

**Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto**



**Análise e Mitigação do Ruído Acústico nas Linhas  
de Muito Alta Tensão da Rede Nacional de  
Transporte**

Alberto Manuel da Silva Pinto

Dissertação/Relatório de Projecto realizada(o) no âmbito do  
Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores  
Major Energia

Orientador: Prof. Dr. António Machado e Moura  
Co-orientador: Eng. Manuel Severina

Junho de 2008

© Alberto Pinto, 2008

# Resumo

Em determinadas condições, o ruído gerado pelas linhas eléctricas, especialmente pelas linhas de Muito Alta Tensão (Linhas MAT), poderá introduzir perturbações no ambiente sonoro das zonas de implementação.

O conhecimento técnico e científico sobre este assunto é escasso, como é escassa a documentação e a bibliografia, quer a nível nacional quer a nível internacional, sobre a geração do ruído, as suas características e a sua interferência na qualidade sonora do ambiente.

Não obstante resulta a necessidade de em sede do estudo e da avaliação de Impacte ambiental do projecto de uma nova linha garantir que são cumpridos os requisitos do Regulamento Geral do Ruído (RGR) tanto mais que não existe nenhum instrumento legal condicionador do aparecimento de um novo receptor na sua vizinhança (p. e. habitação) independentemente do momento da implementação do projecto.

O presente documento trata do assunto do Ruído Acústico (RA) nas linhas eléctricas desde a raiz do seu problema, tentando compreender a sua causa principal, o Efeito Coroa (EC) e a forma como este provoca o ruído.

Foi desenvolvido e melhorado um programa de cálculo que permite calcular o ruído provocado pelas linhas eléctricas, seguindo uma metodologia de cálculo baseada nas mais recentes documentações internacionais e utilizado pela Rede Eléctrica Nacional.

Como casos práticos foram estudadas linhas de 150, 220 e 400 kV, nos quais foram interpretados os valores obtidos em monitorizações de ruído e calculados, com base na metodologia de cálculo referida, os índices acústicos para as mesmas linhas. Caso existam linhas que apresentem valores de ruído preocupantes, é necessário encontrar soluções que permitam a resolução de tal problema.

Através da compreensão do fenómeno EC, foram desenvolvidas soluções que, além de permitirem a diminuição deste fenómeno possibilitam a redução do RA provocado pelas linhas sendo esse o grande objectivo deste estudo. Depois de encontrada uma possível solução do ponto de vista teórico, foi necessário proceder à sua sustentação, que assentou sobretudo em viabilizá-la tecnicamente e posteriormente analisá-la quantitativa e qualitativamente.



# Abstract

Under certain circumstances, the noise generated by transmission lines, especially by the High-Voltage Overhead Transmission Lines (HVOTL), could introduce noise disturbances in the environment of implementation areas.

The scientific and technical knowledge on this subject is scarce, as is a lack of documentation and bibliography, both nationally and internationally, about the generation of noise, his characteristics and his interference in the sound quality of the environment.

It was also carried out a legal framework of the phenomenon of noise in order to know what the requirements and laws to comply with order to try to qualify the HVOTL from the noise.

This document addresses the issue of acoustic noise in HVOTL from the root of his problem, trying to understand its main cause, the corona effect and how it causes the noise.

It was developed and improved a program of calculation used to calculate the noise generated by HVOTL, using a methodology of calculation based on the latest international and documentation used accepted by the Rede Eléctrica Nacional (REN).

As case studies were studied HVOTL of 150, 220 and 400 kV, in which interpreted the results that were obtained in noise monitoring and calculate, based on the current methodology, the acoustic indices for the same lines. If these lines have problematic values, it is necessary find solutions for the resolution of this problem.

By understanding the phenomenon corona effect, were developed solutions that allow addition to the reduction of this phenomenon allow the reduction of acoustic noise caused by transmission lines that being the major aim of this study.

After finding a possible solution to the theoretical point of view, it was necessary support that, enabling it technically and then analyzes it quantitatively and qualitatively.



# Agradecimentos

Gostaria de começar por agradecer aos meus Pais, pois é graças a eles que eu existo e tenho oportunidade de fazer o que gosto na vida e também à minha irmã e família que nunca esqueço.

Agradeço também à minha namorada que esteve sempre presente.

Quero agradecer ao Helder e ao Nuno, com o qual convivi diariamente nestes últimos 4 meses, foram os meus grandes companheiros de casa. Agradeço também ao Ricardo Azevedo pela disponibilidade, permitindo-me “encurtar” a distância entre Lisboa e Porto.

