

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO



# **Otimização do Processo de Manutenção de Faixas de Serviço de Linhas de Média e Alta Tensão**

**Rita da Fonseca Lopes**

Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Orientador: Professor Doutor Artur Manuel Figueiredo Fernandes Costa

31 de Julho de 2013

A Dissertação intitulada

**“Otimização do Processo de Manutenção de Faixas de Serviço de Linhas de Média e Alta Tensão”**

foi aprovada em provas realizadas em 23-07-2013

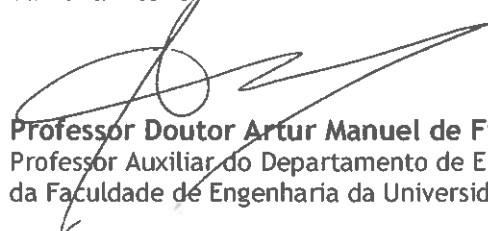
o júri



Presidente **Professor Doutor José Eduardo Roque Neves dos Santos**  
Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores  
da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



**Professor Doutor Davide Baptista da Fonseca**  
Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Electromecânica da Universidade  
da Beira Interior



**Professor Doutor Artur Manuel de Figueiredo Fernandes e Costa**  
Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores  
da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

O autor declara que a presente dissertação (ou relatório de projeto) é da sua exclusiva autoria e foi escrita sem qualquer apoio externo não explicitamente autorizado. Os resultados, ideias, parágrafos, ou outros extratos tomados de ou inspirados em trabalhos de outros autores, e demais referências bibliográficas usadas, são corretamente citados.



**Autor - Rita da Fonseca Lopes**

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



# Resumo

A continuidade da prestação de serviço aos consumidores é um dos grandes desafios que as empresas de distribuição de energia elétrica enfrentam, sendo que a manutenção eficiente e otimizada das redes deve ser garantida com vista à melhoria da qualidade do serviço prestado.

Neste trabalho apresentam-se resultados obtidos com uma aplicação computacional desenvolvida pela autora, concretizando um método de otimização do agendamento de ações de manutenção em faixas de serviço de linhas AT e MT da empresa distribuidora portuguesa EDP Distribuição S.A., com base na informação recolhida com recurso à tecnologia LiDAR, durante as inspeções aéreas realizadas por helicóptero às mesmas.

São descritos os processos de inspeção e caracterizadas as atividades de manutenção de linhas aéreas MT e AT realizados por aquela empresa, desde o planeamento de inspeções até à concretização de ações corretivas ou preventivas.

É igualmente proposta uma abordagem ao problema do agendamento otimizado das referidas ações, baseada em Algoritmos Genéticos, com vista à redução dos encargos com as mesmas. O modelo proposto foi testado com dados reais, obtidos em inspeções realizadas em Outubro de 2012, demonstrando-se a oportunidade de se obterem ganhos expressivos nas despesas de manutenção de faixas de serviço.

O trabalho decorreu ao abrigo de um contrato celebrado entre a Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto e a empresa EDP Distribuição S.A., o que permitiu a realização de uma inspeção aérea por helicóptero, assim como o acompanhamento do posterior tratamento de dados. Nesta dissertação pode ser encontrada uma descrição e uma análise crítica de todo o processo.



# Abstract

The continued provision of service to customers is one of the major challenges that electricity distribution companies face. An efficient and optimized maintenance of the power network must be guaranteed in order to improve the quality of service provided.

Based on the information gathered using LiDAR technology during aerial power line inspections carried out by helicopter, the author developed a computer application in order to implement a method for an optimized maintenance schedule of corrective actions on power lines corridors.

This work describes the process of inspection and maintenance, from planning to the implementation of inspections of corrective or preventive actions, carried out by the company.

The proposed approach to the presented problem of optimal scheduling is based on Genetic Algorithms. The proposed model was tested on real data, obtained during aerial power line inspection conducted in October 2012. It presents the possibility of reducing maintenance costs.

The work took place under a contract between the Faculty of Engineering of Porto University and EDP Distribution S.A., allowing the realization of an aerial inspection by helicopter, as well as monitoring the subsequent data processing. In this dissertation, can be found a description and a critical analysis of the whole process.



# Agradecimentos

Antes de mais, gostaria de agradecer aos meus pais, avós e irmã porque sempre me apoiaram e motivaram ao longo destes vinte e dois anos de vida.

Ao José que, depois destes últimos cinco meses, que se tornou num *expert* em manutenção de faixas de serviço, o que demonstra a sua amizade, o seu carinho e a sua paciência.

Aos Engenheiros da EDP Distribuição, Jorge Manuel Gomes ,Paulo Sousa e Ricardo Santos, por toda a ajuda, cooperação e simpatia que tiveram ao longo do semestre, mesmo nas alturas em que se encontravam mais atarefados.

Um agradecimento especial ao Professor Doutor Artur Costa, pela sua disponibilidade e pela sua experiência , que foram essenciais para o eficaz e eficiente desenvolvimento do meu documento.

Quero também agradecer aos meus amigos Agostinho, Luis, André, David, José, Inês e Joana pela boa companhia durante as muitas horas de estudo, e não só.

Por fim gostaria de agradecer a todos que, comigo, fizeram parte do CineFEUP, do NuIEEE e da TUNAFE.

Rita



*“I wish I could write as mysterious as a cat.”*

Edgar Allan Poe



# Conteúdo

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Considerações gerais . . . . .	1
1.2	Objetivos do trabalho . . . . .	2
1.3	Metodologia . . . . .	3
1.4	Estrutura da Dissertação . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Contextualização do Problema</b>	<b>5</b>
2.1	Caracterização geral da rede (topologia) . . . . .	5
2.1.1	Cadeia de Valor do Sistema Elétrico Nacional . . . . .	5
2.1.2	Caraterização da Rede de Distribuição . . . . .	6
2.2	Exploração: Principais causas de falha . . . . .	8
2.2.1	Indicadores de Qualidade de Serviço da RND . . . . .	8
2.2.2	Vegetação: principal causa de falhas na rede . . . . .	9
2.2.3	Vegetação como causa de falhas na rede . . . . .	10
2.3	Inspeção de falhas incluindo a sua caraterização e localização . . . . .	12
2.3.1	Inspeção visual pelo solo . . . . .	13
2.3.2	Inspeções aéreas tripuladas . . . . .	15
2.3.3	Inspeções Robotizadas . . . . .	18
2.4	Gestão da manutenção . . . . .	20
2.4.1	Importância do planeamento da manutenção . . . . .	20
2.4.2	Diferentes critérios e estratégias adotadas na gestão da manutenção . . . . .	22
2.4.3	Caracterização da otimização da manutenção . . . . .	25
2.5	Síntese . . . . .	25
<b>3</b>	<b>Experiência da empresa em Processo de Inspeção e Manutenção de faixa de serviço</b>	<b>27</b>
3.1	Inspeção das linhas por helicóptero e medição de distâncias . . . . .	27
3.1.1	Planeamento das ações de inspeção . . . . .	27
3.1.2	Inspeções aéreas tripuladas . . . . .	29
3.2	Tratamento de dados, relativos à medição de distâncias, obtidos na inspeção . . . . .	33
3.2.1	Modelo de planeamento de ações de manutenção atualmente em vigor . . . . .	37
3.3	Intervenções das equipas de trabalho no terreno . . . . .	38
3.3.1	Práticas de corte e poda das árvores . . . . .	39
3.4	Síntese . . . . .	40
<b>4</b>	<b>Desenvolvimento de algoritmo para o processamento de dados de inspeção</b>	<b>43</b>
4.1	Métodos computacionais de otimização . . . . .	43
4.1.1	Algoritmos Genéticos . . . . .	43
4.1.2	Algoritmo Genético Simples . . . . .	47

4.2	Descrição do Problema . . . . .	48
4.2.1	Aspetos gerais do problema . . . . .	48
4.3	Formulação matemática do problema . . . . .	51
4.3.1	Variáveis . . . . .	51
4.3.2	Restrições . . . . .	52
4.3.3	Formulação Completa . . . . .	53
4.4	Metodologia baseada em Algoritmos Genéticos . . . . .	54
4.4.1	Leitura e filtragem dos dados a analisar . . . . .	54
4.4.2	Inicialização da População Inicial . . . . .	55
4.4.3	Seleção, Crossover e Mutação . . . . .	56
4.5	Modelo anual com previsão da taxa de crescimento da vegetação . . . . .	57
4.6	Síntese . . . . .	61
<b>5</b>	<b>Análise e Validação dos modelos desenvolvidos</b>	<b>63</b>
5.1	Estruturação dos testes . . . . .	63
5.1.1	Ferramenta computacional utilizada . . . . .	63
5.1.2	Procedimento Prático . . . . .	64
5.1.3	Procedimento Experimental e Resultados . . . . .	65
5.1.4	Avaliação da robustez do modelo desenvolvido . . . . .	65
5.1.5	Parameterização do Algoritmo Genético . . . . .	66
5.1.6	Experência anterior da empresa na resolução do problema . . . . .	71
5.2	Soluções do problema . . . . .	73
5.2.1	Aplicação do modelo que contempla taxa de crescimento da vegetação . . . . .	77
5.3	Síntese . . . . .	80
<b>6</b>	<b>Conclusão</b>	<b>83</b>
6.1	Síntese e Conclusões . . . . .	83
6.2	Perspetivas de trabalho futuro . . . . .	85
	<b>Referências</b>	<b>87</b>

# Lista de Figuras

2.1	Cadeia de Valor do Sistema Elétrico Português . . . . .	5
2.2	Cadeia de Valor do Sistema Elétrico Português . . . . .	7
2.3	Evolução do TIEPI na última década [1] . . . . .	9
2.4	Principais causas raiz da ocorrência de falhas em 2011. Fonte: EDP . . . . .	11
2.5	Principais modos de falha em 2011. Fonte: EDP . . . . .	11
2.6	Ramo e condutor carbonizados, resultante do contacto entre eles, [2]. . . . .	12
2.7	Ramo e condutor carbonizados, resultante do contacto entre eles [2]. . . . .	12
2.8	Técnicas de manutenção adotadas pela EDP Distribuição . . . . .	14
2.9	Termograma, Fonte: EDP Distribuição . . . . .	16
2.10	LiDAR [3] . . . . .	17
2.11	UAV . . . . .	19
2.12	<i>Climbing Robots</i> , da marca <i>Expliner</i> . [4] . . . . .	20
2.13	Ciclo de Vida de um Ativo [1] . . . . .	21
2.14	Matriz de Risco [5] . . . . .	23
3.1	Processo de Inspeção e Manutenção da RD . . . . .	28
3.2	Helicóptero utilizado nas ações de inspeção aéreas. . . . .	30
3.3	Defeitos detetados visualmente. Isolador partido e falha no apoio de um cabo de guarda. . . . .	30
3.4	Inspetor visual e piloto durante uma inspeção. . . . .	31
3.5	Inspetor de Infravermelhos. . . . .	32
3.6	Interface gráfica utilizada pelo Inspetor de Infravermelhos. . . . .	32
3.7	Funcionamento do sistema LiDAR no reconhecimento de obstáculos e linhas . . . . .	34
3.8	Diferentes vistas do mesmo ponto do circuito geradas pelo LiDAR: vista de frente (esquerda), vista de perfil (centro) e vista de cima (direita). . . . .	34
3.9	Fotograma referente às vistas apresentadas na Figura 3.8 . . . . .	35
3.10	Documento Excel que resulta da análise dos varrimentos realizada pelos colaboradores da Labelec. . . . .	36
3.11	Forma como é se adquire a informação à identificação da forma da copa da árvore [6]. . . . .	36
3.12	Identificação de espécies de árvores por LiDAR [6]. . . . .	37
3.13	Anomalias severas (vermelho) e outras anomalias representadas ao longo da linha. . . . .	37
3.14	Modelo que é usado pela empresa para manutenção da vegetação nas proximidades das linhas. . . . .	38
3.15	Anomalias severas (vermelho) e outras anomalias representadas ao longo da linha. . . . .	38
3.16	Sobreiro (esquerda) e operador de terreno com serrote extensível (direita). . . . .	39
3.17	Trabalhos em altura realizados muito próximos da linha. . . . .	40
3.18	Ferramenta de corte isolada eletricamente e extensível. . . . .	40

3.19 Triturador manual de resíduos vegetais. . . . .	41
4.1 Ilustração de conceitos genéticos. . . . .	44
4.2 Crossover Uniforme . . . . .	46
4.3 Torneio Estocástico . . . . .	47
4.4 Evolução da qualidade dos indivíduos da população. O tom mais escuro representa indivíduos mais adaptados. . . . .	48
4.5 Ano em que devem ser realizadas as ações de manutenção de acordo com o grau de gravidade de cada ocorrência. . . . .	50
4.6 Diferença entre ações de manutenção em modo de decote e ações de manutenção em modo de faixa. . . . .	51
4.7 Filtragem de dados . . . . .	55
4.8 Exemplo de descodificação de um indivíduo. . . . .	56
4.9 Fluxograma que representa o cálculo do custo associado a cada indivíduo. . . . .	58
4.10 Fluxograma ilustrativo do processo. . . . .	59
4.11 Evolução de da distância da árvore à linha ao longo dos anos para os quais é feita a planificação, depois de ser feita uma inspeção no ano $n$ . . . . .	60
4.12 Fluxograma representativo da reatribuição de uma classe de gravidade às ocorrências. . . . .	61
5.1 Botões disponíveis para o utilizador, no ficheiro. . . . .	64
5.2 Melhor indivíduo de cada geração. . . . .	66
5.3 Melhor indivíduo ao longo de todo o processo evolutivo. . . . .	67
5.4 Melhor indivíduo ao longo de todo o processo evolutivo. . . . .	68
5.5 Diminuição percentual do custo do melhor indivíduo, em cada iteração. . . . .	69
5.6 Melhor indivíduo de cada geração, para várias taxas de seleção. . . . .	70
5.7 Melhor indivíduo processo evolutivo, para várias taxas de seleção. . . . .	70
5.8 Resultados das várias simulações para diferentes taxas de mutação. . . . .	71
5.9 Modelo atualmente em uso pela EDP Distribuição. . . . .	72
5.10 Percentagem de cada classe de gravidade da amostra das 200 ocorrências em análise. . . . .	74
5.11 Percentagem anual relativa ao ano em que cada ação corretiva fica agendada. . . . .	74
5.12 Percentagem da classe de intervenções planeadas em cada ano. . . . .	74
5.13 Esquema ilustrativo da distância crítica $d$ . . . . .	75
5.14 Comparação entre os resultados finais para a amostra considerada, obtidos com os dois modelos. . . . .	76
5.15 Percentagem de cada classe de gravidade da amostra das 200 ocorrências em análise. . . . .	79
5.16 Percentagem de cada classe de gravidade da amostra das 200 ocorrências em análise. . . . .	79
5.17 Percentagem de cada classe de gravidade da amostra das 200 ocorrências em análise. . . . .	80
5.18 Percentagem de cada classe de gravidade da amostra das 200 ocorrências em análise. . . . .	80

# Lista de Tabelas

2.1	Comprimento das redes da EDP Distribuição . . . . .	7
2.2	Indicadores gerais de qualidade de serviço,[7]. . . . .	9
2.3	Total de ocorrências e TIEPI por cada tipo de causa de falha em linhas aéreas MT. Fonte EDP Distribuição . . . . .	10
2.4	Infraestruturas e situações alvo de atenção durante as inspeções terrestres [8] [9]	14
2.5	Crítérios e factores a considerar no cálculo da probabilidade de falha. . . . .	23
2.6	Tipos de falha segundo diferentes critérios [10] . . . . .	24
2.7	Classificação dos métodos para Otimização da Manutenção [10] . . . . .	26
3.1	Periodicidade das inspeções de acordo com o nível e tensão . . . . .	28
4.1	Distâncias mínimas segundo o RSLEAT. [11] . . . . .	49
4.2	Distâncias limite para cada classe de gravidade, em metros. . . . .	50
4.3	Variáveis de decisão do problema. . . . .	52
4.4	Variáveis de estado do problema. . . . .	52
4.5	Parâmetros do problema. . . . .	52
4.6	Codificação da população inicial. . . . .	55
4.7	Codificação da população inicial. . . . .	56
4.8	Distâncias $d_A$ por nível de tensão. . . . .	60
5.1	Parâmetros do algoritmo, para avaliação da sua robustez. . . . .	66
5.2	Ano em que as ocorrências ilustradas na figura 5.9 ficam com manutenção planeada. . . . .	72
5.3	Percentagem de amostras do tipo "Árvores" em diferentes amostras. . . . .	73
5.4	Parâmetros usados para obtenção da solução final. . . . .	74
5.5	Resumo dos resultados obtidos, com os dois modelos, para a mesma amostra de ocorrências. . . . .	77
5.6	Taxas de crescimento, em metros, para cada as três classes de árvore consideradas.	78
5.7	Distâncias limite para cada classe de gravidade de uma linha de 30kV . . . . .	78



# Abreviaturas e Símbolos

SA	Sociedade Anónima
ERSE	Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos
MAT	Muito Alta Tensão
AT	Alta Tensão
MT	Média Tensão
BT	Baixa tensão
RNT	Rede Nacional de Transporte
RND	Rede Nacional de Distribuição
REN	Rede Elétrica Nacional
EDP	Energias de Portugal
EDPD	Energia de Portugal Distribuição
QS	Qualidade de Serviço
ENF	Energia não fornecida
TIE	Tempo de interrupção equivalente
END	Energia não distribuída
TIEPI	Tempo de interrupção equivalente da potência instalada
SAIFI	Frequência média de interrupções do sistema
SAIDI	Duração média das interrupções do sistema
SARI	Tempo médio de reposição de serviço
RBM	<i>Risk Based Management</i>
TBM	<i>Time Based Management</i>
LiDAR	<i>Light Detection and Ranging</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
UAV	<i>Unmanned Aerial Vehicles</i>
PAS	<i>Publicly Available Specification</i>
SCADA	<i>Supervisory Control and Data Acquisition</i>
RSLEAT	Regulamento de Segurança de Linhas Elétricas de Alta Tensão
DNA	<i>Deoxyribonucleid acid</i>
AG	Algoritmo Genético
VBA	<i>Visual Basic for Applications</i>



# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Considerações gerais

A exploração do sistema elétrico de energia é caracterizada por uma cadeia de valor que inclui as seguintes atividades: Produção, Transporte, Distribuição e Comercialização. A exploração de cada uma destas atividades é feita de forma independente, segundo um sistema não verticalizado. Este trabalho realiza-se no âmbito da Distribuição.

A rede elétrica nacional de distribuição, é gerida em regime de concessão, pela EDP Distribuição, que é responsável pelo cumprimento do Regulamento de Qualidade de Serviço, entre outros requisitos regulatórios, e pelo fornecimento de serviços às entidades envolvidas na comercialização de energia.

As exigências da sociedade atual impõem padrões de elevada qualidade de serviço na alimentação de todo o tipo de cargas: desde os pequenos consumidores domésticos até aos gigantes industriais. De forma a atingir as metas regulatórias e os padrões de qualidade que lhe são impostos, a EDP D direciona os seus esforços para o planeamento, a construção e a manutenção da Rede Nacional de Distribuição.

A sua estratégia tem vindo a refletir-se na realização de planeamentos mais rigorosos que acabam por se refletir numa manutenção mais eficiente dos seus ativos. A manutenção é a atividade responsável por manter e repor a condição técnica dos ativos para que esses operem com segurança, desempenhando corretamente as suas funções.

Os ativos referidos podem ser divididos em três classes distintas, subestações AT/MT, linhas aéreas AT e MT e Rede BT, sendo esta última a que tem a maior extensão – 58 133km aéreas e 16 371 km subterrâneos. O grande foco desta dissertação é a manutenção de linhas AT/MT. Esta atividade é responsável por 31% dos custos totais de manutenção, sendo que esta classe de ativos corresponde a 30% da rede concessionada à EDP D. As ações de manutenção podem consistir, por exemplo, na monitorização de linhas MT, na substituição de linhas e de órgãos de corte ou em inspeções aéreas a linhas AT e MT. As inspeções aéreas são realizadas com recurso a helicópteros e permitem realizar três tipos de inspeção diferentes: inspeção visual, inspeção termográfica e medição de distâncias com recurso à tecnologia LiDAR.

A medição de distâncias com recurso à tecnologia LiDAR tem como objetivo final a manutenção das faixas de serviço das linhas, permitindo identificar obstáculos que se encontrem a uma distância irregular da linha, de acordo com o Regulamento de Segurança de Linhas Elétricas de Alta Tensão. Uma das vantagens da tecnologia LiDAR é que, além de permitir identificar situações irregulares, também permite identificar a natureza dos obstáculos que se encontram nas proximidades das linhas. Esta é uma funcionalidade com grande interesse porque, segundo a EDP Distribuição, 48% das falhas que ocorrem na rede têm uma causa relacionada com a vegetação.

A vegetação não é um obstáculo estático, contrariamente a que acontece para o caso de uma antena ou de um edifício. A distância a que hoje uma árvore se encontra de uma linha, certamente não será a mesma a que se encontrará daqui a dois anos. Por isso, a forma como se planeiam as ações de manutenção relacionadas é diferente da que se realiza para os demais obstáculos. Esta é feita para um prazo de três anos e pode ser contratada de duas formas diferentes, com custos igualmente diferentes, em faixa ou em decote. O planeamento de ações de manutenção relacionadas com a vegetação apresenta-se como o grande foco de atenção desta dissertação.

O problema pode ser encarado como um problema de otimização combinatorio de grande dimensão, o que torna inviável a sua resolução manual. Neste documento apresenta-se uma proposta para a resolução desse problema baseada em Algoritmos Genéticos.

Trata-se de uma dissertação com origem numa parceria entre a Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP) e a empresa Energias de Portugal, Distribuição, S.A. (EDP Distribuição, S.A.), realizada na forma de estágio curricular.

## 1.2 Objetivos do trabalho

Os objetivos que propostos para a realização deste trabalho foram:

- Sistematizar e comparar as diferentes práticas e tecnologias existentes, ou ainda em estudo, para manutenção de linhas aéreas;
- Adquirir conhecimentos sobre gestão de ativos técnicos, em que a gestão manutenção é uma das principais vertentes;
- Acompanhamento de inspeções por helicóptero às linhas da EDP Distribuição, com o objetivo de compreender a forma como as irregularidades e anomalias são detetadas;
- Desenvolvimento de um modelo computacional baseado em Algoritmos Genéticos para o processamento da informação recolhida, na sequência das inspeções, bem como para a otimização do planeamento das intervenções de eliminação das irregularidades detetadas;
- Validação do modelo computacional desenvolvido.

## 1.3 Metodologia

O presente trabalho decorreu, durante 4 meses, nas instalações da EDP Distribuição, da Casa da Música, no Porto. Durante o período que compreendeu a realização do trabalho, a sua autora, teve a oportunidade de acompanhar uma ação de inspeção aérea a uma linha MT, em Coimbra, e de visitar as instalações do Labelec, em Sacavém. Estas duas ações permitiram adquirir um conhecimento mais detalhado sobre a aquisição e o posterior processamento da informação recolhida nas inspeções aéreas.

O trabalho realizado foi orientado pelo Professor Doutor Artur Manuel de Figueiredo Fernandes e Costa, da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, e coorientado pelos Engenheiros Jorge Manuel Gomes, Paulo Sousa e Ricardo Santos, da EDP Distribuição.

Paralelamente ao desenvolvimento do algoritmo realizou-se a pesquisa bibliográfica necessária à fundamentação e clarificação do trabalho desenvolvido, que seguidamente se apresenta.

## 1.4 Estrutura da Dissertação

O texto da dissertação encontra-se organizado em seis capítulos.

No primeiro e presente capítulo, *Introdução*, apresentam-se considerações gerais tais como enquadramento na temática abordada, motivação e, ainda, objetivos para o trabalho realizado.

O segundo capítulo, *Contextualização do Problema*, faz uma caracterização geral da rede, apresenta as principais causas de falha que decorrem da exploração da rede nacional de distribuição de energia elétrica, apresenta as técnicas de inspeção usadas pela empresa e existentes no mercado e, por fim, resume conceitos relevantes sobre a temática gestão da manutenção.

No terceiro capítulo, *Experiência da empresa no processo de inspeção e manutenção de faixas de serviço*, pode ser encontrada a descrição de uma inspeção aérea por helicóptero. No seguimento também se explica a forma como a informação recolhida durante a inspeção é tratada. É feita ainda referência às ações de correção realizadas pelas equipas no terreno.

No quarto capítulo, *Desenvolvimento de algoritmo para o processamento de dados de inspeção*, é feita uma revisão bibliográfica sobre métodos computacionais de otimização, com particular atenção para os Algoritmos Genéticos. Neste capítulo também é descrito o problema a tratar, sendo apresentadas a sua formulação matemática e a forma como este será resolvido com base em Algoritmos Genéticos. É ainda apresentado um novo modelo que inclui a taxa de crescimento das árvores.

No quinto capítulo, *Análise e validação dos modelos desenvolvidos*, é apresentada a ferramenta computacional usada e os estudos de avaliação da robustez do modelo desenvolvido e de parametrização do correspondente algoritmo. Neste capítulo é também feita uma apresentação das experiências anteriores da empresa no tratamento dos dados recolhidos em inspeções. Finalmente, é apresentada uma solução para o problema, proposta para a amostra usada ao longo deste capítulo.

Por fim, no sexto capítulo, *Conclusão*, apresentam-se as conclusões obtidas ao longo de todo o percurso do trabalho e expõem-se algumas perspectivas para possíveis trabalhos futuros com vista a uma melhoria das soluções obtidas para o problema.

## Capítulo 2

# Contextualização do Problema

### 2.1 Caracterização geral da rede (topologia)

#### 2.1.1 Cadeia de Valor do Sistema Elétrico Nacional

A atividade do setor elétrico em Portugal começou no início do século XX com surgimento da Lei dos Aproveitamentos Hidráulicos [12]. Nos seus primórdios, as redes elétricas eram tipicamente de baixa potência e pequenas em extensão, não existindo uma separação clara entre as diferentes atividades do setor elétrico. Até à presente data o setor já sofreu muitas alterações a nível estrutural e organizacional. As mais relevantes foram a nacionalização e integração vertical das atividades do sector com a criação da empresa Eletricidade de Portugal, em 1975, atualmente conhecida como Energias de Portugal SA [13], e o recente processo de liberalização que levou à desverticalização das suas atividades [14].

Atualmente o sector elétrico pode ser caracterizado pela sua cadeia de valor, que é constituída por atividades com funções e área de atuação completamente definidas. Segundo a ERSE, estas atividades são: Produção, Transporte, Distribuição, Comercialização e Consumo [15].



Figura 2.1: Cadeia de Valor do Sistema Elétrico Português

A atividade da Produção de energia elétrica é uma atividade liberalizada no setor português. As principais tecnologias utilizadas em Portugal nesta atividade são as hídricas, as renováveis, a cogeração e as térmicas [16]. A atividade de Transporte funciona em regime de monopólio natural regulado uma vez que seria inviável duplicar linhas de MAT/AT, tanto do ponto de vista económico como ambiental [14]. O estado português concessionaria a rede de transporte de energia à empresa Rede Elétrica Nacional. Esta deve desenvolver, explorar e realizar a manutenção da

RNT, das suas interligações com outras redes. Deve ser garantida a coordenação da RNT com as instalações de produção e distribuição [17].

Seguidamente, na cadeia de valor, encontra-se a atividade Distribuição que possibilita escoamento da energia elétrica que afluí dos centros electroprodutores e das interligações às subestações da RNT para as instalações consumidoras. Esta atividade será detalhadamente caracterizada na secção 2.1.2 deste capítulo.

Depois da já referida liberalização do setor, a atividade de Comercialização de energia passou a estar separada da atividade de Distribuição. São agora duas atividades juridicamente separadas. Os comercializadores têm o direito à liberdade na venda e na compra de eletricidade, para isso, e mediante o pagamento de tarifas, podem aceder às redes de transporte e distribuição de energia [18]. Os consumidores, que se encontram no final da cadeia de valor, podem escolher livremente o comercializador a quem compram a eletricidade [18].

### **2.1.2 Caraterização da Rede de Distribuição**

O trabalho a desenvolver afetará as ações de manutenção diretamente relacionadas com a vegetação que se encontra nas proximidades das linhas aéreas da rede de distribuição, considera-se portanto oportuna uma caraterização detalhada da referida rede.

A Rede Nacional de Distribuição está concessionada à EDP Distribuição, e esta é responsável pela exploração da rede em Alta Tensão (AT), Média Tensão (MT), possuindo também concessões municipais de distribuição de energia elétrica em Baixa Tensão [19]. Além das linhas AT, MT e BT, a RND é também constituída por Postos de Transformação e Subestações. A concessão decorre de acordo com o artigo nº 70 do Decreto-Lei 29/2006, sendo que os seus termos se encontram estabelecidos no Decreto-Lei 172/2006 do mesmo artigo. Das concessões reguladas consideram-se as concessões das redes de BT, concedidas por 278 Municípios para um período de 20 anos, e a concessão da rede AT/MT, concedida pelo Estado português até 2043 [7].

Na RND podem ser encontradas linhas aéreas e linhas subterrâneas. As linhas aéreas são características de áreas mais rurais. As linhas subterrâneas encontram-se exclusivamente em áreas urbanas. A topologia e modo de exploração desta rede variam com o nível de tensão e carga a alimentar, devendo atender aos seguintes objetivos: assegurar a segurança de pessoas e equipamentos, garantir o cumprimento dos requisitos de qualidade definidos para Portugal Continental publicados no Despacho n.º 5255/2006, de 8 de março, que se encontra atualmente em vigor, sendo a sua exploração economicamente rentável [7] [1].

Em relação à Tabela 2.1, em todos os níveis de tensão a maior extensão da rede é do tipo aéreo. Os dados a tratar e analisar no seguimento deste texto têm origem nas inspeções realizadas por helicóptero às linhas aéreas AT e MT (este processo encontra-se descrito em detalhe no Capítulo 3). Desta forma, este trabalho irá afetar aproximadamente 30% das linhas concessionadas pela EDP Distribuição, tal como já foi assinalado no Capítulo 1 deste documento.

