



Impacto da Vegetação na Qualidade de Serviço das Redes Elétricas

Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Energia e Automação

Mateus Caldas Rêgo de Queiroz

Leiria, setembro de 2021



Impacto da Vegetação na Qualidade de Serviço das Redes Elétricas

Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Energia e Automação

Mateus Caldas Rêgo de Queiroz

Relatório de Estágio do Mestrado realizado sob orientação do Doutor Pedro José Franco Marques, Professor Adjunto da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria, supervisão do Engenheiro Bruno Gonçalves, Gestor Operacional do departamento de Manutenção de Redes de Baixa Tensão Leiria da EDP Distribuição – Energia S.A.

Leiria, setembro de 2021

Originalidade e Direitos de Autor

A presente dissertação é original, elaborada unicamente para este fim, tendo sido devidamente citados todos os autores cujos estudos e publicações contribuíram para a elaborar.

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição de que seja mencionado o Autor e feita referência ao ciclo de estudos no âmbito do qual a mesma foi realizado, a saber, Curso de Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Energia e Automação, no ano letivo 2019/2020, da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria, Portugal, e, bem assim, à data das provas públicas que visaram a avaliação destes trabalhos.

Dedicatória

*Dedico inteiramente esse
trabalho aos meus pais.*

Agradecimentos

Agradeço ao professor e orientador, Doutor Pedro Marques, que acreditou em mim e me deu todo o suporte necessário durante esse estágio, sempre dando as direções corretas para eu seguir e, principalmente, por sua paciência e disponibilidade. Não tenho mais palavras para descrever o quanto o senhor foi importante para minha jornada.

Ao Eng.º Bruno Gonçalves, pela excelente supervisão e orientação do estágio dentro da EDP, por ter compartilhado sua experiência e conhecimentos comigo. Mesmo sendo uma pessoa muito ocupada, nunca deixou de me ajudar quando precisei. O aprendizado que obtive com o Eng.º irei levar para a vida toda.

À toda equipe do departamento de manutenção da EDP, que sempre foram muito solícitos comigo e com os quais eu tive a honra de compartilhar várias experiências e pude aprender bastante sobre o mundo da eletricidade.

Aos meus pais, que sem eles não teria a possibilidade de realizar esse mestrado, quanto mais esse estágio. Por mais distante que eles estejam de Portugal, o amor e o incentivo que eles me deram sempre estiveram comigo e quero um dia poder retribuir tudo que eles fizeram por mim. Agradeço também as minhas irmãs, que sempre me apoiaram na decisão de buscar esse mestrado e a saudades delas é muito grande.

À Sara Bona, que é minha companheira para a vida toda, que sempre esteve ao meu lado em todos os momentos, apoiando cada decisão minha.

A todos os meus amigos que de alguma forma torceram para o meu sucesso, estando perto ou longe de mim.

Resumo

Esse relatório consiste em apresentar o trabalho desenvolvido ao longo do período de estágio na EDP Distribuição, situada em Leiria, para a conclusão do mestrado em Engenharia Eletrotécnica, no ramo de Automação e Energia, no Instituto Politécnico de Leiria.

O objetivo desse estágio foi realizar o estudo do impacto da vegetação nas redes de Baixa Tensão, porém durante o estágio foram realizadas outras atividades, as quais estão brevemente descritas ao longo desse relatório.

O estudo de caso realizado foi desenvolvido através de pesquisa científica, em que um algoritmo foi criado para gerar um cronograma otimizado para realizar o corte e desrabe da vegetação incidente nos postos de transformação da rede estudada e com isso, diminuir a energia não distribuída. O resultado do estudo foi positivo, ou seja, utilizando os dados reais coletados, foi obtida uma diminuição da energia não distribuída, caso o cronograma fosse seguido.

Palavras-chave: Distribuição de Energia, Otimização, Manutenção, Vegetação

Abstract

This report consists of presenting the work developed during the internship period at EDP Distribuição, located in Leiria, for the conclusion of the master's degree in Electrotechnical Engineering, in the field of Automation and Energy, at the Polytechnic Institute of Leiria.

The objective of this internship was to carry out the study of the impact of vegetation on low voltage networks, however, during the internship, other activities were carried out, which are briefly described throughout this report.

The case study carried out was developed through scientific research, in which an algorithm was created to generate an optimized timeline to carry out the cutting and clearing of the vegetation incident at the transformation stations of the studied network and, with this, to reduce the undistributed energy. The result of the study was positive, that is, using the real data collected, a decrease in undistributed energy was obtained, if the schedule was followed.

Keywords: Energy Distribution, Optimization, Maintenance, Vegetation

Índice

Originalidade e Direitos de Autor	v
Dedicatória	vii
Agradecimentos	ix
Resumo	xi
Abstract	xiii
Lista de Figuras	xvii
Lista de tabelas	xix
Siglas, Abreviaturas e Estrangeirismos	xxi
1. Introdução	1
1.1. Estrutura do Relatório	2
2. Enquadramento	3
2.1. EDP Distribuição	3
2.2. Objetivos.....	5
2.3. Atividades exercidas	6
3. Revisão Bibliográfica.....	11
3.1. Abordagens para mitigação de incidentes causados por vegetação.....	11
3.2. Abordagem Preventiva	12
3.3. Abordagem Corretiva	20
4. Legislação Aplicada.....	25
4.1. Condições a que deve satisfazer o estabelecimento das instalações elétricas... 	25
4.2. Regulamento da Qualidade de Serviço.....	25
4.3. Manual de Procedimentos da Qualidade de Serviço.....	26
5. Estudo de Caso.....	29
5.1. Levantamento de dados	29
5.2. Análise e Resultados	33

5.3. Metodologia Científica	44
5.3.1. Tratamento de dados	46
5.3.2. Programação Linear	53
5.3.3. Resultados	55
6. Conclusões.....	57
6.1. Trabalhos futuros.....	58
Referências Bibliográficas	59
Anexos	61
Anexo A	63
Anexo B	67

Lista de Figuras

Figura 2-1 - Direções de Rede e Concessões da EDP Distribuição [1].	4
Figura 2-2 – Direção de Rede e Concessões Tejo [1].	5
Figura 2-3 – Ecrã do ProGest.	7
Figura 2-4 – Ecrã da Aplicação Móvel.	8
Figura 3-1 – Fluxograma do algoritmo do cronograma ótimo de manutenção [6].	13
Figura 3-2 – Distância mínima entre árvore e condutor [7].	15
Figura 3-3 – Cronograma otimizado para corte e desrame de vegetação [7].	16
Figura 3-4 – Relação custo-benefício dos modelos matemáticos [8].	17
Figura 3-5 – Localizações que devem receber limpeza de vegetação [9].	18
Figura 3-6 – Quantidade de vezes que cada modelo foi considerado o melhor [10].	19
Figura 3-7 – Delineamento das copas das árvores [11].	21
Figura 3-8 – Sistema de Corte de Árvores Integrado TerraTech™ [12].	22
Figura 3-9 – Método de corte de árvores por helicóptero telecomandado [12].	22
Figura 3-10 - Protótipo do drone [13].	23
Figura 5-1 – Quantidade percentual de incidentes VEG por ano.	34
Figura 5-2 - Quantidade de incidentes de vegetação por trimestre de 2017.	35
Figura 5-3 - Quantidade de incidentes de vegetação por trimestre de 2018.	35
Figura 5-4 - Quantidade de incidentes de vegetação por trimestre de 2019.	36
Figura 5-5 - Gráficos com valores percentuais das interrupções de energia.	37
Figura 5-6 - Tipos de vegetação causadores de incidentes de 2017.	38
Figura 5-7 - Tipos de vegetação causadores de incidentes de 2018.	38
Figura 5-8 - Tipos de vegetação causadores de incidentes de 2019.	39
Figura 5-9 – Equipamentos mais afetados por incidentes VEG em 2017.	40
Figura 5-10 – Equipamentos mais afetados por incidentes VEG em 2018.	40
Figura 5-11 – Equipamentos mais afetados por incidentes VEG em 2019.	41
Figura 5-12 – Quantidade de incidentes de vegetação por concelho em 2017.	42
Figura 5-13 – Quantidade de incidentes de vegetação por concelho em 2018.	42

Figura 5-14 – Quantidade de incidentes de vegetação por concelho em 2019.....	43
Figura 5-15 – Gráficos relativos aos níveis percentuais do SAIDI BT referentes aos incidentes VEG por ano.	43
Figura 5-16 – Folhas de dados da planilha <i>Dados para Otimização</i>	46
Figura 5-17 – Exemplo da tela principal do PowerPivot.	52
Figura 5-18 – Campos disponíveis da tabela dinâmica.	53

Lista de tabelas

Tabela 2-1 – Cronograma do estágio 2019/2020.	6
Tabela 4-1 - Limites aplicados às interrupções longas nas redes de distribuição BT por ano.	26
Tabela 5-1 - Exemplo da tabela de incidentes.....	31
Tabela 5-2 - Palavras-chave.....	32
Tabela 5-3 - Comparação de quantidade de incidentes por ano.....	32
Tabela 5-4 - Quantidade de incidentes de vegetação por ano.....	33
Tabela 5-5 - Quantidade de interrupções de energia causados por vegetação.....	36
Tabela 5-6 – Custos aproximados relativos aos incidentes de vegetação.....	41
Tabela 5-7 – Trecho da folha de dados <i>VEG</i>	47
Tabela 5-8 - Trecho da folha de dados <i>Análise</i>	48
Tabela 5-9 - Trecho da folha de dados <i>Taxa de Falhas</i>	49
Tabela 5-10 – Trecho da folha de dados <i>Indisponibilidade</i>	50
Tabela 5-11 – Trecho do cronograma otimizado para corte e desrame de árvores.....	55
Tabela 5-12 – Resultado da END após otimização.....	56

Siglas, Abreviaturas e Estrangeirismos

A

AO	Área Operacional
AOLRA	Área Operacional de Leiria
ARC	Áreas de Rede e Clientes

B

BT	Baixa Tensão
----	--------------

C

CBC	<i>COIN Branch and Cut</i>
-----	----------------------------

D

DRCT	Direção de Rede e Concessões Tejo
------	-----------------------------------

E

EDP	Energias de Portugal
EDPD	EDP Distribuição
END	Energia Não Distribuída
ERSE	Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos

M

MILP	<i>Mixed-Integer Linear Programming</i>
MPQS	Manual de Procedimentos da Qualidade de Serviço

P

PT	Posto de Transformação
----	------------------------

R

	RDEEBT	Regulamento de Segurança de Redes de Distribuição de Energia Elétrica em Baixa Tensão
	REN	Redes Energéticas Nacionais
	RQS	Regulamento da Qualidade de Serviço
S		
	SAIDI	<i>System Average Interruption Duration Index</i>
	SAIFI	<i>System Average Interruption Frequency Index</i>
U		
	UML	Unidade de Manutenção de Leiria
V		
	VEG	Vegetação

1. Introdução

A engenharia eletrotécnica é muito complexa e abrangente, e o percurso académico dentro de uma licenciatura ou mestrado muitas vezes não é suficiente para formar por completo um estudante, por mais aplicado que este seja. Por isso que o estágio é uma das opções relevantes, não só para a formação académica, como também para a formação profissional.

Na mesma linha de raciocínio, a manutenção elétrica na Média e Alta Tensão é pouco abordada na graduação, justamente pelo facto da limitação da faculdade em relação a equipamentos de grande porte, como motores, transformadores, porque além de serem grandes são caros também. Por isso, acaba que não se dá a devida atenção para a manutenção como se deveria, já que sem os técnicos e engenheiros que ficam a disposição vinte e quatro horas, não teríamos a qualidade de energia e, conseqüentemente, a qualidade de vida que a energia elétrica nos proporciona.

Dentro da manutenção, a vegetação tem um tratamento diferenciado e enquadrado com a legislação vigente, limitando a atuação proativa, sendo da responsabilidade do proprietário garantir que a vegetação não interfere com a rede elétrica. Porém na prática ocorrem incidentes que são derivados da vegetação e sendo algo recorrente, já que as plantas crescem com o tempo, todas as empresas de distribuição elétrica têm um plano muito bem determinado para conter a vegetação que incide nas redes de eletricidade.

Esse estágio focou principalmente na manutenção relativa a vegetação, em que foi realizado um estudo do impacto da vegetação nas linhas de Baixa Tensão (BT). E foi também desenvolvido a partir de uma investigação científica, um algoritmo para reduzir a energia não distribuída da rede abrangida pela empresa onde foi realizado o estágio. Esse algoritmo gera um cronograma otimizado para o corte e desrabe da vegetação ao longo dos Postos de Transformação (PTs) da rede estudada.

1.1. Estrutura do Relatório

O presente relatório está estruturado da seguinte forma, seis capítulos distintos entre si, com o objetivo de apresentar o trabalho realizado no estágio de maneira lógica e objetiva.

O primeiro capítulo é referente à introdução do relatório, a qual abordou de forma geral a importância do estágio para a formação do aluno e contextualizou sobre a importância que existe na área da manutenção, com foco na vegetação, tema que muitas vezes não se dá a devida atenção.

No segundo capítulo foi introduzido o enquadramento do estágio, visando descrever de forma sucinta a EDP, a EDPD e o departamento ao qual o autor deste relatório foi inserido, em seguida foi apresentado os objetivos gerais e específicos do estágio e, por último, foram descritas as atividades desempenhadas no estágio.

O capítulo 3 aborda a revisão bibliográfica utilizada para desenvolver este trabalho, em que consta os conceitos das abordagens preventivas e corretivas encontradas na literatura para solucionar o problema da vegetação que afeta as redes elétricas.

No capítulo 4 é brevemente descrito as leis mais importantes para a realização desse trabalho, em que elas apresentam conceitos e fórmulas que serão utilizadas no caso de estudo do capítulo 5.

No capítulo 5, o caso de estudo será apresentado, o qual está dividido em três seções, o levantamento de dados, a análise dos resultados e, por fim, é proposto uma metodologia científica para ser aplicado ao cenário real da EDPD. Esta última seção é ainda dividida em três etapas, correspondentes ao tratamento de dados, o qual é complementar ao levantamento feito na primeira seção, em seguida é descrito a programação linear para o problema de otimização do estudo de caso e, por fim, são apresentados os resultados.

O sexto e último capítulo é referente às conclusões do trabalho, com sugestões para trabalhos futuros relacionado com o tema da vegetação incidente nas redes elétricas de energia.

2. Enquadramento

Neste capítulo será abordado o contexto do estágio, em que será realizada uma descrição da EDP Distribuição, a empresa onde o estágio foi exercido. Também será feita uma descrição dos objetivos pretendidos e das funções executadas durante o período de estágio.

2.1. EDP Distribuição

A EDP Distribuição insere-se no grupo Energias de Portugal (EDP) é uma das maiores empresas do setor energético da Europa, porém sua operação vai além do continente europeu, pois ela atua em 4 continentes. Vale destacar que a EDP é a quarta maior produtora de energia eólica do mundo e que aproximadamente 66% de sua energia produzida é renovável [1].

A EDP está presente em quase todos os processos do setor energético, já que ela atua na geração, na distribuição e na comercialização de energia elétrica, faltando somente o transporte de energia, visto que esse processo é realizado pela Redes Energéticas Nacionais (REN).

Sendo a EDP Distribuição (EDPD) uma das empresas que compõe o grupo EDP, ela possui os direitos, por meio de concessão do Estado, para operar as redes de distribuição em Alta e Média Tensão e possui também, por meio de concessões das autarquias a concessão da rede de Baixa Tensão, tendo o dever de realizar os processos de acesso às redes. Estes processos são de ligação, manutenção ou intervenção e desligamento das redes [2].

A EDPD possui seis direções de rede e concessões como mostra a Figura 2-1, as quais garantem toda a cobertura do território de Portugal Continental das atividades previstas pelo Operador de Rede de Distribuição, sendo estas atividades reguladas pela Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos (ERSE).

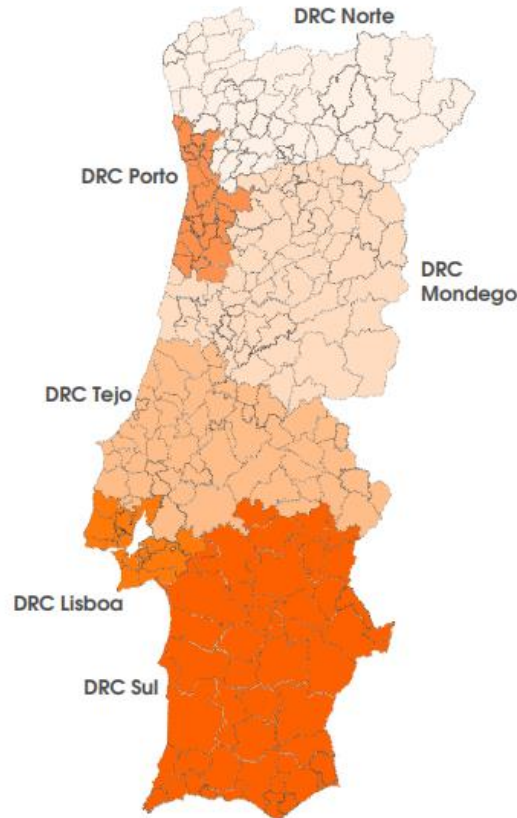


Figura 2-1 - Direções de Rede e Concessões da EDP Distribuição [1].

Dentre essas seis direções, está inserida Direção de Rede e Concessões Tejo (DRCT) representada na Figura 2-2. A DRCT está dividida em três Áreas de Rede e Clientes (ARC), que são ARC Oeste, Portalegre e Santarém. Por sua vez, a ARC Oeste é subdividida em duas Áreas Operacionais (AO), sendo a AO de Leiria (AOLRA) e a AO de Caldas da Rainha. A AOLRA abrange oito concelhos do distrito de Leiria, sendo estes Alvaiázere, Ansião, Batalha, Leiria, Marinha Grande, Ourém, Pombal e Porto de Mós.

Neste estágio fui inserido no departamento de Unidade de Manutenção de Leiria (UML), o qual faz parte da AOLRA.

1. Legislação em vigor nas redes elétricas;
2. Análise de incidentes nas redes elétricas e estudo do impacto;
3. Estudos de redes em Baixa Tensão;
4. Análise de projeto de instalações de serviço público;
5. Elaboração do Relatório Final.