Agradeço ao meu Orientador o Professor Doutor Machado e Moura pela disponibilidade que mostrou desde o primeiro momento ainda anterior ao estágio até ao fim do mesmo.

Agradeço ao Eng. Jorge Liça pela oportunidade de realizar o estágio na REN. Ao Eng. Peralta pelo excelente encaminhamento que me proporcionou.

Um agradecimento ao Eng. Manuel Severina por toda a disponibilidade e atenção que me prestou assim como o Eng. Hugo Valente e o Eng. Carlos Homem, todos eles me deram apoio técnico e pessoal que me permitiu evoluir imenso nos últimos quatro meses.

Agradeço à Eng. Salomé Tapadinhas, minha colega de gabinete nestes quatro meses, uma boa companhia.

Agradeço também a todos os colegas com que partilhei momentos na REN, são bastantes e para não correr o risco de me esquecer de alguém, o agradecimento é colectivo, o ambiente encontrado na REN é muito saudável.



# Índice

Resumo .....	iii
Abstract.....	v
Agradecimentos .....	vii
Índice.....	ix
Lista de figuras .....	xi
Lista de tabelas .....	xiii
Abreviaturas e Símbolos .....	xv
<b>Capítulo 1 - Introdução .....</b>	<b>1</b>
1.1 Enquadramento do trabalho.....	1
1.2 Objectivos .....	3
1.3 Estrutura do Relatório .....	3
<b>Capítulo 2 - Ruído Acústico com Origem em Linhas Eléctricas .....</b>	<b>5</b>
2.1 Ruído com Origem Eólica .....	5
2.1.1 Descrição do fenómeno .....	5
2.2 Ruído com Origem Eléctrica.....	6
2.2.1 Descrição do fenómeno .....	6
2.2.2 Efeito Coroa.....	6
2.3 Incidência deste fenómeno em linhas MAT .....	16
2.3.1 Isoladores.....	16
2.4 Enquadramento Legal do Ruído .....	17
2.4.1 Evolução da “Lei do Ruído” em Portugal .....	17
2.4.2 O Regulamento Geral do Ruído.....	19
<b>Capítulo 3 - Ruído emitido por linhas. Modelos de cálculo e Modelos experimentais .....</b>	<b>23</b>
3.1 Cálculo dos Campos Eléctricos Superficiais e do Efeito Coroa .....	23
3.2 Cálculo do Nível de Ruído.....	26
3.2.1 Verificação do cumprimento do critério de exposição máxima: .....	28

3.2.2	Verificação do cumprimento do critério de incomodidade .....	28
3.3	Exemplo de uma Monitorização de Ruído .....	30
<b>Capítulo 4</b>	<b>- Análise das soluções normalizadas da RNT quanto ao comportamento acústico .....</b>	<b>37</b>
4.1	150kV: Linha Tunes - Estói.....	37
4.1.1	Condutores.....	38
4.1.2	Cadeias de isoladores .....	38
4.1.3	Apoios.....	38
4.1.4	Monitorização .....	39
4.1.5	Estudo do Ruído da Linha através do Programa de Cálculo .....	44
4.2	220kV: Linha Fanhões - Trajouce.....	46
4.2.1	Condutores.....	46
4.2.2	Cadeias de isoladores .....	46
4.2.3	Apoios.....	46
4.2.4	Monitorização .....	47
4.2.5	Estudo do Ruído da Linha através do Programa de Cálculo .....	49
4.3	400kV: Linha Batalha - Pego .....	51
4.3.1	Condutores.....	51
4.3.2	Cadeias de isoladores .....	51
4.3.3	Apoios.....	51
4.3.4	Monitorização .....	52
4.3.5	Estudo do Ruído da Linha através do Programa de Cálculo .....	54
<b>Capítulo 5</b>	<b>- Identificação de áreas de melhoria e análise de medidas de mitigação (normalizada e de remédio) .....</b>	<b>57</b>
5.1	Desenvolvimento de soluções de feixe para os 400kV .....	57
5.1.1	Adaptação do Programa de Cálculo .....	58
5.1.2	Soluções alternativas e análise de desempenho .....	61
5.1.3	Análise das alternativas como soluções normalizadas e de remédio (Análise Técnica, Económica e Ambiental) .....	69
<b>Capítulo 6</b>	<b>- Conclusões.....</b>	<b>87</b>
<b>Referências</b>	<b>.....</b>	<b>91</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>.....</b>	<b>93</b>