Tipo de Rede	Cumprimento (km)	Percentagem (%)
<b>Rede MT</b>		
Linhas Aéreas	58.133	78
Linhas Subterrâneas	16.009	22
Total	74.142	
<b>Rede AT</b>		
Linhas Aéreas	58.133	78
Linhas Subterrâneas	16.009	22
Total	9.114	
<b>Rede BT</b>		
Linhas Aéreas	58.133	78
Linhas Subterrâneas	16.009	22
Total	139.371	

Tabela 2.1: Comprimento das redes da EDP Distribuição

### 2.1.2.1 A faixa de serviço

No Regulamento de Segurança de Linhas Elétricas de Alta Tensão , artigo 28º, encontra-se a regulamentação referente à distância mínima dos condutores às árvores. Para isso, institui-se o conceito de faixa de serviço. Esta faixa deverá ser estabelecida com uma largura mínima de 5m, dividida ao meio pelo eixo da linha, como se pode observar na Figura 2.2 [11].

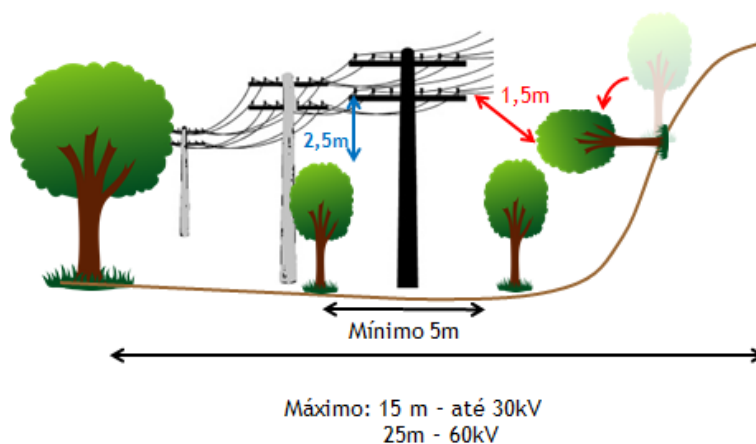


Figura 2.2: Cadeia de Valor do Sistema Elétrico Português

O mesmo regulamento refere que, no caso de queda de uma árvore que se encontra originalmente fora da faixa de serviço, se deve garantir que esta árvore nunca se encontrará a uma distância inferior a 1,5m da linha, tal como se pode observar na Figura 2 [11].

Quando, por inspeção, se verifica a violação de alguma destas distâncias, deverá proceder-se ao corte ou decote das árvores em questão. Caso se verifique que uma árvore, mesmo estando a

uma distância regulamentar, devido ao seu porte, possa vir a comprometer a segurança da linha, deverá proceder-se ao seu corte. Existe legislação específica para o corte de espécies de vegetação protegida. Para o sobreiro, por exemplo, encontra-se estabelecido que o decote apenas pode ser efetuado entre os dias 1 de Novembro e 30 de Março e mediante a aceitação de um pedido de autorização especial emitido pela Direção Geral dos Recursos Florestais [20].

No RSLEAT, podem ainda ser encontrados dados sobre as distâncias mínimas a que se poderão encontrar outras linhas ou construções, por exemplo, mas essas não serão alvo de estudo neste trabalho.

As faixas encontram-se em regime de servidão administrativa, ou seja, apesar de os terrenos que são atravessados pelas linhas da EDP Distribuição não pertencerem à empresa, esta é responsável pela sua limpeza e manutenção.

## 2.2 Exploração: Principais causas de falha

Para uma empresa concessionária da RND, os custos de manutenção e os custos que decorrem da ocorrência de falhas no sistema podem tomar valores superiores aos valores associados ao equipamento do sistema [1]. Torna-se assim necessário identificar as principais causas que induzem falhas no sistema. As causas raiz que estão na origem das falhas registadas na rede são classificadas em 5 formas diferentes: agentes externos, agentes atmosféricos, desconhecidas, internas e terceiros. Estas causas raiz irão refletir-se em modos de falha distintos - rutura de condutores, falhas de isoladores e acessórios, entre outros [21].

### 2.2.1 Indicadores de Qualidade de Serviço da RND

Para que se possam identificar as principais causas de falha, além da contabilização do número de ocorrências por cada tipo de causa raiz de falha, pode contabilizar-se o tempo de interrupção equivalente da potência instalada e o número de ocorrências nas redes em que se originam interrupções. Com estes dados, é possível estabelecer indicadores e padrões anuais de Qualidade de Serviço (QS) que permitem quantificar e qualificar o conjunto das situações de interrupção na rede. Estes indicadores, denominados de indicadores gerais, podem ser referentes à totalidade do sistema, ou a uma zona geográfica específica. Na Tabela 2.2 pode ser encontrada uma lista sumária dos indicadores gerais que se consideram na análise QS da rede em Portugal, segundo o Regulamento de Qualidade de Serviço [7].

O TIEPI tem como unidade minutos ou horas [?] e trata-se de um indicador geral da qualidade de serviço representando o tempo de interrupção equivalente e da potência instalada das redes de distribuição [8]. Como se pode observar na Figura 2.3, durante a última década têm-se registado valores cada vez mais reduzidos para este indicador.

Este e outros indicadores da qualidade de serviço (SAIFI, SAIDI e END) irão determinar os incentivos económicos a atribuir ao operador da rede de distribuição. Estes incentivos tanto se podem refletir em prémios como em penalizações para a empresa concessionária da RND [7].

Indicador Geral	Unidades	Aplicabilidade		
		Transporte	Distribuição MT	Distribuição BT
ENF - Energia não fornecida	MW/h	x		
TIE - Tempo de interrupção equivalente	Minutos	x		
END - Energia não distribuída	MW/h		x	
TIEPI - Tempo de interrupção equivalente da potência instalada	Minutos		x	
SAIFI - Frequência média de interrupções do sistema	Interrupções/ano	x	x	x
SAIDI - Duração média das interrupções do sistema	Minutos	x	x	x
SARI - Tempo médio de reposição de serviço do sistema	Minutos	x	x	x

Tabela 2.2: Indicadores gerais de qualidade de serviço,[7].

## Evolução do TIEPI MT Total com exclusão de tempestades

Minutos

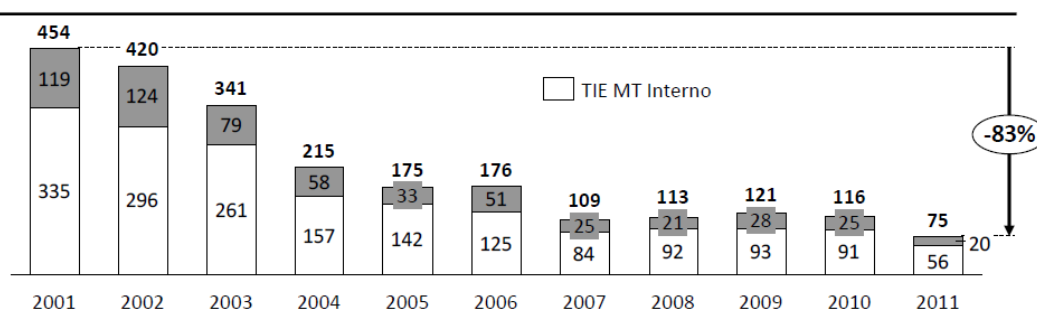


Figura 2.3: Evolução do TIEPI na última década [1]

## 2.2.2 Vegetação: principal causa de falhas na rede

Como se pode verificar pela análise da Tabela 2.3, as árvores, apesar de não serem a causa que está na origem do maior número de ocorrências, constituem a causa que está na origem do maior tempo de interrupção, sendo responsáveis por 21,757 % do TIEPI registado para a rede MT. Não se apresentam os dados relativos á rede BT porque, para efeitos de análise da qualidade de serviço, o TIEPI é um indicador que só é aplicado à rede MT da distribuição [22].

Na Figura 2.4, observa-se de uma forma muito evidente que aproximadamente metade (48%) das causas raiz da ocorrência de falhas está relacionada com a vegetação que ladeia as linhas aéreas da rede de distribuição. Isto vem provar um facto que é aceite e reconhecido pela generalidade das empresas de distribuição: a vegetação é a principal causa de interrupções e diminuição da qualidade do sistema na rede aérea [2]. Algumas destas causas, tais como as relacionadas com o

<b>Causa</b>		<b>Total de Ocorrências (%)</b>	<b>TIEPI (%)</b>
Agentes Externos	Árvores	7.58	21.75
	Corpos Estranhos	4.74	12.20
	<b>TOTAL</b>	<b>12.32</b>	<b>33.95</b>
Agentes Externos	Condições Adversas	1.46	4.98
	Descargas Atmosféricas	13.41	7.11
	Vento/Tempestade/Chuva	51.90	11.48
	Neve / Gelo	0.73	2.43
	Poluição / Corrosão	1.90	5.22
	<b>TOTAL</b>	<b>69.39</b>	<b>31.22</b>
Desconhecidas	-	0	0
Internas	Equipamento	1.75	4.23
	Outros	0.87	1.74
	<b>TOTAL</b>	<b>2.84</b>	<b>5.97</b>
Terceiros	Veículos	0.87	2.43
	Trabalhos	11.37	20.18
	Outros	3.21	6.24
	<b>TOTAL</b>	<b>15.45</b>	<b>28.85</b>
	<b>TOTAL</b>	<b>100</b>	<b>100</b>

Tabela 2.3: Total de ocorrências e TIEPI por cada tipo de causa de falha em linhas aéreas MT. Fonte EDP Distribuição

corde das árvores por terceiros ou causas naturais de origem meteorológica, são de difícil controlo porque não se encontram no âmbito da manutenção preditiva [2].

Algumas destas causas, tais como as relacionadas com o corte das árvores por terceiros ou causas naturais de origem meteorológica, são de difícil controlo porque não se encontram no âmbito da manutenção preditiva [2]. Apesar da grande diversidade de causas que podem estar na origem de falhas na rede aérea, estas resultam em grande número da rutura de condutores, Figura 2.4.

### 2.2.3 Vegetação como causa de falhas na rede

Tal como se pode observar na Figura 2.4, a vegetação é responsável por significativas perdas de qualidade, fiabilidade e segurança no âmbito da distribuição da energia elétrica [22]. O contacto da vegetação com os condutores e o nível de impacto da falha que daí resulta depende de um grande e variado conjunto de fatores: geometria do contacto entre as árvores e os condutores da linha, número de condutores envolvidos no contacto, tipo de árvore envolvida no incidente – diferentes tipos de madeira com diferentes condutividades-, altura e peso da árvore, temperatura e grau de humidade do meio envolvente [2].

Na Figura 2.6 pode observar-se o resultado do contacto prolongado entre um ramo de árvore e um condutor. Na figura são perceptíveis os danos causados pelo contacto, tanto no condutor como

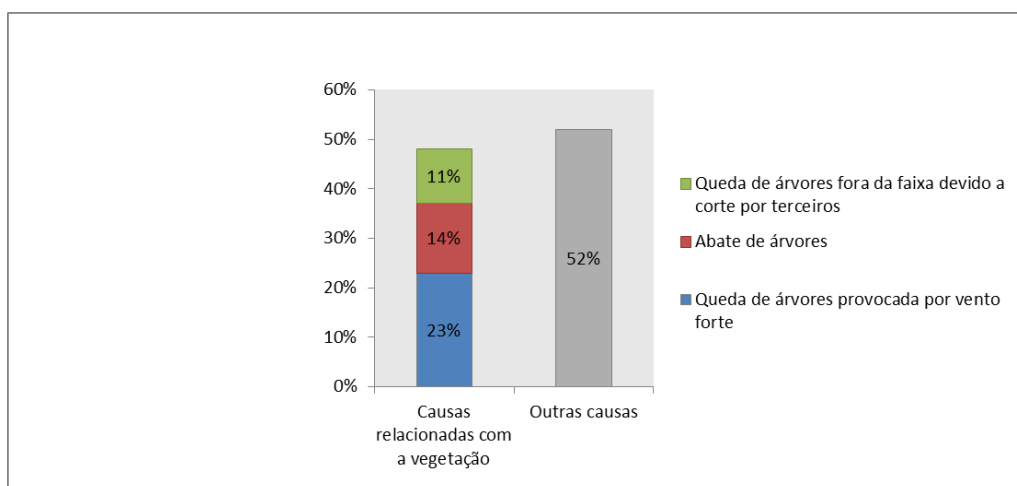


Figura 2.4: Principais causas raiz da ocorrência de falhas em 2011. Fonte: EDP

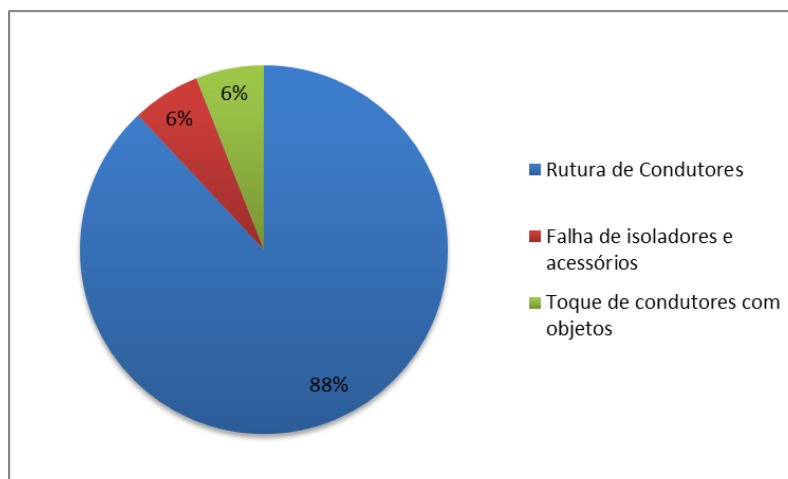


Figura 2.5: Principais modos de falha em 2011. Fonte: EDP

no ramo. Esta fotografia é o resultado do trabalho experimental que pode ser consultado na íntegra em [2].

No momento em que ocorre o contacto, assim como nos momentos seguintes, resulta uma baixa corrente, que progressivamente provoca a carbonização, tanto do condutor, como do ramo da árvore causadora do incidente. A carbonização referida provoca uma diminuição drástica da resistência do condutor e do ramo da árvore.

À medida que o nível de carbonização aumenta, também se verifica um aumento quase exponencial da corrente de falha, até que se verifique a carbonização completa da malha de falha, Figura 2.7. Este aumento de corrente leva a um sobreaquecimento dos condutores, danificando-os. Já a vegetação, pode começar a arder, o que em zonas secas pode levar á ocorrência de incêndios [2].



Figura 2.6: Ramo e condutor carbonizados, resultante do contacto entre eles, [2].

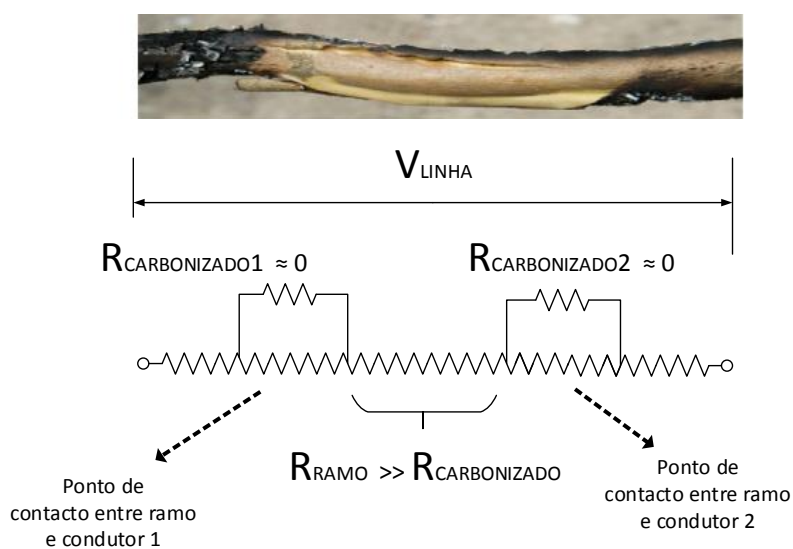


Figura 2.7: Ramo e condutor carbonizados, resultante do contacto entre eles [2].

### 2.3 Inspeção de falhas incluindo a sua caracterização e localização

Atualmente, o bom funcionamento da sociedade encontra-se dependente do uso de eletricidade [6]. A inspeção das linhas da rede de distribuição é uma valiosa fonte de informação sobre o atual estado das mesmas [23]. Esta informação, depois de analisada por profissionais qualificados, permite:

- Identificação de anomalias nos equipamentos;
- Identificação de situações de violação de regulamentos;
- Atualização de informação relativa ao estado das linhas e respetivos traçados [9];

- Determinar o estado do sistema de distribuição quando se verificam situações como inundações ou terremotos, fornecendo imagens informação de ativos danificados com vista a sua urgente reparação [24];

Ao longo dos anos têm vindo a ser desenvolvidas técnicas de inspeção que permitem maximizar o cumprimento dos objetivos enumerados.

Estes objetivos são comuns a todas as formas de inspeção. Cada vez mais, é necessária a modernização e reestruturação das estratégias de manutenção devido ao desenvolvimento de novas e avançadas tecnologias [25]. Assim, serão apresentadas e descritas algumas das formas de inspeção mais inovadoras e recentemente implementadas, nunca esquecendo as já enraizadas e tradicionais, que ainda são usadas quando outras não se aplicam.

As inspeções às linhas aéreas da RND começaram por ser efetuadas a partir do solo. Só mais tarde, em meados dos anos noventa, começaram a ser utilizados helicópteros para a realização desta tarefa [26]. Tanto um método como o outro possuem elevados custos associados [26] e, por isso, com o passar dos anos, têm vindo a ser desenvolvidas técnicas e tecnologias que permitem a otimização das ações de inspeção [6]. Estas técnicas avançadas de inspeção permitem a aquisição de grandes quantidades de informação cada vez mais precisa, surgindo assim uma necessidade de desenvolver algoritmos e ferramentas computacionais de forma a tratar toda a informação adquirida. Desta forma é cada vez mais possível otimizar e planear ações de manutenção [27].

Na Tabela 2.8, pode encontrar-se informação relativa aos critérios de manutenção adotados pela EDP Distribuição. Todas as técnicas apresentadas serão devidamente caracterizadas no seguimento do texto. Na mesma tabela, pode observar-se que as ações de manutenção são divididas em três categorias de critérios diferentes: Risk Based Maintenance (RBM), Time Based Maintenance (TBM) e Manutenção Regulamentar. Todas as técnicas apresentadas serão devidamente caracterizadas no seguimento do texto.

### 2.3.1 Inspeção visual pelo solo

Considera-se dentro desta categoria toda a atividade de ronda e inspeção visual pelo solo a todas as linhas de AT e MT da RND. Este tipo de inspeção é feita a partir do solo e, durante o decorrer da mesma, deve ser anotado o estado das infraestruturas. As infraestruturas a inspecionar são: os apoios, as armações dos apoios, os isoladores e os condutores [9]. Na Tabela 2.4, encontra-se um resumo das situações a inspecionar em cada uma das infraestruturas referidas.

Além do que foi referido na Tabela 2.4, deve ser também assinalado o estado das infraestruturas concebidas para proteger as instalações das atividades das aves.

A medição de distâncias é feita recorrendo a varas isoladas devidamente homologadas para o efeito [9], permitindo executar à distância determinadas manobras, medições ou intervenções sobre um elemento da rede. As varas isoladoras devem ter um nível de isolamento e comprimento adequado à instalação em que irão ser utilizadas [28]. Poderá também recorrer-se, em simultâneo ou não, ao uso de um aparelho de ultrassons [9].

Critérios de Manutenção da EDP Distribuição						
	Rede AT	SE AT/MT	Rede MT	PT T/BT	Rede BT	IP
RBM	Inspeção Termográfica	Inspeção Visual e Termográfica	Inspeção Termográfica	Inspeções Visuais		
	Inspeção Visual		Análise dos Óleos			
	Medição de Distâncias	Análise da Condição	Medição de Distâncias			
TBM					Inspeções Visuais	
Manutenção Regulamentar				Medição da Resistência de Terra		

Figura 2.8: Técnicas de manutenção adotadas pela EDP Distribuição

Infraestrutura	O que se inspeciona
Armações de apoios	<ul style="list-style-type: none"> <li>Estado do tratamento anticorrosivo;</li> <li>Eventuais sinais de apodrecimento;</li> <li>Existência de rachadelas e rachas.</li> </ul>
Isoladores	<ul style="list-style-type: none"> <li>Estado dos isoladores;</li> <li>Estado de fixação de isoladores e travessas;</li> <li>Verificar a verticalidade de cadeias de suspensão.</li> </ul>
Descarregadores de Sobretensões	<ul style="list-style-type: none"> <li>Estado da sua fixação à linha;</li> <li>Estado da sua ferragem e suporte;</li> <li>Estado da sua ligação à terra.</li> </ul>
Condutores	<ul style="list-style-type: none"> <li>Estado das pinças de suspensão e amarração;</li> <li>Existência de condutores com alma de aço desfiados;</li> <li>Existência de uniões mal montadas;</li> <li>Existência de sinais de aquecimento exagerado de condutores;</li> <li>Flechas de condutores irregulares;</li> <li>Distâncias regulamentares dos condutores ao solo;</li> <li>Construção, início de edificações ou instalações móveis a distâncias não regulamentares;</li> <li>Distância da linha à vegetação, mesmo que esta se encontre fora da faixa de proteção.</li> <li>Roubo de cobre.</li> </ul>

Tabela 2.4: Infraestruturas e situações alvo de atenção durante as inspeções terrestres [8] [9]

A medição da resistência de terra nos apoios das linhas aéreas de AT e MT deve ser feita recorrendo a uma pinça de medição de terras, sem que haja necessidade de interromper o circuito [9].

### 2.3.2 Inspeções aéreas tripuladas

As inspeções aéreas tripuladas às linhas aéreas da EDP Distribuição são feitas com recurso a helicópteros e tiveram início em 1995. Estas consistem no sobrevoar das linhas em questão e permitem a realização de diferentes ações de inspeção em simultâneo [29]. Os helicópteros encontram-se equipados com diferentes tipos de sensores/instrumentos de inspeção: câmara termográfica, câmara de filmar standard, câmara ultravioleta e um sensor do tipo LiDAR (*Laser Detection and Ranging*).

Este tipo de inspeções encontra-se naturalmente condicionado por fatores meteorológicos e por restrições operacionais de voo, podendo a qualidade da informação adquirida durante as mesmas não ser afetada. Os sensores encontram-se integrados num sistema robusto e interativo, o que permite uma eficiente adaptação ao afastamento entre as condições esperadas e as condições encontradas. A escolha do momento em que devem ser realizadas as inspeções também possui uma grande relevância na minimização de riscos e na otimização de recursos, evitando-se a realização de inspeções com qualidade inferior [9].

Esta trata-se de uma forma célere de realizar inspeções quando comparada com inspeção visual pelo solo [29].

#### 2.3.2.1 Inspeção Visual

Durante as inspeções aéreas, apesar de todos os sensores que se encontram instalados a bordo, valoriza-se a experiência dos inspetores que realizam as inspeções. Desta forma, estes deverão estar atentos ao mesmo tipo de situações descritas na Tabela 2.4. Algumas destas situações são de identificação mais imediata em inspeções aéreas do que a partir do solo.

#### 2.3.2.2 Termografia

A termografia é a técnica responsável pela medição quantitativa da radiação térmica, ou infravermelha, emitida pelos corpos. Esta é uma técnica que possui os mais variados e distintos campos de aplicação: técnicas avançadas de diagnóstico em medicina, projetos de cariz artístico e equipamento militar, por exemplo.

Quando os equipamentos elétricos se encontram a operar de uma forma anómala, evidenciando o seu mau estado físico ou a ocorrência de uma falha, por exemplo, apresentam uma temperatura de operação diferente da especificada pelo seu fabricante para um funcionamento normal. A termografia permite identificar a existência de equipamentos cujo funcionamento decorre a uma temperatura anormal, designando-se estas ocorrências por pontos quentes [26].

A termografia impõe-se assim como uma importante técnica ao serviço da manutenção preventiva e preditiva das redes AT e MT, permitindo identificar situações de:

- **Alta impedância** anormal em certos troços os componentes da rede. Esta é a causa mais comum que está na origem dos pontos quentes e tem origem nas seguintes situações: ligações soltas, conexões corroídas, rutura de condutores e condutores e equipamentos de corte subdimensionados ;
- **Curto-Circuitos** , com correntes de grande intensidade associadas que provocam graves aquecimentos nos condutores;
- **Defeitos à terra** que são de fácil identificação devido às altas temperaturas que têm associadas. A grande dificuldade que lhes está associada é a identificação da causa raiz dessa falha.

Os helicópteros responsáveis pela realização de inspeções encontram-se equipados com câmaras termográficas, sendo o seu principal objetivo a identificação de pontos quentes nas linhas.

Para cada ponto quente identificado, é criado um termograma (fotografia térmica do equipamento) que tem associadas as coordenadas da ocorrência como se ilustra na Figura 2.9. Nos países mais desenvolvidos o recurso a esta técnica teve início na inspeção de linhas de transmissão por volta dos anos cinquenta [23].

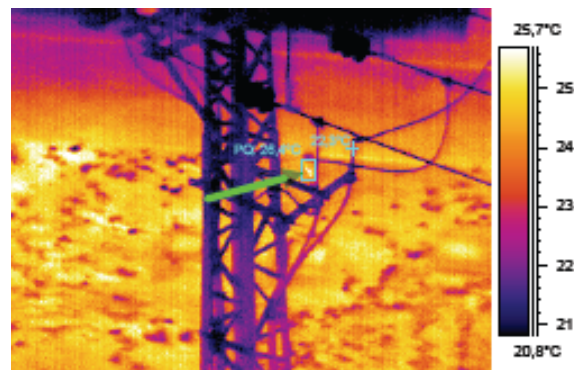


Figura 2.9: Termograma, Fonte: EDP Distribuição

### 2.3.2.3 LiDAR - *Laser Imaging Detection and Ranging*

Até há alguns anos, a precisão na medição de distâncias dos obstáculos, que podem ser edifícios, vegetação ou outras linhas, em relação às linhas em estudo encontrava-se negligenciada. Em inspeções aéreas, este exercício estava dependente do poder de observação e da experiência do técnico responsável que seguia a bordo no helicóptero.

O LiDAR trata-se de uma tecnologia baseada no funcionamento de um sonar que recorre ao uso de laser, ao invés de ondas de rádio. Esta solução permite reconhecer objetos de dimensões mais reduzidas e com maior precisão, uma vez que as ondas laser possuem um menor comprimento de onda e uma maior frequência do que as ondas sonoras – aproximadamente 200 kHz [30] . O recurso à tecnologia laser em sensores teve início nos anos sessenta e setenta, sendo que a sua

primeira utilização para medição ocorreu nos anos 80 com o projeto Atmospheric Oceanographic Lidar (AOL) da NASA [3]. A sua utilização comercial em veículos aéreos generalizou-se em meados da década de noventa. Nos dias de hoje, esta é uma tecnologia com mérito e potencial reconhecidos em diversas áreas: planeamento costeiro, linhas de telecomunicações, avaliação de risco de inundações, controlo florestal, agricultura, sistemas de transporte, planeamento urbano e redes de transmissão e distribuição de energia [3].

Esta tecnologia permite obter imagens digitais 3-D de grande precisão e, para o caso em estudo, a sua aplicação nas inspeções aéreas a linhas da RND é usada para medição de distâncias de objetos, como vegetação, construções ou outras linhas, às linhas que constituem a rede aérea em estudo [25].

Os sistemas de LiDAR são constituídos por 3 unidades principais: sensor laser, Global Positioning System (GPS) e uma unidade de medição inercial. O sensor de laser tem como principal função a medição do intervalo de tempo que existe entre a imissão e a receção do impulso laser, sendo esta medida que está diretamente relacionada com a distância a que se encontra o objeto. A unidade de medição inercial é constituída por acelerómetros e giroscópios sendo usada para definir a posição, a velocidade e a orientação do sensor de laser com vista ao aumento da precisão das distâncias medidas. Por último, a unidade GPS garante a georreferenciação das medições, o que é essencial para ações posteriores de manutenção [25].

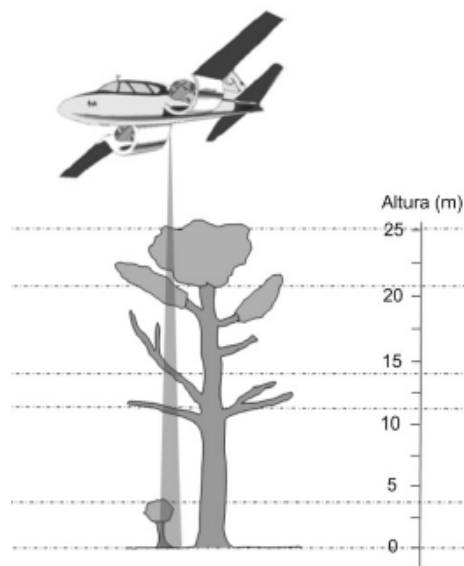


Figura 2.10: LiDAR [3]

A tecnologia LiDAR impõe-se assim como uma das soluções de eleição para a prática da dendrometria [31], ciência dedicada à medição de árvores. Por medida direta, é possível obter os dados relativos à altura da vegetação, ao número de árvores numa dada zona e ao volume e ao diâmetro da copa das árvores [3].

Esta tecnologia, a sua aplicação no espaço florestal e o processamento da informação recolhida serão descritos com maior detalhe no Capítulo 3 deste documento.

### 2.3.3 Inspeções Robotizadas

Neste momento, encontram-se a decorrer muitos projetos de investigação cujo objetivo é automatizar o processo, com todas as suas funcionalidades e potencialidades, descrito na secção 2.3.2, diminuindo ou, idealmente, eliminando o uso de mão-de-obra no processo de inspeção a linhas aéreas [22][31]. Esta automatização do processo possui muitas vantagens associadas, sendo as principais:

- Diminuição dos riscos humanos e de equipamento associados á inspeção [32];
- Inspeções com recurso a robots são mais rápidas [24] [33];
- Permitem a realização de inspeções com maior regularidade visto que possuem custos de operação mais reduzidos [24], [33];
- Não existe o risco de falha humana no momento da inspeção [32].

Existem dois tipos de robots que permitem a realização de inspeções automatizadas a linhas aéreas operando de duas maneiras distintas: UAV, Unmanned Aerial Vehicle, e Climbing Robot.

#### 2.3.3.1 UAV - *Unmanned Aerial Vehicle*

Este tipo de robots é concebido para que possam, da forma mais autónoma possível, percorrer as linhas aéreas para a encontrar e documentar falhas ou violações de regulamentos. São uma evolução do processo de inspeção aérea tripulada, conseguindo melhor precisão na informação obtida, mas nesta tecnologia ainda se encontram alguns dos problemas identificados para as inspeções tripuladas.