O item 4 (Análise de projeto de instalações de serviço público) não pôde ser realizado devido a dois fatores. O primeiro, durante o estágio houve uma reestruturação interna muito grande na EDPD, por isso vários gestores foram trocados de setores e todos ainda estavam se adaptando à nova forma organizacional, o segundo fator foi a pandemia provocado pelo Covid-19, o qual afetou o mundo todo de uma forma que ninguém imaginava, ocasionado no *home-office*, ou seja, trabalho em casa.

Tabela 2-1 – Cronograma do estágio 2019/2020.

ATIVIDADES	Outubro	Novembro	Dezembro	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maio
Legislação em vigor às redes elétricas	x							
Análise de incidentes nas redes elétricas e estudo do impacto	x	x	x	x				
Estudos de redes em baixa tensão			x	x	x			
Análise de projeto de instalações de serviço público				x	x	x		
Elaboração do Relatório Final						x	x	X

2.3. Atividades exercidas

Durante o período de estágio, antes de entrar no foco principal do estágio, que seria o impacto da vegetação nas redes BT, algumas atividades foram desempenhadas. Mesmo quando a vegetação foi introduzida no estágio, atividades paralelas e do cotidiano do estágio também foram desempenhadas.

A primeira tarefa realizada foi entender como funcionava, a partir da leitura e entendimento do Regulamento de Segurança de Redes de Distribuição de Energia Elétrica em Baixa Tensão (RDEEBT), assim como o Regulamento da Qualidade de Serviço (RQS) [3] e o Manual de Procedimentos da Qualidade de Serviço (MPQS) [4], os quais serão brevemente discutidos em próximos capítulos.

Após esse estudo de normas, ferramentas internas da EDPD foram apresentadas, mais especificamente o SAP JUMP, o qual era utilizado para gerir as operações, realizar comissionamento, abertura e orçamentação de obras de ordens de trabalho, e o ProGest, ferramenta onde era possível gerir os incidentes de vegetação, em que se podia atribuir prioridade aos incidentes, atribuir para qual dos técnicos iria ser o responsável para cada incidente entre outros, na **Erro! A origem da referência não foi encontrada.** é mostrada uma tela do ProGest. É importante mencionar que o ProGest não era direcionado apenas para os incidentes de vegetação, porém como fuga do escopo do relatório, apenas a parte da vegetação foi utilizada.

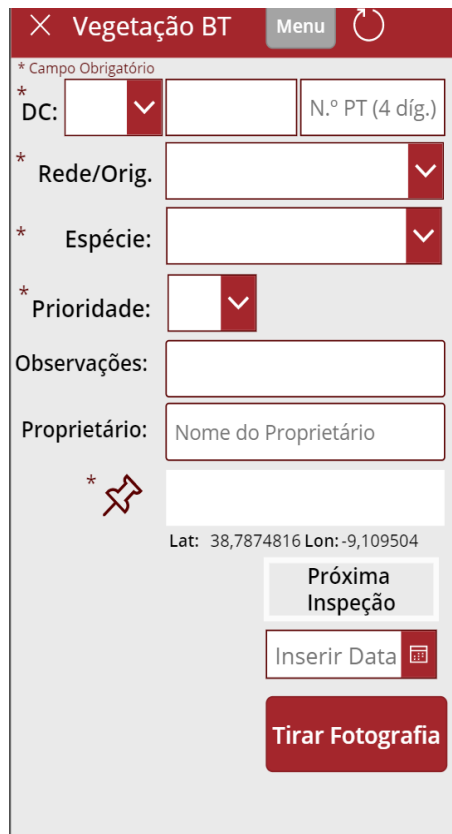
The screenshot displays the ProGest software interface for managing vegetation incidents. The main window is titled 'Vegetação' and shows a detailed view of an incident. The interface is divided into several sections:

- Header:** Displays incident details such as date (20/08/2019), location (Alvalázere), and status (41-Env Minuta F).
- Form Fields:**
 - Concelho:** 1002 ALVALAZERE
 - Lugar:** 1002000 Desconhecido
 - Rua:** (Empty)
 - Instalação:** 1002D2000700 BARQUEIRO
 - Estado do processo:** Acesso (B02, B03), Minuta F enviada por corte, Minuta F enviada por email.
 - Anomalia:** Cabo a passar dentro de Carvalhos
 - Proprietário:** N-L
 - Morada:** (Empty)
- Photo Gallery:** A large image showing a road with trees and a utility pole.
- Right Sidebar:**
 - Identificado:** 19/08/2019
 - Aberto:** 19/08/2019
 - Eletuar Corte:** 22/10/2019
 - Corte efetuado:** 06/12/2019
 - Fechado:** (Empty)
 - Ordem VEG:** 7281590554
 - Código Colaborador:** (Empty)
 - Documentos Anexos:** Foto (jpg)
 - Status:** 41-Env Minuta F
 - Data:** 06/12/2019
 - User:** e336693

Figura 2-3 – Ecrã do ProGest.

Uma atividade realizada que está diretamente relacionada com o trabalho feito no ProGest foi o acompanhamento de rondas com os colegas técnicos eletricitas para vistoriar os Postos de Transformação delegados a eles, com o objetivo de encontrar não conformidades relativos à vegetação nas redes BT. Para cumprir essa tarefa, os funcionários da EDPD utilizavam uma aplicação no telemóvel, a qual pode ser vista na **Erro! A origem da referência não foi**

encontrada. Na aplicação era possível indicar em qual PT estava a não conformidade, atribuir uma prioridade e tirar uma fotografia, em que todos esses dados vão diretamente para o banco de dados do ProGest e então se fazia a gestão. Pode-se ver na **Erro! A origem da referência não foi encontrada.** já existe a opção para classificar a Espécie da vegetação, porém essa é uma versão mais atualizada da aplicação móvel, em que esta opção não existia na época em que foram feitas as rondas.



The screenshot displays the 'Vegetação BT' mobile application interface. At the top, there is a red header with a close button (X), the title 'Vegetação BT', a 'Menu' button, and a refresh icon. Below the header, a legend indicates that an asterisk (*) denotes a mandatory field. The form contains the following elements: a 'DC:' dropdown menu, a 'N.º PT (4 dígit.)' text input field, a 'Rede/Orig.' dropdown menu, an 'Espécie:' dropdown menu, a 'Prioridade:' dropdown menu, an 'Observações:' text input field, a 'Proprietário:' text input field with the placeholder text 'Nome do Proprietário', and a location pin icon. Below the form, there are three buttons: 'Próxima Inspeção' (grey), 'Inserir Data' (white with a calendar icon), and 'Tirar Fotografia' (red). At the bottom, the coordinates 'Lat: 38,7874816 Lon: -9,109504' are displayed.

Figura 2-4 – Ecrã da Aplicação Móvel.

Outra tarefa desempenhada foi a abertura e orçamentação de ordens de trabalho, mais especificamente a ordem de corte e desrame da vegetação. Para executar essa atividade foi utilizado o JUMP e uma planilha com os PTs que deviam receber essa limpeza de vegetação. Como esta tarefa era bastante repetitiva e monótona, uma abordagem diferente foi tentada, utilizando uma ferramenta gratuita para a criação de macros, a partir de linguagem de programação, em que foi possível escrever um código que se conectava com o EXCEL e obtinha os dados da planilha. Dessa forma, o código quando executado conseguia de forma automática criar e orçar as ordens de trabalho.

Para além das atividades voltadas para vegetação, houve um tempo em que o autor deste relatório foi designado para dar suporte aos funcionários do desenho, onde foi introduzido uma nova ferramenta da EDP Distribuição, o SIT. Uma das funções desempenhadas foi associar os clientes aos respetivos ramais.

Por último, quando havia oportunidades, alguns serviços de Trabalho em Tensão, chamados de TET, foram acompanhados, como por exemplo, a troca de um transformador que havia sido avariado por uma descarga atmosférica e a troca de uma caixa de distribuição.

3. Revisão Bibliográfica

A continuidade do serviço de energia elétrica é um dos fatores mais importantes tanto para os consumidores finais, quanto para as comercializadoras de energia, uma vez que a ERSE estipula os valores para os indicadores gerais de continuidade que as companhias de eletricidade devem assegurar aos seus clientes. Um dos maiores causadores de defeitos na rede elétrica é a vegetação, em que muitas vezes não se dá a devida atenção.

Para o cálculo e o entendimento dos indicadores gerais, a ERSE disponibiliza dois documentos: *Regulamento da Qualidade de Serviço* [3] e o *Manual Procedimentos da Qualidade de Serviço* [4], em que se deve ter uma atenção especial para o indicador da duração média de interrupção acumulada ao cliente (SAIDI, sigla em inglês) e o indicador da quantidade de interrupções elétricas médias acumulada ao cliente (SAIFI, sigla em inglês).

Alguns incidentes que ocorrem nas redes de distribuição são decorrentes do contacto da vegetação próxima com os condutores. Por isso, as operadoras da rede de distribuição de energia alocam anualmente recursos significativos para prevenir que esses incidentes ocorram e que seus clientes não fiquem sem energia.

Na literatura existem vários artigos sobre esse tema, e devido a sua importância, o autor desse trabalho realizou uma revisão desses artigos, em que foram encontradas duas abordagens principais para se mitigar os incidentes causados por vegetação, sendo elas, uma abordagem preventiva e uma corretiva.

3.1. Abordagens para mitigação de incidentes causados por vegetação

Antes de entrar nas abordagens, precisa-se ressaltar a importância de uma gestão de vegetação eficiente e a metodologia aplicada em [5] mostra exatamente isso.

O trabalho realizado em [5] faz uma avaliação da importância de se ter uma gestão de vegetação eficiente, utilizando duas abordagens, sendo a primeira uma abordagem puramente estatística e

a segunda uma avaliação da resiliência realizada por um modelo de previsão de interrupção de energia causados por tempestades.

A metodologia utilizada em [5] aplicou as duas abordagens separadamente, tendo em conta dois tipos de tempestades, as tempestades extratropicais e as de verão. Em seguida, essas abordagens são comparadas, para avaliar a percentagem de locais sem interrupção de energia que tiveram diferentes quantidades de corte e desrame de árvores. Analisando os resultados, os autores perceberam que as localidades que tiveram mais recursos em gestão da vegetação, foram os locais que tiveram menos interrupções de energia, porém vale a pena mencionar que os locais que mais sofreram limpeza, foram locais que possuem pouco comprimento de linhas aéreas de energia, ou seja, já era esperado que esse locais não tivessem muitas interrupções de energia.

3.2. Abordagem Preventiva

A abordagem preventiva é constituída de métodos que, de maneira geral, foram desenvolvidos para antecipar eventos que possam levar a interrupções de energia elétrica. As metodologias descritas a seguir se encaixam nessa abordagem.

O trabalho realizado em [6] pode ser considerado antigo, porém foi um dos primeiros artigos a tratar do assunto e é base para muitos outros artigos citados nessa revisão, por isso é importante que este seja descrito e entendido.

Segundo os autores em [6], uma das atividades de manutenção dos sistemas elétricos de potência é o corte ou desrame de árvores que estão em contato com as linhas aéreas de distribuição, para garantir uma melhor confiabilidade no sistema e também por razões de segurança.

É proposto um cronograma ótimo para gestão da vegetação utilizando uma abordagem quantitativa, com o qual espera-se resultar numa melhora na confiabilidade do sistema e uma redução nos custos de manutenção. Para tal cronograma de manutenção ser alcançado, a Figura 3-1 mostra um fluxograma explicando o funcionamento do algoritmo criado.

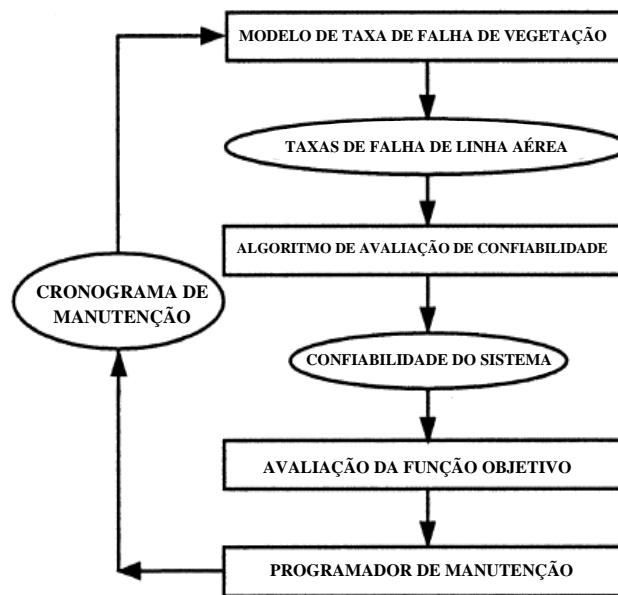


Figura 3-1 – Fluxograma do algoritmo do cronograma ótimo de manutenção [6].

O algoritmo criado pode ser resumido em, primeiramente, gerar as taxas de falhas das linhas aéreas a partir do modelo de previsão de taxas de falhas de vegetação e das datas de quando foram realizadas as últimas manutenções. Em seguida, as taxas de falhas são usadas num algoritmo que avalia a confiabilidade do sistema. Esse algoritmo determina as medidas de confiabilidade dos consumidores, sendo estas medidas a frequência das interrupções longas e temporárias e a duração das interrupções longas. A partir dessas medidas, consegue-se calcular os indicadores gerais de confiabilidade de um sistema de distribuição.

A formulação matemática da otimização do cronograma da manutenção relacionada a vegetação, é dividida em três partes: análise do histórico de falhas, formulação das equações objetivo e de restrição, e as técnicas de solução. As equações objetivo são divididas em três, para que sejam usadas de acordo com a necessidade da companhia. A primeira equação objetivo é a minimização do custo total da confiabilidade do sistema, sendo esse custo total a soma do custo da confiabilidade para a empresa com o custo da confiabilidade para o consumidor. Já a segunda equação objetivo é a minimização do custo para um dado valor de confiabilidade, esse custo pode ser calculado multiplicando o comprimento do condutor aéreo que precisa de manutenção com o valor anual para a atividade de manutenção. Por último, a terceira equação objetivo é a maximização da confiabilidade do sistema para um dado valor de custo, esta

equação é obtida através de uma soma ponderada dos indicadores gerais de confiabilidade especificados pelo usuário.

As equações de restrição também são três, porém apenas uma delas serve para as três equações objetivo, enquanto as outras duas servem apenas para cada uma das outras equações objetivo. A restrição que vale para as três é a disponibilidade da equipe de manutenção, em que é avaliado se o cronograma proposto abrange mais quilômetros do que pode ser feito em questões de manutenção. Para a segunda equação objetivo, a equação de restrição é relacionada aos índices gerais de confiabilidade, em que se tem uma certa flexibilidade no controle de objetivo da confiabilidade. A restrição para a terceira equação objetivo está relacionada ao preço calculado e ao preço estabelecido.

Aplicando a metodologia do artigo [6] num sistema real de distribuição de energia com 121 alimentadores utilizando o algoritmo para gerar o cronograma ótimo de manutenção, selecionando as equações objetivo de maximização da confiabilidade do sistema e a minimização do custo para determinados valores, foi obtido uma redução de aproximadamente 4% no SAIDI e de 6,5% no SAIFI para o primeiro caso, e uma economia de 9,1% nos custos de manutenção para o segundo caso.

Seguindo essa linha de raciocínio, temos outras três metodologias: os trabalhos realizados em [7]–[9]. Em [7], são propostos dois modelos matemáticos para tentar resolver o problema da manutenção da vegetação que fica próxima das linhas elétricas. Os dois modelos são otimizações, em que o primeiro modelo tem como objetivo minimizar a energia não distribuída e utiliza como restrições o histórico de falhas relativas à vegetação. Já o segundo modelo visa minimizar proporção média de violação da distância mínima entre as árvores e os condutores, como pode ser visto na Figura 3-2, e utiliza nas restrições informações a respeito da taxa de crescimento da vegetação.

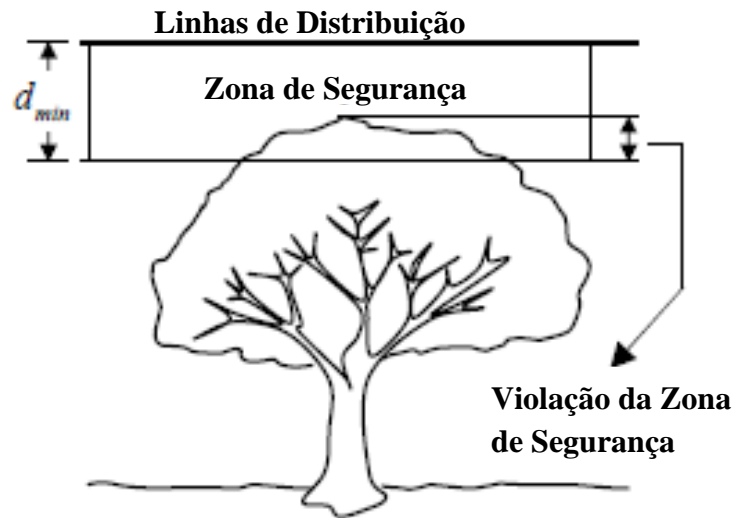


Figura 3-2 – Distância mínima entre árvore e condutor [7].

Para as duas otimizações foi utilizado um algoritmo genético e como resultado é obtido um cronograma otimizado de quando se deve realizar o corte e desrame da vegetação do sistema analisado, num período de um ano e dividido em 4 trimestres.

O primeiro caso em [7] resultou numa energia não distribuída mínima de 48,439 kWh e o cronograma apresentado na Figura 3-3, em que se pode ver que nem todos segmentos de rede deverão ser feitos a limpeza de vegetação naquele ano e que também nenhum segmento deverá ser limpo durante o quarto trimestre. O segundo caso resultou numa percentagem média de violação da zona de segurança de 41,72% e gerou um cronograma similar ao da figura seguinte. Dessa forma, esses modelos matemáticos tentam mitigar os problemas relacionados à vegetação nas linhas de distribuição, sendo o primeiro baseado nas falhas históricas do sistema estudado e, como forma alternativa, quando não se tem esses dados históricos, o segundo modelo faz uso das taxas de crescimento da vegetação da área estudada.

Section	Subperiod t_1	Subperiod t_2	Subperiod t_3	Subperiod t_4
1	0	1	0	0
2	0	1	0	0
3	0	1	0	0
4	1	0	0	0
5	0	1	0	0
6	1	0	0	0
7	0	0	1	0
8	1	0	0	0
9	0	0	1	0
10	0	1	0	0
11	0	0	0	0
12	0	0	1	0
13	0	0	1	0
14	0	0	0	0
15	0	0	0	0
16	1	0	0	0
17	0	0	0	0
18	0	1	0	0
19	0	0	0	0

Figura 3-3 – Cronograma otimizado para corte e desrame de vegetação [7].