## Lista de figuras

<b>Figura 2.1</b> - Deformação de gotas de água num condutor sob efeito de um campo eléctrico [5]. .....	9
<b>Figura 2.2</b> - Campo Eléctrico de um condutor cilíndrico no espaço.....	9
<b>Figura 2.3</b> - Variação do campo Eléctrico Crítico ( $E_0(r)$ ) e do Campo Eléctrico Máximo na superfície dos condutores ( $E_{mx}(r)$ ).....	11
<b>Figura 3.1</b> - Posicionamento do Sonómetro. ....	33
<b>Figura 3.2</b> - Sonómetro com protector de vento e tripé. ....	35
<b>Figura 4.1</b> - Distribuição das Fases nos Apoios com vista de Tunes. ....	37
<b>Figura 4.2</b> - Distribuição das Fases nos Apoios com vista de Fanhões. ....	46
<b>Figura 4.3</b> - Distribuição das Fases nos Apoios com vista da Batalha. ....	51
<b>Figura 5.1</b> - Imagem da distribuição dos três cabos por fase em feixe triplo. ....	58
<b>Figura 5.2</b> - Introdução de dados da Versão Inicial do Programa .....	60
<b>Figura 5.3</b> - Introdução de dados da Versão Final do Programa .....	60
<b>Figura 5.4</b> - Distribuição dos 3 cabos por fase. ....	64
<b>Figura 5.5</b> - Apoio de linha com duplo terno (2 circuitos) e ‘phase shifting’.....	66
<b>Figura 5.6</b> - Comparação de nível de Ruído Ambiente de Longa Duração entre soluções de Feixe Duplo e Feixe Triplo.....	70
<b>Figura 5.7</b> - Exemplo de um apoio e seu “mapa de esforços”. ....	72
<b>Figura 5.8</b> -QS_Limite (lado esquerdo) e QS_Modificado (lado direito). ....	73
<b>Figura 5.9</b> -QRS_Limite (lado esquerdo) e QRS_Modificado (lado direito). ....	74
<b>Figura 5.10</b> -QRA_Limite.....	75
<b>Figura 5.11</b> -QA_Limite (lado esquerdo) e QA_Modificado (lado direito). ....	76
<b>Figura 5.12</b> -QT_Limite (lado esquerdo) e QT_Modificado (lado direito). ....	77

**Figura 5.13** -QT\_Modificado (lado esquerdo) e QT\_Modificado\_2 (lado direito). ..... 78

**Figura 5.14** - QT\_Modificado\_2 (lado esquerdo) e QT\_Modificado\_2\_DES\_25 (lado direito). . 80

## Lista de tabelas

Tabela 1.1 – Níveis Representativos de Intensidade Sonora.....	1
Tabela 2.1 – Valores Limite de Exposição ao Ruído.....	21
Tabela 4.1 – Valores de Ruído Residual medidos durante na situação de referência [dB (A)].....	39
Tabela 4.2 – Valores de Ruído medidos durante a campanha de monitorização de Inverno [dB (A)].....	40
Tabela 4.3 – Valores de Ruído medidos durante a campanha de monitorização de Verão [Db (A)].....	40
Tabela 4.4 – Valores médios de ruído para cada campanha de medição [dB (A)]......	42
Tabela 4.5 – Verificação do Critério de Incomodidade para a campanha de Inverno.....	43
Tabela 4.6 – Verificação do Critério de Incomodidade para a campanha de Verão.....	43
Tabela 4.7 – Valores Máximos Legais de exposição ao ruído. ....	44
Tabela 4.8 – Valores Máximos obtidos nas medições por campanha [dB (A)]. ....	44
Tabela 4.9 – Características da linha Tunes - Estói em todos os receptores sensíveis. ....	45
Tabela 4.10 – Níveis de Ruído da linha Tunes - Estói em cada receptor sensível. ....	45
Tabela 4.11 – Verificação do Critério de Incomodidade para a campanha de Inverno. ....	47
Tabela 4.12 – Verificação do Critério de Incomodidade para a campanha de Verão. ....	48
Tabela 4.13 – Verificação do cumprimento de Exposição Máxima dB (A).....	48
Tabela 4.14 – Características da linha Fanhões - Trajouce em todos os receptores sensíveis .....	49
Tabela 4.15 – Níveis de Ruído da linha Fanhões - Trajouce em cada receptor sensível.....	49
Tabela 4.16 – Verificação do Critério de Incomodidade para a campanha de Inverno. ....	52
Tabela 4.17 – Verificação do Critério de Incomodidade para a campanha de Verão. ....	53