Nestes robots o controlo da posição é essencial e para isso é necessário detetar as linhas e obstáculos de forma automática com vista á otimização da trajetória de voo, e também para que assim se evitem acidentes relacionados com o contacto com condutores, apoios, isoladores ou corpos estranhos às linhas aéreas, mesmo com condições de muito vento. O esforço computacional no processamento da informação adquirida que é exigida aos UAVs é muito elevado porque, depois de identificado um obstáculo, será necessário recalcular e reprogramar a trajetória de voo com elevada exatidão e rapidez.

A deteção automática de falhas é difícil porque a distância às linhas e o facto de o robot se encontrar em constante movimento dificultam a aquisição de imagens com a qualidade exigida. O sistema de reconhecimento automático da linha é idêntico ao usado nas inspeções aéreas tripuladas, possui por isso os mesmos problemas associados, mas com os UAVs é possível que o voo de inspeção seja feito mais próximo das linhas [32].

Apesar de todos os problemas apresentados estes são equipamentos que podem voar muito próximos das linhas aéreas, fornecem muita informação de forma pouco dispendiosa economicamente e possuem um comportamento flexível de acordo com a informação que recolhem em tempo real. Este sistema de inspeção é ideal para zonas rurais com pequena densidade populacional, onde a rede é muito dispersa [24]. Por tudo o que foi referido este tipo de veículos está equipado com câmaras estabilizadas equipadas com diferentes tipos de sensores, sistema regulador de navegação e posicionamento, um computador para processamento de informação recolhida em tempo real, um sistema de comunicação para o exterior e um sistema de alimentação [32].



Figura 2.11: UAV

### 2.3.3.2 Climbing Robots

Os *Climbing Robots* realizam as inspeções percorrendo as linhas suspensas nos condutores. O processo de inspeção decorre assim a uma distância muito reduzida das linhas o que faz com que não haja tanta oscilação aquando da aquisição de informação pelos sensores com que se encontra equipado. O campo elétrico magnético nas linhas é muito elevado, facto que, associado à proximidade com que se efetua a inspeção, leva a que se devam ter cuidados redobrados com a proteção dos circuitos eletrónicos dos sensores, que podem ser facilmente perturbáveis [32].

Estes robots possuem uma construção muito complexa visto que o nível de exigência em termos de controlo e de automação é muito elevado para que possam contornar os obstáculos detetados. A deteção dos obstáculos é feita com base na informação recolhida em tempo real e na informação que compõe a base de dados estática e interna do computador do robot. Os sensores adquirem a informação relativa à localização do robot e à sua posição relativamente aos obstáculos enquanto que a base de dados interna contém dados sobre apoios e outros obstáculos característicos da topologia da linha aérea [34].

Este tipo de robots não possuiu uma aceitação tão elevada como a dos UAV. Isto acontece porque os UAV já se encontram devidamente instalados no mercado e as grandes desvantagens

que lhes têm vindo a ser apontadas, com constante evolução tecnológica verificada nos domínios de aquisição e tratamento de imagem, são cada vez mais ultrapassadas com sucesso.



Figura 2.12: *Climbing Robots*, da marca *Expliner*. [4]

## 2.4 Gestão da manutenção

As redes elétricas são cada vez mais complexas [35] e, têm vindo a ser desenvolvidas tecnologias que permitem o ganho de eficiência no processo manutenção das linhas. Este ganho de eficiência criou a necessidade de fazer reestruturações a nível da organização e planeamento do processo de manutenção adotados pelas empresas responsáveis pela gestão das redes elétricas [25] [27].

A gestão da manutenção de redes elétricas é um problema com uma complexidade muito elevada, sendo inclusivamente mais complexa do que a gestão da manutenção dos sistemas produtores de energia elétrica. Esta complexidade deve-se à grande quantidade de diferentes fatores que, de alguma forma, influenciam o planeamento da RND e que abrangem uma grande quantidade de diferentes áreas de estudo, podendo estes ser da aérea de gestão, eletricidade, botânica ou mecânica, entre outros [35].

### 2.4.1 Importância do planeamento da manutenção

A EDP Distribuição orienta a sua atividade pela a norma PAS 55 para fazer a gestão dos seus ativos a qual é uma *Public Available Specification* para otimização da gestão de ativos físicos da British Standards Institution (BSI). A PAS 55 é composta pela definição clara de um conjunto de requisitos, cujo cumprimento assegura uma gestão eficaz de todo o ciclo de vida global do ativo [36]. Consideram-se ativos físicos da EDPD as linhas, os apoios, os isoladores, os transformadores, entre outros.

Como se pode ver no esquema da Figura 2.13, a manutenção e a operação de um ativo é responsável por cerca de 80% do seu custo total durante o seu período de vida útil [1]. Conclui-se assim que, além de uma grande importância na qualidade de serviço da RND, a manutenção possui também um grande impacto orçamental para a EDP Distribuição e muitas outras empresas dedicadas à distribuição de energia noutros países [35], que também por este motivo têm vindo a investir cada vez mais na sua otimização.

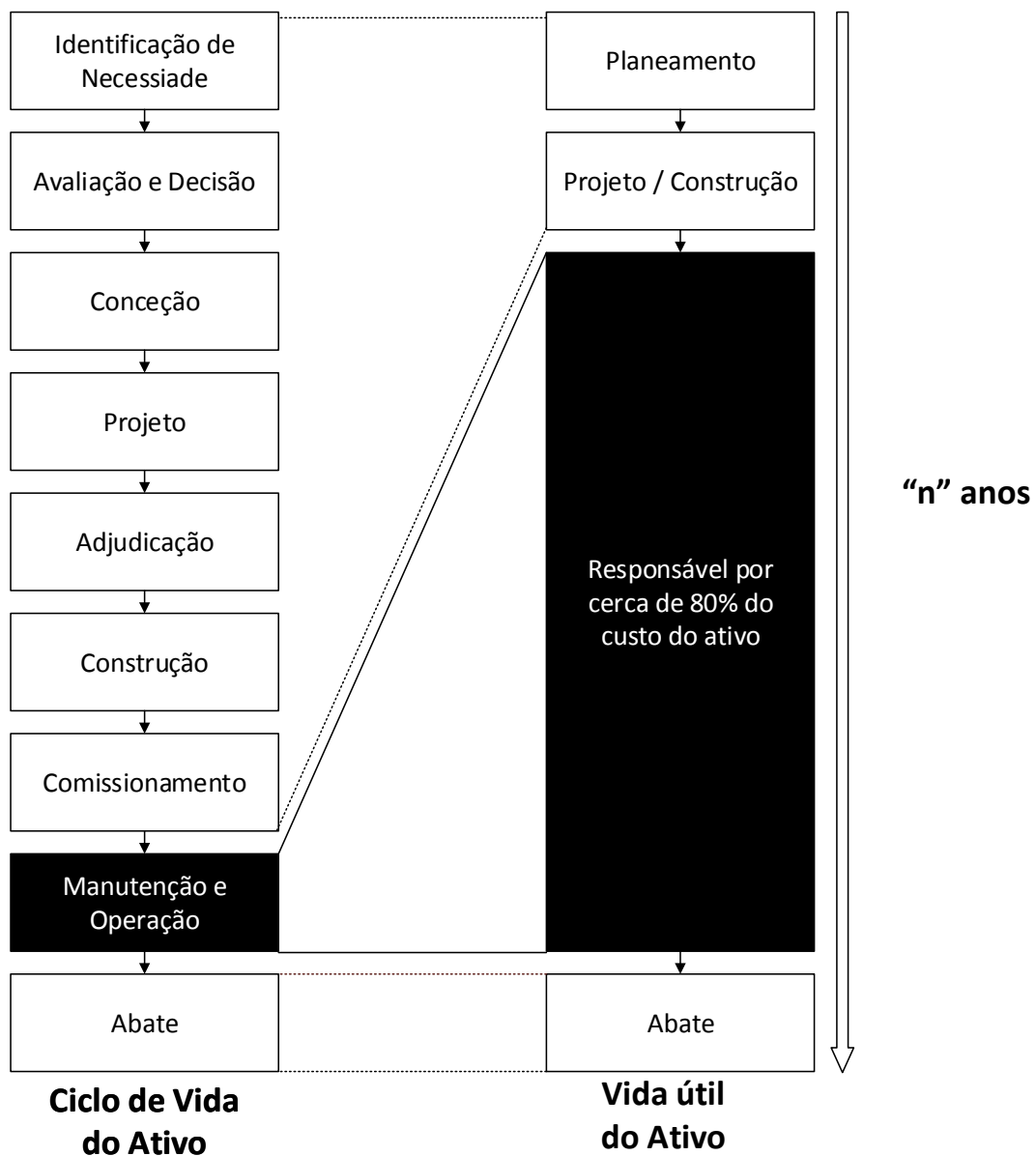


Figura 2.13: Ciclo de Vida de um Ativo [1]

Impedir a ocorrência de falhas trata-se de uma ideia utópica visto que é muito difícil prever

exatamente o momento da sua ocorrência e respetiva gravidade associada. No entanto, é possível aprender-se com a experiência analisando o contexto da ocorrência de falhas e a severidade dos seus efeitos na rede. Só assim se pode evoluir no sentido da diminuição da probabilidade de ocorrência de um dado tipo de falha e no controlo dos danos causados[37]. O conhecimento da probabilidade de ocorrência de uma falha e das suas consequências é uma poderosa ferramenta para a gestão da rede.

A PAS 55 tem como principal foco é a análise e gestão de risco [1], como se pôde observar na Figura 2.8, a EDP Distribuição aplica o critério de RBM a grande parte das ações de manutenção realizadas.

## 2.4.2 Diferentes critérios e estratégias adotadas na gestão da manutenção

A fiabilidade pode ser definida como sendo a capacidade em realizar uma dada função sob dadas condições num dado instante ou intervalo de tempo [10]. Atualmente, as técnicas existentes para avaliação da fiabilidade da rede podem ser divididas em duas grandes categorias: técnicas determinísticas e técnicas probabilísticas [5].

As técnicas determinísticas baseiam-se no estudo do funcionamento da rede aquando da saída de serviço de um dado ativo. No entanto, estas técnicas não conseguem fornecer a informação necessária para a total compreensão do efeito e das consequências impulsionadas pela falha que esteve na origem da saída de serviço do referido ativo e isso leva a que, cada vez mais, muitos países tenham começado a aplicar o método de estudo de risco probabilístico [5].

O risco, no estudo dos sistemas elétricos, pode ser visto como a probabilidade de um acontecimento diminuir a fiabilidade do sistema perturbando o seu bom funcionamento, tal como sobrecargas nas linhas, instabilidade nos níveis de tensão e ocorrência de regimes transitórios.

Caracteriza-se o risco segundo dois parâmetros: nível de severidade e probabilidade associada à ocorrência da falha. A forma como é classificado cada tipo de falha ao nível de severidade e de probabilidade de ocorrência varia de acordo com a empresa de distribuição e de país para país, mas os princípios base associados à determinação do risco da ocorrência de uma dada falha são os comuns. Na Figura 2.14, pode observar-se um esquema base para determinação do nível de risco.

O estudo da probabilidade de ocorrência está dependente de uma grande quantidade de fatores que podem ser agrupados em diferentes categorias, Tabela 2.5. Cada um deles será considerado com um peso diferente na fórmula de cálculo da probabilidade de falha, sendo este valor definido de acordo com a experiência da empresa. Também se encontra definido o conjunto de fatores que permitem determinar a potencial severidade da ocorrência de uma falha, sendo: segurança das pessoas (falha em ambiente urbano, periurbano, rural, campo aberto, escolar ou desportivo), ambiente, clientes não alimentados, tipo de clientes servidos e, finalmente, impacto económico da ocorrência da falha.

Este estudo está ainda dependente da capacidade de previsão e deteção de falhas, e irá determinar a estratégia de manutenção a aplicar para cada caso específico.

Cada falha é classificada segundo dois critérios: previsibilidade e detetabilidade, Tabela 2.6.

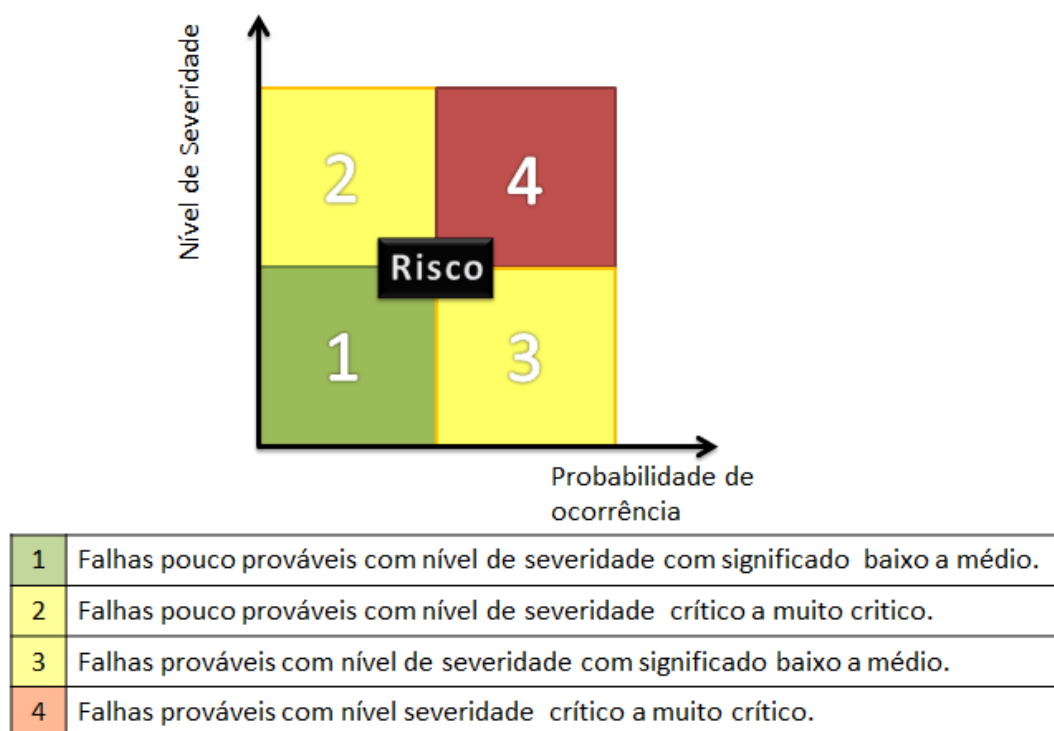


Figura 2.14: Matriz de Risco [5]

<b>Cálculo da Probabilidade de Falha</b>	
<b>Características Ambientais</b>	<b>Condição Técnica</b>
Arborização	Fundações - Postes
Vegetação	Cadeia de Isoladores
Tipo de poluição	Número de uniões
Avifauna	Número de ligadores de bico-móvel
Índice Ceráunico	Número de ligadores paralelos
<b>Características Técnicas</b>	<b>Fatores Externos Impactantes</b>
Tipo de condutor	Incêndio
Tipo de isolamento	Furto
Tipo de poste	Inundação
Cabo de guarda	Tipo de solo
Órgãos de corte	Eventos atmosféricos extremos
Comprimento da linha	Risco de sismo

Tabela 2.5: Critérios e factores a considerar no cálculo da probabilidade de falha.

A manutenção atua de forma diferente face a cada um dos quatro tipos de falha considerados, que resultam das combinações entre os dois tipos de cada critério. Por exemplo, caso se trate de uma falha aleatória sem tempo de incubação para a manutenção, é muito difícil prevê-la ou detetá-la com antecedência. Nestes casos, recorre-se a ações corretivas ou à reconfiguração do sistema,

<b>Tipos de falha segundo diferentes critérios</b>	
<b>Previsibilidade</b>	<b>Detetabilidade</b>
Recorrentes	Falha com tempo de incubação
Aleatórios	Falhas sem tempo de incubação

Tabela 2.6: Tipos de falha segundo diferentes critérios [10]

podendo mesmo vir a ser necessário o recurso a estas duas opções [10].

No passado, os especialistas em manutenção de redes elétricas começaram a centrar os seus esforços na determinação do intervalo ótimo entre ações de reparação e de manutenção. Os estudos nesta área evoluíram e levaram ao desenvolvimento de estratégias de manutenção. As estratégias definidas podem ser divididas em duas categorias diferentes: manutenção corretiva e manutenção preventiva.

#### 2.4.2.1 Manutenção Corretiva

Este tipo de manutenção realiza-se no momento da deteção dos efeitos que decorrem da ocorrência de uma falha e, na sua sequência, a rede deverá retomar o seu funcionamento normal. Esta é uma prática aplicada em último recurso [25].

Embora este tipo de manutenção aparente não ter necessidade de planeamento prévio, na prática é planeada com base no estudo de cenários possíveis que podem decorrer da ocorrência dos mais variados tipos de falhas em diferentes contextos [10].

Este tipo de correção é crucial em situações que verificam falhas aleatórias sem tempo de incubação, Tabela 2.6.

#### 2.4.2.2 Manutenção Preventiva

Inicialmente, as práticas de manutenção eram predominantemente corretivas mas o crescente desenvolvimento das tecnologias que permitem avaliar e inspecionar a rede justificou que a prática da manutenção passasse a ser maioritariamente preditiva [25].

É impossível eliminar completamente a ocorrência de falhas recorrendo à manutenção preventiva mas, com a sua aplicação, o número de falhas verificadas tende a diminuir [25] dado que se reduz a sua probabilidade atuando na rede antes que degradação significativa num componente aconteça, por exemplo [10].

Esta pode ser classificada segundo a frequência e os critérios que levam à realização de ações de manutenção e inspeção podendo assim falar-se em manutenção preventiva periódica, ou sistemática, e manutenção preventiva baseada no estado [1] [10]. Um dos objetivos da EDP Distribuição é a diminuição progressiva do recurso à manutenção corretiva, impondo-se cada vez mais a manutenção preventiva com carácter preditivo. Em alguma literatura, a manutenção preditiva é considerada-se uma estratégia de manutenção a par das duas referidas anteriormente.

A manutenção preditiva baseia-se na realização de ensaios, medições e ações de inspeção sistemáticas que permitem conhecer o estado operacional e técnico de todos os elementos da rede [25].

### 2.4.3 Caracterização da otimização da manutenção

As estratégias de manutenção implementadas nas empresas de distribuição de energia elétrica possuem um conjunto de problemas já devidamente identificados, sendo que a maior parte deles se encontra relacionado com a definição da frequência ótima entre a realização de ações de inspeção [37]. Muitas vezes, realizam-se ações de manutenção desnecessárias, que apenas têm em consideração a condição técnica dos ativos, negligenciando-se assim a forte componente econômica cuja consideração é essencial para que se faça uma boa gestão da rede.

É necessário definir objetivos para cada tipo de ação de manutenção. Só conhecendo os custos associados a uma dada ação preventiva e o aumento em níveis de fiabilidade e qualidade de serviço que desta resultam será possível avaliar a pertinência e viabilidade da sua realização.

No caso do corte e manutenção de vegetação nas imediações das faixas de serviço, é necessário um cuidado especial na gestão e calendarização das ações de manutenção. Nem toda a vegetação possui igual taxa de crescimento, pelo que caso seja aplicado o mesmo critério para o corte e decote de todo o tipo de árvores poderá criar-se uma situação em que umas árvores são cortadas mais vezes do que na realidade é necessário, enquanto que outras, com maiores taxas de crescimento, são negligenciadas, podendo deteriorar a qualidade de serviço [2]. Para uma boa gestão da vegetação que ladeia as linhas aéreas, é essencial saber precisamente o momento em que uma árvore toca nos ativos que constituem a linha. Na sequência do que foi dito, apresenta-se na Tabela 2.7, um sistema com vista à organização dos critérios a ter em conta, com vista à otimização da manutenção da RND.

## 2.5 Síntese

Neste capítulo, *Contextualização do Problema*, fez-se uma caracterização geral da rede, que pode ser aérea ou subterrânea, sendo que a sua parte aérea é a mais extensa.

A manutenção dos ativos que constituem a linha possui uma grande importância na obtenção de melhores índices de qualidade de serviço.

As principais causas de falha na rede têm origem na vegetação. Com vista à diminuição de falhas com esta origem devem adotar-se práticas de manutenção de faixas de serviço mais eficientes. Com este objetivo, durante as inspeções aéreas a linhas, já se encontra disponível uma tecnologia que permite a medição de distâncias de obstáculos à linha, o LiDAR. Analisando a informação recolhida pelo LiDAR é possível praticar-se uma manutenção preventiva. Devido a esta, e a outras técnicas inovadoras de inspeção e monitorização da rede, é possível que se pratique cada vez menos uma manutenção corretiva, o que reflete os esforços da empresa na prática de ações de manutenção cada vez mais otimizadas.

### Classificação dos métodos para otimização da manutenção

<b>Critério de classificação</b>	<b>Descrição</b>
<b>Objetivo da otimização da manutenção</b>	
Fiabilidade	Maximização da fiabilidade respeitando restrições como mão-de-obra ou custo, por exemplo.
Custo mínimo	Minimização do custo respeitando restrições como fiabilidade ou regulamentação de manutenção, por exemplo.
Custo mínimo total	Minimização do custo total, ou seja, a soma do custo de manutenção e do custo que advém de interrupções.
<b>Horizonte Temporal</b>	
Intervalo entre inspeções	Otimização do tempo médio entre inspeções ou ações de manutenção. (Aproximadamente 1 Ano)
Ciclo de vida útil do equipamento	Otimização do tempo entre inspeções ou ações de manutenção relacionadas com o ciclo de vida do equipamento.
Adaptativo	Otimização do tempo entre ações de manutenção baseado em informação adquirida durante as inspeções.
<b>Fator de decisão</b>	
Intervalo entre ações	Intervalo entre ações de manutenção, substituição regulamentar de equipamentos e intervalo entre inspeções, baseado em dados estatísticos.
Tempo previsto para falha	Tempo entre a detecção da possibilidade de falha e a concretização da mesma.
Possibilidade Oportuna	Realizar ações de inspeção e manutenção em equipamento que tem custos de saída de serviço elevados.
Mão-de-obra	Otimização do uso de recursos humanos.
Redundância	Otimização da localização e colocação de equipamentos redundantes.
Equipamento suplente	Identificação da localização e número de equipamento suplente que deverá estar disponível.
<b>Número de Componentes</b>	
Componente único	Otimização da manutenção de um tipo componente específico.
Componentes múltiplos	Otimização da manutenção entre equipamentos que funcionam em conjunto.

Tabela 2.7: Classificação dos métodos para Otimização da Manutenção [10]

## Capítulo 3

# Experiência da empresa em Processo de Inspeção e Manutenção de faixa de serviço

Com o Capítulo 3 pretende-se fazer uma descrição detalhada dos processos de inspeção aérea tripulada às linhas aéreas AT e MT, do posterior tratamento da informação recolhida e do planeamento das ações de manutenção praticados pela EDP Distribuição.

Nestas inspeções recorre-se a diferentes tecnologias para aquisição de diferentes tipos de informação; algumas destas tecnologias foram já abordadas no capítulo anterior. Aqui será dado um maior destaque à aquisição e ao tratamento da informação que irá ser usada com vista à manutenção da faixa de serviço, ou seja, na medição de distâncias. Estas inspeções e a análise dos dados que delas resultam são realizadas em regime de *outsourcing* por uma outra empresa do grupo EDP, a Labeltec - Estudos, Desenvolvimentos e Atividades Laboratoriais, SA.

As principais etapas do processo a descrever podem ser observadas na Figura 3.1.

### 3.1 Inspeção das linhas por helicóptero e medição de distâncias

#### 3.1.1 Planeamento das ações de inspeção

As inspeções realizadas às linhas aéreas nem sempre foram feitas com recurso a meios aéreos. Antes de essa tecnologia se encontrar à disposição da empresa, as inspeções eram feitas na forma de percorridos pelo solo. Este tipo de inspeção conta com a participação de dois a quatro colaboradores da empresa, que inspecionam as linhas da forma descrita no ponto 2.3.1 deste documento. A periodicidade com que estas se realizavam dependia de uma série de fatores relacionados, por exemplo, com o tipo de carga alimentada pela linha.

Atualmente o planeamento das ações de inspeção às linhas aéreas não possui uma frequência fixa regulamentar. No entanto, a empresa estabeleceu frequências fixas para a realização das ações de inspeção, Tabela 3.1.

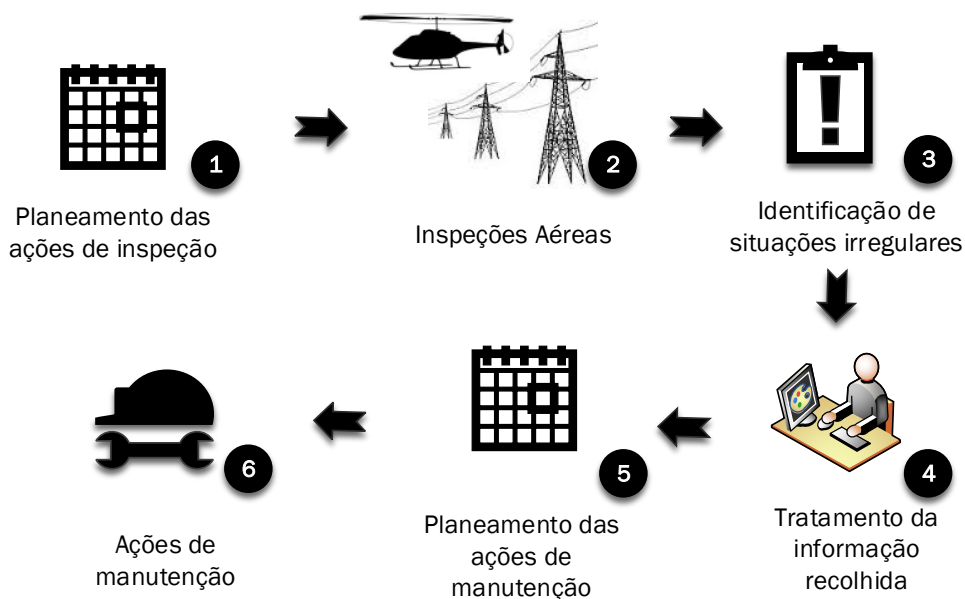


Figura 3.1: Processo de Inspeção e Manutenção da RD

Nível de tensão	Periodicidade
AT	2 Anos
MT	5 Anos

Tabela 3.1: Periodicidade das inspeções de acordo com o nível e tensão

Estas inspeções possuem uma frequência de realização definida, no entanto a deteção de uma quantidade anormalmente elevada de falhas numa dada linha, ou até mesmo a verificação de condições atmosféricas adversas numa dada região, podem levar a um cenário em que será necessária a realização de inspeções fora dos anos para as quais estavam planeadas. Dependendo da extensão de linha a inspecionar, as inspeções poderão ser aéreas ou percorridos pelo solo.

As falhas são detetadas por um conjunto de unidades remotas de monitorização da rede em tempo real. Esta informação é adquirida pelo sistema SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition). Assim, depois de tratados os dados, a EDP Distribuição possui informação sobre o estado atual dada rede no que diz respeito a:

- Disponibilidade de serviço;
- Resposta a ações de comando remoto - abertura e fecho;
- Operabilidade, ou seja, relação entre número de unidades instaladas e número de unidades operacionais.

Todas as informações geradas pelos dispositivos de controlo remoto e adquiridos pelo sistema SCADA da EDP Distribuição, são analisadas por um sistema de *Business Intelligence* que permite tomar decisões em tempo real sobre a operação da rede.

### 3.1.2 Inspeções aéreas tripuladas

As inspeções aéreas às linhas, como já foi referido no Capítulo 2 deste documento, possuem duas vertentes: uma vertente mais tecnológica, que recorre ao uso de sensores, e outra vertente humana que conta com a experiência e conhecimento dos operadores de voo que se encontram responsáveis pela realização da inspeção. São estas duas vertentes que, combinadas, permitem que as inspeções decorram de forma eficiente obtendo informação com qualidade.

Para que se possa realizar uma inspeção aérea tripulada é necessário que se encontrem reunidas as condições meteorológicas de modo que a qualidade da informação recolhida e a segurança da tripulação não sejam afetadas. É recomendável que não se verifique a ocorrência de aguaceiros, vento forte e nevoeiro. Estes pontos serão explicitados no seguimento do presente capítulo.

O helicóptero usado para a realização da inspeção encontra-se equipado com um conjunto vasto de equipamentos que lhe permitem recolher informação relativa às anomalias e irregularidades encontradas nas linhas a inspecionar e à sua localização geográfica. Toda esta informação é guardada num dispositivo eletrónico de armazenamento, que se encontra a bordo, podendo ser acedida em tempo real ou analisada mais tarde.

A localização exata da posição do helicóptero é dada por um recetor de GPS, Global Positioning System, e é recorrendo às coordenadas fornecidas por este equipamento que se consegue georreferenciar todas as ocorrências encontradas.

As câmaras que se encontram a bordo são: câmara de infravermelhos e uma câmara de LiDAR que possui acoplada uma câmara de vídeo e uma máquina fotográfica com uma funcionalidade de zoom elevada. Todos os equipamentos descritos anteriormente encontram-se dentro de *Gimbals*, que se encontram localizadas na parte exterior do helicóptero e que permitem que a direção de captura das câmaras/sensores possa ser, em simultâneo, controlada por um dos operadores de voo.

O voo é feito a uma velocidade que pode variar entre os 27 e os 55 km/h e o helicóptero deverá manter-se a uma distância dos condutores que nunca deverá ser inferior a 10m. No entanto este valor não é universal para todas as linhas a inspecionar, visto que depende de um grande conjunto de fatores, tais como: tensão e geometria da linha, práticas legais e familiaridade e experiência do piloto e dos operadores a bordo. Assim, idealmente, esta distância deverá encontrar-se entre os 15 e os 30 m, de forma a garantir um bom compromisso entre segurança e fiabilidade da inspeção.

Devido ao tipo de helicóptero utilizado nestas inspeções, Figura 3.2, cada voo não deverá durar mais do que duas horas. O conhecimento da topologia da linha a inspecionar e da restrição temporal anteriormente apresentada e a experiência dos operadores a bordo permitem uma definição tão otimizada quanto possível da trajetória de voo, sem que para isso se tenha que recorrer a ferramentas computacionais.