Como continuação do trabalho desenvolvido em [7], o trabalho proposto em [8] é também uma otimização, porém é um problema de programação linear multiobjetivo (MILP sigla em inglês). Uma das equações objetivo é a minimização da energia não distribuída, igual como foi visto em [7], porém nesse trabalho mais equações de restrição foram adicionadas, por exemplo, uma equação que envolve as taxas de crescimento da vegetação da área abordada. A outra equação objetivo é também uma minimização, mas esta é sobre os custos associados à execução do corte e desrame de árvores, em que após ser obtido cronograma otimizado, um problema de atribuição é resolvido. Esse problema resolve quais equipas são atribuídas para cada segmento de linha, de acordo com a disponibilidade das equipas de manutenção. A última equação objetivo é uma junção das duas primeiras equações objetivo.

A partir das equações objetivo e de restrição apresentadas foram contruídos 3 modelos matemáticos, em que o primeiro modelo é justamente a otimização multiobjetivo, utilizando as duas primeiras equações objetivo e suas respectivas restrições. O segundo modelo é uma otimização mono objetiva, em que se usa a última equação objetiva descrita. E, por último, é feita uma minimização apenas dos custos associados a execução do corte e desrame da vegetação, utilizando equações de restrição as mesmas utilizadas no primeiro modelo.

Como resultado apresentado em [8], a Figura 3-4 mostra um gráfico com a relação custo-benefício de cada modelo, em que se pode ver o terceiro modelo apresenta o menor custo, porém com o maior nível de energia não distribuída e, do outro lado, tem-se o primeiro modelo, o qual tem o menor nível de energia não distribuída, mas é o mais caro para ser implementado.

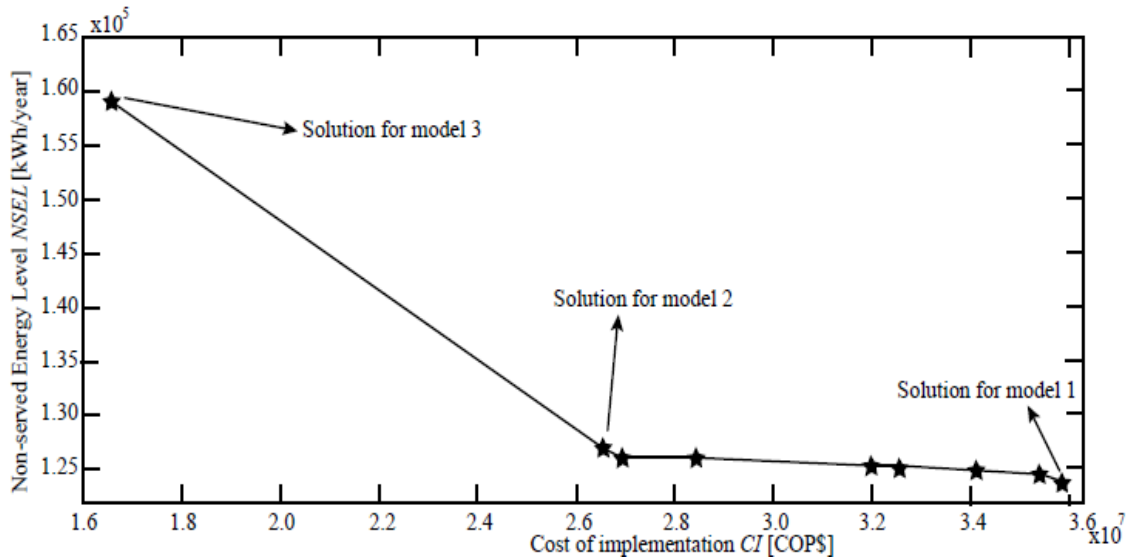


Figura 3-4 – Relação custo-benefício dos modelos matemáticos [8].

Em [9], é proposto uma análise de risco e de vulnerabilidade para previsões de cronogramas dinâmicos para corte e desraste de vegetação de redes de distribuição. Este artigo também contribui para melhorar as previsões de risco, utilizando dados históricos e de previsão do clima da região estudada, histórico de interrupção de energia da empresa de energia e vários índices relacionados a vegetação local, de maneira que possa integrar essas informações e traçar uma correlação entre elas.

A metodologia utilizado em [9] foi, num primeiro momento, realizar o pré-processamento dos dados e tentar achar uma correlação entre eles, sendo estas correlações de dois tipos: espaciais e temporais. Em seguida, é feita a análise de risco da gestão da vegetação, onde é utilizado um método de *clustering*, um conceito de *machine learning*, em que foi definido 6 níveis de intensidade de risco:

- Nível 0 – Sem risco, nenhum impacto à rede;
- Nível 1 – Pequeno, pequenas interrupções de serviço;
- Nível 2 – Moderado, algumas interrupções na rede;
- Nível 3 – Severo baixo, moderado número de interrupções na rede;

- Nível 4 – Severo alto, múltiplas interrupções na rede;
- Nível 5 – Catastrófico, toda a rede ou grande parte dela está fora de serviço.

Após a análise de risco, é feita então a previsão da vulnerabilidade da rede elétrica, utilizando um modelo probabilístico de campo aleatório gaussiano condicional. Por último, é realizada uma otimização para gerar um cronograma de limpeza de vegetação durante o ano, dividido por trimestres. Para atingir o objetivo da otimização, esta foi baseada na previsão dos três meses seguintes da análise de risco da gestão da vegetação. Este é um problema não linear, o qual foi resolvido utilizando uma programação linear melhorada de relaxação com a relaxação langrangeana com um adicional de um método heurístico.

Na Figura 3-5, pode-se ver o resultado das localizações, dentro da região estudada em [9], que deve ser feita a limpeza da vegetação durante os trimestres do ano. Os testes feitos para validar essas previsões de interrupção tiveram uma acurácia maior que 64%.

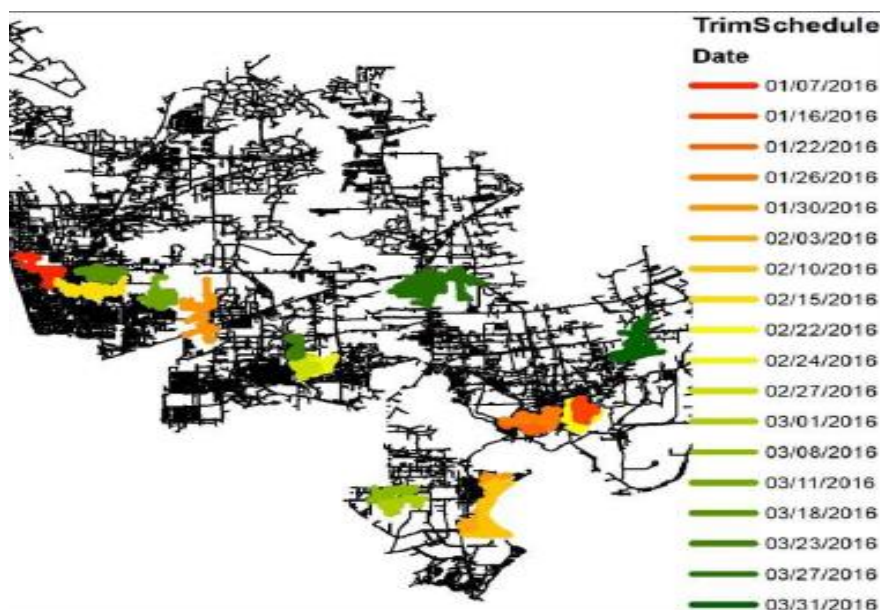


Figura 3-5 – Localizações que devem receber limpeza de vegetação [9].

Ainda sobre previsões de interrupções de energia temos [10], em que o trabalho feito foi utilizar os dados disponíveis a respeito da vegetação da área estudada para melhorar os modelos de previsão de interrupções elétricas respectivas a furacões.

A área estudada está localizada na parte oriental de Connecticut, Estados Unidos da América (EUA), devido a esta região possuir dados provenientes de sensores *LiDAR*. Os dados utilizados nos modelos matemáticos propostos são de três tipos: dados de infraestrutura, dados sobre a

gestão da vegetação e dados sobre a altura das árvores. Os dados de infraestrutura informam o tipo de condutor, condutor nu ou cabo isolado, utilizado nos circuitos elétricos de distribuição. Os dados sobre a gestão da vegetação informam a percentagem das linhas aéreas que receberam manutenção preventiva, em que se faz limpeza de vegetação, e tratamento aprimorado de corte e desrame de árvores. Por fim, os dados sobre as alturas das árvores são aqueles coletados pelos sensores *LiDAR* e depois são tratados.

A metodologia aplicada em [10] utilizou um algoritmo de *Random Forest*, o qual faz uso de um dos conceitos mais primordiais da aprendizagem automática, as árvores de decisão. Para garantir que não se utilize dados desnecessários, foram desenvolvidos cinco modelos com entradas diferentes, em que o primeiro modelo foi utilizado como base para comparar com os outros modelos, pois era com esse modelo que se fazia as previsões de interrupção de energia devido a furacões. Após correr os modelos com o algoritmo foram utilizadas algumas métricas de erro para analisar qual deles era melhor. Após dez mil iterações, a Figura 3-6 mostra quantas vezes cada modelo foi considerado o melhor para cada iteração, baseado nos tipos de métricas de erro. As métricas de erro utilizadas foram a área sobre a curva (AUC, sigla em inglês), rácio de falsa omissão (FOR, sigla em inglês), rácio verdadeiro positivo (TPR, sigla em inglês), rácio verdadeiro negativo (TNR, sigla em inglês), proporção correta (PC, sigla em inglês) e, por fim, o *Cohen's Kappa* (K).

Model	AUC	FOR	TPR	TNR	PC	K
Model 1	658	477	477	2475	658	658
Model 2	1530	1486	1486	1833	1530	1530
Model 3	1646	1754	1754	1700	1646	1646
Model 4	3706	3118	3118	2486	3706	3706
Model 5	2460	3165	3165	1506	2460	2460

Figura 3-6 – Quantidade de vezes que cada modelo foi considerado o melhor [10].

Analisando a Figura 3-6, pode-se ver que os modelos entre o segundo e o quinto foram bem mais selecionados como melhor do que o primeiro modelo. E de maneira geral, o modelo 4 foi o que se apresentou melhor nos testes, seguido pelo quinto modelo. Dessa forma, os autores de [10], demonstraram que a utilização das informações sobre gestão da vegetação, infraestrutura dos circuitos de distribuição e a altura da vegetação melhora a previsão de interrupção de energia.

3.3. Abordagem Corretiva

Para esta abordagem, foram selecionadas as metodologias que, de maneira geral, ajudem nas formas de detecção de vegetação próximas às redes elétricas ou formas que permitam a limpeza da vegetação de forma mais segura e mais eficiente.

A metodologia aplicada em [11] enquadra-se na detecção da vegetação, em que é proposto uma avaliação da viabilidade de extrair informações, como localização da vegetação e altura da mesma, de dados comerciais utilizando técnicas avançadas de sensoriamento remoto e também de algoritmos de processamento de imagem.

O processo descrito em [11] pode ser dividido em três tarefas, sendo a primeira a detecção da vegetação, em que os dados coletados vem de imagens aéreas, porém a identificação de vegetação e árvores é complicada porque sombras, solos nus, matos e relvados apresentam irregularidades que precisam ser manipuladas posteriormente com o algoritmo de detecção. A segunda tarefa é estimar a posição horizontal da vegetação relativa às linhas aéreas e para essa tarefa são utilizados dois tipos de sensores, um sensor baseado em imagem e um sensor LiDAR. Por último, é feita a estimativa da altura da vegetação identificada e, assim como na segunda tarefa, essa estimativa pode ser feita através dos dois tipos de sensores citados anteriormente. Uma vez que as alturas são estimadas, serão essas medidas que irão definir se o corte e desrame de árvores será necessário.

Para validar o processo descrito em [11], foram realizadas duas experiências. A primeira avalia se a copa da vegetação foi segmentada de forma apropriada, em que se pode definir o que é realmente árvore ou se algumas das irregularidades citadas anteriormente estão sendo consideradas vegetação também. A segunda avalia a confiabilidade e acurácia dos resultados de posicionamento horizontal da vegetação relativo e da estimativa da altura das árvores.

Na Figura 3-7, o resultado do delineamento das árvores a partir de imagens aéreas pode ser visto, onde os traçados em branco são a saída do algoritmo de detecção, enquanto os traçados em vermelho são os contornos originais de cada árvore. Pode-se perceber que o algoritmo de detecção funcionou como esperado e removeu todas as sombras das vegetações. Os resultados relativos à segunda experiência, mais precisamente em relação à posição horizontal da

vegetação, obtiveram erros menores quando o sensor LiDAR foi utilizado. Para a estimativa da altura da vegetação, o sensor LiDAR também apresentou melhores resultados, porém dessa vez comparado a técnica de correspondência *stereo*.

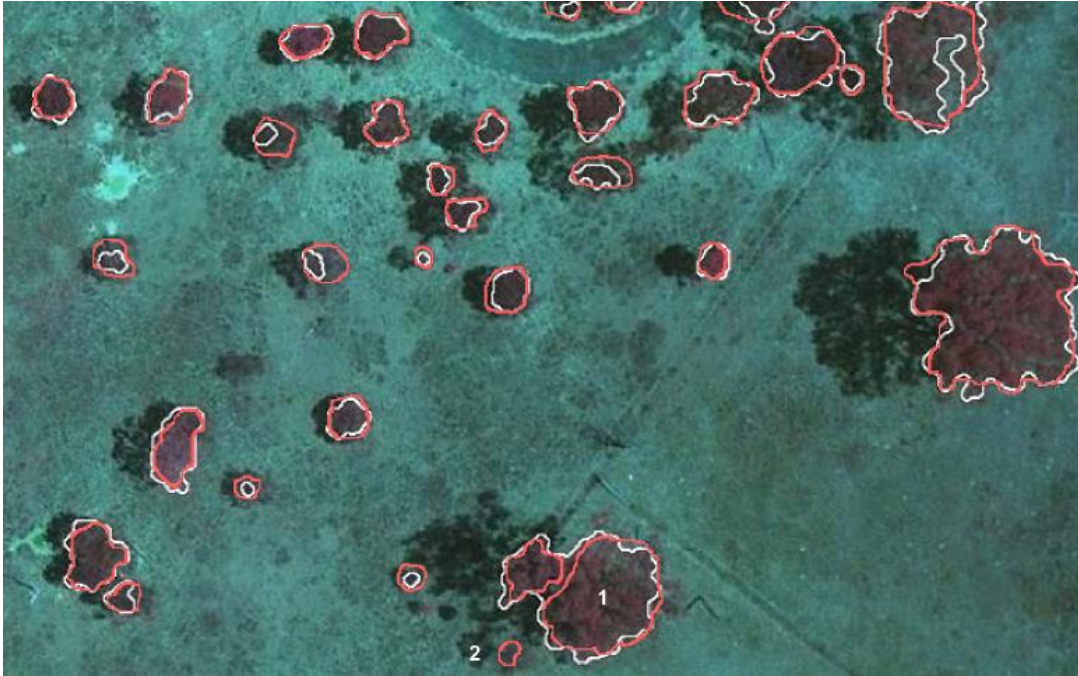


Figura 3-7 – Delineamento das copas das árvores [11].

Já as metodologias aplicadas em [12], [13] utilizam robôs, que ajudam numa manutenção da vegetação mais segura e mais eficiente.

Em [12] é feita uma pesquisa a respeito da utilização de robôs para fazer a limpeza da vegetação de vãos nos sistemas de distribuição, abordando dois tipos de robôs: aéreos e terrestres.

Pensando nos perigos da execução do desraste da vegetação, por exemplo, a queda de técnicos eletricitas, o choque elétrico e outros, a substituição desse serviço por robôs é vista com bons olhos.

Um dos robôs terrestres mais atuais apresentados em [12] é produzido pela *TerraTech*, uma empresa dos EUA, o qual funciona através de telecomando, mostrado na Figura 3-8. Percebe-se que dessa forma o técnico fica protegido dentro da cabine de onde ele realiza os comandos para fazer a limpeza da vegetação.



Figura 3-8 – Sistema de Corte de Árvores Integrado TerraTech™ [12].

A respeito do robôs aéreos, em [12] são apresentados helicópteros que são comandados através de câmeras de vídeo, por isso são considerados robôs. Um deles, mostrado na Figura 3-9, o helicóptero voa baixo na mesma direção das linhas elétricas, de forma que uma serra ligada ao helicóptero corte a copa das árvores. Na Figura 3-9 o item 1 é o helicóptero, o item 2 é a haste que conecta o helicóptero à serra, o item 3 é a copa das árvores e, por fim, o item 4 é a serra.

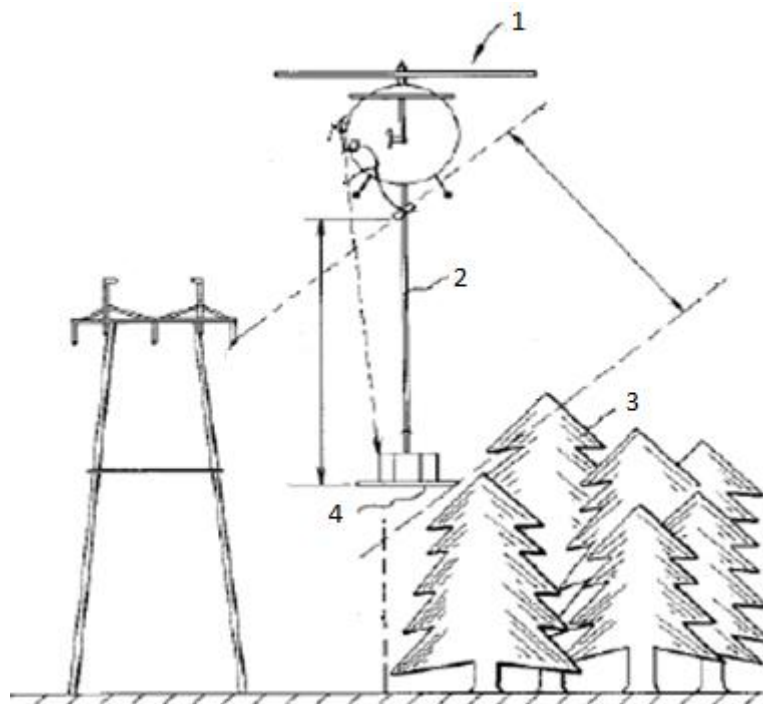


Figura 3-9 – Método de corte de árvores por helicóptero telecomandado [12].