Tabela 4.18 – Verificação do cumprimento de Exposição Máxima .....	53
Tabela 4.19 – Características da linha Batalha - Pego em todos os receptores sensíveis.....	54
Tabela 4.20 – Níveis de Ruído da linha Batalha - Pego em cada receptor sensível .....	55
Tabela 5.1 – Características para a linha com 2 cabos por fase.....	61
Tabela 5.2 – Características para linha com três cabos por fase.....	62
Tabela 5.3 – Características para a linha com 2 feixe duplo.....	63
Tabela 5.4 – Características para linha com feixe triplo. ....	63
Tabela 5.5 – Características para a linha com dois cabos por fase. ....	64
Tabela 5.6 – Características para linha com três cabos por fase.....	65
Tabela 5.7 – Características para a linha com feixe duplo. ....	66
Tabela 5.8 – Características para linha com feixe triplo. ....	66
Tabela 5.9 – Resultados com a linha em funcionamento a 400 kV.....	67
Tabela 5.10 – Resultados para a linha em funcionamento a 420 kV. ....	68
Tabela 5.11 – Comparação de nível de ruído ambiente de longa duração para a linha com feixe duplo e com feixe triplo. ....	69
Tabela 5.12 – Número de apoios por cada tipo da actual linha Batalha - Pego. ....	71
Tabela 5.13 – Tipos de Apoios Normalizados.....	71
Tabela 5.14 – Tipos de Apoios adaptados para a solução de feixe triplo .....	78
Tabela 5.15 – Número de apoios por cada tipo da linha Batalha - Pego para feixe triplo. ....	79
Tabela 5.16 – Tipos de Maciços e suas características por tipo de Apoio.....	81
Tabela 5.17 – Diferença das características das fundações substituindo apoios do tipo QA por apoios QRA. ....	81
Tabela 5.18 – Aumentos em quantidade e percentuais das características dos maciços de fundação.....	81
Tabela 5.19 – Diferença de Custos quando implementada uma linha feixe triplo para 66 km. ....	82
Tabela 5.20 – Poupança em termos de cabo para uma linha de feixe triplo com cabo Zebra em vez de RAIL AW. ....	84
Tabela 5.21 – Poupança em termos de cabo para uma linha de feixe triplo com cabo Zebra em vez de RAIL AW. ....	84
Tabela 6.1 – Tipos de Apoios Adaptados a linhas de feixe triplo.....	88

# Abreviaturas e Símbolos

AG	Algoritmos Genéticos
EC	Efeito Coroa
LFD	Linha de Feixe Duplo
LFT	Linha de Feixe Triplo
HVOTL	High-Voltage Overhead Transmission Lines
MAT	Muito Alta Tensão
RA	Ruído Acústico
REN	Rede Eléctrica Nacional
RGR	Regulamento Geral do Ruído
RM	Relatório de Monitorização
RNT	Rede Nacional de Transporte



# Capítulo 1 - Introdução

## 1.1 Enquadramento do trabalho

O nome ruído é normalmente associado a uma sensação de incómodo, podendo ele ser originado pelas mais diversas fontes.

Por ruído entende-se todo o som que produza uma sensação auditiva desagradável, incomodativa ou perigosa. O ouvido humano é sensível aos deslocamentos de ar produzidos pelas ondas acústicas que se manifestam sob a forma de pressão.

O nível de ruído é comumente quantificado em decibéis (dB (A)) e pode ser expresso como intensidade, pressão ou potência. Na tabela seguinte são consideradas algumas fontes de ruído e os níveis que produzem, de forma a se compreender melhor este factor.

Tabela 1.1 – Níveis Representativos de Intensidade Sonora.

Fontes de Ruído ou Descrição do Ruído	Nível de Ruído em dB (A)
Limiar da sensação dolorosa	120
Martelos pneumáticos	95
Passagem do comboio eléctrico	90
Interior de carros de corrida	84
Ruas de tráfego intenso	70
Conversação normal	65
Escritórios normais	50 a 60
Sala quieta	25 a 30
Murmúrio comum	20
Farfalhar de folhas	12

O nível de ruído pode também ser quantificado em outras unidades:

- watt/cm<sup>2</sup> (W/cm<sup>2</sup>) para a intensidade sonora;
- pascal (Pa) ou newton/m<sup>2</sup> (N/m<sup>2</sup>) para a pressão sonora;
- watt (W) para a potência sonora.