A tripulação de um helicóptero responsável pela realização deste tipo de inspeções a linhas de AT e MT é composta por dois operadores e um piloto devidamente licenciado para o efeito. O helicóptero possui ainda capacidade para mais uma pessoa a bordo e foi este facto que permitiu que fosse realizado um acompanhamento de uma destas ações de inspeções aquando da realização deste documento pela autora.



Figura 3.2: Helicóptero utilizado nas ações de inspeção aéreas.



Figura 3.3: Defeitos detetados visualmente. Isolador partido e falha no apoio de um cabo de guarda.

Cada um dos membros da tripulação possui um conjunto de funções bem definidas.

As funções e obrigações do inspetor visual são:

- Durante as inspeções posiciona-se ao lado do piloto do helicóptero, Figura 3.4;
- Possui, impresso, o esquema unifilar da linha que se encontra a ser inspecionada;
- Deve estar atento a qualquer obstáculo que possa surgir próximo da trajetória de voo, comprometendo a segurança do mesmo;
- Deve ainda tomar notas de defeitos visualmente detetáveis na linha, podendo recorrer ao uso de binóculos estabilizadores sempre que a situação o justifique, 3.3.

Por questões de segurança, a única função do piloto é garantir que o voo decorra da forma mais estável e segura possível, devendo igualmente estar atento ao surgimento de obstáculos na trajetória de voo.

As funções e obrigações do inspetor de infravermelhos são:



Figura 3.4: Inspetor visual e piloto durante uma inspeção.

- Durante as inspeções instala-se no banco de trás do helicóptero, 3.5;
- Possui um monitor tátil que lhe permite monitorizar em tempo real, 3.6:
  - O filme composto pelos termogramas gerados pela camara de infravermelhos. Assim, é possível que este inspetor detete em tempo real a existência de pontos quentes na linha;
  - O filme da câmara de vídeo;
  - A sequência de varrimentos gerados pela pelo LiDAR;
- Sempre que deteta um ponto quente, o inspetor deverá gerar um termograma da falha, permitindo que este seja posteriormente analisado.

Um dos obstáculos mais comuns que se encontram durante as inspeções são os cruzamentos entre a linha a inspecionar e outras linhas da rede de tensão superior, cujos apoios possuem uma altura igualmente superior. Este é uma situação de gravidade acrescida aquando da inspeção de linhas MT, visto que nestas são comuns os cruzamentos entre estas e linhas AT ou até MAT. Esta é uma das maiores dificuldades sentidas durante as inspeções porque a concentração da tripulação encontra-se principalmente dirigida para o solo, visto que é aí que se encontra a linha alvo, o que pode levar a acidentes graves, ou até fatais, de embate com as linhas superiores. Este é um dos motivos que torna desaconselhável a realização de inspeções quando se verifica a existência de nevoeiro.

Tal como já foi referido, a inspeção aérea permite o recurso a diferentes modos de inspeção, por isso, foi implementada uma interface gráfica que facilita a monitorização dos três câmaras/sensores em simultâneo. Esta é composta por diferentes janelas: uma por cada modo de inspeção. Sempre que um dos sensores deteta uma anomalia na interface surge um alerta na aba do modo respetivo, Figura 3.6.



Figura 3.5: Inspetor de Infravermelhos.



Figura 3.6: Interface gráfica utilizada pelo Inspetor de Infravermelhos.

A medição de distâncias feita recorrendo á tecnologia LiDAR tem associado um processo de registo e deteção de falhas completamente automatizado. O processamento da informação recolhida faz-se em tempo real, e as situações em que se regista uma distância irregular, em relação à linha, são automaticamente registadas juntamente com o respetivo fotograma para consulta futura.

Há árvores que, mesmo se encontrando a uma distância regulamentar, devido ao seu grande porte podem comprometer o bom funcionamento da linha, em situações de más condições atmosféricas, por exemplo. Estas devem ser igualmente registadas no sistema.

### 3.1.2.1 Inspeções Aéreas Visuais

É possível que as inspeções aéreas possam ser unicamente visuais, ou seja, sem que tenham que recorrer ao uso dos sensores referidos anteriormente. Estas contam unicamente com a capacidade de observação e experiência dos inspetores a bordo. Neste tipo de inspeção, e tal como acontece na anteriormente descrita, todos os defeitos e irregularidades detetados visualmente são georreferenciados. No entanto mesmo que seja detetado mais do que um, por cada vão da linha apenas é registada uma falha.

Este tipo de inspeção é feito a uma menor distância da linha para que os inspetores a bordo possam ter uma melhor perceção da sua condição.

## 3.2 Tratamento de dados, relativos à medição de distâncias, obtidos na inspeção

O trabalho desenvolvido usa unicamente a informação relativa à medição de distâncias recolhida durante a inspeção. Por isso, seguidamente será apenas explicitada a forma como se faz a análise dos fotogramas recolhidos e gerados pela tecnologia LiDAR. Este é um método direto de captura de dados e classifica-se como sendo um sensor ativo [30]. A cada fotograma gerado por este sistema dá-se o nome de varrimento.

Tal como já foi referido, a tecnologia LiDAR encontra-se integrada num sistema que a bordo permite a identificação automática de situações em que as distâncias regulamentares entre a linha em inspeção e construções, solo, outras linhas e vegetação são violadas.

Para que possam ser calculadas as distâncias referidas anteriormente é necessário, antes de mais, que o algoritmo implementado no sistema seja capaz de identificar a linha em inspeção. Algumas das características próprias das linhas, tais como número de condutores, número de cabos de guarda e tensão, são conhecidas *à priori* pelo algoritmo. A forma como a linha é captada pelo sistema LiDAR possui também características que facilitam a sua identificação pelo algoritmo, nomeadamente [27]:

- Todos os condutores possuem igual orientação espacial e são paralelos entre si;
- Os condutores, apesar de formarem catenárias, na imagem são aproximados a linhas retas;

A linha é devidamente identificada depois de processados os varrimentos correspondentes a um valor entre 10 a 20 metros de comprimento da linha, e a partir desse momento o varrimento é feito tendo sempre essa primeira identificação como referência. Tal como já foi referido, de forma a evitar os obstáculos que se atravessam no percurso do helicóptero este acaba por desviar a sua trajetória. Assim, ao retomar a inspeção todo o processo de identificação da linha tem que se repetir o que implicará uma reanálise manual dos dados recolhidos nas inspeções.

Depois de identificada a linha, é então possível identificar quais os pontos que se encontram na sua proximidade, e classificá-los como sendo solo, outra linha, árvores/vegetação ou construções.

Isso é feito por análise das formas geradas pelas nuvens de pontos classificados como não linha, Figura 3.7.

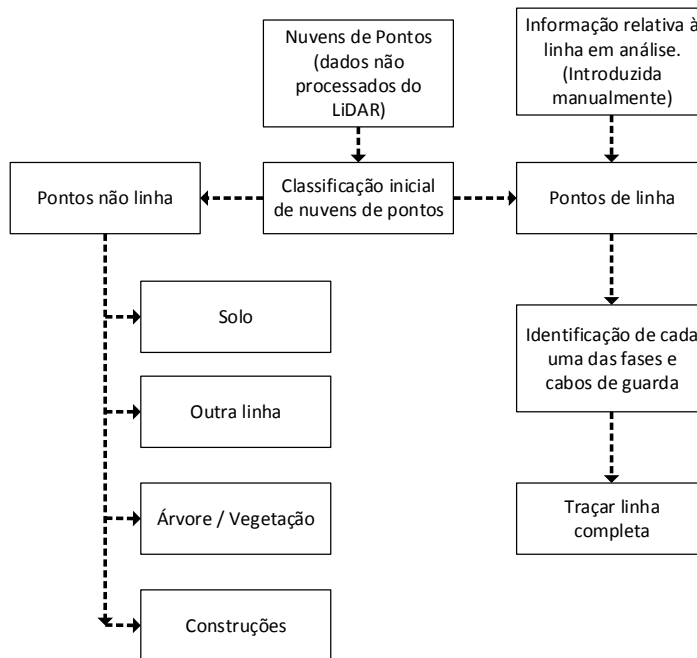


Figura 3.7: Funcionamento do sistema LiDAR no reconhecimento de obstáculos e linhas

O sistema LiDAR gera imagens que permitem que cada ponto da linha seja avaliado recorrendo a 3 vistas diferentes: vista de perfil, vista de cima e vista de frente (alçado). Seguidamente apresentam-se as três vistas referidas para um mesmo ponto na rede.

Cada um dos elementos identificados apresenta-se com cor diferente nas imagens resultantes do algoritmo: a linha principal é vermelha, as outras linhas são amarelas, o solo é castanho e a vegetação é verde, Figura 3.8.

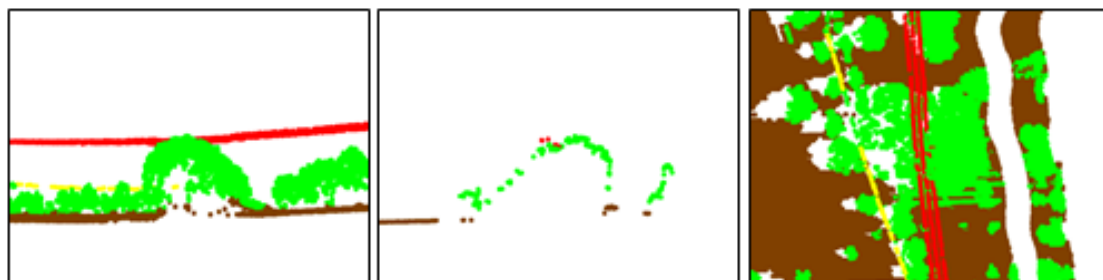


Figura 3.8: Diferentes vistas do mesmo ponto do circuito geradas pelo LiDAR: vista de frente (esquerda), vista de perfil (centro) e vista de cima (direita).

As diferentes vistas apresentadas na Figura 3.8 correspondem à situação captada na Figura 3.9.



Figura 3.9: Fotograma referente às vistas apresentadas na Figura 3.8

A identificação, em tempo real, de situações irregulares impõe um elevado esforço computacional dos equipamentos a bordo do helicóptero, e por isso estes possuem implementado um algoritmo simplificado de análise de imagem. Depois da inspeção é necessário realizar uma análise manual de todos os varrimentos registados.

Este é um processo moroso, mas garante que a informação que é transmitida à EDP Distribuição seja fidedigna garantindo que situações como as que serão apresentadas em seguida são:

- Aves que são interpretadas pelo algoritmo como sendo vegetação;
- Apoios que são interpretados como sendo vegetação;
- Quando se verificam travessias com outras linhas, por vezes a medição de distâncias é feita relativamente a linhas que não estão a ser alvo de inspeção;

Os fotogramas e as diversas vistas geradas pelo sistema de laser permitem que os colaboradores da Labelec possuam toda a informação necessária com vista à eliminação de todos os registos de falsas situações irregulares. Na Figura 3.10 pode observar-se a forma como a informação, já completamente processada relativa aos dados recolhidos nas inspeções, é apresentada na forma de ficheiro de Excel do Microsoft Office.

### 3.2.0.2 O uso do LiDAR na identificação de espécies vegetais

Durante algum tempo, a identificação de espécies foi feita com recurso a sensores que emitiam radiação próxima dos infravermelhos [38]. Hoje em dia, já é possível identificar as espécies

H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	
a	Scan	Hora	Classe	Lat/Inf	Nivel/Typo	Coberto Vegeta	Descritor	Lat. N	Long. W	Lat. Traj. N	Long. Traj. W	Alt. Traj
1397	2012/10/03 09:39:46	2		Árvore	A1	3.71	40.531670	-8.085460	40.531681	-8.085283	421	
1399	2012/10/03 09:39:46	3		Árvore	A2	4.6	40.531685	-8.085516	40.531699	-8.085288	421	
1664	2012/10/03 09:39:59	3		Árvore	A1	4.76	40.533802	-8.086013	40.533734	-8.085707	422	
1838	2012/10/03 09:40:08	3		Árvore	A1	4.32	40.534459	-8.085624	40.534197	-8.085524	429	
1998	2012/10/03 09:40:16	3		Árvore	A1	4.62	40.534581	-8.084132	40.534329	-8.084172	433	
2413	2012/10/03 09:41:36	3		Construção	A1	4.64	40.534506	-8.082936	40.534387	-8.082964	424	
2497	2012/10/03 09:41:41	2		Árvore	A2	2.7	40.534476	-8.082534	40.534369	-8.082564	424	
2502	2012/10/03 09:41:41	1		Árvore	A2	1.73	40.534478	-8.082507	40.534367	-8.082539	424	
2511	2012/10/03 09:41:41	1		Árvore	A2	1.26	40.534471	-8.082461	40.534365	-8.082494	424	
2515	2012/10/03 09:41:41	2		Árvore	A2	2.86	40.534461	-8.082443	40.534364	-8.082474	424	
2522	2012/10/03 09:41:42	1		Árvore	A2	2.37	40.534447	-8.082410	40.534362	-8.082439	424	
2527	2012/10/03 09:41:42	1		Árvore	A2	1.44	40.534436	-8.082386	40.534360	-8.082413	424	
2535	2012/10/03 09:41:42	1		Árvore	A2	1.01	40.534462	-8.082337	40.534358	-8.082372	424	
2537	2012/10/03 09:41:43	1		Árvore	A2	2.22	40.534429	-8.082336	40.534358	-8.082362	424	
2540	2012/10/03 09:41:43	1		Árvore	A1	1.73	40.534464	-8.082310	40.534357	-8.082346	424	
2545	2012/10/03 09:41:43	1		Árvore	A1	2.18	40.534429	-8.082295	40.534355	-8.082320	424	
2555	2012/10/03 09:41:43	1		Árvore	A1	1	40.534434	-8.082240	40.534351	-8.082267	424	
2575	2012/10/03 09:41:44	2		Árvore	A1	2.78	40.534405	-8.082140	40.534341	-8.082156	424	
2578	2012/10/03 09:41:45	1		Árvore	A9	1.98	40.534420	-8.082117	40.534340	-8.082138	424	
2585	2012/10/03 09:41:45	2		Árvore	A9	3.13	40.534409	-8.082082	40.534336	-8.082097	424	
2598	2012/10/03 09:41:46	2		Árvore	A9	3.27	40.534391	-8.082006	40.534328	-8.082015	424	
2613	2012/10/03 09:41:46	2		Árvore	A9	2.67	40.534427	-8.081889	40.534317	-8.081917	425	
2630	2012/10/03 09:41:47	3		Árvore	A9	4.48	40.534435	-8.081760	40.534303	-8.081797	426	
2712	2012/10/03 09:41:51	3		Árvore	A9	4.19	40.534412	-8.081095	40.534245	-8.081142	429	
2729	2012/10/03 09:41:52	2		Árvore	A9	3.25	40.534408	-8.080963	40.534240	-8.080998	430	

Figura 3.10: Documento Excel que resulta da análise dos varrimentos realizada pelos colaboradores da Labelec.

das árvores por LiDAR recorrendo à identificação da forma do contorno da copa das árvores identificadas, a aquisição de imagens é feita da forma ilustrada na Figura 3.11. Na figura 3.12 pode observar-se a forma como é feito o contorno. Esta forma é depois classificada de acordo com o seu tamanho e conhecimento das formas típicas, de copas de árvores conhecidas, [6] [39] [40].



Figura 3.11: Forma como é se adquire a informação à identificação da forma da copa da árvore [6].

A forma como opera o algoritmo usado na identificação das espécies não será explicada neste documento, visto ser um problema complexo de análise de imagem que sai fora do âmbito do presente trabalho. A identificação de espécies é mais difícil e complexa quando a densidade florestal é muito elevada [39]

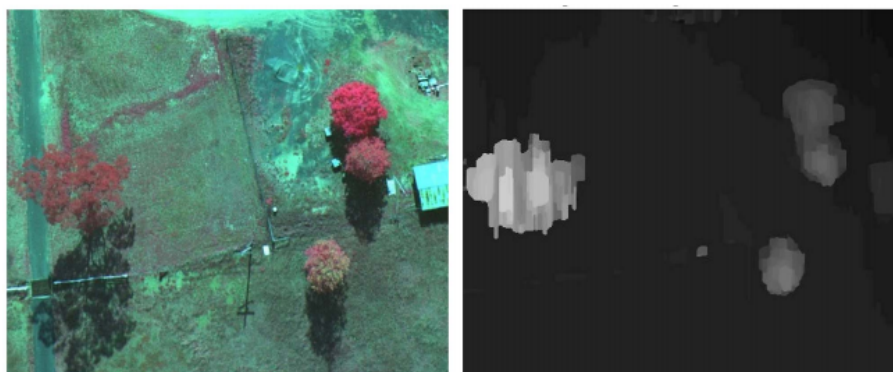


Figura 3.12: Identificação de espécies de árvores por LiDAR [6].

### 3.2.1 Modelo de planeamento de ações de manutenção atualmente em vigor

Esta ferramenta baseia o seu funcionamento num algoritmo que começa por calcular distâncias entre as consecutivas anomalias, usando a equação de Haversine. As intervenções são, com este modelo, estabelecidas de acordo com o seu tipo e gravidade assim como pela distância relativa calculada entre as mesmas.

O principal objetivo é intervir, no futuro mais próximo possível, as anomalias mais severas. Os colaboradores da EDP Distribuição responsáveis pelo desenvolvimento deste algoritmo determinaram, com base na sua experiência acumulada na gestão e planeamento de ações de manutenção, que as intervenções de que devem ser agendadas são as relativas às anomalias mais graves, nesse ano, e a todas as outras que se encontrem numa banda de 100 m antes e depois delas, Figura 3.13. Este processo será descrito em maior detalhe no Capítulo 5 deste documento.

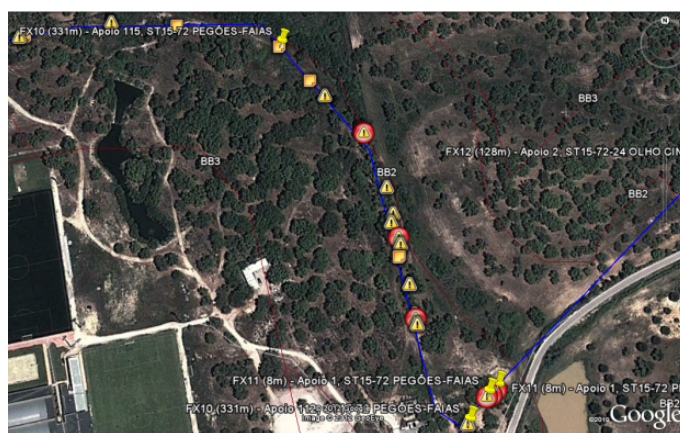


Figura 3.13: Anomalias severas (vermelho) e outras anomalias representadas ao longo da linha.

Este modelo opera principalmente com vista à manutenção da vegetação existente nas proximidades das linhas. Para os casos em que são detetadas irregularidades relacionadas com edifícios,

ou seja, anomalias “estáticas”, foi construída uma base de dados para evitar o deslocamento recorrente de trabalhadores especializados para inspecionar estas anomalias em futuras inspeções. O modelo descrito pode ser resumido pela Figura 3.14.

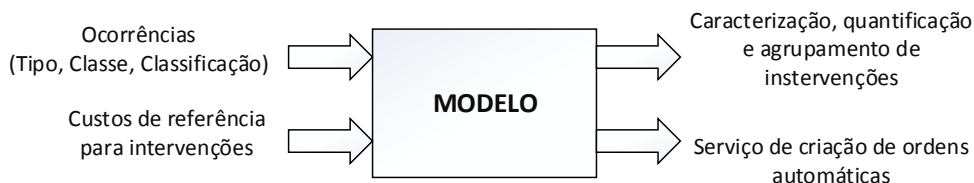


Figura 3.14: Modelo que é usado pela empresa para manutenção da vegetação nas proximidades das linhas.

### 3.3 Intervenções das equipas de trabalho no terreno

Depois de feito o planeamento é enviada uma ordem de trabalho para o prestador de serviços externos contratado para o efeito, com a posição exata dos pontos ou extensão de pontos da linha onde terá que atuar. A EDP Distribuição possui toda a sua rede de linhas aéreas desenhada na plataforma Google Earth. Nesta plataforma pode ser encontrada informação geográfica relativa a todas as linhas e apoios da RD. Através do uso de diferentes cores e diferentes símbolos é possível distinguir os diferentes tipos de torre e linha. O Google Earth permite ainda que os utilizadores do sistema possam facilmente ver a imagem de satélite referente à zona das ocorrências registadas na inspeção o que facilita o trabalho às equipas que depois operam no terreno. Esta plataforma permite ainda a identificação da existência de construções ilegais nas proximidades das linhas aéreas.

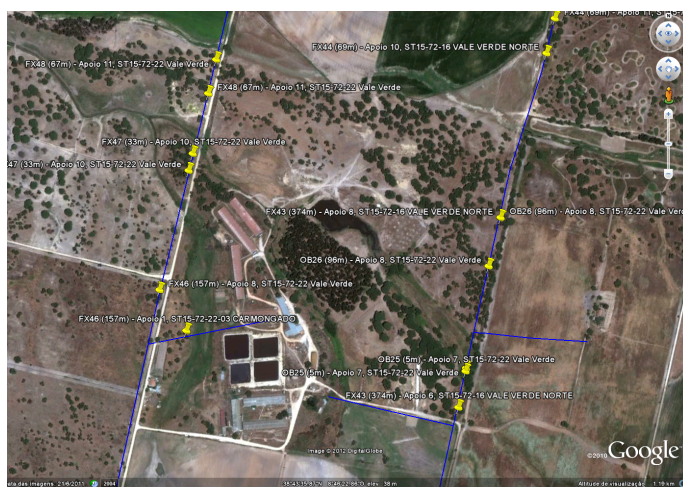


Figura 3.15: Anomalias severas (vermelho) e outras anomalias representadas ao logo da linha.

### 3.3.1 Práticas de corte e poda das árvores

Em Portugal Continental, os proprietários dos terrenos encontram-se legalmente obrigados a não realizar plantações que possam por em risco o bom funcionamento da RND e, além disso, devem permitir a entrada nas suas propriedades dos funcionários designados pela EDP Distribuição, seja para ações de inspeção ou de manutenção. A este sistema dá-se o nome de regime de servidão administrativa.

Além da manutenção das distâncias estabelecidas no Regulamento de Segurança de Linhas Eléctricas de Alta Tensão, nos espaços florestais podem vir a ser estabelecidas regras adicionais resultantes dos planos municipais de defesa da floresta contra incêndios [8].

Apesar de o controlo do crescimento da vegetação ser difícil, é possível adotar medidas nesse sentido. Algumas das medidas que muitas vezes se aplicam com vista ao adiamento das ações de corte e de poda são as seguintes:

- Imposição de faixas de serviço maiores do que aquilo que se encontra estabelecido no Regulamento de Segurança de Linhas Eléctricas de Alta Tensão;
- Plantação de espécies com reduzidas taxas de crescimento nas proximidades das linhas. Uma espécie que é usada para este efeito é o carvalho;
- O uso de pesticidas também pode ser uma das práticas em vigor, mas possui associada uma forte regulamentação. Este método só pode ser aplicado entre os dias 1 de Março e 30 de Setembro de cada ano e a sua aplicação só deve ser feito por entidades que devidamente certificadas ao nível de transporte, armazenamento e aplicação do tipo de produtos químicos contidos nos pesticidas aplicados.

Tal como já foi referido, existe um conjunto de espécies protegidas, como o sobreiro e o azevinho, que além de só poderem ser intervencionadas numa altura específica do ano, também possuem associadas regras específicas associadas que não permitem o seu corte, mas apenas a sua poda ??.



Figura 3.16: Sobreiro (esquerda) e operador de terreno com serrote extensível (direita).

As ações de manutenção da vegetação são feitas nas proximidades de linhas que se encontram em serviço, mas, poderão verificar-se situações em que a distância do elemento da equipa de

manutenção à linha não é regulamentar e, nesses casos, poderá justificar-se, como medida de segurança, tirar a linha de serviço durante o trabalho de manutenção. Ainda assim, atualmente já existe equipamento que permite que os trabalhos sejam feitos muito próximos das linhas sem que as equipas se encontrem em risco.



Figura 3.17: Trabalhos em altura realizados muito próximos da linha.



Figura 3.18: Ferramenta de corte isolada eletricamente e extensível.

Depois de concluídas as ações de manutenção da vegetação, os prestadores de serviços externos responsáveis pela sua execução devem proceder ao tratamento dos vestígios que resultam destas atividades para que estes não possam vir a servir de combustível em possíveis cenários de incêndios nestas regiões. Caso o proprietário do terreno não expresse o seu interesse para uso próprio dos resíduos que resultam da manutenção, estes devem ser removidos para locais públicos existentes para este efeito. Existe ainda a alternativa de os mesmos poderem ser fragmentados ou até triturados, sendo depois homogeneamente distribuídos no solo do terreno em questão. Estas ações dependem do tipo de vegetação e da quantidade de resíduos que resultam da ação de manutenção.

### 3.4 Síntese

Neste Capítulo foram descritos, com detalhe, todos os passos envolvidos no processo de manutenção de faixas de serviço de linhas MT e AT.



Figura 3.19: Triturador manual de resíduos vegetais.

As inspeções são feitas com recurso a um helicóptero e nestas recorre-se à termografia, à inspeção visual e à medição de distâncias por LiDAR. Fazem-se com uma regularidade estabelecida internamente pela empresa. Nestas é possível avaliar a condição dos ativos, assim como o estado da vegetação próxima das faixas de serviço.

O tratamento da informação adquirida com a tecnologia LiDAR é um processo computacional exigente, que, atualmente na empresa ainda implica uma extensa análise manual.

Todas as situações irregulares detetadas pelo sistema LiDAR, são georreferenciadas, o que facilitará depois as ações corretivas no terreno.



## Capítulo 4

# Desenvolvimento de algoritmo para o processamento de dados de inspeção

### 4.1 Métodos computacionais de otimização

Uma grande variedade de desafios reais de decisão e controle são caracterizados por possuírem grandes problemas de não linearidade ou serem tipicamente de natureza discreta. Atualmente, um grande foco de investigação na comunidade científica é a tentativa de encontrar um conjunto de métodos universais para resolução de problemas de otimização. Tem sido assim dado um lugar de destaque aos algoritmos evolucionários na obtenção de soluções ótimas ou próximas do ótimo [37] [41].

A primeira referência registada sobre os Métodos Computacionais Evolucionários data do ano 1966 e pode ser encontrada no livro *Artificial Intelligence Through Simulated Evolution* de Lawrence J. Fogel [42]. Em paralelo, John Holland também desenvolveu trabalhos sobre sistemas adaptativos cujo objetivo era estudar as formas de evolução e adaptação na natureza com o intuito de as pôr ao serviço das ferramentas computacionais. Foram estes estudos que culminaram no que hoje em dia é conhecido como Algoritmos Genéticos, que são apresentados no seu livro *Adaptation in Natural and Artificial Systems* de 1975, como sendo uma abstração matemática da evolução biológica [43].

#### 4.1.1 Algoritmos Genéticos

Para que se possa perceber o funcionamento dos Algoritmos Genéticos é necessário clarificar alguns dos conceitos biológicos envolvidos, visto que esta será usada no seguimento do texto. Os seres vivos são compostos na sua totalidade por células, e cada uma destas células contém cromossomas, onde se encontra codificada a informação genética que irá determinar as características de cada organismo. Cada cromossoma é constituído por genes onde podem ser encontrados blocos de DNA relativos a, unicamente, uma característica do organismo em questão, ocupando sempre o mesmo lugar no cromossoma. Durante a reprodução de organismos ocorre um fenómeno que se designa crossover. Durante este fenómeno é gerada uma descendência cujo cromossoma resulta

de uma combinação entre os cromossomas dos seus progenitores. A descendência poderá sofrer mutações, ocorrendo alterações em partes do seu DNA. A adaptação do organismo descendente pode ser quantificada em termos probabilísticos, ou seja, qual a probabilidade que o organismo tem de sobreviver e se reproduzir, gerando descendência para a próxima geração [43].

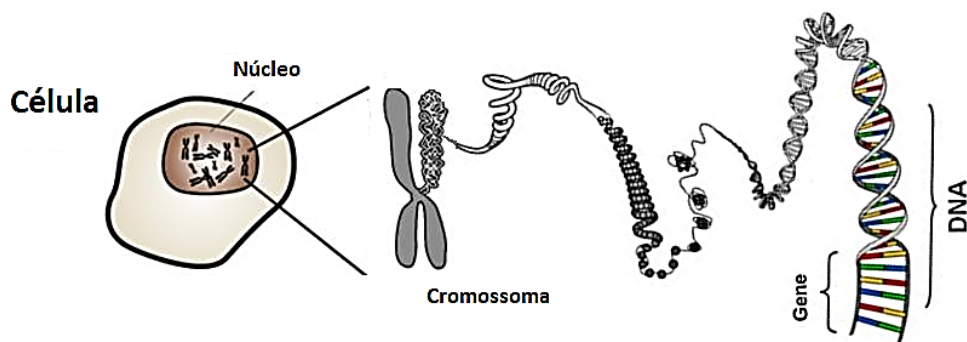


Figura 4.1: Ilustração de conceitos genéticos.

A sobrevivência das espécies na natureza está dependente do seu nível de adaptação ao ambiente que as envolve e, por isso, estas têm vindo a evoluir, de geração para geração, encontrando-se cada vez mais adaptadas devido aos mecanismos de crossover e mutação entre diferentes organismos aquando da sua reprodução.

Os AG apresentam-se assim como a importação dos conceitos anteriormente apresentados para a computação e otimização. As várias soluções possíveis de um problema de otimização que recorre aos AG, depois de devidamente codificadas, podem ser interpretadas como sendo um cromossoma. Ao conjunto de cromossomas existentes num dado momento é dado o nome de população.

Depois de agrupadas em populações, as soluções codificadas sofrem os processos evolutivos já referidos, permitindo que, a partir do grande e vasto conjunto de soluções viáveis, seja possível identificar uma solução otimizada para o problema. No seguimento do texto será usada a nomenclatura de indivíduo ao que até agora foi chamado de cromossoma. Nestes algoritmos, a adaptação dos indivíduos faz-se recorrendo a uma função concebida de acordo com os requisitos do problema.