Uma forma alternativa de se fazer o corte de galhos de árvores é proposto em [13] é a construção de um drone para realizar esta tarefa. Na Figura 3-10 pode-se ver o protótipo criado em laboratório.



Figura 3-10 - Protótipo do drone [13].

Nesse drone é conectado uma serra, de forma que o robô possa sobrevoar as árvores e faça o desrame das mesmas.

Este capítulo apresentou uma revisão bibliográfica do tema central do relatório de estágio, em que pôde se observar que a mitigação dos incidentes relativos à vegetação é uma tarefa complexa, pois pode envolver vários fatores, muitos desses são climáticos, ou seja, difíceis de se prever. E por mais que existam vários esforços para se antecipar esse tipo de incidente, ainda não é possível evitá-los na totalidade, existindo as formas da abordagem corretiva para mitigá-los.

O próximo capítulo irá abordar a legislação que foi mais útil para desenvolver este trabalho, abordando as normas importas pela ERSE que já foram mencionadas no presente capítulo.

4. Legislação Aplicada

No que é relativo a incidentes de vegetação, serão brevemente apresentadas três leis em que a EDPD se baseia na forma de agir em face de ocorrências de tal género. A primeira lei que será abordada é o Decreto-Lei n.º 26852, de 1936-07-30, seguida do Regulamento da Qualidade de Serviço (RQS) e do Manual de Procedimentos da Qualidade de Serviço (MPQS), esses dois últimos foram anteriormente citados no capítulo anterior.

4.1. Condições a que deve satisfazer o estabelecimento das instalações elétricas

A legislação ainda vigente no que diz respeito à vegetação que interfira com as linhas de baixa tensão é contemplada no capítulo V, cujo título é **Condições a que deve satisfazer o estabelecimento das instalações elétricas**, no Artigo 54.º do Decreto-Lei n.º 26852, de 1936-07-30.

Neste artigo ficam obrigados os proprietários dos terrenos confinantes ou àqueles onde se encontram as linhas de Baixa Tensão zelar pela segurança das infraestruturas e garantir que a vegetação não interfira com o bom funcionamento da rede elétrica.

4.2. Regulamento da Qualidade de Serviço

O Regulamento de Qualidade de Serviço (RQS) é o documento feito pela ERSE para ditar as regras que devem ser aplicadas tanto no Sistema Elétrico Nacional quanto no Sistema Nacional de Gás Natural.

No RQS são definidas como são classificados os casos fortuitos ou de força maior, que são aqueles que apresentam ao mesmo tempo situação que não pode ser prevista, é exterior e irresistível às boas práticas ou às regras técnicas aplicáveis e determinadas, segundo [3], em que os incidentes de vegetação causados por chuvas, tempestades, furacões e outros podem ser enquadrados nessa categoria.

Neste documento também são definidos quais os indicadores gerais para a rede de distribuição, sendo eles dependentes da tensão das redes. O presente estágio foi focado na Baixa Tensão e os indicadores gerais considerados são o SAIFI BT e o SAIDI BT, esse último é dado em minutos.

No anexo desse documento são definidos os limites para os indicadores gerais de acordo com a zona de qualidade de serviço, que são zonas definidas no Manual de Procedimentos da Qualidade de Serviço (MPQS) e que os operadores de rede devem obedecer. Na Tabela 4-1 são apresentados os limites aplicados às interrupções longas nas redes de distribuição BT por ano. Deve-se destacar que apesar de a END não ser obrigatória para a Baixa Tensão, esse indicador também é calculado pela EDP e serve como indicativo de melhoria.

Tabela 4-1 - Limites aplicados às interrupções longas nas redes de distribuição BT por ano.

Zona de Qualidade de Serviço	SAIDI BT (horas)	SAIFI BT
A	3	3
B	5	5
C	8	7

4.3. Manual de Procedimentos da Qualidade de Serviço

O MPQS funciona como um complemento e nele estão definidos vários procedimentos, dentre os quais vale a pena destacar a classificação de zonas de qualidade de serviço no setor elétrico e a forma de calcular os indicadores gerais de qualidade de serviço definidos no RQS.

Portanto, nessa seção serão apresentadas as três fórmulas que serão úteis para o estudo de caso e a metodologia científica proposta, sendo estas fórmulas relativas ao SAIFI BT, ao SAIDI BT e a END.

O SAIFI BT serve para dizer o número médio de interrupções longas que ocorreram nas linhas BT num período determinado e sua fórmula é:

$$SAIFI\ BT_z = \frac{\sum_{j=1}^k FI_{jBT}}{k} \quad (4.1)$$

Em que k significa o valor total de pontos de entrega do tipo z da rede de distribuição, z é o tipo de zona de entrega, podendo ser de instalação, de produção ou de consumo e FI_{jBT} é o total de interrupções longas no pontos de entrega, segundo o [4].

O próximo indicador geral é o SAIDI BT que serve para dizer a duração média das interrupções longas que ocorreram nas linhas BT num período determinado e sua fórmula é:

$$SAIDI\ BT_z = \frac{\sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^x DI_{ijBT}}{k} \quad (4.2)$$

Em que k , assim como na Equação 4.1, significa o valor total de pontos de entrega do tipo z da rede de distribuição, z é o tipo de zona de entrega, podendo ser de instalação produção ou de consumo, x é o número de interrupções longas no ponto de entrega j e DI_{ijBT} é a duração da interrupção longa i no pontos de entrega, segundo o [4].

O último indicador que será abordado nesse capítulo é a END, a qual em [4] é mostrado apenas a fórmula para o cálculo desse indicador na Média Tensão, porém a fórmula pode ser facilmente convertida para BT. Portanto a fórmula da END BT é a seguinte:

$$END\ BT = \frac{TIEPI\ BT \times ED}{T} \quad (4.3)$$

Em que **TIEPI BT** corresponde ao tempo de interrupção equivalente da potência instalada na rede BT, **ED** significa o valor da energia distribuída à rede BT do operador da rede distribuição e **T** é o período considerado para o cálculo em horas.

Porém esta fórmula de cálculo da END não é muito útil para o estudo de caso apresentado no capítulo 5, pois os dados disponíveis não permitem o uso da Equação 4.3. Para contornar esse problema, a fórmula retirada do *Estimação de indicadores de qualidade de energia elétrica* [14] que também serve para calcular a END, é apresentada a seguir e esta será utilizada no estudo de caso do capítulo 5.

$$END_i = \sum_{j \in \Omega_i} \lambda_j \times T_j \times \Delta D_{i,j} \quad (4.4)$$

Em que λ_j corresponde à taxa de falha no componente \mathbf{j} , \mathbf{T} é o período de restabelecimento do serviço do componente \mathbf{j} , i é o consumidor analisado e $\Delta D_{i,j}$ é a demanda do trecho do consumidor \mathbf{i} até a contingência \mathbf{j} .

No próximo capítulo será abordado o caso de estudo realizado durante o estágio, em que foi feita uma análise do impacto dos incidentes de vegetação na rede estudada e uma metodologia científica é proposta para ser aplicada ao cenário real da EDPD para reduzir a END.

5. Estudo de Caso

Neste capítulo será abordado a pesquisa sobre o impacto da vegetação nas redes elétricas pertencentes aos concelhos abrangidos pela UML, sendo esta dividida em duas etapas, a primeira descreve como foi realizado o levantamento de dados e, em seguida, será mostrado os resultados.

5.1. Levantamento de dados

O levantamento de dados realizado da quantidade de incidentes relativos à vegetação ocorreu nos últimos 3 anos (2017, 2018 e 2019). Para obter esses dados foi disponibilizada uma planilha de dados com todos os incidentes que ocorreram nesses anos, na qual foi feito um filtro para que se identificasse apenas àqueles que tinham relação com vegetação.

A forma em que era possível associar um incidente à vegetação era analisando dois campos da tabela de incidentes, correspondentes às observações registadas pelo responsável por abrir a ordem de incidente no sistema da EDP e aos comentários dos técnicos eletricitistas que iam a campo para resolver o incidente. Deve-se mencionar que a partir da metade de 2018, a própria EDP começou a classificar os incidentes que era relacionado com vegetação, porém mesmo com esta classificação o filtro foi aplicado neste período, pois algumas vezes a classificação era feita de forma errônea, em que havia casos que incidentes eram classificados como VEG (vegetação), mas não tinha a ver com vegetação e outros casos em que deveriam ter sido classificados como vegetação, mas não foram.

Além de identificar se o incidente teve relação com vegetação, foi também analisado se houve interrupção de energia, qual o tipo de vegetação causou esse incidente e se ocorreram danos materiais que possam ser correlacionados com o incidente.

Na Tabela 5-1 pode-se observar o modelo de como é a tabela de incidentes, a melhor forma encontrada para se realizar o filtro foi utilizando palavras-chave como vegetação, árvore, ramo entre outras e aplicando-as nas colunas de Observações e Comentários. O programa utilizado

Tabela 5-1 - Exemplo da tabela de incidentes.

Nome Área Ordem Trabalho	Número Ordem Trabalho	Cod Tipo Ordem Trabalho	Nome Tipo Ordem Trabalho	Nome Estado Ordem Trabalho	Encerrada	Data Detecção	Observações	Comentários
Avarias	7122982	IU	Cliente Particular	Finalizada	Sim	2017/01/01 01:55:35	Após despiste verifica-se que DCP não Arma Informado que equipa só iria apartir das 08:00 Informado dos custos \\Fernando - 918949736\\	CL 08:40 SR 09:10 Pt. 104 Circ. 01. Dcp avariado ficou shuntado é nec. ser substituir, contactar cliente para o nº 918408616 (esposa). Dcp. 0026587/92 - Mg - 10/30, 3x15 dif. selo ret. chumbo. Cont. 30982044 - Reguladora - Lt. 68394. Definitiva. RT: Rui Santos
Avarias	7122993	IU	Cliente Particular	Finalizada	Sim	2017/01/01 02:42:18	Sra. Vania indica que não tem energia no local apos despiste clt continua sem energia apos as 08hda manha inf sobre os custos *** 916920182	CL 09:45 SR 10:00 Pt. 166 Circ. 01. Unipolar queimado ficou shuntado é nec. aplicar Dcp e prancheta. Foi aplicado 1 ligador 4/6. Cont. 1726415 - Janz - Lt. 7295. Definitiva. RT: Rui Santos
Avarias	7123453	B	Baixa Tensão	Finalizada	Sim	2017/01/01 16:32:24	Ic sem energia apos despiste.helio jorge /tlf 917107767. 917107767	CL-17:30 SR 17:30 PT-42 Circ 02. Substituição de 1 ligador 16/25 no cabo LXS 4X25+16. Ke-381135770 Landis Lt 22997. RT. Rui Santos. Def
Avarias	7123529	IP	Iluminação Pública	Finalizada	Sim	2017/01/01 17:58:56	Vários focos (Rua inteira apagada). sem IP há pelo menos 15 dias. luzes acendem mais tarde. a partir das 17:30 já não há luz nesta rua. perto da escola primaria de atougua. pfv verificar. sr João Reis 916237208	CL-18:30 SR 18:45 PT-253 Circ IP- Substituição de 1 relógio Órbis. Liga às 17:45 horas e desliga às 07:10 horas. Ke-50294751 Landis Lt tLC. RT. Joaquim Barros. Def
Avarias	7123883	B	Baixa Tensão	Finalizada	Sim	2017/01/02 08:29:43	FALTA DE FASE DESDE AS 00:00H - PFV VERIFICARNOME: SR JOÃO SALGADO + TLM: 966566203	CL- 09:05 SR- 09:25 PT 552 Circ. 1 Cabo LXS 4x70+16 danificado a meio vão devido a eucalipto. Ficou provisório com 2 ligadores 16/95. Necessário passar 55 mts de cabo LXS 4x70+16. Provisória. KE- 020780812329 Sagem LT- 54932. RT- Rui Santos

Tabela 5-2 - Palavras-chave.

Palavras-chave
vegetação
ramo
arvore
faixa
eucalipto
pinheiro
árvore
Árvore
oliveira
carvalho

A Tabela 5-3 mostra a comparação do total de incidentes em cada ano antes e depois de realizar o filtro com as palavras-chave. Pode-se observar que em cada ano analisado houve um decréscimo de mais dez vezes a quantidade original.

Tabela 5-3 - Comparação de quantidade de incidentes por ano.

Ano	Nº de Incidentes Antes	Nº de Incidentes Depois
2017	10575	853
2018	13522	1086
2019	12461	977

Após a filtragem, por não ser uma forma perfeita de se filtrar os dados, foram verificadas um a um dos incidentes que restaram as colunas de comentários e observações e desse modo foram classificadas se eram VEG ou não, assim como dito anteriormente, se houve interrupção de energia, o tipo de vegetação e se houve danos materiais.

A partir da planilha de incidentes disponibilizada foi ainda possível retirar mais informações acerca dos incidentes de vegetação, sendo estas dados sobre a época do ano em que houve estes incidentes, dados sobre quais equipamentos foram mais danificados e dados sobre a quantidade de incidentes por concelho. Estas informações foram possíveis ser obtidas através de tabelas dinâmicas do EXCEL.

A Tabela 5-1 mostra que cada incidente é também classificado por um tipo de ordem de trabalho, em que esses tipos são: Anomalia de Rede, Baixa Tensão, Cliente Coletivo, Cliente Particular, Iluminação Pública e Transformador. Para saber o real impacto dos incidentes de vegetação somente os incidentes classificados como Anomalia de Rede, Baixa Tensão e Transformador foram considerados.

Depois de analisar a planilha de incidentes desses três anos, foi disponibilizada outra planilha de incidentes semelhante a primeira, porém esta já possuía os valores do SAIDI BT calculado para cada incidente, visto que todo incidente tem registrado sua hora de início e de fim. Porém, o código do incidente dessa segunda planilha é diferente da primeira planilha, isso se deve ao facto que a primeira planilha de incidentes ainda não passou por nenhuma análise, ou seja, existe incidentes que são abertos, quando na realidade se referem ao mesmo incidente. Já na segunda planilha de incidentes, todos os incidentes já estão com seus códigos finais.

Por isso antes de simplesmente somar todos os valores de SAIDI BT individuais, foi feita uma comparação dos códigos dos incidentes da primeira com a segunda planilha, para confirmar que todos os incidentes de vegetação foram incluídos no cálculo.

5.2. Análise e Resultados

- **Quantidade de incidentes de vegetação por ano**

Na Tabela 5-4 é mostrado a quantidade total de incidentes de cada ano e sua respectiva quantidade de incidentes de vegetação, deve-se notar que a quantidade total, comparado com a Tabela 5-3, reduziu bastante, porque como já foi falado anteriormente só foram considerados os incidentes classificados como Anomalia de Rede, Baixa Tensão e Transformador (AR,B,T).

Tabela 5-4 - Quantidade de incidentes de vegetação por ano.

Ano	Total de Incidentes (AR, B, T)	Total de Incidentes VEG
2017	2695	407
2018	3741	655
2019	3209	532

É possível notar pela Tabela 5-4 que em 2018 houve um número elevado de incidentes de vegetação em comparação aos outros anos, isso se deve muito ao fato de que 2018 ocorreu o furacão *Leslie*, em que este causou muito estrago em algumas partes de concelhos abrangidos pela UML, como por exemplo o concelho da Marinha Grande, que sofreu bastante com o furacão.

O gráfico a seguir na Figura 5-1 ajuda a ilustrar como seguiu o padrão de crescimento de incidentes de vegetação ao longo desses 3 anos em valores percentuais, em que 2017 foi o ano com o menor número e 2018 foi o ano com o maior número de incidentes VEG.

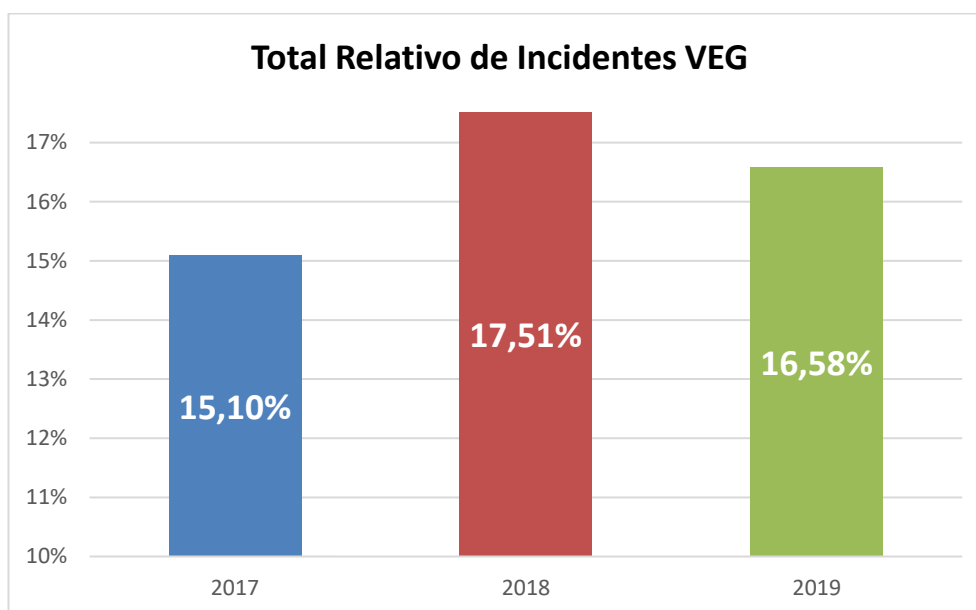


Figura 5-1 – Quantidade percentual de incidentes VEG por ano.

- **Quantidade de incidentes de vegetação por trimestre**

Os gráficos da Figura 5-2 a Figura 5-4 detalham a quantidade de incidentes de vegetação por trimestre nos anos analisados, os quais são úteis para perceber que o quarto trimestre é sempre o mais afetado por esse tipo de incidente. A razão para a qual esse padrão ocorre pode ser atribuído ao facto de que é no quarto trimestre a época de chuvas e tempestades, podendo também ter a ocorrência de furacões e depressões, como foi o caso de 2018 e 2019, em que ocorreram o furacão *Leslie* e a depressão *Elsa*, respetivamente.

