharia de Coimbra
- [2] Alves, M.H.L.d.B., Desenvolvimento de um Modelo de Cálculo para Determinação do Índice de Saúde, Probabilidade de Falha e Vida Restante de Linhas Aéreas AT e M., 2018, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
- [3] EDP. [cited 2019 Agosto e Setembro]; Available from: <https://www.edp.pt/particulares/>.
- [4] DMN - MNPC. 2012. Gestão de Ativos no âmbito da BSI PAS 55:2008, Piloto de implementação na AO STB. Lisboa: EDP.
- [5] Cardoso, j.p.m., uma abordagem à manutenção de postos de transformação aéreos 2014, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa
- [6] Networks, S.P., ASSET MANAGEMENT PLAN 3.2.05 SUBSTATION CIRCUIT BREAKERS 2014 TO 2025. 2014.
- [7] Networks, S.E., SP Energy Networks 2015-2023 Business Plan Updated March 2014 - risk and uncertainty.
- [8] Networks, S.E., SP Energy Networks 2015-2023 Business Plan Updated March 2014 - Asset Health and Criticality Strategy. 2014.
- [9] Networks, S.E., SP Energy Networks 2015-2023 Business Plan Updated March 2014 - Cost Benefit Analysis 2014.
- [10] Networks, S.E., SP Energy Networks 2015-2023 Business Plan Updated March 2014 - 11kV Substation Plant Strategy. 2014
- [11] Networks, S.E., SP Energy Networks 2015-2023 Business Plan Updated March 2014 - 33kV Substation Plant Strategy. 2014
- [12] Networks, S.E., SP Energy Networks 2015-2023 Business Plan Updated March 2014 - Asset Management Health Index Reporting Assurance 2013.
- [13] Networks, S.E., SP Energy Networks 2015-2023 Business Plan Updated March 2014 - Civil Strategy and Plans 2014.
- [14] Corporation, P.a.W., Asset Health and Criticality Method
- [15] West, W., Asset Strategy 2011.
- [16] Caldas, A.N., Desenvolvimento de um Sistema de Apoio à Decisão para a manutenção preditiva dos ativos de uma subestação elétrica in Engenharia Informática e Computação, 2015, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

- [17]** NATTI, S. and RISK BASED MAINTENANCE OPTIMIZATION USING PROBABILISTIC MAINTENANCE QUANTIFICATION MODELS OF CIRCUIT BREAKER, 2008, Texas A&M University
- [18]** Jim McCalley; Yong Jiang Vasant Honavar, J.P.M.K., Satish Natti Chanan Singh, Jirutitijaroen Panida Automated Integration of Condition Monitoring with an Optimized Maintenance Scheduler for Circuit Breakers and Power Transformer, 2006, Texas A&M University Iowa State University
- [19]** Pedro, K.S., Modelização do Arco Elétrico em Disjuntores para Análise de Transitórios Eletromagnéticos, 2017, Instituto Superior Técnico, Lisboa
- [20]** Omokhafa J. T, a.A.G.J., Reliability Study of Electric Circuit Breakers (A case study) 2011, Department of Electrical and Electronics Engineering, Federal University of Technology Minna, Niger State, Nigeria
- [21]** METHODOLOGY, D.C.N.A.I., Health & Criticality - Version 1.1 2017.
- [22]** Administration, W.A.P., Asset Health & Probability of Failure - Calculations for Transformers and Breakers 2018.