Os AG fazem parte da família evolucionária e diferem das restantes, pertencentes à chamada computação baseada em métodos *fenótipo*, nas quais não se recorre à codificação na representação das soluções do problema, essencialmente em três pontos: codificação e interpretação das soluções e no mecanismo preferencial para gerar novas soluções[44]. Todas as etapas características deste tipo de algoritmo serão seguidamente descritas.

#### 4.1.1.1 Codificação

A grande maioria da primeira literatura desenvolvida sobre AG focou-se na representação binária das soluções. No entanto, os AG podem recorrer a qualquer tipo de codificação. A codifi-

cação deverá estabelecer limites no espaço das soluções, o que poderá ser vantajoso visto que uma representação rígida poderá diminuir este espaço [37]. A codificação deve ser mínima e existindo uma correspondência bijetiva entre as representações e as soluções reais respectivas[45][44].

Apresentam-se, em seguida, diferentes formas de codificar soluções:

- Um indivíduo poderá ser representado de uma forma igual aquela com que é usado no cálculo da função de adaptação;
- As variáveis que existem na solução são as mesmas que se usam na função de adaptação, mas encontram-se representadas sobre uma forma diferente;
- Para que as variáveis possam ser usadas na função de adaptação, é necessário recorrer a uma rotina de forma a descodificar a informação codificada das variáveis da solução.

#### 4.1.1.2 Mutação

A Mutação é a operação que consiste na criação de novos indivíduos a partir de indivíduos existentes, por introdução de pequenas alterações. É um operador genético fulcral no sentido em que a sua operação pode evitar uma convergência prematura para um ótimo local ou a paralisação da pesquisa em qualquer ponto do espaço de soluções. Quando se verifica a convergência do algoritmo, os indivíduos de uma mesma geração são todos muito semelhantes e, caso não seja introduzido um fator de perturbação, acabar-se-á por fazer a pesquisa sempre na mesma região do espaço de soluções[46].

O tipo de mutação que introduzida depende sempre da forma como as soluções se encontram codificadas. Quando as variáveis se encontram codificadas binariamente, um tipo de mutação básica a introduzir é a inversão de um dos bits, alterando o bits de 1 para 0 ou vice-versa. Já quando as soluções se encontram codificadas com recurso a números naturais, aplica-se uma estratégia diferente de mutação: troca-se a posição entre os valores associados a duas variáveis [46].

Deve garantir-se que depois de se realizar uma mutação, os novos indivíduos mutados são soluções viáveis de acordo com as restrições do problema.

#### 4.1.1.3 Crossover

O operador genético crossover aplica-se a dois indivíduos, os progenitores, de forma a dar origem à sua descendência que será uma combinação das características dos seus progenitores [43].

Deseja-se que as ações de crossover resultem em descendentes com níveis de adaptação superiores aos dos progenitores que estiveram na sua origem, ou pelo menos que isto se verifique com elevada probabilidade.

Existem diferentes estratégias possíveis para aplicação deste tipo de operador nos AG. Neste trabalho será utilizado o crossover uniforme. Este tipo de crossover opera independentemente da forma como a informação se encontra codificada nas soluções, sendo os elementos do progenitor diretamente copiados para a descendência [45]. A escolha do progenitor de origem do valor de

cada variável que transita para a respectiva descendência é feita com recurso a uma sequência de comando do crossover.

Tal como se pode observar na Figura 4.2, quando na sequência se encontra o valor 0 a informação provém do Progenitor 1, assim como caso se encontre o valor 1 a informação terá origem no Progenitor 2. O Descendente 2 tem origem num processo oposto ao descrito anteriormente [44].

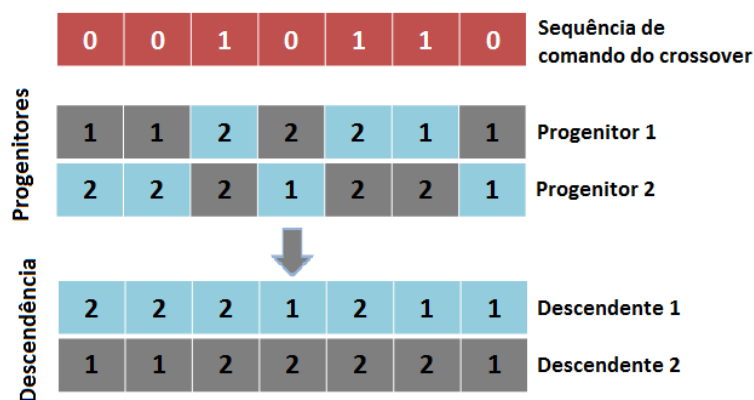


Figura 4.2: Crossover Uniforme

#### 4.1.1.4 Seleção

A seleção trata-se de mais uma operação típica deste tipo de algoritmo. Difere das operações anteriormente apresentadas na medida em que é a única que, independentemente do método adotado, tem em conta o valor da função de adaptação associado a cada um dos indivíduos da população. Existem diferentes estratégias que podem ser adotadas para seleção dos indivíduos que irão estar na origem na geração seguinte: seleção por torneio, seleção por truncagem, seleção por ranking linear, seleção por ranking exponencial, seleção proporcional e seleção elitista [46].

Neste trabalho irá adotar-se, para seleção, a estratégia de torneio estocástico. Para uma dada probabilidade  $p'$  e definindo o valor de uma probabilidade fixa com valor reduzido  $p$ , caso  $p'$  seja inferior a  $p$  seleciona-se o individuo menos adaptado, já no caso de caso  $p'$  ser superior a  $p$  seleciona-se o individuo mais adaptado. Trata-se de um torneio estocástico simples do tipo T(1,2) em que é atribuída uma vitória de forma probabilística. Este processo pode ser repetido tantas vezes quanto as necessárias para que se obtenha uma população de progenitores com a dimensão desejada para a próxima geração [44]. Caso o valor da probabilidade fixa  $p$  seja definido com o valor zero, encontramos-nos numa situação de torneio elitista, em que se poderá correr o risco de ocorrer uma convergência prematura.

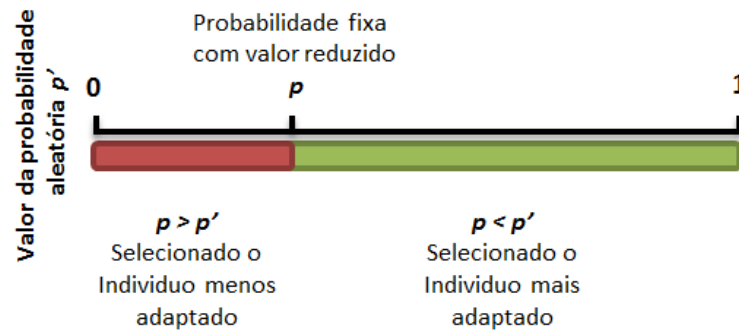


Figura 4.3: Torneio Estocástico

### 4.1.2 Algoritmo Genético Simples

Um algoritmo genético simples pode ser descrito de acordo com a sequência de passos que será seguidamente apresentada.

1. Definição do critério de convergência;
2. Inicialização de uma nova população com  $n$  indivíduos;
3. Cálculo do valor da função de adaptação associada a cada um dos indivíduos;
4. Criação de uma nova geração recorrendo a operadores genéticos:
  - (a) Seleção dos indivíduos mais adaptados, tendo como critério o valor da função de adaptação  $e$ , dependendo da estratégia de seleção adotada e do valor de uma probabilidade de seleção  $p$ , Figura 4.3;
  - (b) Operação de crossover entre pares de indivíduos resultantes da seleção;
  - (c) Aplicação de operação de mutação em indivíduos selecionados aleatoriamente;
5. Substituição da população progenitora pela população descendente.
6. Regresso ao ponto 3 até que se verifique convergência.

O critério de convergência pode ser aproximação ao ótimo global, quando se conhece o valor do mesmo, ou simplesmente, número máximo de gerações [47] .

Há que ter em conta que uma das particularidades do algoritmo apresentado é o facto de em cada nova geração a população inteira será substituída por novos indivíduos. A tendência dos mecanismos de seleção é a manutenção dos melhores indivíduos na geração, o que fará com que a sua boa informação genética passe de geração em geração melhorando a adaptação geral da população, Figura 4.4 [45].

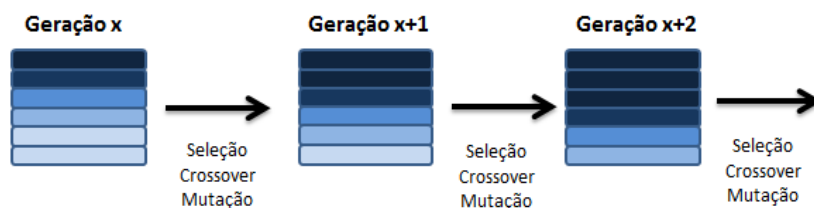


Figura 4.4: Evolução da qualidade dos indivíduos da população. O tom mais escuro representa indivíduos mais adaptados.

## 4.2 Descrição do Problema

Os problemas de planeamento e de agendamento são comuns a diferentes domínios da engenharia. Genericamente, muitas vezes considera-se que estes são semelhantes, no entanto diferem em alguns aspetos: os problemas de planeamento focam-se na determinação do que deve ser feito e como deverá ser feito de acordo com as restrições que lhe estão implícitas; já a resolução de problemas de agendamento permite determinar quando e como uma dada tarefa deverá ser executada.

A tentativa de resolução de problemas de agendamento não é recente e o início do seu estudo data dos primeiros anos da década de 50. Inicialmente, tentou-se resolver com exatidão versões simplificadas de problemas reais, mas rapidamente se verificou que alguns destes problemas são demasiado grandes em dimensão para que possam ser resolvidos de forma eficiente e com elevada exatidão. Começou-se então a recorrer a técnicas heurísticas para a resolução de problemas reais, visto que estas são conhecidas por encontrar boas soluções, ou simplesmente soluções admissíveis para problemas complexos e de difícil resolução [45].

### 4.2.1 Aspetos gerais do problema

O problema a solucionar na sequência deste trabalho trata-se de uma situação em que se pretende realizar o agendamento de ações de manutenção de faixa de serviço de acordo com a informação recolhida aquando das ações de inspeção aérea por helicóptero das linhas AT e MT da EDP Distribuição.

Tal como já foi referido no Capítulo 3, depois de recolhida e tratada a informação, fica-se com um conjunto de dados relativos à distância da vegetação às linhas em análise. Toda a informação é georreferenciada e tem associado o código que permite determinar o troço da linha a que se refere.

Atualmente, as ações de manutenção são agendadas para um horizonte temporal de 3 anos e, por isso, é necessário garantir que durante este intervalo de tempo se garante o cumprimento do que se encontra estabelecido para a faixa de serviço no Regulamento de Segurança de Linhas Elétricas de Alta Tensão de Abril de 1993 (RSLEAT), Tabela 4.1.

<b>Tipo de Obstáculo</b>	<b>Distância Mínima (m)</b>	<b>Artigo</b>
Distância dos condutores ao solo	6	27
Distâncias dos condutores às árvores	2.5	28
Distâncias dos condutores a edifícios	4	29
Distâncias dos condutores a obstáculos diversos	3	30
Entre condutores e apoios	0.15	33
Distâncias dos condutores às autoestradas e às estradas nacionais e municipais	7	91
Distância a travessias de cursos de água não navegáveis	6	93
Distância a Teleféricos	4	95
Distância a travessia de caminho-de-ferro não eletrificados	7	100
Distância aos carris de travessias de caminho-de-ferro cuja eletrificação esteja prevista	13.5	101
Distância dos condutores á instalação da linha de contacto nos cruzamentos	3	102
Distâncias dos apoios à via-férrea nas travessias e nos cruzamentos	5	103
Distâncias entre duas linhas	2	109

Tabela 4.1: Distâncias mínimas segundo o RSLEAT. [11]

A vegetação não é um obstáculo estático e, por isso, é necessário que se tenha em conta que, caso não se realizem ações de manutenção num futuro próximo, esta poderá encontrar-se a violar o regulamento.

Para isso, cada uma das ocorrências verificada é classificada com um nível de gravidade. Os níveis de gravidade são A, B e C sendo o A o de maior urgência e C o de menor urgência associada. Os limites que estão associados à classificação das ocorrências variam de acordo com o nível de tensão da linha em questão e com a natureza do obstáculo encontrado.

Na Tabela 4.2, consegue observar-se que para valores mais elevados de tensão se verifica que a distância mínima de segurança à linha a manter é superior às verificadas para níveis de tensão mais reduzida. Isto acontece porque, quanto maior for a tensão da linha, mais severos poderão ser os efeitos que decorrem da ocorrência de um qualquer modo de falha, tanto pela magnitude de um fenómeno físico que daí poderá resultar, como pela quantidade de consumidores que poderão estar dependentes da continuidade em serviço da linha em questão.

Na Tabela 4.2, podem observar-se três categorias diferentes de obstáculos. Aquando das ações de inspeção, é muito importante que seja feita esta distinção porque a forma como estes registos irão entrar no agendamento das ações de manutenção é diferente.

Da categoria construções fazem parte os novos elementos de edifícios já existentes (chaminés ou antenas, por exemplo), novos edifícios ou, até mesmo, as gruas usadas em construções nas proximidades das linhas. Nestas situações, um colaborador da EDP Distribuição é destacado para ir ao terreno verificar e solucionar a situação irregular registada na inspeção. A categoria solo é importante para perceber, por um lado, se as distâncias mínimas em situação de flexa máxima são cumpridas.

Nível de tensão	Natureza/ Outros			Construções			Solo		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
400kV	6	9	12	6	9	11	8	9.1	10.3
220kV	5	7.5	10	5	8	9	7.1	7.7	8.5
130/150kV	4	6.5	9	4.5	7	8	6.8	7	7.3
60kV	3	5	7	4	5	6	6.3	6.6	7
30kV	2.5	4	5	4	4.5	5	6.2	6.6	7
6/10/15kV	2.5	4	5	4	4.5	5	6.1	6.6	7

Tabela 4.2: Distâncias limite para cada classe de gravidade, em metros.

Todo o agendamento das ações de manutenção é feito de acordo com a classificação que é dada a cada uma das ocorrências registrada durante as ações de inspeção:

- Caso uma ocorrência seja classificada com o nível de gravidade A, terá que ser alvo de uma ação de manutenção durante o decorrer do presente ano, ano  $x$ .
- As ocorrências classificadas como B terão que ser intervencionadas, no máximo, durante o ano seguinte, ano  $x+1$ .
- As ocorrências classificadas como C terão que ser alvo de uma ação de manutenção até 2 anos a partir da data em que se registou, ano  $x+2$ .

Na Figura 4.5, pode observar-se um esquema onde facilmente se conseguem identificar os limites temporais estabelecidos para a manutenção de uma ocorrência registrada num dado ano  $x$ .

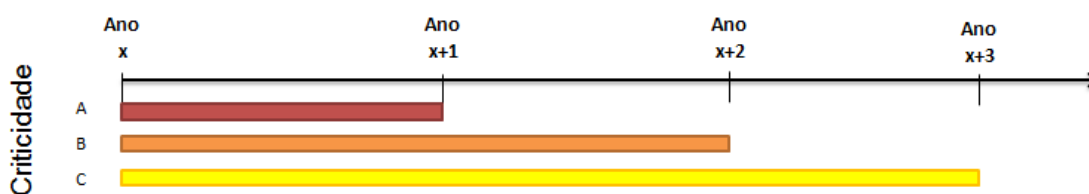


Figura 4.5: Ano em que devem ser realizadas as ações de manutenção de acordo com o grau de gravidade de cada ocorrência.

A forma como é feito o agendamento de ações corretivas de situações relacionadas com obstáculos de origem vegetal é diferente da que se pratica para os demais obstáculos.

A EDP Distribuição contrata os prestadores de serviços externos de duas formas distintas, para o corte de árvores com vista à manutenção da faixa de serviço: decote e faixa. Quando se contrata uma ação de manutenção como decote, o que se pretende é que a manutenção a fazer incida apenas sobre uma ocorrência isolada, o decote de uma única árvore por exemplo. Já quando a contratação

é feita em modo de faixa, a manutenção é feita a todas as ocorrências que se possam encontrar entre dois pontos, Figura 4.6.

Estas duas formas de contratação são remuneradas de forma diferente: o decote é remunerado por cada ocorrência contratada, enquanto a manutenção em modo de faixa é remunerada proporcionalmente à porção de linha em que é necessário realizar manutenção.

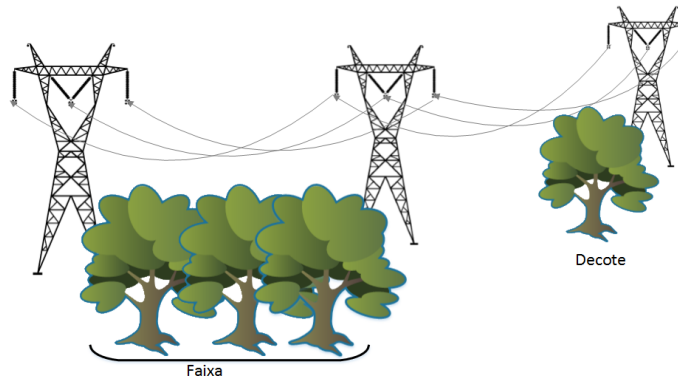


Figura 4.6: Diferença entre ações de manutenção em modo de decote e ações de manutenção em modo de faixa.

### 4.3 Formulação matemática do problema

O trabalho descrito realizado, em colaboração com a EDP D, insere-se nas atividades do gabinete de Manutenção, Planeamento e Controlo da Direção de Manutenção. Esta direção, entre outras, tem como meta a diminuição do valor de SAIFI, que é o indicador de qualidade de serviço que reflete o número e a frequência das interrupções, tal como já foi referido.

Cada uma das interrupções que ocorrem na rede, independentemente da sua causa, severidade ou tempo total de interrupção, são contabilizadas de igual forma no cálculo do SAIFI, independentemente das consequências que delas decorram.

Assim, todos os potenciais cenários de possível falha são merecedores da mesma atenção, sendo portanto vistos com igual importância aquando da resolução deste trabalho. Nenhuma das ocorrências que poderá dar origem a uma situação de falha é ignorada, ficando todas com ação de manutenção agendada.

O principal objetivo deste trabalho é encontrar de uma estratégia ótima que permita uma minimização dos custos envolvidos na realização das ações de manutenção. Serão alvo de agendamento de ações de manutenção apenas as ocorrências registadas que estejam relacionadas com vegetação.

#### 4.3.1 Variáveis

Como em qualquer problema clássico de otimização, devem ser definidos três tipos de variáveis: variáveis de decisão, variáveis de estado e os parâmetros.

As variáveis de decisão são aquelas cujo valor se pretende determinar com a resolução do problema, Tabela 4.3.

<b>Variáveis de decisão</b>	
$m_{ix}$	Modo da ação de manutenção da ocorrência $i$ no ano $x$

Tabela 4.3: Variáveis de decisão do problema.

As variáveis de estado, quando definidas, possuem a capacidade de descrever o problema na sua totalidade, Tabela 4.4.

<b>Variáveis de estado</b>	
$d_{ix}$	Distância da vegetação na ocorrência $i$ no ano $x$
$l_{ij}$	Distância entre as ocorrências $i$ e $j$
$cl_{ix}$	Classe da ocorrência $i$ e $x$

Tabela 4.4: Variáveis de estado do problema.

Os parâmetros são variáveis cuja definição é feita *à priori* da resolução do problema, Tabela 4.5.

<b>Parâmetros</b>	
$MI_{ct}$	Margem inferior da classe $c$ para a tensão $t$
$MS_{ct}$	Margem superior da classe $c$ para a tensão $t$
$c_{ix}$	Classe da ocorrência $i$ e $x$

Tabela 4.5: Parâmetros do problema.

### 4.3.2 Restrições

A definição da estratégia ótima de manutenção possui implícitas algumas condicionantes. Cada problema possui associado um espaço de soluções admissíveis, e este encontra-se definido pelo conjunto das condicionantes que o irão restringir. Na seção 4.2.1 deste capítulo foi já possível conhecer o problema, mas serão seguidamente explicitadas as restrições, que, lhe estão implícitas.

As ações devem ser planeadas respeitando a classe de gravidade atribuída a cada uma das ocorrências, de acordo com o exposto na Figura 4.5.

Muitas vezes, o planeamento é feito para mais do que uma linha, pelo que é necessário garantir que, quando se programam ações de manutenção em modo de faixa, todos os pontos sobre os quais se pretende agir pertencem à mesma linha.

Nenhuma ocorrência registada deverá ficar fora do plano de manutenção, no entanto há que garantir que o orçamento que a empresa possui alocado para este efeito não é ultrapassado.

Seguidamente, no trabalho, serão propostos um novo modelo para resolução deste problema. Este não é mais do que um conjunto de restrições adicionais ao problema. Este contempla o

recurso a uma nova informação: a espécie das árvores que se encontram nas proximidades de cada linha. Este, e as restrições adicionais que lhes estão associadas, serão explicados com maior detalhe no seguimento do texto.

### 4.3.3 Formulação Completa

O nível de adaptação de um indivíduo pode se quantificado recorrendo-se a uma função que na formulação matemática do problema pode ser chamada de função objetivo. O conhecimento do valor numérico das funções objetivo de dois indivíduos torna a sua comparação possível. A função objetivo traduz os custos de manutenção de vegetação associados a cada um dos indivíduos, que na prática não é mais do que a estratégia de agendamento das ações de manutenção dos próximos três anos.

De uma forma simplificada da função objetivo pode ser escrita da forma seguidamente apresentada.

$$\text{Min} \sum_{i=1}^T p_{decote,i} + \sum_{i=1}^T c_{f,ij} \quad (4.1)$$

Em que,

- $T$ : número total de ações de manutenção planeadas;
- $c_{d,i}$  : custo de uma ação de manutenção em modo de decote, da ocorrência  $i$  (euros) ;
- $c_{f,ij}$  : custo de uma ação de manutenção em modo faixa, entre as ocorrências  $i$  e  $j$  euros ).

Contrariamente ao que acontece no caso das ações de manutenção em modo de decote, as que são feitas em modo de faixa possuem um custo associado, que varia com a extensão da porção de linha contratada:

$$c_{f,ij} = d_{ij} \times p_{faixa} \quad (4.2)$$

Em que,

- $p_{faixa}$ : custo da ação de manutenção de 1 km de linha em modo de faixa (euros/km).

A distância  $d_{ij}$  calcula-se recorrendo à formula de Haversine [48]. Esta é uma equação comumente usada na navegação porque permite determinar distâncias, no grande-circulo, entre dois pontos de uma esfera, ou neste caso, a Terra. É necessário conhecer as suas latitudes e longitudes dos pontos.

Calcula-se da forma seguidamente apresentada.

$$\text{haversin}\left(\frac{d_{ij}}{r}\right) = \text{haversin}(\theta_j - \theta_i) + \cos(\theta_j)\cos(\theta_i) \times \text{haversin}(\delta_j - \delta_i) \quad (4.3)$$

Em que,

- *haversion*: é a função de Harversine, e desine-se da forma seguidamente apresentada.

$$\text{haversion}(\theta) = \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)^2 = \frac{(1 - \cos(\theta))}{2} \quad \theta = \theta_j - \theta_i \quad (4.4)$$

- $r$ : é o raio da Terra : 6371km (aproximadamente);
- $\theta_i$  e  $\theta_j$  são as latitudes dos dois pontos.
- $\delta_i$  e  $\delta_j$  são as longitudes dos dois pontos.

## 4.4 Metodologia baseada em Algoritmos Genéticos

A resolução deste problema concretizou-se com a construção de um programa que se baseado em Algoritmos Genéticos. Como a forma de aplicação deste método de resolução varia de acordo com a natureza e as características do problema, considera-se oportuna a realização de uma descrição do procedimento adotado na sua resolução.

Tal como já foi referido, depois de tratados e processados, os dados recolhidos nas inspeções apresentam-se na forma de Folha de Cálculo do *Excel* do *Microsoft Office* . Como tal, e visto ser o mais conveniente para a empresa, o programa foi desenvolvido na aplicação *Visual Basic for Applications* (VBA), que se trata de um suplemento do Excel.

Os parâmetros já se encontram otimizados para o problema em questão, por isso, o utilizador não se deve ocupar com a sua definição.

### 4.4.1 Leitura e filtragem dos dados a analisar

O primeiro passo a realizar pelo programa é a leitura dos dados existentes na folha de cálculo. Nesta altura, é feita uma filtragem das ocorrências que de facto irão ser utilizadas neste programa. Na fonte de dados, podem ser encontradas ocorrências classificadas de quatro formas distintas: árvores, solo, construções ou linhas.

Relativamente a cada uma das ocorrências registadas, de toda a informação que se encontra disponível, é necessário e oportuno para uma boa execução do programa, retirar os dados relativos às condições de voo em que a ocorrência foi registada: latitude, longitude e altura de voo, e às relativas à ocorrência: número do scan, natureza do obstáculo, distância a que o obstáculo se encontra da linha e código da linha em análise, sendo que este dado contém entre outros, a informação relativa à tensão de funcionamento da linha, que é uma informação essencial para a classificação do grau de gravidade da ocorrência.

Apenas interessa trabalhar com os dados relativos à vegetação pelo que, nesta fase, se filtram os dados relativos a obstáculos que possuam uma natureza de origem diferente. Este passo reduz a dimensão dos dados a processar posteriormente no programa, melhorando assim a sua *performance*.

Scan	Classe	Tipo	Descritor
6688	2	Árvores	2.96
6690	1	Árvores	1.74
6733	1	Construção	1.92
6742	3	Linhas	4.19
6774	2	Árvores	3.27
6784	2	Construção	4.28
6742	1	Solo	4.04

→

Scan	Classe	Tipo	Descritor
6688	2	Árvores	2.96
6690	1	Árvores	1.74
6774	2	Árvores	3.27

Figura 4.7: Filtragem de dados

#### 4.4.2 Inicialização da População Inicial

Depois de filtrar os dados a tratar, pode iniciar-se a primeira fase da construção de um Algoritmo Genético com a inicialização da população inicial. A codificação de cada indivíduo foi feita de forma binária, seguindo a codificação que será apresentada na Tabela 4.6.

Codificação	Modo
0	Decote
1	Faixa
Classe	
01	A
10	B
11	C
Ano	
01	$x$
10	$x+1$
11	$x+2$

Tabela 4.6: Codificação da população inicial.

Assim, cada indivíduo da população é definido por uma sequência de 5 vezes  $n$  bits (1 bit para o Modo, 2 bits para a Classe, e 2 bits para o Ano), onde  $n$  é o número de ocorrências a tratar. A inicialização de cada indivíduo não é feita de forma completamente aleatória, de forma a garantir a adaptação de população inicial que possuirá unicamente indivíduos viáveis de acordo com as restrições estabelecidas para o problema.

A atribuição do modo é feita aleatoriamente, já a classe é calculada de acordo com o que se encontra estabelecido na Tabela 4.2, enquanto a atribuição do valor do ano é feita de forma aleatória, garantindo que o exposto na Figura 4.5. Garante-se assim que todas as soluções se encontram no espaço admissível de soluções, Figura 4.8.

O método adotado no algoritmo pode ser consultado no fluxograma da Figura 4.7

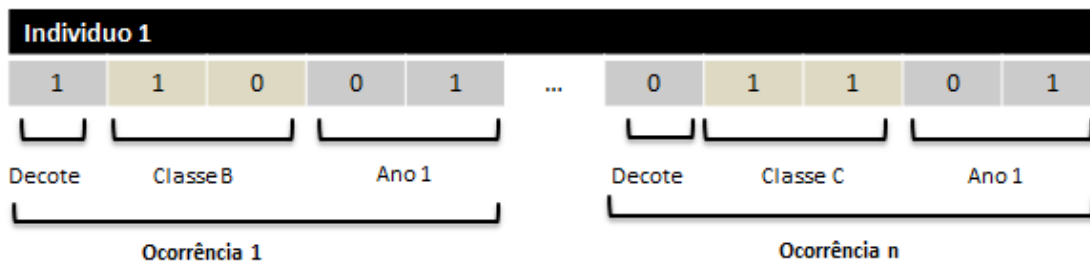


Figura 4.8: Exemplo de descodificação de um indivíduo.

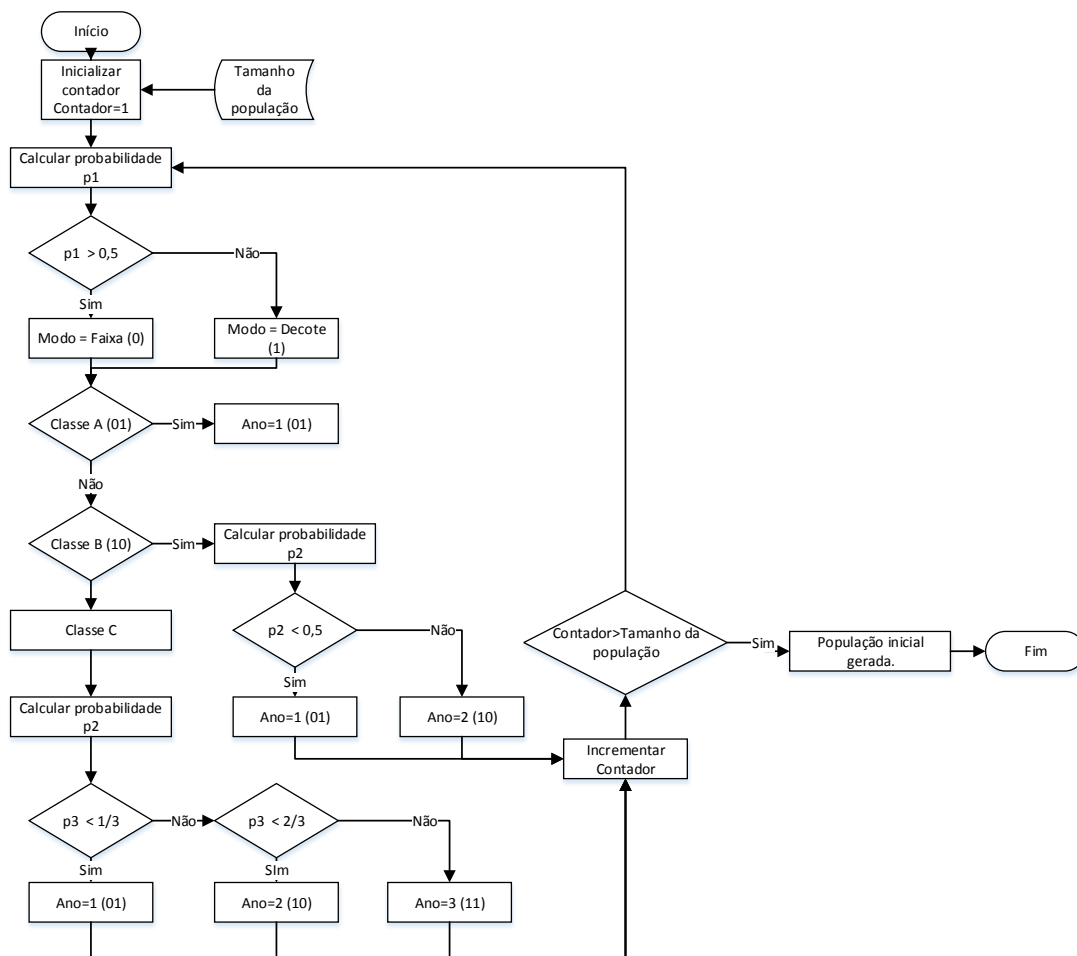


Tabela 4.7: Codificação da população inicial.