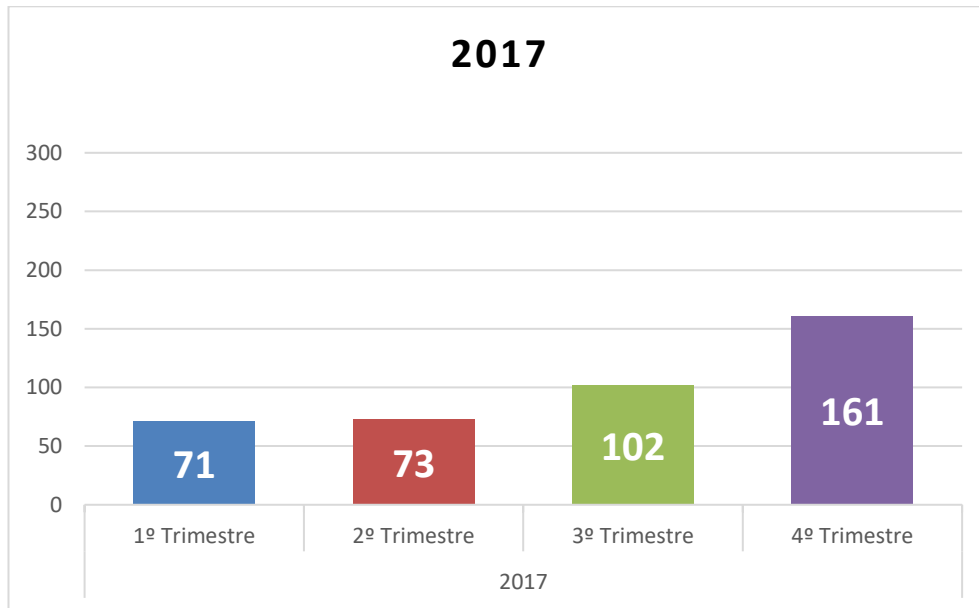


Figura 5-2 - Quantidade de incidentes de vegetação por trimestre de 2017.

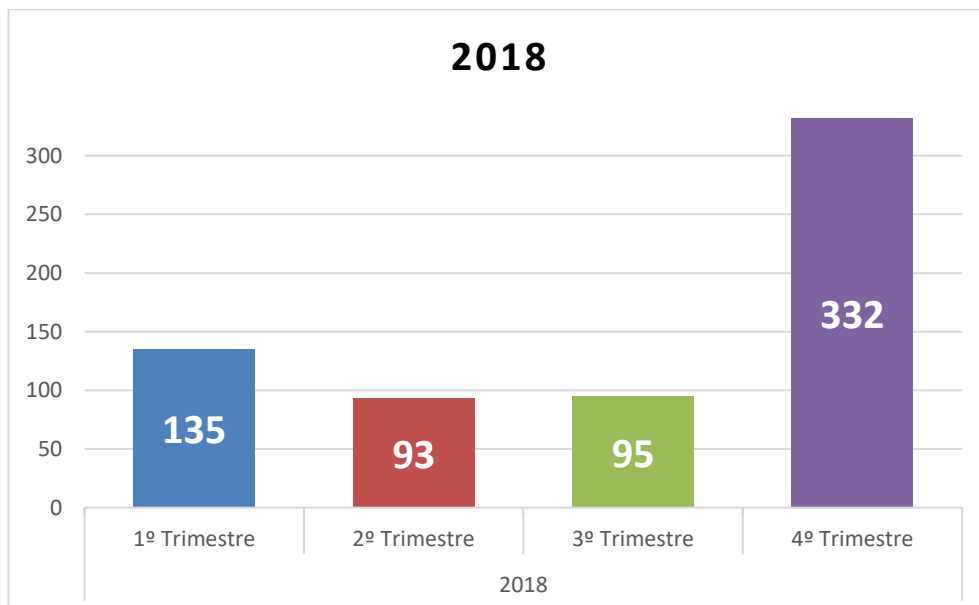


Figura 5-3 - Quantidade de incidentes de vegetação por trimestre de 2018.

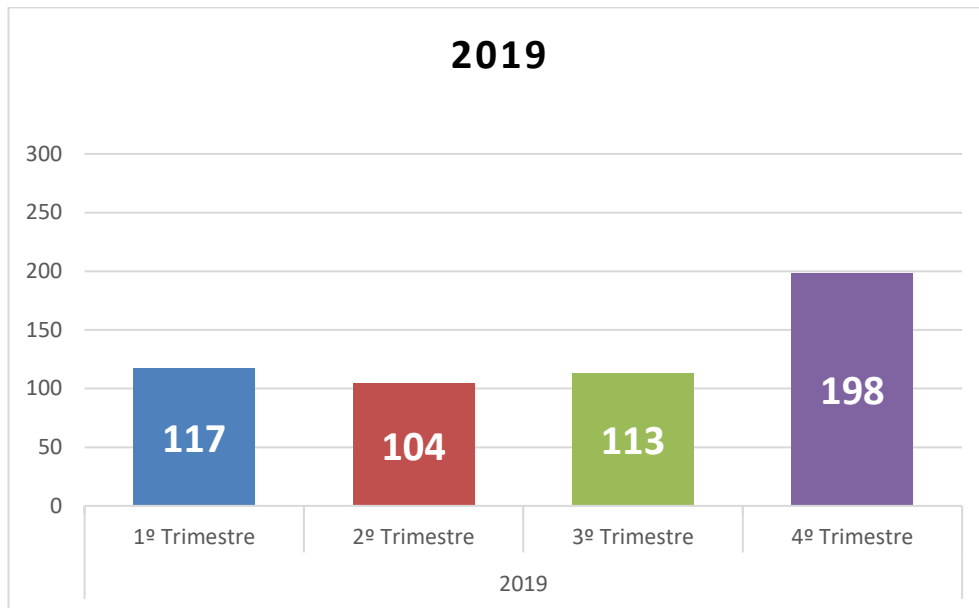


Figura 5-4 - Quantidade de incidentes de vegetação por trimestre de 2019.

Com as Figura 5-2 a Figura 5-4 pode ser traçado um padrão em que o quarto trimestre, como já foi dito, é quando ocorrem mais incidentes, seguido pelo primeiro trimestre, depois o terceiro trimestre e, por último, vem o segundo trimestre. Somente o ano de 2017 não seguiu esse padrão, já que o primeiro trimestre não ficou em segundo lugar.

Outro ponto que deve ser notado é que em quase todos os trimestres têm-se uma média de mais de um incidente de vegetação por dia, um número que pode ser considerado bastante elevado.

- **Quantidade de interrupções de energia devido à vegetação**

Na Tabela 5-5 é detalhado a quantidade de interrupções de energia derivados de incidentes de vegetação.

Tabela 5-5 - Quantidade de interrupções de energia causados por vegetação.

Ano	Interrupções de Energia	Total de Incidentes VEG
2017	173	407
2018	339	655
2019	251	532

Os gráficos a seguir mostram os valores da Tabela 5-5 em percentagem, mostrando que entre um pouco mais de quarenta por cento e um pouco acima de cinquenta por cento dos incidentes VEG resultaram em falta de energia.

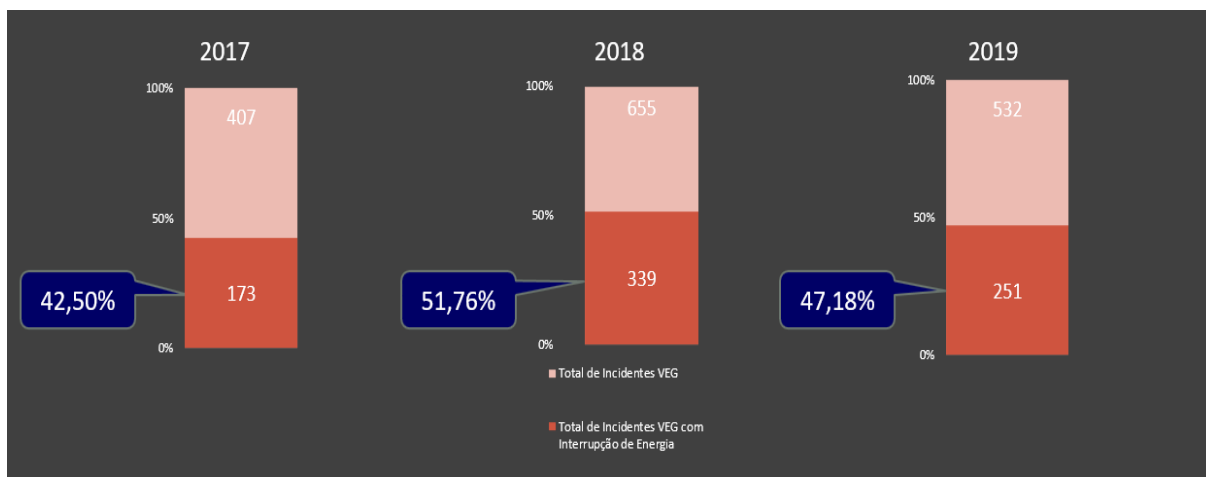


Figura 5-5 - Gráficos com valores percentuais das interrupções de energia.

- **Tipos de vegetação associados aos incidentes**

Ao longo da análise feita um dos objetivos era identificar quais os tipos de árvores causavam mais defeitos na rede elétrica, porém como é mostrado da Figura 5-6 a Figura 5-8 não foi possível atingir esse objetivo por falta de informação por parte dos técnicos eletricitas que iam a campo resolver o incidente, pois não era uma obrigação do mesmo saber que tipo de árvore era e, mesmo que soubesse, não era necessário reportar o tipo da vegetação.

É possível notar a partir da Figura 5-6 a Figura 5-8 que dentro dos tipos de árvores identificadas, o pinheiro é o maior causador de incidentes de vegetação, seguido pelos eucaliptos e os outros tipos não tem valores tão expressivos.

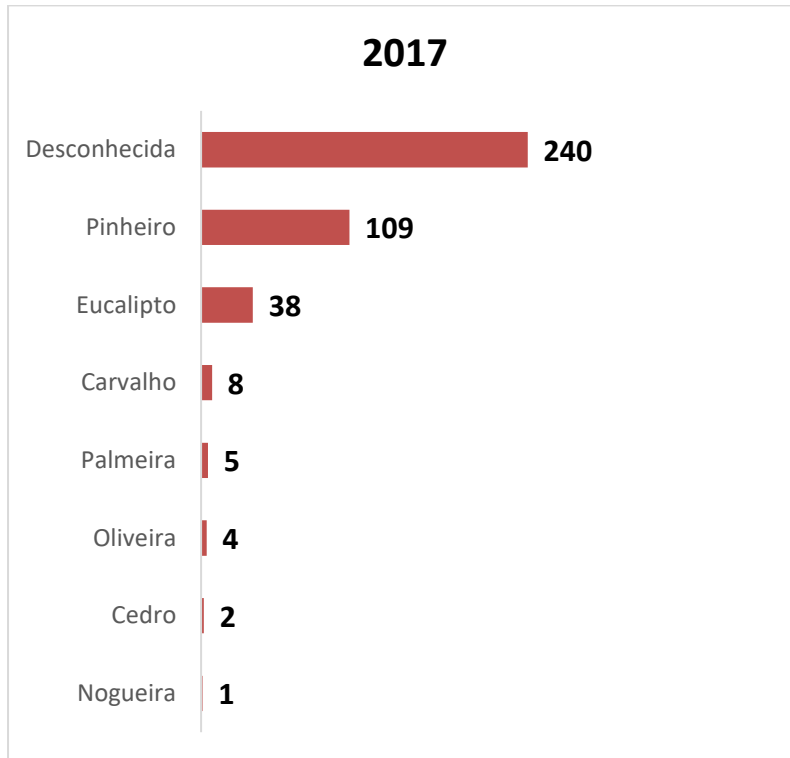


Figura 5-6 - Tipos de vegetação causadores de incidentes de 2017.

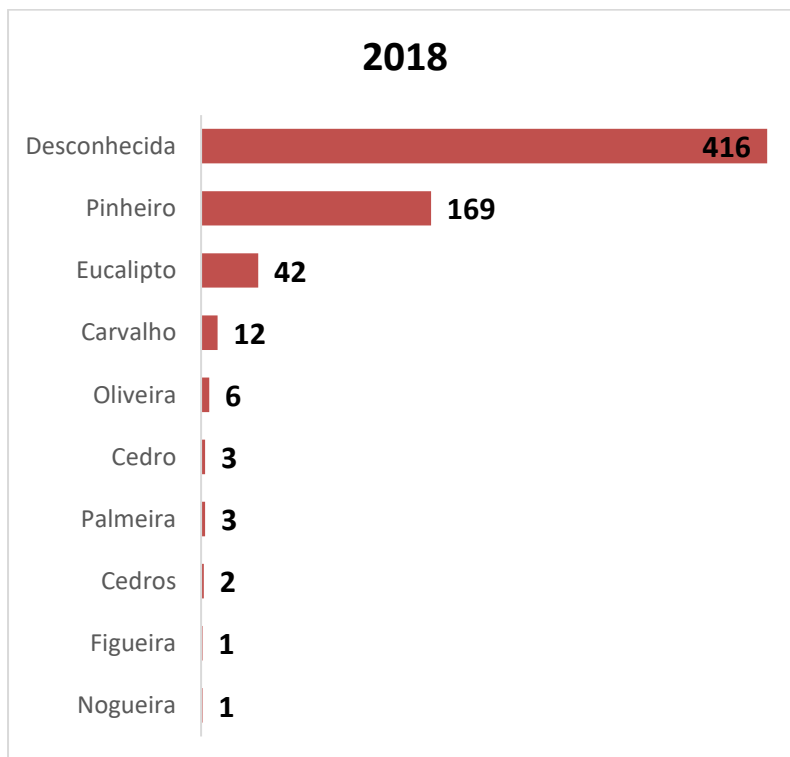


Figura 5-7 - Tipos de vegetação causadores de incidentes de 2018.

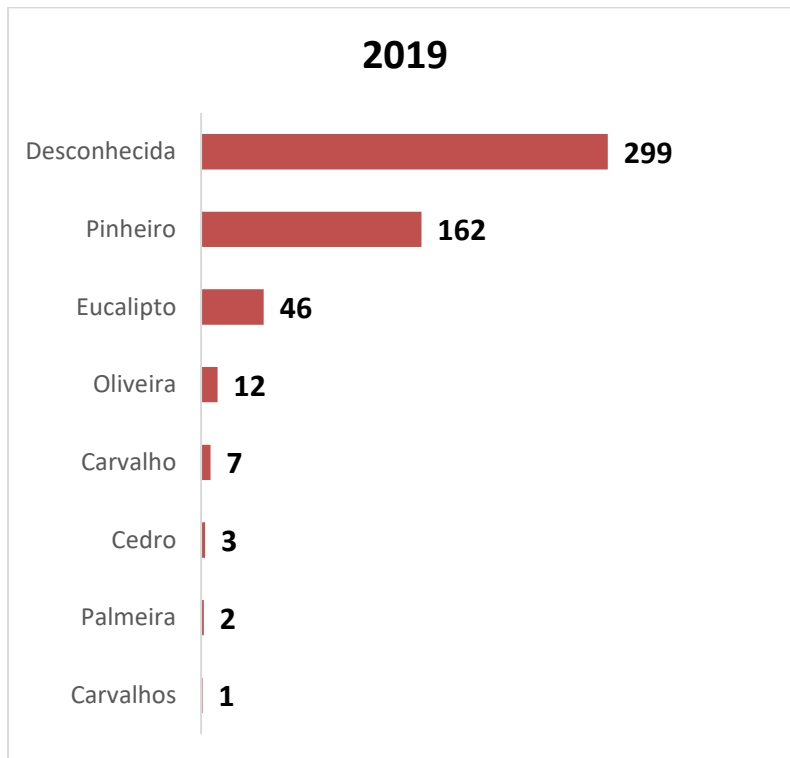


Figura 5-8 - Tipos de vegetação causadores de incidentes de 2019.

- **Equipamentos mais afetados por incidentes de vegetação**

Como era de se esperar o equipamento mais afetado por incidente de vegetação nos três anos analisados são os cabos de Baixa Tensão, como é mostrado da Figura 5-9 a Figura 5-11. É importante citar que outros equipamentos como as pinças, que seguram os cabos nos postes, e os próprios postes também tem sua parcela afetada por incidentes VEG.

Vale ressaltar também o custo que esses equipamentos acarretam à EDP, em que uma intervenção em um cabo de Baixa Tensão custa entre duzentos e trezentos euros e se por um acaso não for necessário realizar nenhuma intervenção existe ainda um mínimo de sessenta e cinco euros, por causa da deslocação dos técnicos eletricitistas ao local do incidente.

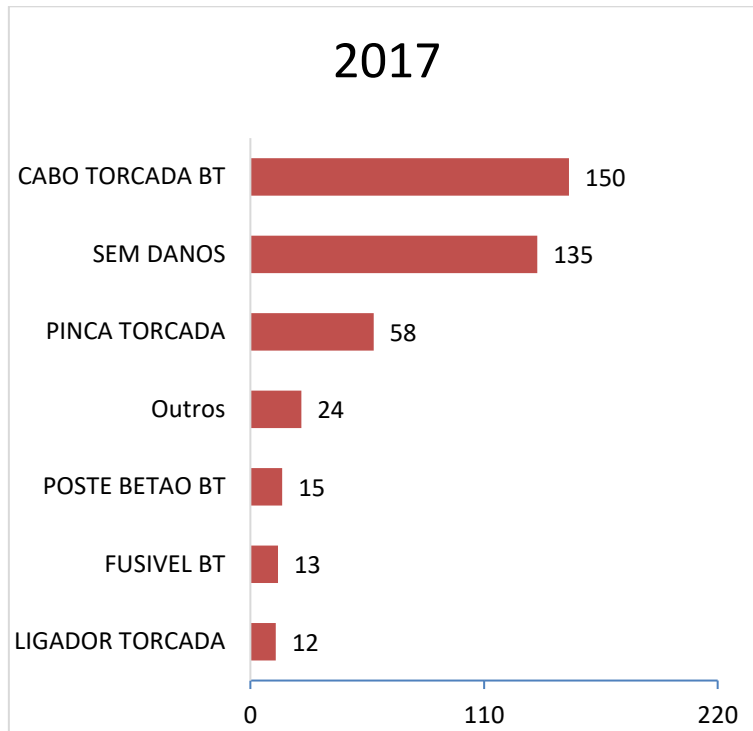


Figura 5-9 – Equipamentos mais afetados por incidentes VEG em 2017.

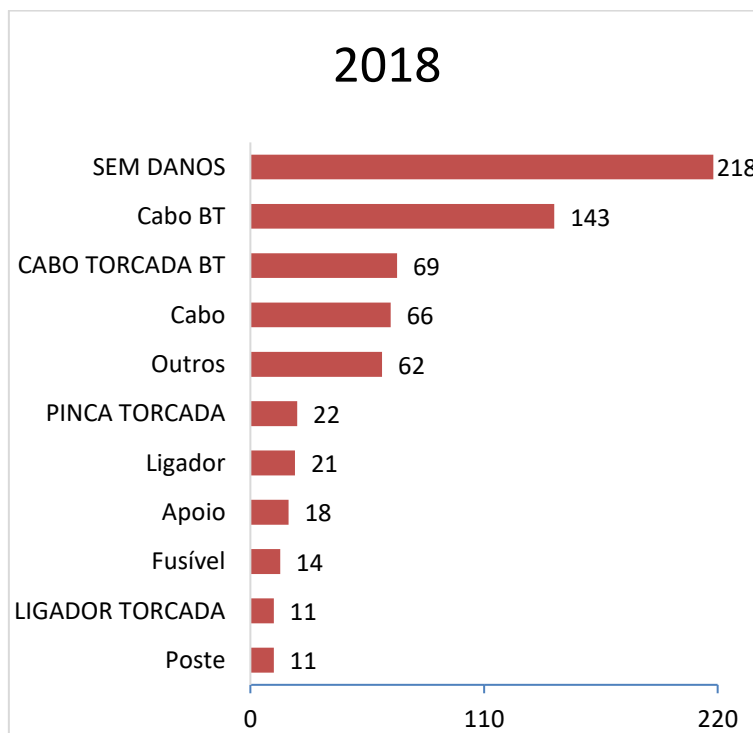


Figura 5-10 – Equipamentos mais afetados por incidentes VEG em 2018.

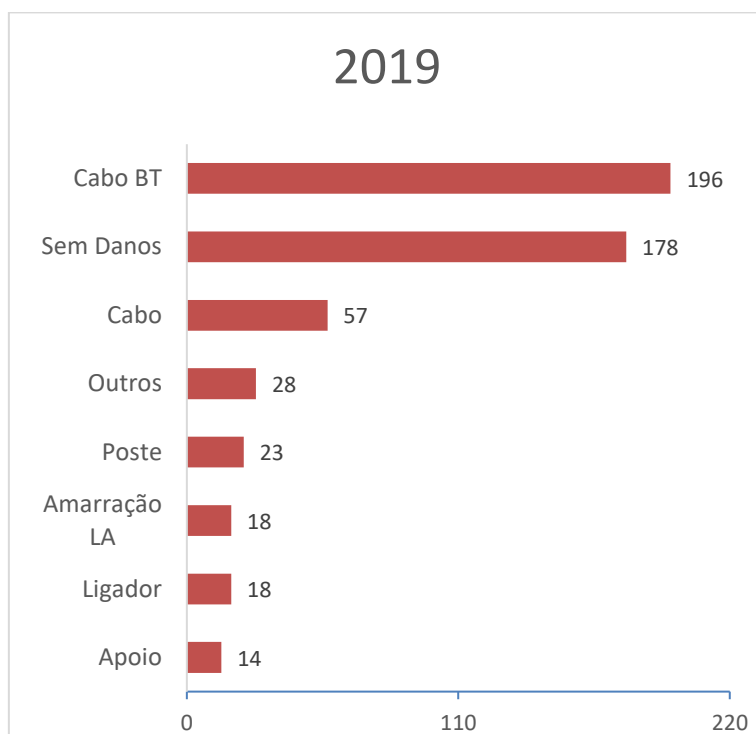


Figura 5-11 – Equipamentos mais afetados por incidentes VEG em 2019.

Na Tabela 5-6 mostra os valores aproximados dos custos que a EDPD de Leiria teve com os danos de cabos de Baixa Tensão em cada ano analisado e o total dos três anos. Pode-se observar que são valores altos e que não estão sendo considerados o custo com os outros equipamentos afetados.

Tabela 5-6 – Custos aproximados relativos aos incidentes de vegetação.

Ano	Custo Aproximado
2017	€ 61.705,00
2018	€ 107.905,00
2019	€ 94.035,00
Custo Total	€ 263.645,00

- **Quantidade de incidentes de vegetação por concelho**

Através da localização de cada incidente VEG, foi possível fazer um ranking dos concelhos mais afetados por esse tipo de incidente. Na Figura 5-12 é mostrado o ano de 2017, em que o concelho de Leiria foi o mais atingido, seguido por Pombal e em terceiro Ourém. Pode-se

justificar a posição desses três concelhos por eles serem os maiores em questão de rede elétrica de Baixa Tensão.

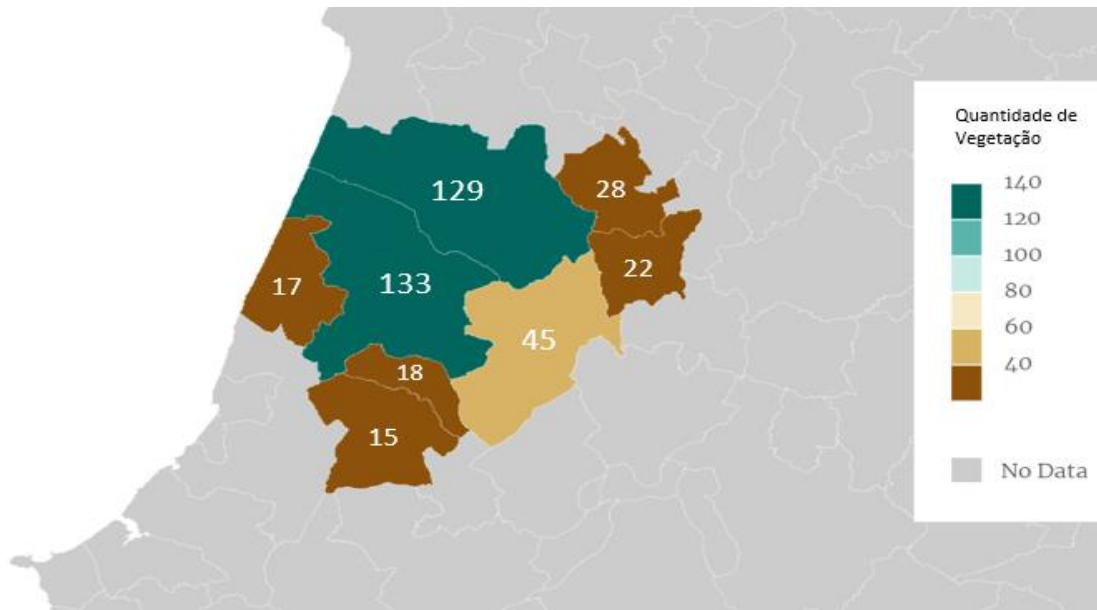


Figura 5-12 – Quantidade de incidentes de vegetação por concelho em 2017.

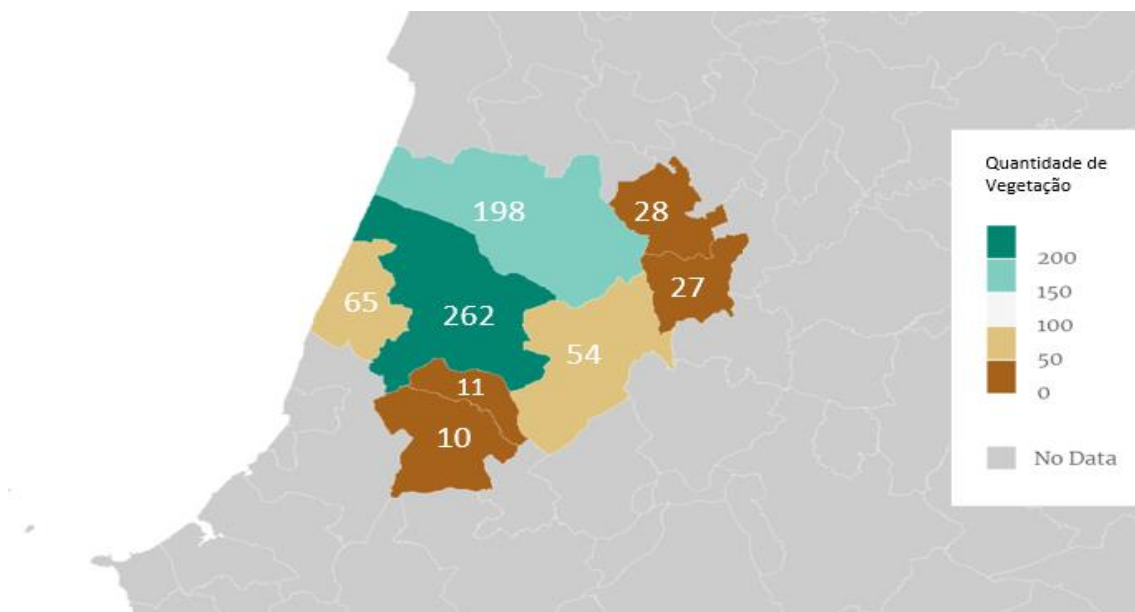


Figura 5-13 – Quantidade de incidentes de vegetação por concelho em 2018.

A Figura 5-13 mostra o ano de 2018 e nesse ano as duas primeiras posições foram iguais à 2017, porém a terceira posição foi trocada para o concelho da Marinha Grande, e pode-se atribuir esse facto ao furacão *Leslie*, o qual incidiu com mais gravidade nesse concelho.

Em 2019, o padrão retoma o que foi em 2017, com Leiria em primeiro, Pombal em segundo e Ourém em terceiro, como mostra a Figura 5-14.

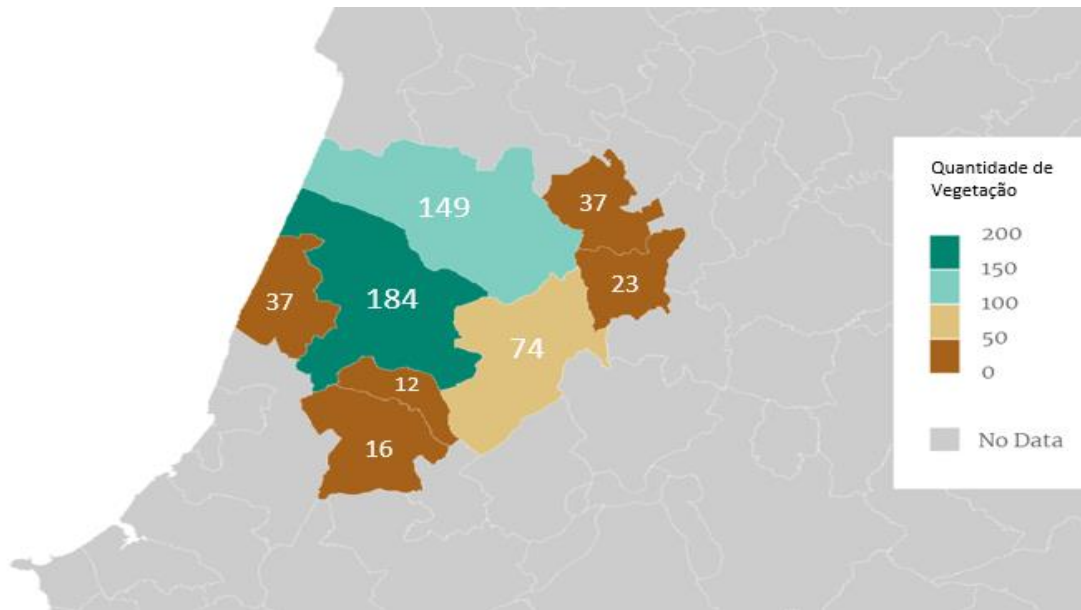


Figura 5-14 – Quantidade de incidentes de vegetação por concelho em 2019.

- **Impacto dos incidentes no SAIDI BT**

Os gráficos da Figura 5-15 mostram em níveis percentuais o impacto que os incidentes de vegetação tiveram no SAIDI BT.

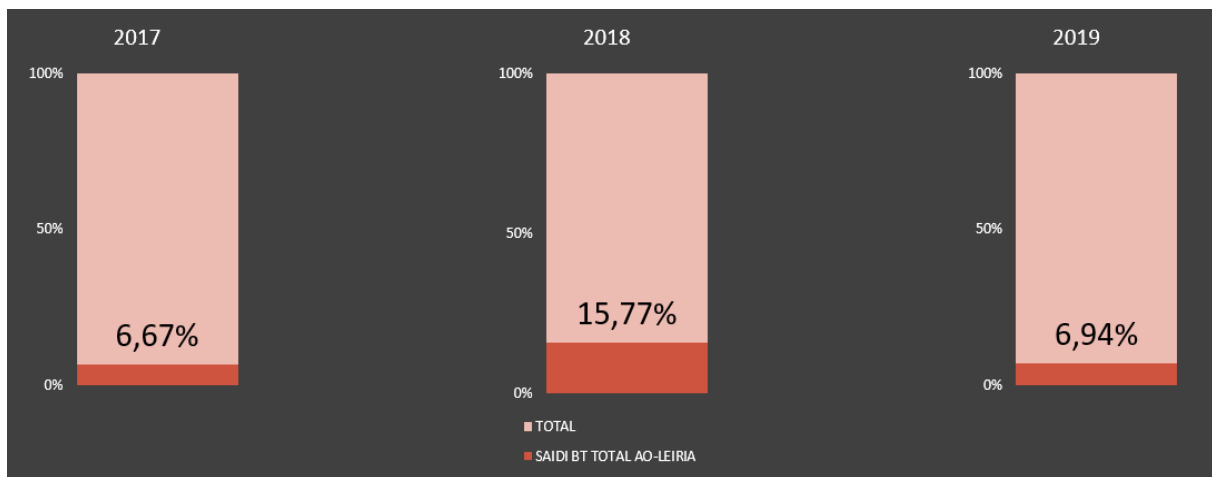


Figura 5-15 – Gráficos relativos aos níveis percentuais do SAIDI BT referentes aos incidentes VEG por ano.

Pode-se observar que 2018 teve um número muito maior que os outros dois anos, e novamente o porquê disso é o furacão *Leslie*. Além desse ponto, outro detalhe que deve se atentar é que

esse não é o valor final do SAIDI BT para esses anos, já que muitos desses incidentes são provenientes de chuvas, tempestades e, como já foi explicado no capítulo 4, esses incidentes se enquadram como causados por força maior e estes não entram para o cálculo de SAIDI.

5.3. Metodologia Científica

Após a análise dos resultados do impacto da vegetação nas redes de Baixa Tensão nos concelhos abrangidos pelo UML, foi proposto pelo autor deste relatório aplicar uma metodologia científica no cenário real da EDPD. A metodologia proposta já foi revisada no capítulo 3, sendo esta apresentada no artigo cujo título é *Optimal scheduling of vegetation maintenance underneath overhead power distribution lines*, que em português significa cronograma otimizado de manutenção da vegetação debaixo das linhas aéreas de distribuição de energia.

No artigo de [7], os autores utilizaram uma pequena rede elétrica para sua pesquisa, composta por dezenove ramos, para aplicar um problema de programação linear, ou seja, aplicar uma otimização no cenário proposto, em que eles utilizaram um algoritmo genético para chegar ao resultado. Como resultado eles chegaram num cronograma otimizado, o qual diz em que trimestre do ano seria necessário, ou não, realizar o corte e desrame das árvores localizadas nos dezanove ramos, visando com isto minimizar a Energia Não Distribuída (END).

Para aplicar essa metodologia no cenário da EDPD, ao invés de aplicar em todos os ramos existentes da rede elétrica dos oito concelhos, foi proposto aplicar em cada posto de transformação (PT) como se estes fossem os ramos. Outra mudança do artigo original é que os autores do artigo tinham em uma de suas equações de restrição um limite máximo de para realizar o corte e desrame das árvores, com esse valor máximo dado em quilómetros, porém na EDPD não existe essa restrição por quilómetros para realizar tal tarefa. Na realidade, o que restringe à EDPD quanto ao limite de poder limpar a vegetação ao longo dos cabos é uma questão financeira. Portanto, essa restrição foi adaptada para o caso real, em que cada limpeza de um vão custa aproximadamente vinte e cinco euros e o valor utilizado para decidir qual seria o máximo possível a ser cortado foi oitenta e um mil euros, pois este foi o custo que a EDPD teve com limpeza de vãos no ano de 2018.

Dessa forma, o problema de otimização proposto para a EDPD está composto da seguinte equação objetivo e de suas três restrições, apresentadas a seguir, em que i corresponde ao número de PTs e t corresponde ao trimestre do ano.

$$\min END = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{NPT} [I(i, t)] \times [DM(i, t)] \times [(1 - x(i, t))] \quad (5.2)$$

Sujeito a:

$$\sum_{t=1}^T x(i, t) \leq 1 \quad (5.2)$$

$$\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{NPT} [25 \times NV(i, t)] \times [x(i, t)] \leq C_{m\acute{a}x} \quad (5.3)$$

$$\left(\frac{1}{TNC} \times \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{NPT} [\lambda_{falhas}(i, t)] \times [(1 - x(i, t))] \times NC(i) \right) \leq SAIFI \quad (5.4)$$

A Equação 5.1 corresponde ao cálculo da END, em que o objetivo é conseguir minimizar o valor da END ao máximo de acordo com as restrições apresentadas. Nessa equação é feita uma multiplicação entre a Indisponibilidade de serviço, que corresponde ao número de horas de indisponibilidade de um equipamento, nesse caso, é como se fosse o PT, por ano, e a Demanda Média de cada PT. A parte da equação em que é multiplicado por $[1 - x(i, t)]$ é justamente para saber qual PT vai influenciar no valor final da END, já que as variáveis $x(i, t)$ assumem somente o valor de 1 ou 0. Para chegar no valor de indisponibilidade foi considerado um valor constante para os reparos dos incidentes de vegetação, no caso duas horas cada incidente. Então esse valor constante foi multiplicado pelo valor da taxa de falhas daquele PT e dividido por 8760, que é o número de horas equivalentes a um ano completo.

As equações de restrição estão apresentadas da Equação 5.2 a 5.4. Sendo a Equação 5.2 a mais simples e que serve somente para garantir que àquele PT receba limpeza de seus vãos apenas uma vez no ano.

A Equação 5.3 diz respeito a restrição financeira para o corte e desrame de árvores, em que o lado direito da equação é a multiplicação do preço unitário, vinte e cinco euros, para a limpeza

de um vão e o número de vãos que aquele PT contém. O lado esquerdo representa o custo máximo que o orçamento da EDPD disponibilizou.