### 4.4.3 Seleção, Crossover e Mutação

A seleção dos indivíduos é feita recorrendo ao já referido Torneio Estocástico. Este é executado o número de vezes necessárias para que se consiga obter uma nova geração de progenitores com dimensão igual à da geração inicial.

Neste ponto de execução do programa encontram-se reunidas as condições para que possa realizar a reprodução. Esta faz-se através de um processo de *crossover* uniforme já descrito anteriormente neste texto. Para que se possa realizar o *crossover*, os elementos da população emparelham-se aleatoriamente, estando cada par de progenitores na origem de dois descendentes. Caso a população possua uma dimensão de valor ímpar, haverá um dos indivíduos cuja cópia exata fará parte da nova geração. Seguidamente, na execução do programa, realiza-se a operação de mutação, da qual serão alvo os novos descendentes. Como já foi referido, esta irá introduzir nova informação genética na população salvaguardando um possível cenário de convergência prematura. De seguida apresenta-se um fluxograma onde se consegue observar a forma como são encadeados as etapas do programa descritas anteriormente.

Na Figura 4.9 pode observar-se um fluxograma que ilustra a forma como é calculado a adaptação de cada indivíduo, ou seja, o custo de manutenção que lhe está associado.

O fluxograma da Figura 4.10 ilustra todos os passos que constituem o modelo desenvolvido.

## 4.5 Modelo anual com previsão da taxa de crescimento da vegetação

No modelo apresentado anteriormente, toda a vegetação que se encontra nas proximidades da linha é tratada pelo algoritmo de forma igual [49]. No entanto, a vegetação apresenta toda a mesma taxa de crescimento, esta depende de um conjunto de factores.

Os factores que influenciam a taxa crescimento das árvores são:

- Espécie da árvore;
- Terreno onde a árvores está plantada;
- Idade da árvore;
- Condições climatéricas;
- As taxas de crescimento lateral e em altura são diferentes.

Com o modelo anterior pode acontecer o seguinte cenário: no ano  $x$  um eucalipto, com elevada taxa de crescimento, e um sobreiro, que se encontram nas proximidades da mesma linha, são sinalizados com uma ocorrência de Classe B, ou seja, os dois ficariam com ação de manutenção associada, no mínimo para o ano  $x+1$ . No entanto, no ano seguinte pode ocorrer com elevada possibilidade o seguinte cenário: o eucalipto já se encontra a uma distância que o leva a ser classificado como classe A, enquanto que o sobreiro ainda é classificado com a classe B, pois o seu crescimento foi mais lento.

Seria realizada uma intervenção nas duas árvores, sendo que uma delas ainda se encontraria a uma distância regulamentar. Impõe-se assim a importância de considerar a taxa de crescimento das árvores de forma a evitar situações como a apresentada anteriormente [39].

Por isso, foi criado um novo modelo, que apenas varia do anterior na fase inicial de tratamento dos dados: a atribuição de classes de gravidade a cada uma das ocorrências. Esta classificação,

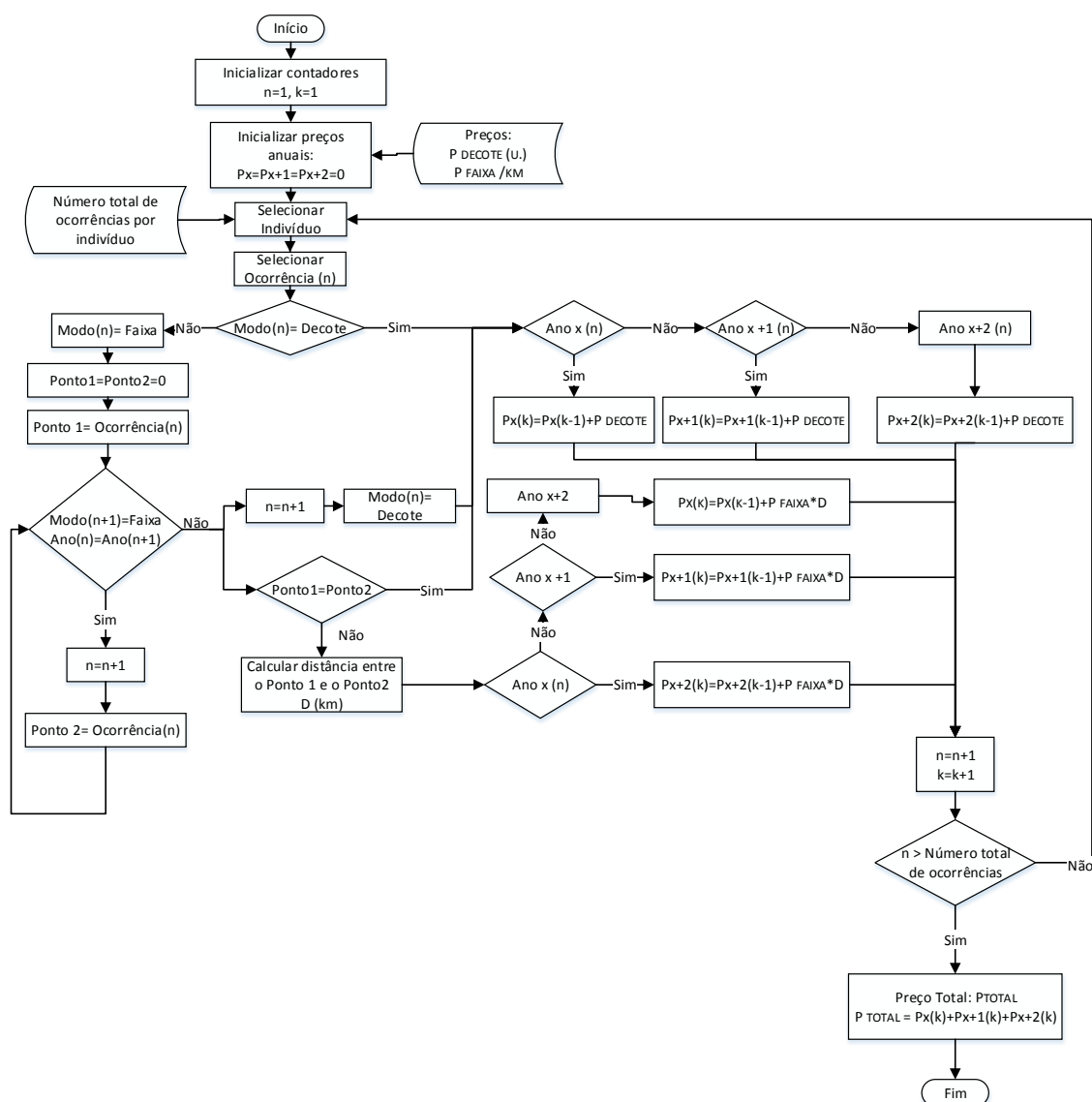


Figura 4.9: Fluxograma que representa o cálculo do custo associado a cada indivíduo.

dos limites apresentados anteriormente na Tabela 4.8, apenas se considera distância para que a ocorrência seja considerada como classe A. Neste modelo essa distância toma a designação de  $d_A$ .

A ideia base desta nova classificação defende uma árvore só deve ser obrigatoriamente alvo de ação de manutenção se nesse ano a sua distância à linha for inferior a  $d_A$ . Pode observar-se na Figura 4.11 a forma como se determina se a distância da linha a que a árvore se encontrará no decorrer dos anos para os quais se está a fazer a planificação. Nesta figura, o esquema representa o crescimento lateral da árvore, mas este conceito é igualmente aplicado ao crescimento em altura da mesma, para os casos em que esta se encontra de baixo da árvore.

Como não existe informação sobre se a árvore se encontra por baixo ou lateralmente, relativamente à linha, não é possível fazer distinção entre as duas taxas de crescimento reativas a cada

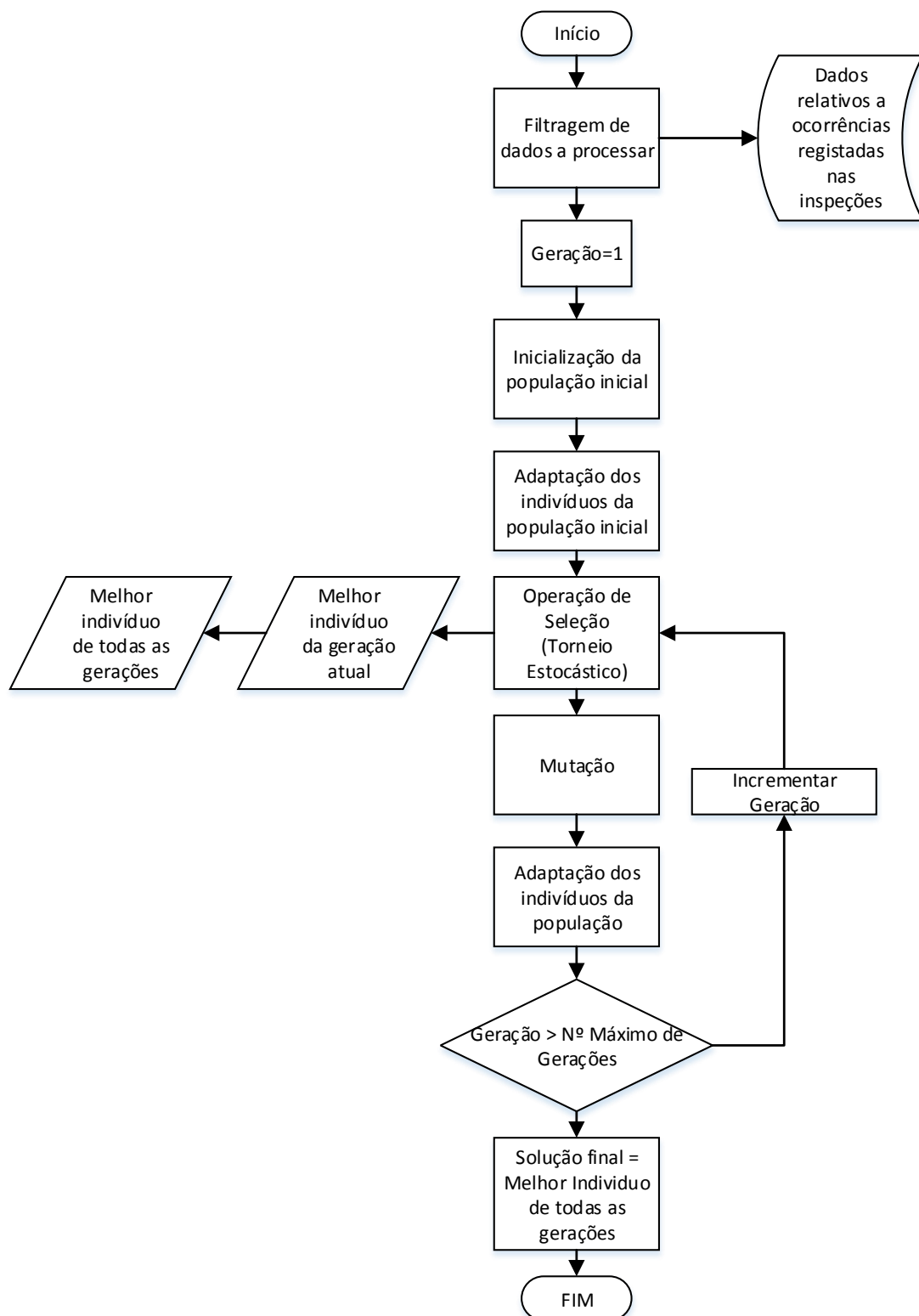


Figura 4.10: Fluxograma ilustrativo do processo.

Nível de Tensão (kV)	Distância crítica - $d_A$ (m)
400	6
220	5
130/150	4
60	3
30	2.5
6/10/15	2.5

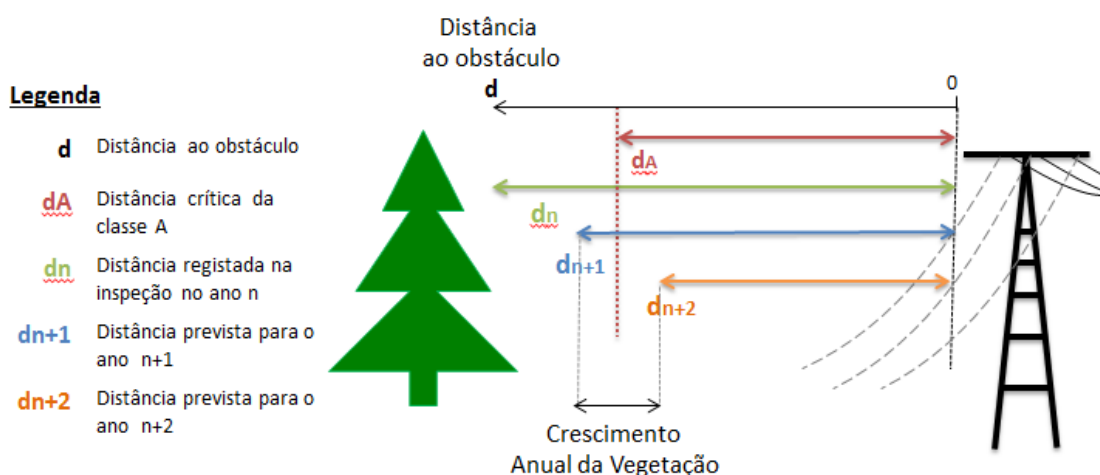
Tabela 4.8: Distâncias  $d_A$  por nível de tensão.

Figura 4.11: Evolução de da distância da árvore á linha ao longo dos anos para os quais é feita a planificação, depois de ser feita uma inspeção no ano n.

árvore e por isso é considerada a sua taxa de crescimento média global.

No fluxograma apresentado na Figura 4.12, observa-se a forma como o algoritmo calcula a classe de gravidade de cada uma das ocorrências.

Visto que esta se trata de uma planificação trianual, com a aplicação de taxas de crescimento considera-se o caso de que algumas espécies que possuem baixo crescimento, durante os período em causa, nunca virão a estar a uma distância da linha inferior a  $d_A$ . Estes casos são excluídos da planificação e guardados numa base de dados.

As espécies de árvores foram organizadas por tipos e para cada tipo foi atribuído um valor médio de taxa de crescimento. Estes valores podem ser alterados pelo utilizador do programa numa folha de cálculo criada para o efeito.

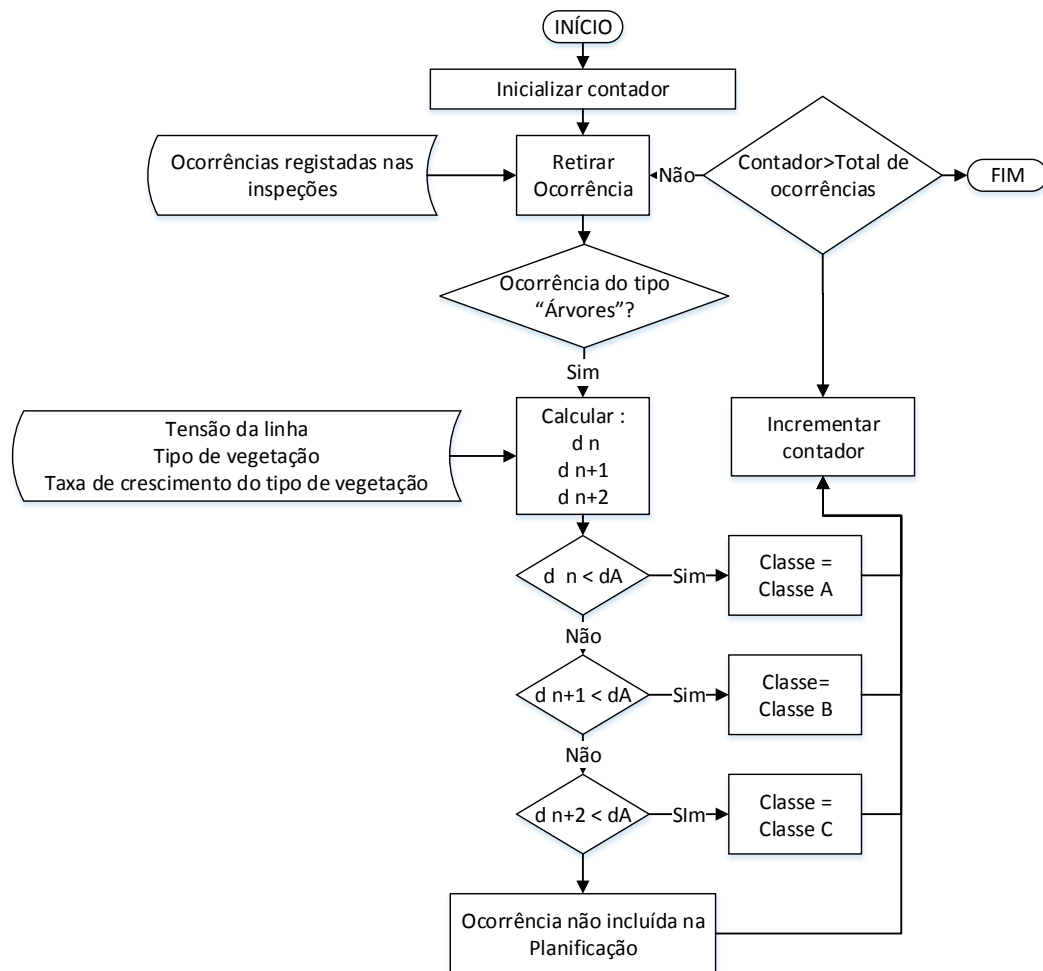


Figura 4.12: Fluxograma representativo da reatribuição de uma classe de gravidade às ocorrências.

## 4.6 Síntese

O problema, para o qual se propõe um método de resolução, trata-se de um problema combinatorio de grande dimensão. Com vista à sua resolução foi desenvolvido um algoritmo baseado num método computacional evolucionário: os Algoritmos Genéticos.

Os Algoritmos Genéticos possuem as seguintes etapas:

- **Inicialização da população inicial:** é feito de forma aleatória, de acordo com as restrições do problema;
- **Crossover:** *Crossover* uniforme;
- **Mutação:** inversão de *bits* com baixa probabilidade;
- **Seleção:** torneio estocástico;

- **Critério de convergência:** número máximo de iterações;
- **Função de adaptação:** custo do agendamento codificado em cada indivíduo;

## Capítulo 5

# Análise e Validação dos modelos desenvolvidos

No presente capítulo podem ser encontrados alguns resultados da aplicação do algoritmo desenvolvido para efeito de otimização das ações de manutenção a contratar pela EDP Distribuição. Para isso, o algoritmo foi testado em dados reais recolhidos aquando da realização de ações de inspeção aérea a uma linha MT no mês de Outubro do ano de 2012. Para cada caso de estudo considerado encontra-se associado um planeamento de ações de inspeção, sendo que este é caracterizado por um custo total; este valor será sempre apresentado em percentagem. O principal objetivo é minimizar este custo.

### 5.1 Estruturação dos testes

#### 5.1.1 Ferramenta computacional utilizada

O algoritmo implementado foi desenvolvido com recurso à ferramenta de programação *Visual Basic for Applications*. Esta ferramenta permite que a informação a processar possa ser diretamente recolhida a partir de uma folha de cálculo do Excel. À semelhança dos dados de entrada, também os resultados da aplicação do algoritmo são apresentados numa folha de cálculo do mesmo programa.

Todos os testes realizados ao código desenvolvido foram feitos num computador com as seguintes características:

- *Sistema Operativo*: Windows 7 Enterprise (Service Pack1);
- *Processador*: Intel Core i5 3320M CPU 2.60GHz;
- *Memória RAM* : 4GB;
- *Tipo de sistema*: Sistema Operativo de 64 bits.

### 5.1.2 Procedimento Prático

Antes de se prosseguir com a apresentação dos resultados obtidos, considera-se oportuna a explicação do processo prático que se encontra envolvido na sua obtenção.

Um dos requisitos funcionais deste trabalho é garantir que qualquer pessoa que não possua conhecimento sobre algoritmos genéticos, ou sobre processos de otimização, possa, de uma forma simples, recorrer ao algoritmo desenvolvido e possa, igualmente, interpretar os resultados obtidos.

Tal como já foi referido no Capítulo 3, a Labelec envia os relatórios das ocorrências detetadas durante as ações de inspeção, na forma de ficheiro *Excel*, e é com base neste mesmo ficheiro que todo o processo se desenrola.

Enumaram-se, em seguida, as várias etapas que este processo envolve:

1. Receção, na EDP D, do ficheiro Excel com os dados relativos às ocorrências registadas durante a inspeção.
2. Os dados relativos às taxas de crescimento da vegetação, e aos limites para cada classe de gravidade já se encontram, por defeito, numa folha de cálculo do ficheiro. Caso se pretenda alterá-los, trata-se de um processo simples e intuitivo.
3. Acionar a *macro* que irá iniciar o processo iterativo de otimização.
4. Consultar os relatórios criados, para cada ano, em folhas de cálculo separadas. Nestas pode ser consultada a descrição detalhada das ações de manutenção a realizar em cada ano, assim como o seu custo.

	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	
1	Nº relatório	Concelho	GA	DRC	Nota	Scan	Hora	Classe	Lat/Inf	Nível/Tipo	Cobe
2						1397	2012/10/03 09:39:46	2		Árvores	
3						1399	2012/10/03 09:39:46	3		Árvores	
4	Filtrar Dados					1664	2012/10/03 09:39:59	3		Árvores	
5						1838	2012/10/03 09:40:08	3		Árvores	
6						1998	2012/10/03 09:40:16	3		Árvores	
7						2413	2012/10/03 09:41:36	3		Construção	
8						2497	2012/10/03 09:41:41	2		Árvores	
9						2502	2012/10/03 09:41:41	1		Árvores	
10						2511	2012/10/03 09:41:41	1		Árvores	
11	Agendar Ações Corretivas					2515	2012/10/03 09:41:41	2		Árvores	
12						2522	2012/10/03 09:41:42	1		Árvores	
13						2527	2012/10/03 09:41:42	1		Árvores	
14						2535	2012/10/03 09:41:42	1		Árvores	
15						2537	2012/10/03 09:41:43	1		Árvores	
16						2540	2012/10/03 09:41:43	1		Árvores	
17						2545	2012/10/03 09:41:43	1		Árvores	
18	Ver relatório Ano X					2556	2012/10/03 09:41:43	1		Árvores	
19						2575	2012/10/03 09:41:44	2		Árvores	
20	Ver relatório Ano X+1					2578	2012/10/03 09:41:45	1		Árvores	
21						2585	2012/10/03 09:41:45	2		Árvores	
22	Ver relatório Ano X+2					2598	2012/10/03 09:41:46	2		Árvores	
23						2613	2012/10/03 09:41:46	2		Árvores	
24						2630	2012/10/03 09:41:47	3		Árvores	
25						2712	2012/10/03 09:41:51	3		Árvores	
26						2729	2012/10/03 09:41:52	2		Árvores	

Figura 5.1: Botões disponíveis para o utilizador, no ficheiro.

### 5.1.3 Procedimento Experimental e Resultados

Antes de apresentar os resultados obtidos nas simulações realizadas é necessário garantir a robustez do algoritmo desenvolvido. A qualidade dos resultados obtidos pela aplicação de métodos baseados em Algoritmos Genéticos é afetada pelos seus parâmetros (número de indivíduos da população inicial, número máximo de gerações, valor das taxas de seleção usada no torneio estocástico e de mutação). Assim, proceder-se-á ao estudo da melhor combinação dos parâmetros referidos.

Considerando os mesmos dados de inspeções e iguais cenários, serão aplicados os dois modelos desenvolvidos: com e sem considerar a taxa de crescimento da vegetação.

Seguidamente apresenta-se uma lista sumária dos objetivos para os testes a realizar no seguimento do texto:

- Verificar a robustez das soluções conseguidas aplicando a metodologia dos Algoritmos Genéticos ao problema em estudo;
- Distribuição das ações de manutenção, pelos 3 anos, a agendar na solução final;
- Diferença entre o volume de ações de manutenção a agendar quando são consideradas as taxas de crescimento da vegetação;

Considera-se pertinente sublinhar que o objetivo do presente trabalho é a resolução do problema de otimização de planeamento das ações de manutenção, e não a realização de um estudo teórico sobre parameterização de Algoritmos Genéticos.

No presente capítulo estuda-se pois a viabilidade da resolução do problema ser feita com recurso a Algoritmos Genéticos. Assim sendo, o estudo a realizar sobre o impacto que diferentes valores de parâmetros do algoritmo nas soluções obtidas possui apenas o intuito de se conseguir uma melhor adaptação do algoritmo ao problema de otimização, não se tratando de um estudo teórico sobre Algoritmos Genéticos.

Um dos pontos negativos que é, algumas vezes, apontado aos Algoritmos Genéticos está relacionado com o elevado tempo de computação consumido até que se atinja a solução ótima. Neste trabalho, esse não é um problema visto se tratar de um planeamento a 3 anos, e por isso não se requer do programa uma resposta instantânea.

### 5.1.4 Avaliação da robustez do modelo desenvolvido

É necessário comprovar a robustez do modelo desenvolvido, antes de se proceder à realização de testes, com vista a determinar a melhor combinação de parâmetros. Para isso, o código foi executado três vezes, sempre com a combinação de parâmetros apresentada na Tabela 5.1.

Seguidamente apresentam-se os resultados obtidos nas três execuções do programa.

Nos gráficos apresentados nas Figuras 5.2 e 5.3 verifica-se que as soluções iniciais não são iguais em todas as simulações dos testes, apesar de apresentarem níveis de adaptação próximos; este facto deve-se à forma aleatória como é gerada a população inicial. Relembra-se que os modos

Parâmetro	Valor
Número máximo de gerações	300
População	50
Taxa de seleção	0.85
Taxa de mutação	0.06
Número de ocorrências a processar	200

Tabela 5.1: Parâmetros do algoritmo, para avaliação da sua robustez.

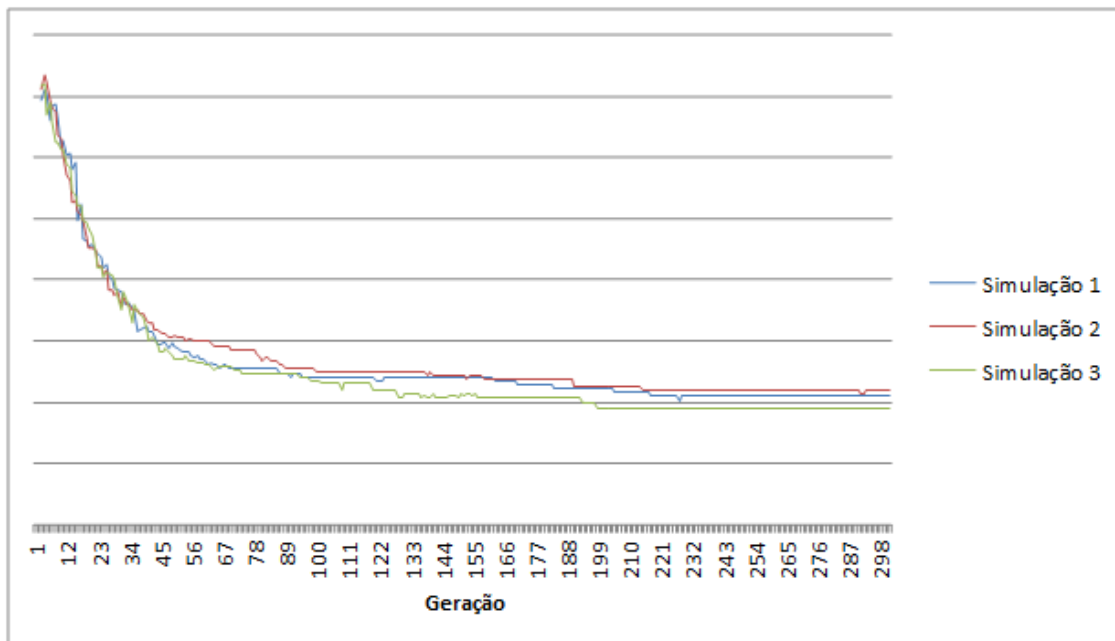


Figura 5.2: Melhor indivíduo de cada geração.

de manutenção, faixa ou decote, são atribuídos aleatoriamente a cada ocorrência, sendo que apenas os anos, em que estes deverão ser realizados são alvo, de adaptação às restrições do problema, de forma a garantir a viabilidade de todas as soluções.

Apesar da aleatoriedade inicial já referida, verifica-se que nas mesmas condições de parame-trização, e para o mesmo número de ocorrências a processar, a aplicação do algoritmo resultou em que os melhores indivíduos de cada geração gradualmente tomassem valores menores, por se tratar de um problema de minimização, e semelhantes.

### 5.1.5 Parameterização do Algoritmo Genético

O valor a selecionar como sendo o mais apropriado, para cada número de ocorrências que caracterizam o problema, deverá resultar da busca de um compromisso entre capacidade de cál-culo, tempo de computação e precisão e qualidade das soluções obtidas. O objetivo de qualquer problema de otimização é chegar ao ótimo global, ou pelo menos, a uma solução muito próxima

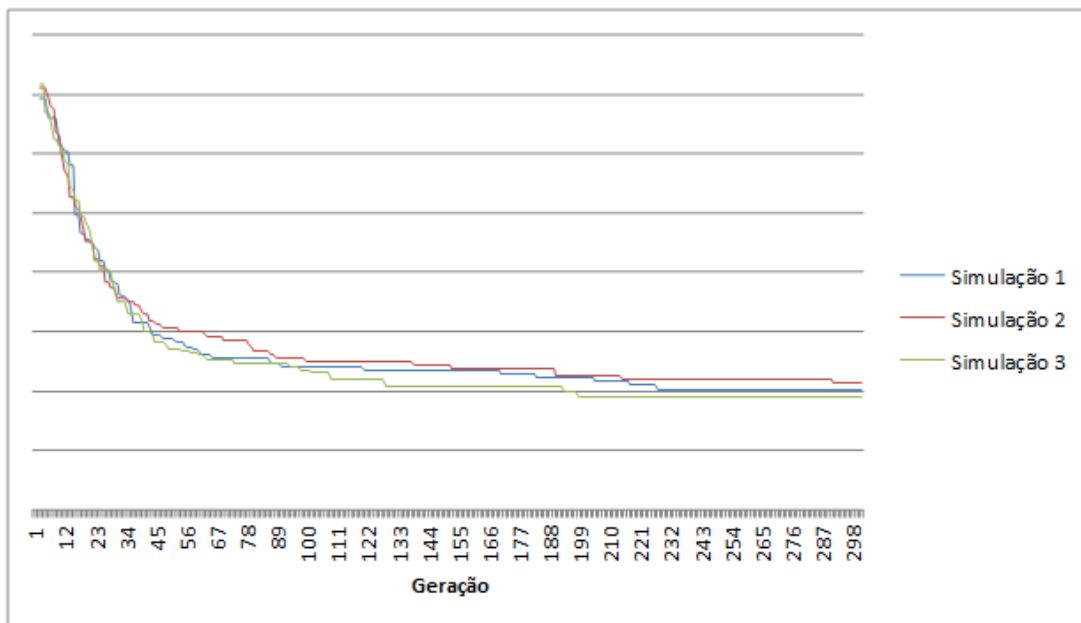


Figura 5.3: Melhor indivíduo ao longo de todo o processo evolutivo.

desse valor, mas o processo iterativo pode estagnar num ótimo local. Um ótimo local é uma solução melhor do que muitas outras viáveis, mas pior do que o ótimo global.

#### 5.1.5.1 Estratégias de otimização de processos evolutivos

Foram desenvolvidas diferentes estratégias com vista a evitar a estagnação do algoritmo em ótimos locais [50]. Algumas delas são:

- Reiniciar o processo iterativo, quando a estagnação é detetada;
- Inserir, aleatoriamente, um fator de ruído quando este facto se verifica;
- Manter algumas soluções obtidas, durante o processo evolutivo, em memória para que, no caso de estagnação num ótimo local, estes espaços de soluções sejam evitados;
- Alguns algoritmos recorrem a uma técnica que se chama, na literatura inglesa, de *Multiobjectivisation*. Esta pode tomar duas formas distintas: decompor o problema em pequenos problemas simples, tornando-o num problema multiobjectivo, ou, adicionar funções objetivo, diminuindo a pressão de seleção de indivíduos. Esta técnica, em alguns casos, pode revelar-se eficaz numa fuga aos ótimos locais, mas por outro lado, dificulta a formulação do problema [51];
- Em algoritmos que recorrem ao conceito de população, como é o caso do algoritmo usado, recorre-se à sua capacidade intrínseca de manter a diversidade na população. Este objetivo

atinge-se estudando a parametrização do algoritmo em questão. O estudo feito, no âmbito do problema, apresenta-se no seguimento do texto.

### 5.1.5.2 População

Seguidamente, apresentam-se os resultados das simulações realizadas com vista à análise do impacto da variação do número de elementos da população nas soluções obtidas. A definição deste valor não foi feita teoricamente.

Uma população inicial com mais indivíduos, gerados aleatoriamente, possuirá necessariamente uma maior variedade de informação genética. Assim, em populações mais numerosas existe uma maior probabilidade de encontrar indivíduos melhor adaptados, o que permite um melhor desempenho do algoritmo nas gerações iniciais.

O facto de as soluções iniciais serem soluções viáveis para o problema é importante para estabelecer limites no espaço de soluções, aumentando a probabilidade de sucesso na descoberta do ótimo global [37] [52].

Na Figura 5.4 podem ser encontrados os resultados, melhores indivíduos de cada geração, relativos a 300 gerações. Nestes pode observar-se a evolução do algoritmo para diferentes valores de população: 20, 30, 40, 50, 60 e 70 indivíduos; as simulações foram realizadas para o mesmo cenário, ou seja, planeamento de ações de manutenção de 200 ocorrências e iguais taxas de mutação e seleção, Tabela 5.1.

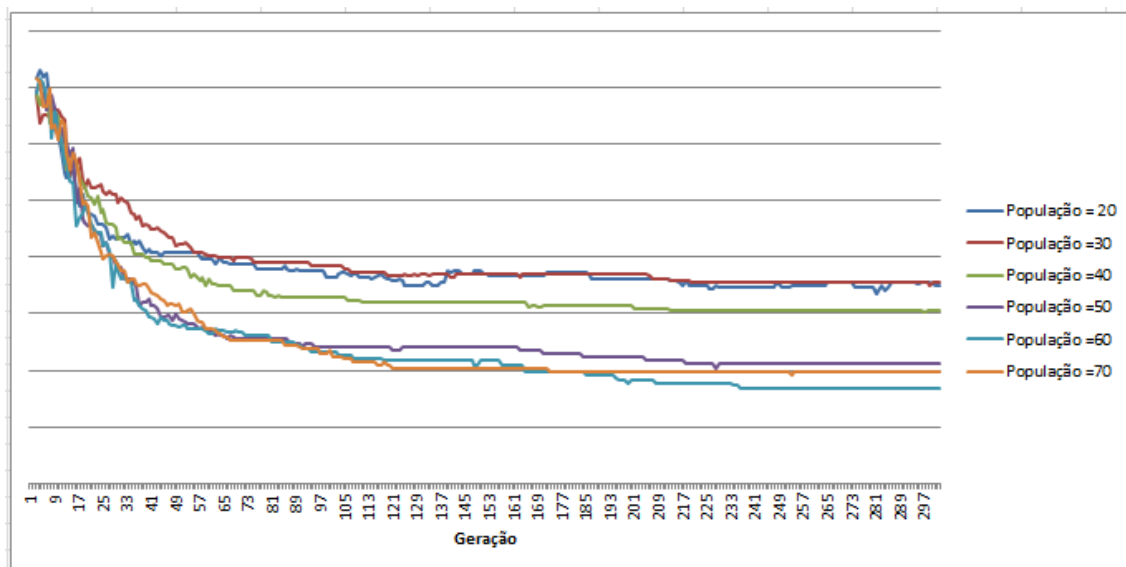


Figura 5.4: Melhor indivíduo ao longo de todo o processo evolutivo.

Pela observação do gráfico da figura 5.5 consegue verificar-se que quanto maior o número de indivíduos da população, mais rápida será a convergência inicial para a solução ótima do problema e menor é a probabilidade de convergência para ótimos locais [53]. No entanto, por exemplo, para a população de 70 indivíduos não se verificam melhorias visíveis no processo iterativo, sendo que

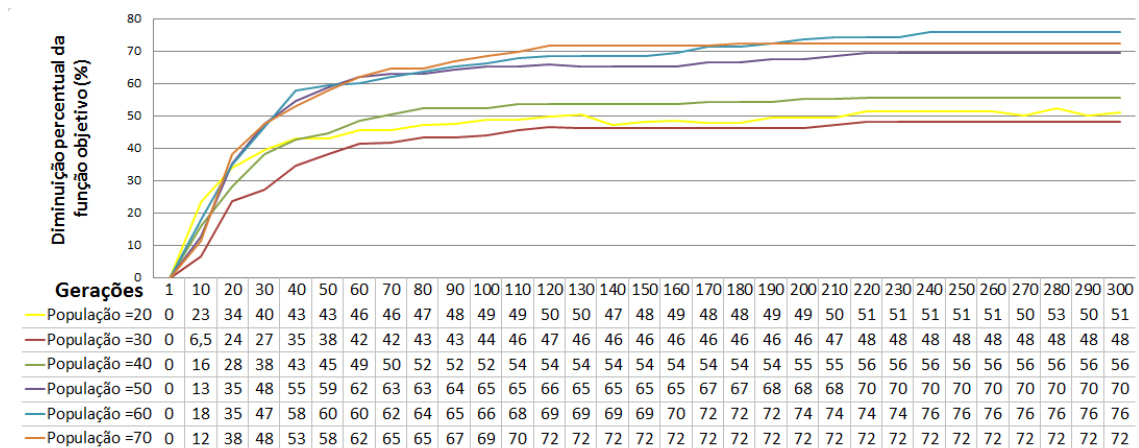


Figura 5.5: Diminuição percentual do custo do melhor indivíduo, em cada iteração.

apenas se verifica um maior tempo de cálculo. A simulação que apresentou um melhor desempenho foi a da população de 60 elementos.

### 5.1.5.3 Taxa de Seleção

A taxa de seleção é outro dos parâmetros que permite controlar e otimizar a *performance* do Algoritmo Genético desenvolvido. Este é o parâmetro utilizado na etapa de seleção. Tal como já foi referido no secção 4.1.1.4 do capítulo 4, deste documento, no algoritmo desenvolvido a seleção é feita na forma de torneio estocástico. Ou seja, na prática a taxa de seleção é a probabilidade com que uma solução menos adaptada ao problema poderá transitar para a geração seguinte, Figura 4.3. Tipicamente usa-se o valor para este parâmetro 0.8 [44].

Tal como foi referido para o caso da variação do número de elementos da população, também neste caso deverá tentar-se encontrar o valor para a taxa de seleção, entre zero e um, que melhor se adapte à problemática em análise.

Quando a taxa de mutação toma um valor muito próximo da unidade, pode acontecer que um conjunto de indivíduos, com elevada adaptação ao problema, domine o conjunto de soluções que transitam para as gerações seguintes. Esta é uma das situações que pode levar ao bloqueamento do algoritmo num ótimo local.

Quando a taxa de seleção é 1, trata-se de uma situação de elitismo, em que apenas as soluções mais adaptadas transitam para a geração seguinte [54]. O elitismo permite que a qualidade da população que transita para a próxima da geração não diminua, podendo resultar numa maior rapidez de convergência. Tal como se verifica nas Figuras 5.6 e 5.7, num pior caso esta pode verificar-se como sendo uma prática pouco eficaz, visto que limita a capacidade que o algoritmo tem para procurar de novas soluções. Deve ser encontrado um balanço entre elitismo e diversidade da população [55].

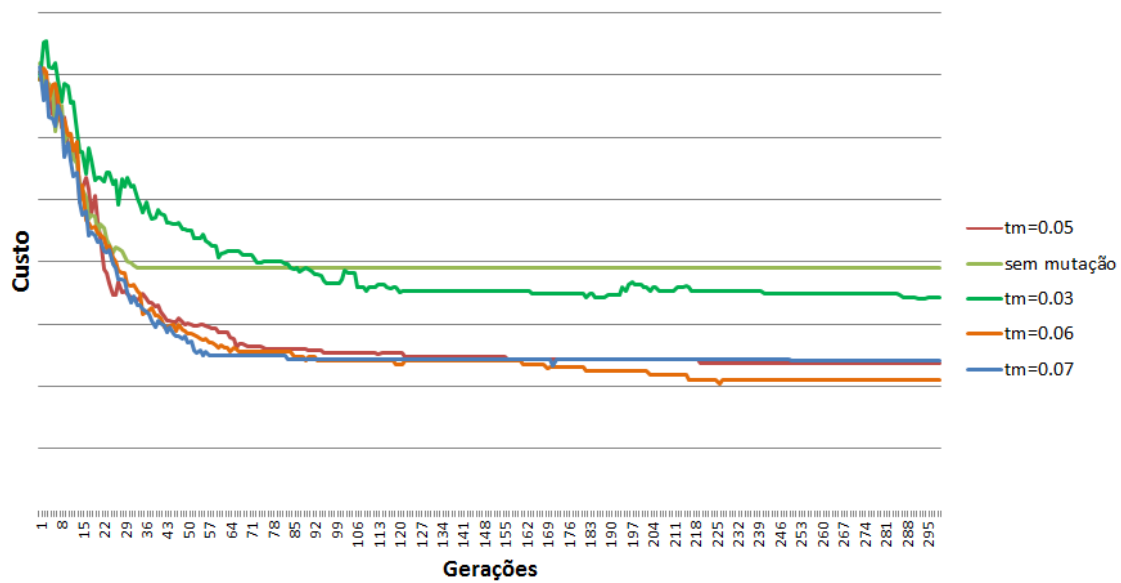


Figura 5.6: Melhor indivíduo de cada geração, para várias taxas de seleção.

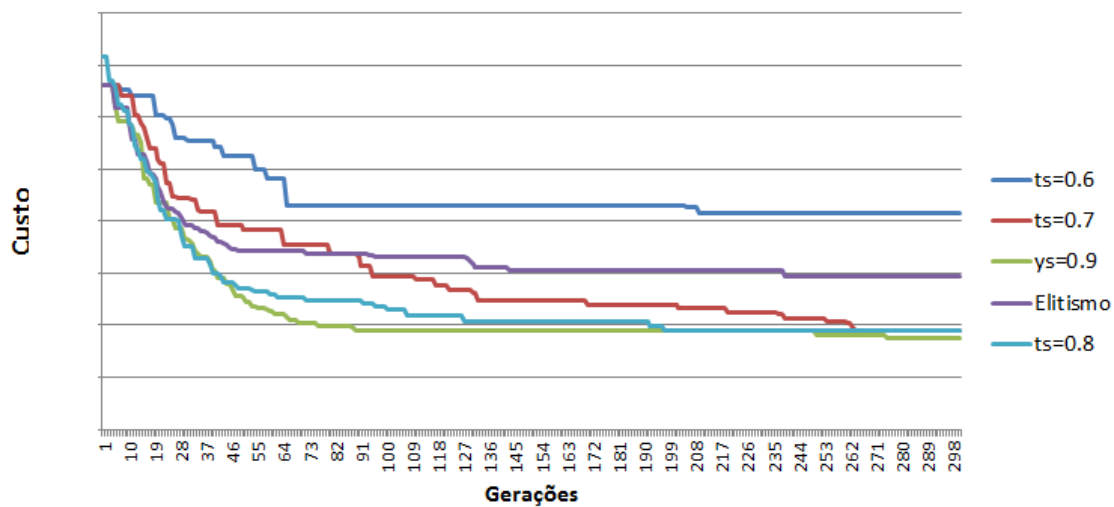


Figura 5.7: Melhor indivíduo processo evolutivo, para várias taxas de seleção.

Como se pode observar nos gráficos das Figuras 5.6 e 5.7, os melhores resultados obtidos são os da taxa com valor igual a 0,9, ainda assim, com resultados muito semelhantes aos obtidos para uma taxa com valor igual a 0,8, que foi usada em todas as simulações apresentadas, até este ponto.

#### 5.1.5.4 Taxa de Mutação

Seguidamente prosseguir-se-á com o estudo da influência que a taxa de mutação possui na eficiente evolução e convergência do algoritmo. Assim, irão ser realizadas simulações com recurso

a diferentes valores da taxa de mutação. A taxa de seleção usada tem o valor de 0.8.

A taxa de mutação é importante na medida em que introduz variedade na população, muitas vezes impedindo a interrupção da progressão do algoritmo em ótimos locais [56]. Este deve ser um parâmetro cuidadosamente escolhido visto que variações, de geração para geração, demasiado pequenas podem levar a estagnação num ótimo local, enquanto que a introdução de variações quando o algoritmo se encontra próximo do ótimo global podem perturbar a sua eficiente convergência [57].

Em parte significativa da bibliografia consultada sobre este assunto, as taxas de mutação a que se faz referência, apresentam valores reduzidos, na ordem os 1% a 5% [55] [41]. No entanto, este, tal como todos os outros parâmetros dos algoritmos genéticos já estudados, deverá ser estudado no âmbito do problema em questão para que o valor que melhor se ajusta possa ser encontrado. Dependendo do algoritmo que interpreta o cromossoma, a nova solução gerada por uma inversão de um *bit*, poderá ou não ficar mais ou menos adaptada do que aquela que lhe deu origem.

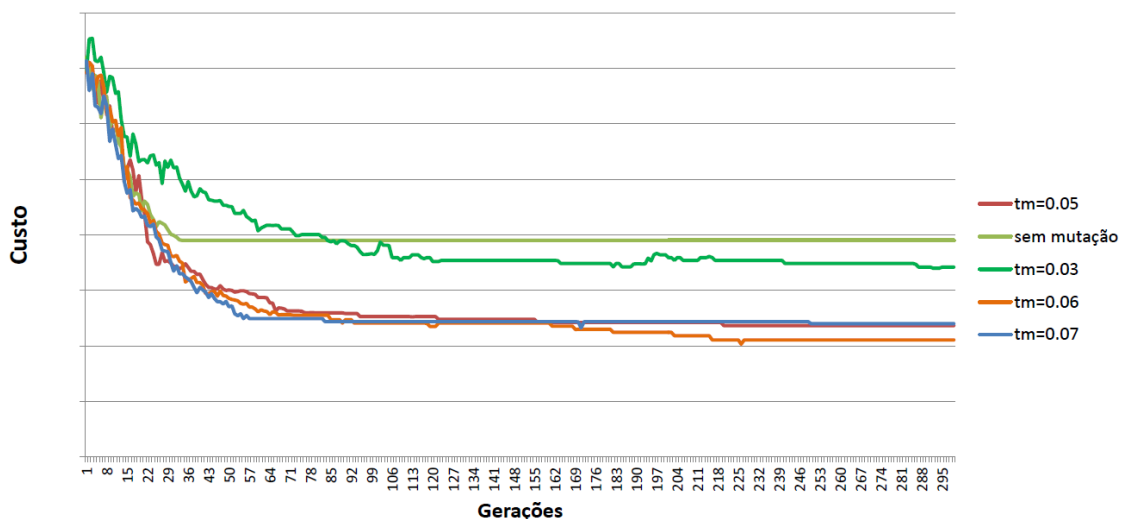


Figura 5.8: Resultados das várias simulações para diferentes taxas de mutação.

No gráfico da Figura 5.8 pode observar-se o resultado obtido para uma simulação em que a taxa de mutação é 0%, ou seja, quando esta não ocorre. Nesta situação é evidente que o algoritmo fica preso num ótimo local, evidenciando-se o que foi referido anteriormente.

Podem ainda observar-se os resultados obtidos para outros valores da taxa de mutação. Para uma taxa de 3% os resultados não foram satisfatórios quando comparados com os obtidos para as taxas de 5% e 7%. Ainda assim, os melhores resultados, foram obtidos para uma taxa de mutação de 6%.

### 5.1.6 Experiência anterior da empresa na resolução do problema

A preocupação pela criação de um procedimento sistemático para tratamento e análise de dados recolhidos nas inspeções a linha, com vista ao planeamento de ações de manutenção, é

recente.

Cronologicamente, a experiência passada da empresa, no que diz respeito a este assunto, pode ser dividida em dois períodos temporais.

Até há cerca de um ano atrás, os dados recolhidos nas inspeções eram analisados visualmente, sem ajuda de qualquer ferramenta computacional. Os colaboradores responsáveis pelo planeamento das ações de manutenção, conhecedores da regulamentação, assinalavam manualmente as situações mais críticas que neste trabalho são rotuladas com a classe de gravidade A, ou até mesmo irregulares. Este método revelou-se pouco eficaz e eficiente, visto que era lento e muita da informação era subaproveitada.

Tal como já foi referido na secção 3.2.1, mais recentemente, na EDP Distribuição foi concebido um modelo de forma a aproveitar e planear mais eficientemente ações de manutenção.

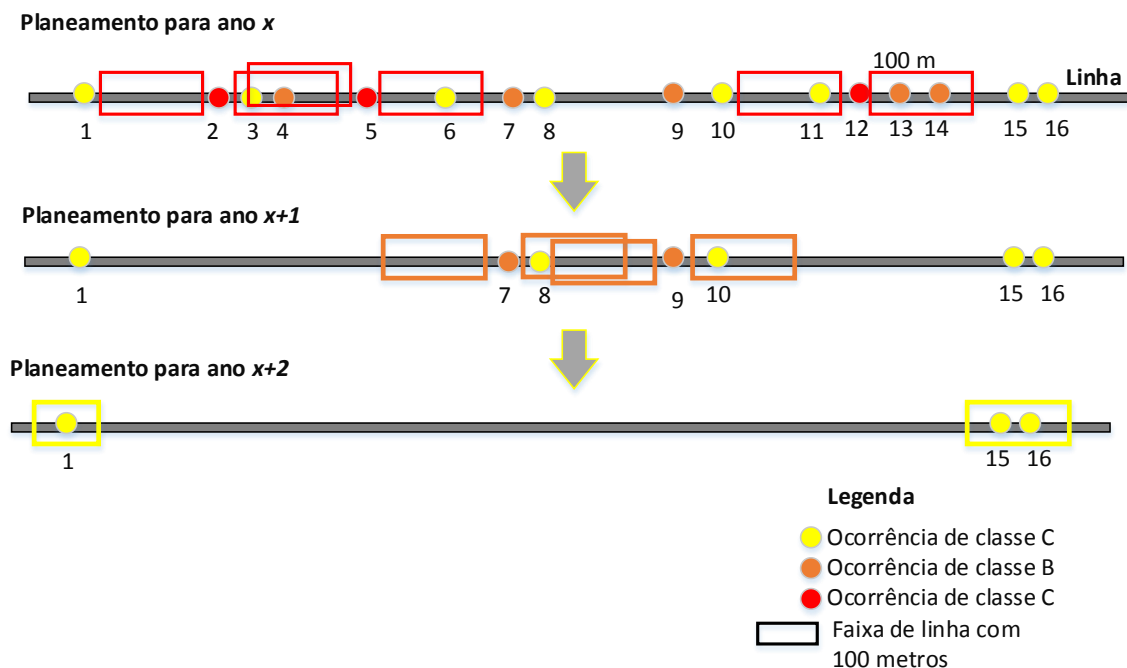


Figura 5.9: Modelo atualmente em uso pela EDP Distribuição.

Ano	Ocorrências com ação de manutenção planeada
$x$	2, 3, 4, 5, 6, 11, 12, 13, 14
$x+1$	7, 8, 9, 10
$x+2$	1, 15, 16

Tabela 5.2: Ano em que as ocorrências ilustradas na figura 5.9 ficam com manutenção planeada.

Na figura 5.9 encontra-se ilustrada a forma como opera o modelo de planeamento atualmente em uso pela EDPD:

1. Todas as ocorrências que se encontram a uma distância inferior a 100m das ocorrências de classe A, ficam com manutenção agendada para o ano  $x$ .
2. Excluem-se todas as ocorrências já com manutenção agendada e repete-se o processo para o ano  $x+1$ .
3. Excluem-se todas as ocorrências já com manutenção agendada e repete-se o processo para o ano  $x+2$ .

Desta forma, contrariamente ao que se verificava no passado, nenhuma informação recolhida nas inspeções é negligenciada.

A definição dos 100m como distância limite foi feita de forma empírica, e por isso não se garante que a solução que se alcança com este modelo é a melhor possível.

## 5.2 Soluções do problema

Como já foi referido na secção 4.4.1, apenas as ocorrências com origem na vegetação, e portanto, classificadas com o rótulo "Árvores" serão processadas. O número de ocorrências que cada amostra contém é conhecido, mas é importante saber, nem que seja apenas estimativamente, o número de ocorrências que são alvo deste estudo.

Amostra	Total de Ocorrências	Ocorrências do tipo "Árvores"
1	100	90%
2	200	86.5%
3	500	88.6%
4	1000	90.2%

Tabela 5.3: Percentagem de amostras do tipo "Árvores" em diferentes amostras.

Como se pode observar na Tabela 5.3, só cerca de 90% das ocorrências recolhidas na inspeção de uma linha têm origem na vegetação.

Foi feita uma simulação para a amostra de 200 elementos com vista à análise da solução final obtida e também, de forma a poder comparar a vantagem deste método com os métodos que se encontravam e encontram em prática na empresa. Os parâmetros com que esta simulação foi realizada podem ser consultados na Tabela 5.4.

Para que se possa interpretar melhor os resultados práticos obtidos para a resolução do problema, ficam em seguida as percentagens de cada classe de gravidade das ocorrências que constituem.

Como se pode observar na figura 5.10, a menor percentagem pertence à classe A, este valor é reflexo dos esforços da EDP D na manutenção das faixas de serviço das linhas da RND.

Tal como seria espectável, nos gráficos das Figuras 5.10, 5.11 e 5.12 podem observar-se algumas questões que se consideram como sendo relevantes, para que, mais uma vez, possa assinalar-se a eficácia deste algoritmo na resolução do problema proposto.

Parâmetro	Valor
Número máximo de gerações	1000
População	50
Taxa de seleção	0.9
Taxa de mutação	0.06
Número de ocorrências a processar	200

Tabela 5.4: Parâmetros usados para obtenção da solução final.

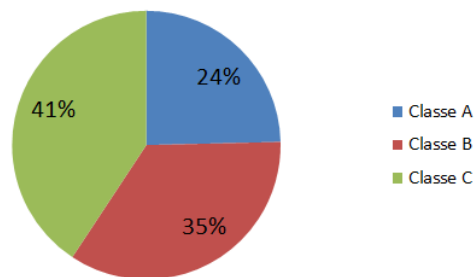


Figura 5.10: Percentagem de cada classe de gravidade da amostra das 200 ocorrências em análise.

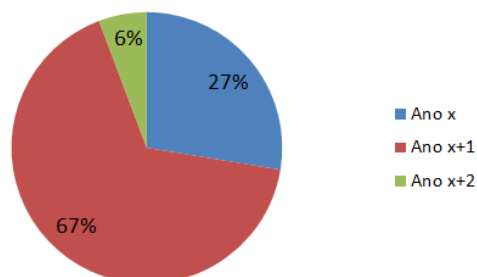


Figura 5.11: Percentagem anual relativa ao ano em que cada ação corretiva fica agendada.

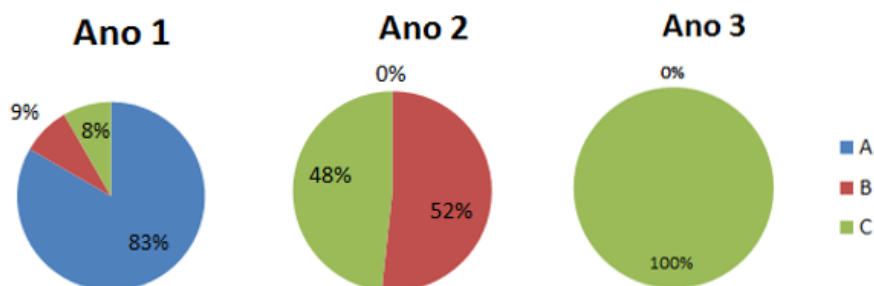


Figura 5.12: Percentagem da classe de intervenções planejadas em cada ano.

As restrições temporais impostas, e referidas no capítulo 3, são respeitadas na medida em que:

- Ocorrências de **classe A** planeadas apenas para o ano  $x$ ;
- Ocorrências de **classe B** planeadas apenas para para os anos  $x$  e  $x + 1$ ;
- Ocorrências de **classe C** não possuem restrições temporais associadas.

A maior percentagem de ações de manutenção ficou agendada para o ano  $x + 1$ . O que se verificou atribui-se ao facto de as ocorrências de classe B serem a maioria, na amostra em análise.

À medida que os anos ficam mais distantes, também o número de ações agendadas poderá diminuir. Isto pode acontecer porque cada vez são menos as ocorrências que, por restrições temporais do problema, poderão ser agendadas.

Considerando que  $p_{decote}$  é o preço por ação em modo de decote,  $p_{faixa}$  é o preço por quilometro de uma ação em modo de faixa e  $d$  é a distância entre os dois pontos limites de uma faixa. Para que seja mais rentável realizar duas ações como decote ao invés de as realizar como uma só faixa, é necessario que se verifique a seguinte condição:

$$2 \times p_{decote} \leq p_{faixa} \times d \quad (5.1)$$

Ou seja,

$$\frac{2 \times p_{decote}}{p_{faixa}} \leq d \quad (5.2)$$

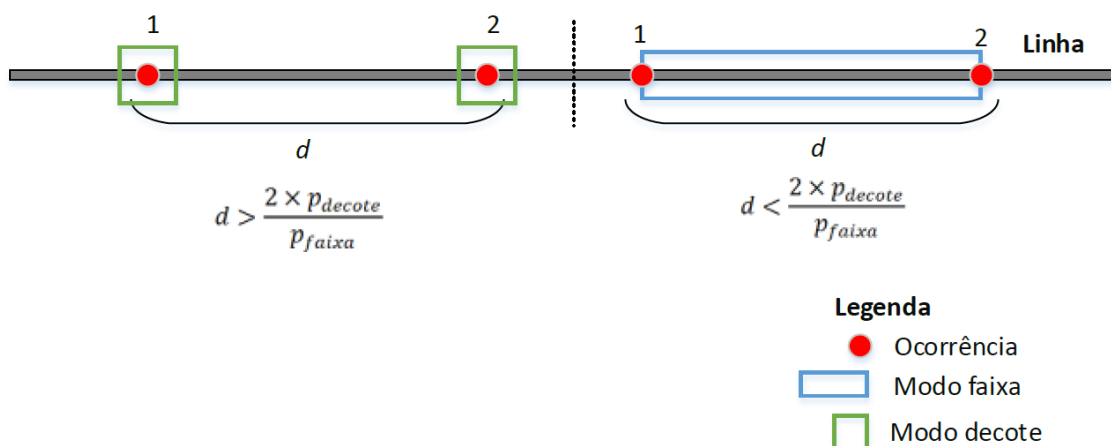


Figura 5.13: Esquema ilustrativo da distância crítica  $d$ .

Na Figura 5.14 pode observar-se o resultado obtido pela aplicação do actual modelo em vigor na empresa, e do novo modelo desenvolvido. Conhecendo a relação entre os valores de  $p_{decote}$  e  $p_{faixa}$  por quilometro consegue-se comparar o preço final de cada uma das soluções.