A equação de restrição 5.4 serve para garantir que o número de interrupções máximo, ou seja, o SAIFI, não seja ultrapassado. Nesse caso, quem define o valor do SAIFI, como já mencionado anteriormente no capítulo 4, é a ERSE. A equação utiliza o número total de consumidores, a taxa de falhas e o número de consumidores de cada PT.

Para realizar essa otimização, foi preciso tratar alguns dados e, em seguida, selecionar uma linguagem de programação para executar a otimização. Esta seção está dividida em três partes, a primeira é dedicada somente ao tratamento dos dados, a segunda explicará o processo de chegar numa linguagem de programação e conseqüentemente num solver que fosse útil ao caso, a última parte é voltada para a discussão dos resultados.

5.3.1. Tratamento de dados

Parte do levantamento de dados da Seção 5.1 foi útil para o tratamento de dados para essa metodologia científica proposta, pois um dos dados necessários para a otimização é a taxa de falhas de cada PT e para obter esses dados, como os incidentes de vegetação já estavam identificados, na planilha de incidentes também é informado a qual PT àquele incidente está relacionado.

A primeira etapa realizada foi a criação de uma planilha no EXCEL, chamada de *Dados para Otimização*, em que nela foram criadas várias folhas de dados, como mostra a Figura 5-16.

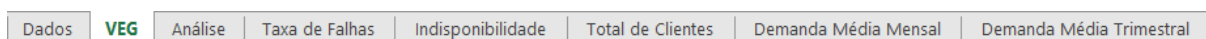


Figura 5-16 – Folhas de dados da planilha *Dados para Otimização*.

A folha de dados chamada *Dados* corresponde a todos os incidentes dos anos de 2017 a 2019, ou seja, as três planilhas de incidentes de cada ano analisado foram concatenadas em uma única, para que fosse mais fácil a manipulação dos dados.

A folha de dados chamada *VEG* foi criada com o propósito de identificar de qual PT cada incidente de vegetação estava relacionado, como exemplo a Tabela 5-7 mostra uma parte da tabela criada.

Tabela 5-7 – Trecho da folha de dados *VEG*.

Número do Incidente VEG	Concelho	Posto de Transformação	Código Instalação EDP criado	Código Instalação EDP	Data do Incidente	Data Formatada	Concelho/PT
7123883	1009	0552	1009B9055200	1009B9055201	20170102	02/01/17	10090552
7124027	1004	0140	1004B9014000	0	20170102	02/01/17	10040140
7124939	1009	0179	1009B9017900	0	20170102	02/01/17	10090179
7126317	1015	0291	1015B9029100	0	20170103	03/01/17	10150291
7130718	1421	0250	1421B9025000	0	20170106	06/01/17	14210250
7133733	1421	0088	1421B9008800	0	20170109	09/01/17	14210088
7135226	1015	0264	1015B9026400	0	20170110	10/01/17	10150264
7136397	1015	0308	1015B9030800	1015B9030801	20170111	11/01/17	10150308
7137529	1015	0020	1015B9002000	0	20170112	12/01/17	10150020
7137974	1016	0003	1016B9000300	1016B9000301	20170112	12/01/17	10160003

A coluna correspondente ao número do incidente VEG da Tabela 5-7 são os incidentes previamente identificados no estudo de caso do capítulo anterior. Na folha de dados *Dados* os campos Concelho, Posto de Transformação, Código Instalação EDP e Data do Incidente, por isso para capturar os valores dessas colunas foi utilizado a fórmula PROCV, a qual procura pelo valor do número do incidente na tabela de *Dados* e devolve o valor dos respectivos campos. Foi criada uma coluna auxiliar chamada de Código Instalação EDP criado, a qual concatena o número do concelho com o posto de transformação e acrescenta entre esses dois valores “B9” e no fim acrescenta “00”, pois é dessa forma que o código de instalação é visto na EDP. O outro motivo para a criação dessa coluna auxiliar é porque na folha *Dados* o campo Código Instalação EDP muitas vezes não é preenchido.

Como se pode ver também na Tabela 5-7, a data retirada da planilha de incidentes está num formato de apenas números, porém para ser utilizada e reconhecida como data em tabelas dinâmicas, esse valor tem que estar em formato de data, por isso foram utilizadas em combinação as fórmulas DATA, ESQUERDA, DIREITA e SEG.TEXTO para formatar a data corretamente.

A última coluna é justamente o valor final utilizado para identificar o PT na otimização e esse valor é respetivo ao código do concelho junto com o número do PT.

Tabela 5-8 - Trecho da folha de dados *Análise*.

PTs	Incidentes VEG 2017				Incidentes VEG 2018				Incidentes VEG 2019			
	1º Trimestre	2º Trimestre	3º Trimestre	4º Trimestre	1º Trimestre	2º Trimestre	3º Trimestre	4º Trimestre	1º Trimestre	2º Trimestre	3º Trimestre	4º Trimestre
10090552	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
10040140	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
10090179	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10150291	2	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0
14210250	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	1
14210088	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
10150264	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10150308	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10150020	3	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	3
10160003	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14210070	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14210138	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10150425	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10150257	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0
10150192	1	1	1	7	0	0	0	1	0	0	0	0
10090437	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10090069	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
14210103	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Na Tabela 5-8 é mostrada uma parte da folha de dados *Análise*, a qual foi criada para identificar em que trimestre de cada ano ocorreu um incidente de vegetação em cada PT identificado na folha *VEG* e também a quantidade de incidentes, já que num mesmo ano e num mesmo trimestre pode ter ocorrido mais de um incidente VEG num PT. Para saber esses valores, foi utilizado a fórmula *CONTAR.SE.S* do *EXCEL*, a qual permite introduzir vários critérios e, se todos forem atendidos, ela retorna o valor da contagem de quantas vezes eles foram atendidos. Nesse caso em particular, os critérios utilizados foram se o número do PT era igual ao procurado e se a data do incidente estava no período daquele trimestre.

Dessa forma, ao fim de reconhecer os incidentes dos PTs de cada trimestre, os PTs foram agrupados, de modo que se tem o total de PTs, que serão, na realidade a quantidade variáveis para o problema de otimização.

O próximo passo foi encontrar os valores das taxas de falhas trimestrais por ano de cada PT. Uma vez que foi obtido no passo anterior os valores totais trimestrais de cada ano de incidentes de cada PT, bastou somar os valores correspondentes ao primeiro trimestre de cada ano e dividir por três para cada PT e repetir esse processo para o segundo, o terceiro e quarto trimestre. A Tabela 5-9 mostra uma parte da folha de dados *Taxa de Falhas*.

Tabela 5-9 - Trecho da folha de dados *Taxa de Falhas*.

PTs	1º Trimestre	2º Trimestre	3º Trimestre	4º Trimestre
10020002	0	0,666666667	0	0
10020005	0,333333333	0	0	0
10020006	0	0	0,666666667	0,333333333
10020007	0	0,333333333	0	0
10020010	0	0	0,333333333	0
10020018	0	0,333333333	0,333333333	0,333333333
10020019	0	0	0	0,333333333
10020023	0,333333333	0	0	0
10020024	0	0	0,666666667	0
10020026	0	0	0,333333333	0,666666667
10020032	0	0,666666667	0,333333333	0,333333333
10020033	0	0	0,333333333	0,333333333
10020038	0	0,333333333	0	0
10020041	0	0,333333333	0	0,666666667
10020044	0	0	0	0,333333333
10020047	0	0,333333333	0	0,666666667
10020050	0,333333333	0,333333333	0,333333333	0

Após obter os valores das taxas de falhas, foi obtido os valores da indisponibilidade de serviço dos PTs, conforme já mencionado anteriormente, ou seja, o valor da taxa de falha multiplicado pelo tempo de reparo, considerado duas horas para todos os incidentes, dividido por 8760 horas. A Tabela 5-10 mostra os valores de indisponibilidade dos PTs respectivos da Tabela 5-9.

Tabela 5-10 – Trecho da folha de dados *Indisponibilidade*.

PTs	1º Trimestre	2º Trimestre	3º Trimestre	4º Trimestre
10020002	0	0,000152207	0	0
10020005	7,61035E-05	0	0	0
10020006	0	0	0,000152207	7,61035E-05
10020007	0	7,61035E-05	0	0
10020010	0	0	7,61035E-05	0
10020018	0	7,61035E-05	7,61035E-05	7,61035E-05
10020019	0	0	0	7,61035E-05
10020023	7,61035E-05	0	0	0
10020024	0	0	0,000152207	0
10020026	0	0	7,61035E-05	0,000152207
10020032	0	0,000152207	7,61035E-05	7,61035E-05
10020033	0	0	7,61035E-05	7,61035E-05
10020038	0	7,61035E-05	0	0
10020041	0	7,61035E-05	0	0,000152207
10020044	0	0	0	7,61035E-05
10020047	0	7,61035E-05	0	0,000152207
10020050	7,61035E-05	7,61035E-05	7,61035E-05	0

O próximo dado necessário para a otimização foi o número de clientes por PT, que, conseqüentemente, somando a quantidade de clientes de cada PT, o valor total de clientes é obtido.

Para conseguir identificar quantidade de clientes por PT, foram disponibilizadas várias planilhas com a quantidade de clientes por ramal, em que também eram identificados a alimentação desses ramais, ou seja, por qual circuito de um PT esses clientes estavam sendo alimentados. Através de tabelas dinâmicas, foi facilmente encontrado o valor da quantidade clientes por PT.

De maneira similar à quantidade de clientes por PT, para encontrar o comprimento dos troços BT foram disponibilizadas várias planilhas, uma planilha por concelho, em que constavam os valores dos comprimentos das linhas BT, portanto os valores por PT também foram obtidos através de tabelas dinâmicas. Porém a equação de restrição para o problema de otimização não

leva em conta diretamente, o que é utilizado na realidade é o número de vãos que cada PT possui. Portanto, para obter o número de vãos de cada PT, foi adotado um valor fixo de 90 metros cada vão, assim ao dividir o comprimento total de linha BT de cada PT por 90, resulta no número de vãos.

Uma das partes mais desafiantes do tratamento de dados foi conseguir os dados relativos aos consumos dos PTs, pois foi disponibilizado três planilhas com os consumos dos PTs de 2019, em que cada planilha dessas continha os consumos referentes a quatro meses do ano (janeiro a abril, maio a agosto e setembro a dezembro). O problema das planilhas era o seu tamanho, cada planilha tinha aproximadamente 1,7Gb e possuíam aproximadamente 34 milhões de linhas de dados e pelo EXCEL só é possível visualizar um pouco mais de 1 milhão de linhas de dados. Várias tentativas, com vários softwares diferentes, foram realizadas e sem sucesso. Até que através do próprio EXCEL, criando um modelo de dados foi conseguido importar os dados das planilhas e para conseguir manipulá-los foi utilizado um complemento do EXCEL chamado PowerPivot.

Na figura a seguir é mostrado a tela do PowerPivot com os separadores indicando que as três planilhas foram lidas. Pode-se perceber que o PowerPivot é bastante semelhante ao EXCEL, porém nele para escrever fórmulas é diferente, pois este possui a própria linguagem chamada DAX. Dessa forma, foi criada uma coluna auxiliar para identificar apenas o mês do registo do consumo, os quais são listados a cada quinze minutos, como se pode ver na Figura 5-17.

Após criar essa coluna no PowerPivot, se pode usar o EXCEL novamente, mais especificamente as tabelas dinâmicas, já que através destas se consegue ter acesso ao modelo de dados criado e também fica disponível a coluna criada no PowerPivot, a Figura 5-18 mostra os campos disponíveis para manipulação da tabela dinâmica.

Dessa forma, as folhas de dados *Demanda Média Mensal* e *Demanda Média Trimestral* foram criadas, completando todos os dados necessários para o algoritmo da programação linear criado, que será explicado na próxima seção.

Power Pivot para Excel - Tratativa de dados de consumo.xlsx

Ficheiro **Base** **Estrutura** **Avançadas**

Colar | Da Base de Dados | Do Serviço de Dados | De Outras Origens | Ligações Existentes | Atualizar | Tabela Dinâmica | Tipo de Dados: | Formato: | Ordenar de A a Z | Ordenar de Z a A | Desmarcar Todos os Filtros | Ordenar por Coluna | Localizar | Soma Automática | Criar KPI | Vista de Dados | Vista de Diagrama | Mostrar Ocultos | Área de Cálculo

Área de Transferência | Obter Dados Externos | Formatação | Ordenar e Filtrar | Localizar | Cálculos | Ver

	CodigoPTD	Totalizador	Data	ActivaCli	ActivaProd	Mês 1	Adicionar Coluna
1	1003D2012500	TP1	01/01/2019 00:00:00	6		0 jan	
2	1003D2012500	TP1	01/01/2019 00:15:00	6		0 jan	
3	1003D2012500	TP1	01/01/2019 00:30:00	6		0 jan	
4	1003D2012500	TP1	01/01/2019 00:45:00	6		0 jan	
5	1003D2012500	TP1	01/01/2019 01:00:00	6		0 jan	
6	1003D2012500	TP1	01/01/2019 01:15:00	6		0 jan	
7	1003D2012500	TP1	01/01/2019 01:45:00	6		0 jan	
8	1003D2012500	TP1	01/01/2019 02:00:00	6		0 jan	
9	1003D2012500	TP1	01/01/2019 02:15:00	6		0 jan	
10	1003D2012500	TP1	01/01/2019 02:45:00	6		0 jan	
11	1003D2012500	TP1	01/01/2019 03:00:00	6		0 jan	
12	1003D2012500	TP1	01/01/2019 03:15:00	6		0 jan	
13	1003D2012500	TP1	01/01/2019 03:30:00	6		0 jan	
14	1003D2012500	TP1	01/01/2019 03:45:00	6		0 jan	
15	1003D2012500	TP1	01/01/2019 04:15:00	6		0 jan	
16	1003D2012500	TP1	01/01/2019 04:30:00	6		0 jan	
17	1003D2012500	TP1	01/01/2019 04:45:00	6		0 jan	

DRCT_2019_01_02_03_04 | DRCT_2019_05_06_07_08 | DRCT_2019_09_10_11_12

Registro: 1 de 32.819.705

Figura 5-17 – Exemplo da tela principal do PowerPivot.

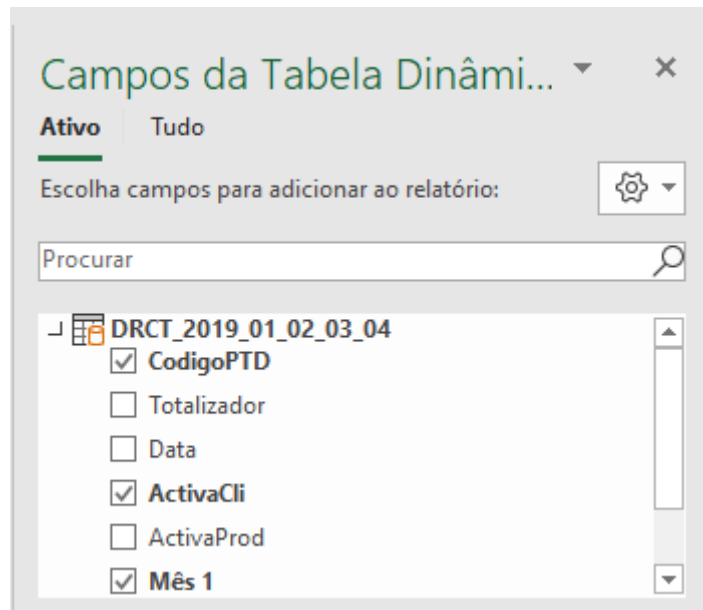


Figura 5-18 – Campos disponíveis da tabela dinâmica.

5.3.2. Programação Linear

Para a criação do algoritmo de otimização, uma escolha da linguagem de programação teve de ser feita, a princípio tudo foi feito em *Python*, pelo facto de ser gratuito, porém por motivos de comparação foi decidido criar um algoritmo também em *MATLAB*. Quando se fala de otimização, deve-se fazer outra escolha, qual *solver* utilizar. *Solver* é o solucionador de programação linear e pode ser gratuito ou pago. A diferença entre ser pago ou gratuito é que normalmente o pago tem uma performance muito melhor. Para o *Python* foi escolhido trabalhar com um pacote de modelação de programação linear, cujo *solver* por defeito é o *COIN Branch and Cut solver* (CBC), segundo [15] este *solver* é *open-source* para ser utilizado em Problema de Programação Inteira (MIP, em inglês). Já para o *MATLAB*, este possui seu próprio *solver*.

A seguir será descrito de forma genérica de como os códigos foram desenvolvidos e os códigos de facto estão presentes no anexo.

O *Python*, assim como o *MATLAB*, possui diversas bibliotecas com várias funções destinadas à objetivos específicos. A diferença entre as duas linguagens nesse quesito é que o *MATLAB* se adquire essas bibliotecas na compra do software e no *Python* deve-se realizar o *download* das bibliotecas necessárias para a aplicação e importá-las no código.

Feita as importações das bibliotecas, utiliza-se as funções de cada linguagem para se extrair o conteúdo do ficheiro em EXCEL e armazená-las em variáveis. A partir dessas variáveis criadas serão criadas as matrizes e vetores que serão utilizados no problema de programação linear, sendo estas matrizes e vetores respetivos aos valores da Indisponibilidade do sistema, do Consumo Médio, das Taxas de Falhas, do Número de Vãos por PT e do Número de Consumidores por seguimento.

Em seguida, são criadas as constantes necessárias para o modelo e a elas são atribuídos valores. Essas constantes correspondem ao valor do Total de Consumidores no sistema estudado, do Custo Máximo, que também pode ser interpretado como o orçamento máximo permitido para a realização da limpeza dos vãos, do SAIFI máximo permitido, valor este que é estipulado no MQS, e também ao valor constante de um para forçar que cada PT seja cortado somente uma vez no ano, como já foi explicado anteriormente.

Com todas as constantes, matrizes e vetores com valores atribuídos, tem-se uma pequena diferença na forma de construção do código nas duas linguagens. No *Python*, nesse momento já deve-se criar o modelo de otimização, enquanto no *MATLAB* o modelo é criado posteriormente.

O próximo passo é a criação das variáveis de controle binárias, em que foram criadas 3.564 variáveis de controle, correspondentes aos 891 PTs vezes os 4 trimestres do ano. Depois as equações de restrição e a equação objetivo são criadas, sendo utilizadas as variáveis de controle binárias para a criação destas.

É neste momento em que é criado o modelo de otimização no *MATLAB*, o que faz com que nas duas linguagens a criação do modelo seja concluída.