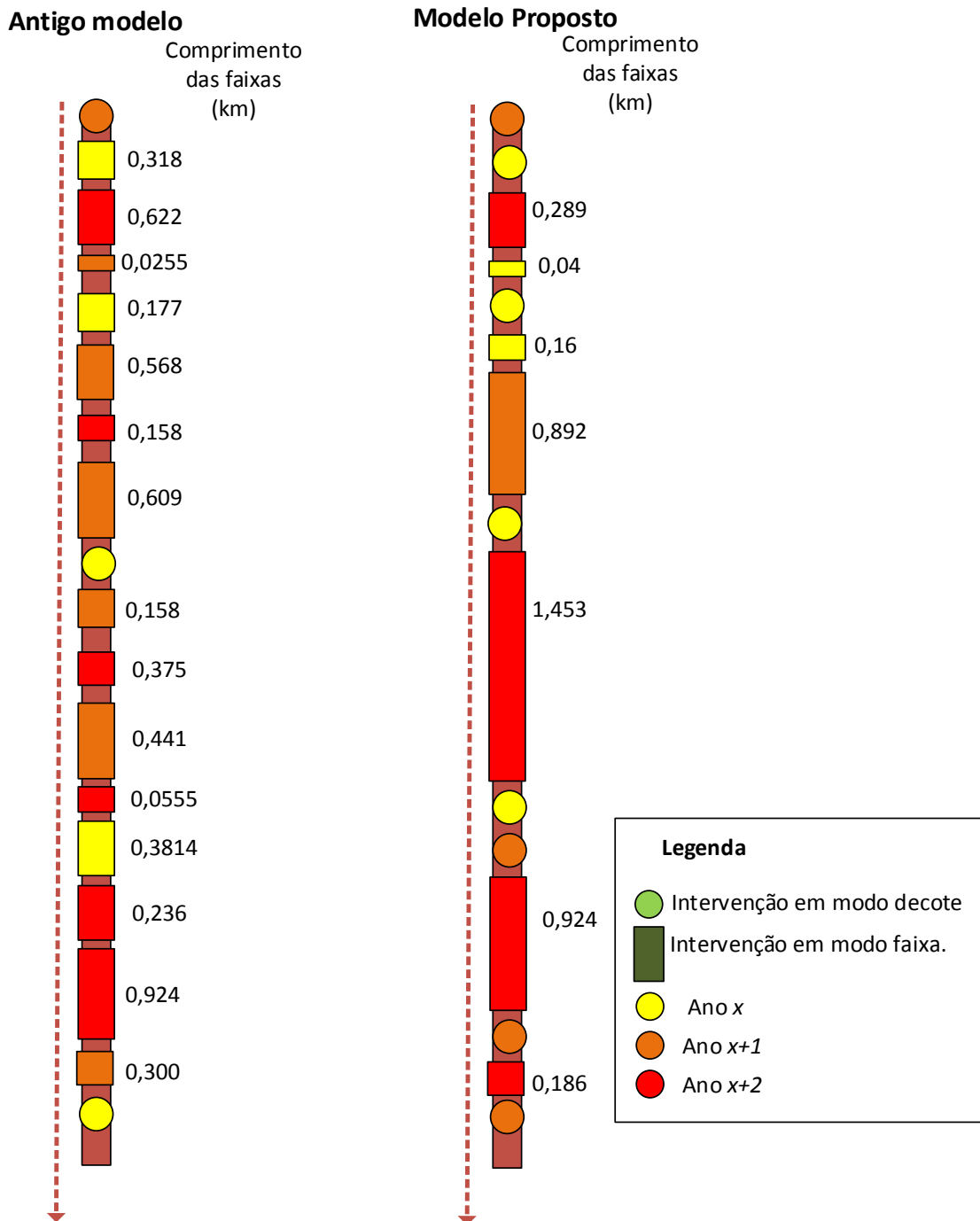


Figura 5.14: Comparação entre os resultados finais para a amostra considerada, obtidos com os dois modelos.

A relação entre os dois preço é dada pela expressão:

$$p_{faixa} = 10,26 \times p_{decote} \quad (5.3)$$

Conhecendo a relação apresentada na 5.3, é possível comparar os resultados obtidos com

	<b>Antigo Modelo</b>	<b>Modelo Proposto</b>
<b>Faixa (km)</b>	5,34	3,34
<b>Decotes</b>	3	8

Tabela 5.5: Resumo dos resultados obtidos, com os dois modelos, para a mesma amostra de ocorrências.

cada um dos modelos. As expressões dos custos totais das soluções, apresentadas na Figura 5.14, podem ser consultadas em seguida.

$$\text{ModeloAntigo} : 5.34 \times p_{faixa} + 3 \times p_{decote} = 57.79 \times p_{decote} \quad (5.4)$$

$$\text{ModeloProposto} : 3.34 \times p_{faixa} + 8 \times p_{decote} = 42.268 \times p_{decote} \quad (5.5)$$

Como se pode observar, pelas expressões finais relativas aos custos de manutenção, o custo de manutenção resultante da aplicação do modelo proposto baseado em Algoritmos Genéticos permite a obtenção de uma planificação com custos mais reduzidos. Reduz-se o custo total da solução final, para a amostra considerada, em cerca de 25%.

Analisando as diferenças entre as propostas conseguidas pelos dois métodos conseguem verificar-se as seguintes diferenças:

- Com o novo modelo, diminui-se o número de segmentos relativos a faixas, mas estes apresentam um maior comprimento;
- Maior número de ações corretivas em modo de decote.

### 5.2.1 Aplicação do modelo que contempla taxa de crescimento da vegetação

No Capítulo 4 foi apresentada a formulação de um modelo que contempla a taxa de crescimento da vegetação no cálculo da sua classe de gravidade. Neste ponto proceder-se-á à realização de simulações com o novo modelo. Para que os resultados obtidos com este modelo possam ser comparáveis com dos do modelo anteriormente apresentado, as simulações foram realizadas em condições iguais às apresentadas em 5.4.

Ao se introduzir a taxa de crescimento da vegetação no modelo, pretende-se estudar os seguintes aspetos:

- Comparação entre as classificações relativas à classe de gravidade das ocorrências, relacionadas com vegetação, e o sistema baseado nos limites impostos anteriormente;
- Perceber se algumas das ações de manutenção de algumas ocorrências, referentes a vegetação com baixa taxa de crescimento, são excluídas da planificação para horizonte temporal de 3 anos;

- Perceber alterações na distribuição das ações pelos 3 anos em planeamento.

A identificação da espécie do tipo de árvore que se encontra nas imediações da linha pode ser feita de duas formas: deteção automática por LiDAR ou então por localização geográfica da linha. A primeira, trata-se de um tipo de uma funcionalidade do LiDAR, que através da delineação das copas das árvores consegue identificar a sua espécie, no entanto, esta é uma tecnologia ainda pouco precisa e requer uma grande capacidade e tempo de processamento [6]; ainda não é usada pela EDP Distribuição. Já a segunda opção, é mais viável e encontra-se em processo de implementação. Esta baseia-se na associação de um tipo de espécie, a uma dada aérea florestal onde se encontra parte do traçado da linha aérea. Neste trabalho, a classificação foi feita agrupando as espécies de árvores em três categorias: árvores de crescimento rápido, árvores de crescimento médio e, por fim, árvores de crescimento lento.

Na Tabela seguinte podem observar-se os valores médios de crescimento para cada tipo de árvore considerada.

Classe de crescimento	Taxa média de crescimento (m/ano)
Rápido	1
Médio	0.5
Lento	0.2

Tabela 5.6: Taxas de crescimento, em metros, para cada as três classes de árvore consideradas.

Para a mesma amostra de ocorrências registadas, serão feitas simulações para o recalcular das classes de gravidade considerando os três tipos de vegetação referidos na Tabela 5.6.

Na Figura 5.15 observam-se as percentagens de classe de gravidade, antes da aplicação das taxas de crescimento. O troço em estudo faz parte de uma linha aérea de 30kV. Na Tabela 5.7 podem ser lembrados os limites, de cada classe, impostos para este nível de tensão, para obstáculos do tipo Natureza e Outros.

Classe de gravidade		
A	B	C
2,5	4	5

Tabela 5.7: Distâncias limite para cada classe de gravidade de uma linha de 30kV

Com vista a uma maior facilidade na análise do impacto da aplicação das taxas de crescimento, em cada simulação realizada considerou-se que todas as árvores da área atravessada pela linha, pertencem à mesma classe de rapidez de crescimento: rápido, médio ou lento.

Analisando os gráficos das figuras 5.16 5.17 e 5.18 é possível concluir os seguintes pontos:

- Quando a taxa de crescimento é rápida, algumas das ocorrências vêm a sua classe de gravidade agravada, ou seja, encontrar-se-ão numa situação irregular antes do previsto nos limites atualmente em vigor;

### Sem aplicação de taxa de crescimento

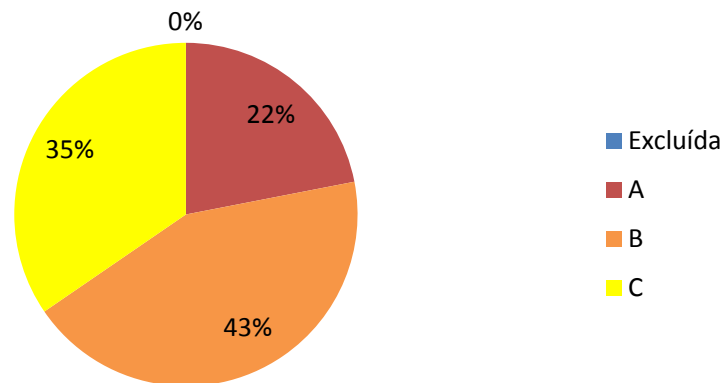


Figura 5.15: Percentagem de cada classe de gravidade da amostra das 200 ocorrências em análise.

### Aplicação de taxa de crescimento rápido

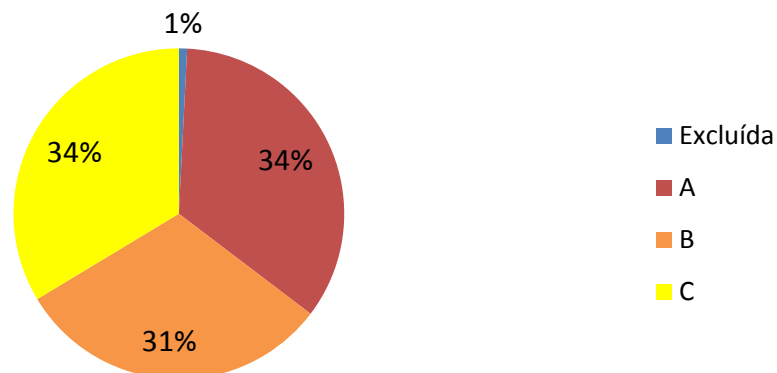


Figura 5.16: Percentagem de cada classe de gravidade da amostra das 200 ocorrências em análise.

- Quando as taxas de crescimento aplicadas foram a média e a lenta, verificou-se que uma significativa percentagem de ocorrências foi excluída do planeamento. Conhecendo com exatidão as taxas de crescimento da vegetação numa dada área poder-se-á evitar a concretização de ações de planeamento desnecessárias.

Este é o único ponto que se considera relevante para análise deste modelo, visto que apenas a classificação da gravidade das ocorrências difere do que foi apresentado na análise dos resultados do modelo anteriormente apresentado.

### Aplicação de taxa de crescimento médio

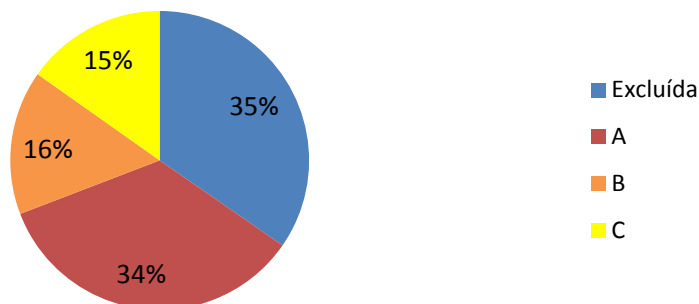


Figura 5.17: Percentagem de cada classe de gravidade da amostra das 200 ocorrências em análise.

### Aplicação de taxa de crescimento lento

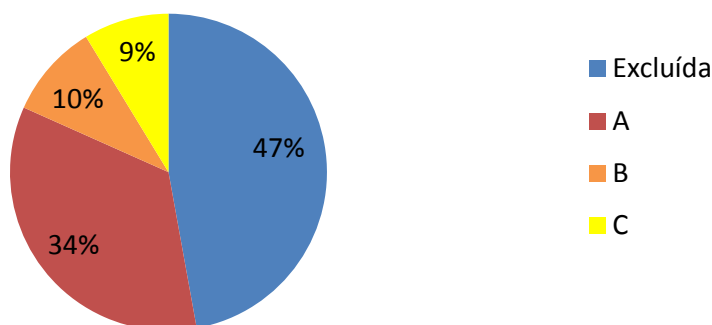


Figura 5.18: Percentagem de cada classe de gravidade da amostra das 200 ocorrências em análise.

## 5.3 Síntese

Neste capítulo apresentou-se os resultados da aplicação do método computacional desenvolvido a uma amostra de 200 ocorrências.

Depois de ter sido feito um estudo, sobre a melhor parameterização do algoritmo para o problema, chegou-se a uma combinação de parâmetros que se refletiu numa melhor convergência dos resultados obtidos.

A solução obtida com o modelo proposto nesta dissertação, revelou-se superior à que se encontra atualmente em prática na empresa.

Os resultados obtidos, quando é aplicado o modelo que contempla a taxa de crescimento das árvores, ainda que de forma simplificada, revelaram que esta poderá ser uma área a investir, visto que em alguns casos, diminuiu-se o número de ocorrências a corrigir, o que diretamente implica a

redução de custos envolvidos,



# Capítulo 6

## Conclusão

### 6.1 Síntese e Conclusões

Analisando o trabalho apresentado neste documento, conclui-se que os objetivos inicialmente fixados e apresentados no seu primeiro capítulo foram atingidos com sucesso.

No segundo capítulo, apresentou-se o resultado da pesquisa realizada com vista a conhecer o que foi feito no passado, o que se faz no presente e quais são as perspetivas futuras para as inspeções a linhas aéreas. Este conhecimento, juntamente com os conceitos de gestão e otimização da manutenção também aí apresentada uma abordagem mais sustentada sobre todo o processo de inspeção de linhas por helicóptero, tal como se apresentou no terceiro capítulo. Com a observação direta de uma ação de inspeção e uma visita às instalações do Labelec, ele permitiu também identificar algumas oportunidades imediatas de melhoria de processos.

Desde o momento do planeamento das ações de inspeção até ao momento de concretização das ações corretivas aos defeitos e irregularidades encontrados, foram identificadas situações em que pequenas alterações podem vir a verificar-se como sendo vantajosas.

Nomeadamente, no que se refere aos esquemas unifilares. Pontualmente, verificou-se que os unifilares usados pelas equipas de inspeção, devido a reconfigurações na rede, não se encontram atualizados, por isso deveria haver uma maior sincronização entre a base de dados da empresa e a base de dados da Labelec, de forma a evitar contratemplos.

Durante as inspeções aéreas por helicóptero, a consulta aos unifilares da rede é feita em papel. Como no papel não se encontram representadas todas as linhas da rede, quando há cruzamentos entre linhas, por vezes é difícil identificar qual a direção certa que a linha a ser inspecionada segue. Por outro lado, toda a informação relativa às linhas encontra-se carregada na plataforma Google Earth enquanto o helicóptero encontra-se equipado com GPS. O que se propõe é que, para além da clássica consulta do unifilar em papel, também se encontrem carregadas no sistema as imagens de satélite da linha, onde a linha em análise, assim como as outras linhas que se cruzam, se encontrem claramente assinaladas.

Outro aspeto a ter em atenção prende-se com a classificação dos obstáculos. O processamento atualmente empregue permite classificar em quatro categorias os obstáculos que se encontram a

distâncias irregulares da linha, mas muitas vezes esta identificação é feita de forma errada. Este facto implica um grande investimento de tempo no processamento da informação recolhida, de forma manual. Sugere-se um investimento na melhora da robustez do algoritmo usado na identificação de obstáculos.

Adicionalmente, seria vantajoso que fosse acrescentada informação aquando da identificação de obstáculos classificados como vegetação. Tal como foi referido no texto, existem técnicas de análise de imagem de LiDAR que, através da análise da forma da copa da árvore, permitem a determinação da sua espécie. Com esta informação, e conhecendo a posição relativa do obstáculo relativamente à linha, inferior ou lateral, será possível determinar com maior precisão qual o momento em que no futuro está será potencialmente uma causa de falha na rede.

No que diz respeito à aplicação informática que foi desenvolvida com base em Algoritmos Genéticos, ela mostrou-se competente para solucionar o problema proposto, com vantagens significativas em termos de eficácia da solução alcançada, em comparação com os processos anteriormente seguidos na empresa, tal como se evidenciou ao quinto capítulo. Com base na parametrização inicialmente realizada ao algoritmo, o caso de estudo tratado mostra bem a superioridade da solução apresentada. Apesar disso, existem certos pontos em que o algoritmo poderia ser eventualmente melhorado, especialmente no que se refere aos seguintes aspetos:

- Poderia ser criado um sistema com vista à adaptação de todos os parâmetros do algoritmo ao número de ocorrências a processar. Potencialmente, esta medida poderia melhorar a velocidade de convergência do algoritmo quando se regista um número anormalmente elevado de ocorrências para processar.
- A taxa de mutação aplicada na construção do algoritmo genético desenvolvido é sempre constante, no entanto existem estudos que defendem que uma taxa de mutação decrescente e próxima de zero nas proximidades do ótimo global melhora a performance do processo evolutivo [44] [57].
- O algoritmo usa um mecanismo de seleção baseado na técnica do torneio estocástico. Contudo, existem muitos outros métodos para este efeito e um deles poderá revelar-se mais adequado ao problema em questão.
- No modelo que incluiu a taxa de crescimento das árvores, poderia ser vantajoso aumentar o horizonte temporal da programação de intervenções de manutenção, para que nenhuma ocorrência fosse excluída do planeamento, sendo apenas agendada a sua eliminação para mais tarde.
- Como se pôde verificar, a solução desenvolvida é caracterizada por uma solução final em que a quantidade de ocorrências que ficam com correção agendada em modo de decote é muito inferior ao mesmo número relativo ao modo em faixa. Assim, com vista a uma mais rápida e eficiente convergência, sugere-se que a inicialização dos indivíduos da população inicial seja feita de uma maneira diferente. A uma ocorrência pode ser atribuído o modo

faixa, ou o modo decote com igual probabilidade. O que se sugere é que o modo faixa seja atribuído com uma maior probabilidade, de forma a que a população inicial já se encontre mais próxima do ótimo global.

- Sugere-se ainda a criação de um modelo com base semestral, ao invés do modelo com base anual que foi construído. Tal como se referiu, existem espécies protegidas por uma legislação específica que impede o seu corte em determinados meses do ano, pelo que, ao planear as intervenções de manutenção, ter-se-ia em conta que certas ações só poderiam ser planeadas para certos semestres. Este é um modelo que só será vantajoso quando se conseguir com exatidão determinar a espécie da árvore que esta na origem de cada ocorrência.

Ou seja, existem aspetos que não se conseguiram contemplar no modelo computacional que se desenvolveu e se apresentou no presente trabalho, alguns deles, afinal, só identificados através da própria experiência ganha com a realização do mesmo. Contudo, mesmo com a estrutura apresentada, os resultados alcançados já foram bastante satisfatórios quando comparados com os obtidos recorrendo ao método anterior em uso, nomeadamente ao nível do aspeto mais crítico para a Empresa: as soluções aqui alcançadas preconizam uma redução de custos de manutenção da linha testada de cerca de 25%, o que, tendo consciência dos enormes encargos que estas operações implicam, constitui um benefício muito significativo e aconselha a sua extensão a outras linhas.

Por isso, e por se considerar também que ainda há muito espaço para novos e inovadores trabalhos no âmbito da otimização da gestão de ativos na EDP Distribuição, salienta-se o sucesso da introdução de uma técnica inovadora de otimização na resolução de um problema que antes era solucionado empiricamente. Espera-se, também, que este tenha sido um primeiro passo para aplicação desta ou de outra meta-heurística semelhante na resolução de novos problemas do âmbito do planeamento de ações de manutenção, abrindo um grande campo de oportunidades para a aplicação dos Algoritmos Genéticos, tal como se fez no problema que foi proposto.

## 6.2 Perspetivas de trabalho futuro

Apesar de, na secção anterior, se terem avançado já algumas sugestões quanto à continuação do presente trabalho, especialmente no que se refere à eficiência do algoritmo desenvolvido, onde se poderá tentar a melhoria da sua *performance*, existem várias hipóteses para a continuação do presente trabalho, das quais destacam-se estas duas:

- Aplicação do modelo desenvolvido a outras linhas, para além daquela aqui estudada, com vista à melhor clarificação da margem de ganhos efetivamente conseguidos com a programação das operações de manutenção de linhas AT e MT da EDP D baseada nos resultados assim obtidos, comparativamente às estatísticas do passado.
- Incorporação no algoritmo desenvolvido de um modelo de previsão para a taxa de crescimento de cada árvore de acordo com a sua localização geográfica, pois, mesmo para uma mesma espécie, essa localização é um fator determinante para a sua taxa de crescimento.

Este modelo poderia, por exemplo, basear-se na construção de uma rede neuronal e poderia conduzir a reduções suplementares nos custos de manutenção das linhas.

# Referências

- [1] Eng. João Torres. O caso da edp distribuição. caminhos para melhor qualidade de serviço, Maio 2012. EDP Distribuição.
- [2] Carl L. Benner e B. Don Russel Jeffrey Wischkaemper. *Electrical Characterization of vegetation Contacts with distribution conductors - Investigation of progressive fault behavior*. 2008.
- [3] Sebastião do Amaral Machado Flavio Felipe Kirchner e Marco Marchetti Marcos Gionco, Henrique Soares Koehler. Lidar: princípios e aplicações florestais. 2010.
- [4] HiBot. *Expliner - Robot for power line inspection*, 2013.  
URL: [http://www.hibot.co.jp/en/products/robots\\_1/expliner-robot-for-power-line-inspection\\_12](http://www.hibot.co.jp/en/products/robots_1/expliner-robot-for-power-line-inspection_12).
- [5] e Tae-Kyoo Oh Sung-Hwan Song, Sang-Ho Lee.
- [6] L. Zhengrong-R. Hayward L. Meijas e R. Walker J. Mills, M. P. Gerardo Castro. *Evaluation of Aerial Remote Sensing Techniques for Vegetation Management in Power-Line Corridors*. 2010.
- [7] Regulação da qualidade de serviço em portugal, Maio 2012. Entidade Reguladora de Serviços Energéticos.
- [8] EDP Distribuição. *Smartlife II, Distribution OHL, Pruning and Cutting*, Setembro de 2012. Lisboa.
- [9] EDP Distribuição. Obras de construção, reparação e manutenção de redes de distribuição at, mt e bt, 2009. Portugal.
- [10] Patrik Hilber. *Maintenance Optimization for Power Distribution Systems*. Tese de doutoramento, Royal Institute of Technology, 2008.
- [11] Direção Geral de Energia. Regulamento de segurança de linhas elétricas de alta tensão, Abril 1993. Lisboa, Portugal.
- [12] I lei dos aproveitamentos hidráulicos, 1926. Portugal.
- [13] Decreto de lei, 1975.
- [14] J. L. Pereira da Silva e M. T. Ponce Leão J. P. Tomé Saraiva. *Mercados de Electricidade - Regulação e Tarificação do Uso das Redes*. FEUP Edições, 1ª edição edição, 2002.
- [15] Portal erse - actividades do sector, 2013. URL: <http://www.erse.pt/pt/electricidade/actividadesdosector/Paginas/default.aspx>.

- [16] Portal erse - produção, 2013. URL: <http://www.erse.pt/pt/electricidade/actividadesdosector/producao/Paginas/default.aspx>.
- [17] Portal erse - transporte, 2013. URL: <http://www.erse.pt/pt/electricidade/actividadesdosector/transporte/Paginas/default.aspx>.
- [18] Portal erse - comercialização, 2013. URL: <http://www.erse.pt/pt/electricidade/actividadesdosector/comercializacao/Paginas/default.aspx>.
- [19] A edp distribuição, 2013. URL: <http://www.edpdistribuicao.pt/pt/edpDistribuicao/Pages/aEDPDistribuicao.aspx>.
- [20] Diário da república, 1ª série n.º 186, 2009. Anexo - Código Florestal.
- [21] J. Neves dos Santos e J. R. Ferreira. Redes de distribuição de energia elétrica em baixa tensão, Novembro de 2004. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- [22] Entidade Reguladora de Serviços Energéticos. Relatório da qualidade de serviço do setor elétrico 2011, Setembro de 2011. Portugal.
- [23] Wenhui Wang e J Geoffrey Chase Mostafa Nayyerloo, XiaoQi Chen. *Cable-Climbing Robots for Power Transmission Lines Inspection*. 2009.
- [24] Poss Hayward Jinglan Zhang e Jinhai Cai Zhengrong Li, Yuee Liu. *Knowledge-based Power Line Detection for UAV Surveillance and Inspection Systems*. 2008.
- [25] Israel Gondres Torné e Santiago Lajes Choy. *Considerations about the Maintenance in Electrical Networks*. 2006.
- [26] D. I. Jones e G. K. Earp C. C. Whitworth, A. W. G. Duller. *Aerial video inspection of overhead power lines*. Junho 2005.
- [27] Kazhong Deng Zhengjun Liu e Qunshan Shi Jing Liang, Jixian Zhang. *A New Power-Line Extraction Method Based on Airborne LiDAR Point Cloud Data*. Agosto 2011.
- [28] EDP Valor Direção de Segurança e Saúde. Manual de segurança. prevenção do risco elétrico, Agosto 2011. Portugal.
- [29] ALBATROZ Engenharia. *Power Line Maintenance Inspection: Inspeccionar 1346km de linhas de transmissão em 15 dias*, Janeiro 2008. Portugal.
- [30] Vaughan ON Canada ; Theriault L. ; Sitar M. ; Kou T. Ussyshkin, R.V. ; Optech Inc. *Advantages of Airborne Lidar Technology in Power Line Asset Management*. Janeiro 2011.
- [31] M. Nilsson. *Estimation of Three Heights and Stand Volume Using an Airborne LiDAR System. Remote sensing of Environment*. 1996.
- [32] e Bostjan Likar Jaka Katrasnik, Franjo Pernus. *New Robot for Power Line Inspection*. 2008.
- [33] Binhai Wang Jingjing Zhang Liang Liu Qiang Wang e Chuanhu Wei Gang Dong, Xiguang Chen. *Inspecting Transmission Lines with an Unmanned Fixed-wings Aircraft*. 2012.
- [34] F. Lijin Z. Mingyang e Z. Jiping W. Ludan, W. Hongguang. *Research on Obstacle-navigaton control of a mobile robot for inspection of the power transmission lines based on expert system*. 2006.

- [35] Liqun Gao Ping Ren e Yang Li Zhiling Lin, Dapeng Zhang. *Application of Analytic Hierarchy Process in Power Lines Maintenance*. 2006.
- [36] *What is PAS 55?*, 2013. URL: <http://pas55.net/whatis.asp>.
- [37] Neil Eklund e Thomas R. Kiehl Piero P. Bonissone, Raj Sabbu. *Evolutionary Algorithms+ Domain Knowledge= Real World Evolutionary Computation*. Jun 2006.
- [38] P. J. Sellers R. B. Myneni, F. G. Hall e A. L. Marshak. *The interpretation of spectral vegetation indexes*. 2002.
- [39] J. Zhang Z. Li, R. Hayward e Y. Liu. *Individual tree crown delineation techniques for vegetation management in power line corridor*. 2008.
- [40] R. ; Mejias L. Walker, R. ; Hayward. *Advances in vegetation management for power line corridor monitoring using aerial remote sensing techniques*. 2010.
- [41] R. ; Ali S. Waqas, K. ; Baig. *Feature subset selection using multi-objective genetic algorithms*. 2008.
- [42] Walsh MJ Fogel LJ, Owens AJ. *Artificial intelligence through simulated evolution*. Wiley, New York, 1ª edição edição, 1966.
- [43] Outi Raiha. *Applying Genetic Algorithms in Software Architecture Design*. Tese de doutoramento, University of Tampere, 2008.
- [44] Vladimiro Miranda. *Computação evolucionária: uma introdução*, Março, 2005. Portugal.
- [45] Matthew Bartschi Wall. *A Genetic Algorithm for Resource-Constrained Scheduling*. Tese de doutoramento, Massachusetts Institute of Technology, 1996.
- [46] Y. Lee e A. M. El-Sharkawi. *Modern heuristic optimization technics - theory and applications to Power Systems*. John Wiley and Sons, Inc., 2008.
- [47] Stephen Marshall David Greenhalgh. *Convergence Criteria for Genetic Algorithms*. 2000.
- [48] Nadeem Bari Samuel Idowu. *A Development Framework for Smart City Services*. Tese de mestrado, Lulea University of Technology, Department of Computer Science, Electrical and Space Engineering, November 13, 2012.
- [49] J. Wischkaemper W. Jewell D. B. Russel, C. L. Benner e J. McCalley. *Reliability based vegetation management through intelligent system monitoring*. 2007.
- [50] Carlos Segura Eduardo Segredo e Coromoto Leon. *Analysing the Robustness of Multiobjectivisation Parameters with Large Scale Optimisation Problems*. 2012.
- [51] R. A. Watson J. D. Knowles e D. Corne. *“Reducing Local Optima in Single-Objective Problems by Multi-objectivization*. 2001.
- [52] J. Kubalik e American Institute of Physics J. Lazansky, D. M. Dubois. *Genetic algorithms and their tuning*. 1999.
- [53] Miyazaki ; Fujimaru T. ; Yu-an Zhang ; Sakamoto M. Furutani, H. ;. *Effects of Population Size on Computational Performance of Genetic Algorithm on Multiplicative Landscape*. 2007.

- [54] J. Heitkotter e D. Beasley. *The hitch-hiker's guide to evolutionary computation*. 2001.
- [55] F.J.M. Silva. *An evolutionary approach for performing multiple sequence alignment*. 2010.
- [56] Jize Li ;Ping Song ; Kejie Li. *A Modified Particle Swarm Optimization with Adaptive Selection Operator and Mutation Operator*. 2008.
- [57] K. ; Taniguchi-T. ; Ohta M. Narihisa, H. ; Okayama ; Kohmoto. *Evolutionary Programming With Only Using Exponential Mutation*. 2006.