Como etapa final, nas duas linguagens, é a resolução do problema, em que são necessárias algumas etapas para gerar um ficheiro de extensão *.CSV* com o resultado em *Python*, já no *MATLAB*, o resultado é armazenado numa variável chamada *sol*.

5.3.3. Resultados

O algoritmo criado em *Python* não foi muito útil, pois ele não conseguiu gerar nenhum resultado, provavelmente devido a uma limitação do solver utilizado, o algoritmo não aceitou que os valores de indisponibilidade de serviço fossem muito parecidos entre si, o que era o caso com os dados para essa otimização. Para redes menores, com menos variáveis e com valores mais distintos entre si, o algoritmo se mostrou eficiente.

Já o algoritmo do *MATLAB* gerou resultados coerentes e bastante interessantes, a tabela a seguir mostra apenas uma parte do cronograma otimizado para corte e desrame de árvores devido a este ser muito extenso, porém seu conteúdo completo está presente no anexo deste relatório.

Tabela 5-11 – Trecho do cronograma otimizado para corte e desrame de árvores.

PTs	1° T	2° T	3° T	4° T
10090006	1	0	0	0
10090008	0	0	0	0
10090010	0	0	0	0
10090032	0	0	0	0
10090033	0	0	0	0
10090035	0	0	0	0
10090036	0	0	0	0
10090038	0	0	0	1
10090081	0	0	0	0
10090082	0	0	1	0

Como se pode notar na tabela 6-5, os PTs 1009006, 10090038 e 10090082 devem receber limpeza de seus vãos no primeiro trimestre, no quarto trimestre e no terceiro trimestre, respectivamente.

Em relação à END, a tabela a seguir mostra os resultados, em que tendo como base a END de 2019, quando o valor desta foi 107.300 kWh, porém este valor corresponde à todos os incidentes que ocorreram nos concelhos abrangidos pela UML, o valor da END no pior caso seria se nenhum PT recebesse uma limpeza de seus vãos é de 8.543 kWh/ano, o que representaria aproximadamente 8% da END total, sendo este um resultado coerente já que os incidentes de vegetação impactam por volta de 15% dos incidentes totais.

E se o cronograma fosse seguido, o valor da END seria 6.563 kWh/ano, o que representaria uma redução de 23,18%.

Tabela 5-12 – Resultado da END após otimização.

END de Referência (2019)	END Pior Caso	END Otimizado	Resultado
107300 kWh	8543 kWh/ano	6563 kWh/ano	23,18% de redução

O capítulo a seguir é o último desse relatório, em que serão apresentadas as conclusões, assim como sugestões para trabalhos futuros, para que o trabalho possa ser melhorado e se torne mais fidedigno com o cenário real.

6. Conclusões

A vegetação ao redor das linhas elétricas é uma situação que sempre vai existir e sua manutenção deve ser tratada com a devida atenção, para que a população não sofra com as interrupções de energia, já que a eletricidade é um bem essencial para nossas vidas. A EDPD mostrou-se muito empenhada em evitar que incidentes relativos às vegetações aumentassem, apesar da extensa rede de energia elétrica BT.

O intuito do estágio aqui relatado foi realizar um estudo do impacto da vegetação nas redes de Baixa Tensão e pode-se constatar que esse objetivo foi alcançado, assim como, os outros objetivos específicos e gerais traçados no início do estágio, principalmente, no que se tratou da vivência do dia-a-dia do trabalho na engenharia eletrotécnica. Outro ponto a ser destacado é que sem o suporte e orientação do Eng.º Bruno Gonçalves, assim como todo o apoio do departamento de manutenção, essa experiência não teria sido tão proveitosa. Vale ressaltar também que o presente trabalho foi apresentado internamente na EDP, obtendo um *feedback* positivo a respeito do estudo.

Deve-se apontar que este relatório é referente ao estágio realizado no fim de 2019 até meados de maio de 2020 e no fim do estágio a EDPD estava ainda passando por uma grande reestruturação, em que foi criado um departamento específico para a vegetação, portanto é provável que a empresa tenha criado melhores formas de combater esses incidentes.

Como já foi dito anteriormente, no capítulo 2, a pandemia que se vive hoje em dia acabou por atrapalhar a experiência total do estágio, já que não pôde ser realizado as análises de projetos de instalação elétrica no serviço público. Porém, é verdade, que esse foi uma excelente primeira experiência com a vivência da engenharia elétrica.

6.1. Trabalhos futuros

O caso de estudo apresentado mostrou resultados positivos para o cenário da época em o estágio foi realizado, porém para estudos futuros seria ideal ter um maior conhecimento a respeito da vegetação dos concelhos abrangidos. Dessa forma seria possível realizar um estudo mais completo e utilizar outros modelos matemáticos para o problema de otimização, por exemplo, seria possível incluir no modelo variáveis relativas à taxa de crescimento das árvores.

Outra melhoria no processo de detecção da vegetação incidente nas linhas seria desenvolver e aplicar uma inteligência artificial, a qual ao tirar uma fotografia da árvore já identificasse que tipo de vegetação é, assim o mapeamento se tornaria muito mais fácil e não obrigaria os técnicos eletricitas que realizam as rondas soubessem todos os tipos de árvore que estão nas linhas de baixa tensão.

Referências Bibliográficas

- [1] «A EDP», *edp.com*. <https://www.edp.com/pt-pt/a-edp> (acedido Jul. 13, 2020).
- [2] «Gestão de redes de Distribuição de energia | EDP Distribuição». <https://www.edpdistribuicao.pt/pt-pt/gestao-de-processos-diretos> (acedido Jul. 14, 2020).
- [3] ERSE, «Regulamento da Qualidade de Serviço - 2017.pdf». 2017.
- [4] ERSE, «Manual Procedimentos da Qualidade de Serviço - 2017.pdf». 2017.
- [5] D. Cerrai, P. Watson, e E. N. Anagnostou, «Assessing the effects of a vegetation management standard on distribution grid outage rates», *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 175, p. 105909, Out. 2019, doi: 10.1016/j.epsr.2019.105909.
- [6] P. A. Kuntz, R. D. Christie, e S. S. Venkata, «Optimal vegetation maintenance scheduling of overhead electric power distribution systems», *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 17, n. 4, pp. 1164–1169, Out. 2002, doi: 10.1109/TPWRD.2002.804007.
- [7] A. Arias, R. A. Hincapie, M. Granada, e R. A. Gallego, «Optimal scheduling of vegetation maintenance underneath overhead power distribution lines», em *2012 Sixth IEEE/PES Transmission and Distribution: Latin America Conference and Exposition (T&D-LA)*, Montevideo, Set. 2012, pp. 1–6, doi: 10.1109/TDC-LA.2012.6319097.
- [8] J. S. Correa-Tamayo, A. Arias Londoño, e M. Granada-Echeverri, «Optimal management of vegetation maintenance and the associated costs of its implementation in overhead power distribution systems», *TecnoLógicas*, vol. 22, n. 45, pp. 91–107, Mai. 2019, doi: 10.22430/22565337.1173.
- [9] T. Dokic e M. Kezunovic, «Predictive Risk Management for Dynamic Tree Trimming Scheduling for Distribution Networks», *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 10, n. 5, pp. 4776–4785, Set. 2019, doi: 10.1109/TSG.2018.2868457.
- [10] D. W. Wanik, J. R. Parent, E. N. Anagnostou, e B. M. Hartman, «Using vegetation management and LiDAR-derived tree height data to improve outage predictions for electric utilities», *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 146, pp. 236–245, Mai. 2017, doi: 10.1016/j.epsr.2017.01.039.

- [11] S. J. Mills *et al.*, «Evaluation of Aerial Remote Sensing Techniques for Vegetation Management in Power-Line Corridors», *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 48, n. 9, pp. 3379–3390, Set. 2010, doi: 10.1109/TGRS.2010.2046905.
- [12] L. C. Siebert, L. F. R. B. Toledo, P. A. B. Block, D. B. Bahlke, R. A. Roncolato, e D. P. Cerqueira, «A survey of applied robotics for tree pruning near overhead power lines», em *Proceedings of the 2014 3rd International Conference on Applied Robotics for the Power Industry*, Foz do Iguassu, Brazil, Out. 2014, pp. 1–5, doi: 10.1109/CARPI.2014.7030070.
- [13] N. Azami, P. Zarafshan, A. M. Kermani, M. Khashehchi, e S. Kouravand, «Design and Analysis of an Armed-Octorotor to Prune Trees near the Power Lines», p. 7, Fev. 2017.
- [14] N. Kagan, E. J. Robba, e H. P. Schmidt, *Estimação de indicadores de qualidade da energia elétrica*. Blucher, 2009.
- [15] «CBC User Guide», 2005. <https://www.coin-or.org/Cbc/cbcuserguide.html#id3342315> (acedido Nov. 15, 2020).

Anexos

Anexo A – Cronograma Otimizado para o Corte e Desrame de Árvores

Anexo B – Códigos dos Algoritmos

Anexo A

A tabela a seguir contém apenas os PTs que devem receber a limpeza de seus vãos em algum trimestre do ano.

PTs	1º T	2º T	3º T	4º T
10020002	0	1	0	0
10030032	0	0	1	0
10030070	0	1	0	0
10040003	1	0	0	0
10040012	0	0	0	1
10040095	0	0	1	0
10090006	1	0	0	0
10090038	0	0	0	1
10090073	1	0	0	0
10090082	0	0	1	0
10090118	0	0	0	1
10090128	0	0	0	1
10090159	1	0	0	0
10090198	0	0	0	1
10090240	0	0	0	1
10090266	1	0	0	0
10090270	0	0	1	0
10090272	1	0	0	0
10090279	0	0	0	1
10090280	0	0	0	1
10090287	1	0	0	0
10090312	0	0	0	1
10090348	0	0	0	1
10090375	0	0	0	1
10090390	0	0	1	0
10090397	1	0	0	0
10090402	0	1	0	0
10090405	0	0	0	1
10090419	1	0	0	0
10090427	0	0	1	0
10090438	0	1	0	0
10090445	1	0	0	0
10090451	0	0	0	1
10090453	1	0	0	0
10090489	1	0	0	0
10090491	0	0	0	1

10090504	0	0	0	1
10090520	0	0	0	1
10090525	1	0	0	0
10090527	0	1	0	0
10090542	1	0	0	0
10090552	1	0	0	0
10090552	1	0	0	0
10090558	0	0	0	1
10090561	1	0	0	0
10090569	0	0	0	1
10090585	1	0	0	0
10090603	0	0	0	1
10090625	0	0	0	1
10090637	1	0	0	0
10090642	0	1	0	0
10090658	0	1	0	0
10090699	0	0	0	1
10090741	0	0	0	1
10090793	0	0	0	1
10090797	1	0	0	0
10090812	0	1	0	0
10090814	1	0	0	0
10090815	1	0	0	0
10090818	1	0	0	0
10090845	1	0	0	0
10090891	1	0	0	0
10090926	0	0	0	1
10090943	1	0	0	0
10090955	0	0	0	1
10090959	0	0	0	1
10090984	1	0	0	0
10091052	1	0	0	0
10100009	0	0	1	0
10100016	0	0	0	1
10100035	0	0	0	1
10100052	0	0	0	1
10100064	0	1	0	0
10100087	1	0	0	0
10100093	0	0	0	1
10100101	0	1	0	0
10100106	0	0	0	1
10100115	0	0	0	1
10100117	0	0	0	1
10100129	1	0	0	0

10100146	0	0	0	1
10100149	0	0	0	1
10100163	1	0	0	0
10100165	0	0	0	1
10100174	0	0	0	1
10150032	0	0	0	1
10150034	0	0	1	0
10150064	1	0	0	0
10150066	0	0	0	1
10150077	0	0	0	1
10150097	1	0	0	0
10150112	0	1	0	0
10150192	0	0	0	1
10150422	0	0	0	1
10150439	1	0	0	0
10150523	1	0	0	0
10150535	1	0	0	0
10150547	0	0	1	0
10150584	0	0	0	1
10160092	0	0	0	1
10160156	0	0	0	1
10160162	1	0	0	0
14210163	0	0	0	1
14210225	0	0	0	1
14210239	1	0	0	0
14210250	1	0	0	0
14210422	0	0	0	1
14210430	1	0	0	0
14210467	1	0	0	0

Anexo B

Nesta seção serão apresentados os códigos dos algoritmos desenvolvidos durante o estágio, tanto em *Python* quanto em *MATLAB*.

- *MATLAB*

```

Book1 = readtable('Otimização.xlsx','Sheet','Taxa de
Falhas','Range','A1:G892');
Book1S2 =
readtable('Otimização.xlsx','Sheet','Indisponibilidade','Range','A1:D892');
Book1S3 = readtable('Otimização.xlsx','Sheet','Demanda Média
Trimestral','Range','A1:D892');

FR = Book1{:,1:4};
U = Book1S2{:, :};
AD = Book1S3{:, :};
NC = Book1{:,5};
ls = Book1{:,7};
TNC = 71315;
Lmax=81000;
SAIFI = 7;

x = optimvar('x',891,4,'LowerBound',0,'UpperBound',1,'Type','integer');

expr = sum(sum((U.*AD).*(1-x)));

cons1 = sum(sum(25*ls'*x)) <= Lmax;
cons2 = sum(sum((1/TNC).*(NC'*(FR.*(1-x))))) <= SAIFI;
cons3 = optimineq(895);
for i = 1:891
    cons3(i) = x(i,1) + x(i,2) + x(i,3) + x(i,4) <= 1;
end

prob = optimproblem('Objective',expr);

prob.Constraints.cons1 = cons1;
prob.Constraints.cons2 = cons2;
prob.Constraints.cons3 = cons3;

problem = prob2struct(prob);

[sol,fval] = intlinprog(problem);

```

- *Python*

```
import pulp as plp
import pandas as pd
import datetime as dt

# Extração das variáveis do Arquivo em Excel
df1 = pd.read_excel('Book1.xlsx', sheet_name='Taxa de falhas')
df1 = df1.to_dict()
df1_keys = list(df1.keys())

df2 = pd.read_excel('Book1.xlsx', sheet_name='Indisponibilidade')
df2 = df2.to_dict()

df3 = pd.read_excel('Book1.xlsx', sheet_name='Consumo Médio')
df3 = df3.to_dict()

# Atribuição dos valores das constantes
TNC = 70
SAIFI = 7
Lmax = 10000
NP = 1

# Variável de Indisponibilidade
a = 0
b = 0
U = {}
for i in df2['Unnamed: 0']:
    a += 1
    b = 1
    for j in df2:
        U[(a, b)] = df2[j][i]
        b += 1

# Variável de Consumo Médio
a = 0
b = 0
AD = {}
for i in df3['Unnamed: 0']:
    a += 1
    b = 1
    for j in df3:
        AD[(a, b)] = df3[j][i]
        b += 1
```

```
# Variável das taxas de falhas
a = 0
b = 0
FR = {}
for i in df1['Unnamed: 0']:
    a += 1
    b = 1
    for j in df1_keys[:4]:
        FR[(a, b)] = df1[j][i]
        b += 1

# Comprimento de cada vão
a = 1
df1_ls = list(df1['Unnamed: 4'].values())
ls = {}
for i in df1_ls:
    ls[a] = df1_ls[a - 1]
    a += 1

# Número de consumidores por segmento
a = 1
df1_NC = list(df1['Unnamed: 5'].values())
NC = {}
for i in df1_ls:
    NC[a] = df1_NC[a - 1]
    a += 1

# Criação de modelo de otimização utilizando PuLP
opt_model = plp.LpProblem(name="MIP_Model")

# Modelo Binário do PuLP
# Criação das variáveis
x_vars = {(i, j):
            plp.LpVariable(cat='Binary',
                            name="x_{0}_{1}"
                            .format(i, j)) for i in range(1, 17) for j in range(1
, 5)}
```

```

# Restrições do tipo menor ou igual
#PuLP
constraints1 = {1: opt_model.addConstraint(plp.LpConstraint(e=plp.lpSum(1
s[i] * x_vars[i, j] for i in range(1, 17) for j in range(1, 5)),
sense=plp.LpC
onstraintLE,
rhs=Lmax,
name="constra
int_1"))}

constraints2 = {2: opt_model.addConstraint(
    plp.LpConstraint(e=(1 / TNC) * (plp.lpSum(FR[i, j] * (1 - x_vars[i, j
]) * NC[i] for i in range(1, 17) for j in range(1, 5))),
    sense=plp.LpConstraintLE,
    rhs=SAIFI,
    name="constraint_2"))}

constraints3 = {3: opt_model.addConstraint(plp.LpConstraint(e=x_vars[1,1]
+x_vars[1,2]+x_vars[1,3]+x_vars[1,4],
sense=plp.LpC
onstraintLE,
rhs=NP,
name="constra
int_3"))}

constraints4 = {4: opt_model.addConstraint(plp.LpConstraint(e=x_vars[2,1]
+x_vars[2,2]+x_vars[2,3]+x_vars[2,4],
sense=plp.LpC
onstraintLE,
rhs=NP,
name="constra
int_4"))}

constraints5 = {5: opt_model.addConstraint(plp.LpConstraint(e=x_vars[3,1]
+x_vars[3,2]+x_vars[3,3]+x_vars[3,4],
sense=plp.LpC
onstraintLE,
rhs=NP,
name="constra
int_5"))}

constraints6 = {6: opt_model.addConstraint(plp.LpConstraint(e=x_vars[4,1]
+x_vars[4,2]+x_vars[4,3]+x_vars[4,4],
sense=plp.LpC
onstraintLE,
rhs=NP,
name="constra
int_6"))}

```

```
# Criação da função objetivo
#PuLP
objective = plp.lpSum(U[i, j] * AD[i, j] * (1 - x_vars[i, j])
                    for i in range(1, 17)
                    for j in range(1, 5))

# Realizando a minimização
#PuLP
opt_model.sense = plp.LpMinimize
opt_model.setObjective(objective)

# Solucionando o modelo
opt_model.solve()

# Gerando o resultado em um arquivo .csv
opt_df = pd.DataFrame.from_dict(x_vars, orient="index",
                               columns=["variable_object"])
opt_df.index = pd.MultiIndex.from_tuples(opt_df.index,
                                         names=["column_i", "column_j"])
opt_df.reset_index(inplace=True)

# PuLP
opt_df["solution_value"] = opt_df["variable_object"].apply(lambda item: item.varValue)

opt_df.drop(columns=["variable_object"], inplace=True)

date = dt.datetime.now().strftime('%f')

filename = './optimization_solution_plp_' + date + '.csv'

opt_df.to_csv(filename)
```