O ruído não é definido apenas como um fenómeno exclusivamente de ordem física e fisiológica mas também de ordem psicológica, pois nem sempre é o nível de ruído provoca mau estar, mas sim as suas características e a adaptação do ser humano a esse mesmo ruído. Por exemplo o ruído de um relógio de corda, pode ter níveis baixos mas causar incómodo, enquanto que o som dos grilos no campo pode atingir níveis elevados e não afectar as pessoas que o têm como ambiente sonoro.

Com a modernização das sociedades e com o aparecimento de muitas fontes sonoras até então desconhecidas para a humanidade e sendo ruído tido como um fenómeno incomodativo chegando por vezes prejudicial para a saúde, foram criadas condições legais que permitissem estabelecer limites este fenómeno. Em vigor na legislação Portuguesa, o Decreto - Lei 9/2007 que aprovou o Regulamento Geral do Ruído (RGR) é documento que estabelece toda a legislação a cumprir presentemente no nosso País.

O ruído gerado pelas linhas eléctricas, especialmente pelas linhas de Muito Alta Tensão (Linhas MAT) é uma das fontes sonoras que surgiu com a modernização das sociedades, podendo ser causadoras de perturbações no ambiente sonoro das zonas de implementação. O presente relatório, relata o estudo efectuado sobre este fenómeno, tentando abranger a sua globalidade, desde as suas causas às suas implicações, passando por todos os pontos intermédios considerados relevantes.

Decorre da legislação em vigor que os projectos de todas as linhas de muito alta tensão estão sujeitos a Avaliação de Impacte Ambiental (AIA) com excepção daqueles que tenham comprimentos inferiores a 10 km e não cruzem áreas sensíveis do ponto de vista ambiental.

De entre os descritores ambientais muito relevantes que devem ser considerados destacam-se entre outros o impacte das linhas sobre o ambiente sonoro.

Nesta análise do impacte da linha sobre o ambiente sonoro deverão ter-se em conta os aspectos da alteração do ambiente devido à acção do vento sobre os diversos componentes e o “efeito de coroa” cuja importância depende da existência na proximidade da linha de alguns receptores sensíveis como sejam habitações, escolas e espaços de lazer (saliente-se que a natureza da legislação portuguesa e a servidão que decorre da implementação de uma linha não condiciona em nenhum momento a construção de p. e. uma nova habitação na proximidade imediata ou mesmo sob a linha).

Os estudos ambientais devem em termos de ambiente sonoro caracterizar a situação de referência, calcular o ruído particular produzido pela linha e calcular o ruído ambiente após a montagem da linha.

Resulta ainda que se torna necessário proceder à validação daqueles valores com recurso a monitorizações a efectuar junto dos receptores sensíveis existentes que pode decorrer da avaliação ambiental, reclamação e/ou solicitação de terceiros ou iniciativa própria.

## 1.2 Objectivos

Os principais objectivos do trabalho são:

- Compreender a origem do ruído nas linhas eléctricas, principalmente as linhas MAT da RNT;
- Interiorizar ou desenvolver, se necessário, uma metodologia de cálculo do ruído produzido pelas linhas eléctricas de transporte de energia;
- Enquadrar legalmente o ruído, no que diz respeito às linhas MAT;
- Estudar a incidência do ruído nas linhas de 150, 220 e 400 kV;
- No caso das linhas eléctricas introduzirem complicações preocupantes no ambiente sonoro, procurar desenvolver soluções de mitigação desse fenómeno;

## 1.3 Estrutura do Relatório

O relatório encontra-se dividido, para além do resumo inicial, em 6 capítulos, que correspondem também a 6 fases de trabalho distintas, ainda que algumas estejam subdivididas nos respectivos capítulos.

No capítulo 2 pode ser considerado, juntamente com a introdução, o portador de toda a fundamentação teórica deste trabalho, sendo baseado na documentação mais recente sobre as várias temáticas abordadas, assim como alguns trabalhos mais antigos. É também feita referência à legislação que rege a temática do ruído, dando particular importância aos artigos directamente relacionados com as linhas de MAT.

O Capítulo 3 aborda e descreve a metodologia de cálculo actualmente tida como a mais recente, para o cálculo, primeiro de todas as variáveis relacionadas com o fenómeno do efeito coroa e em segundo do cálculo dos índices de ruído, provocados pelas linhas de MAT. Este capítulo possui ainda uma descrição para exemplificação, da realização de monitorização de ruído.

No capítulo 4 são estudados casos reais, em que se consideram 3 linhas de três níveis de tensão diferentes e são analisados através de dados existentes em relatórios de monitorização os cumprimentos ou não de critérios legais do ponto de vista acústico, por parte das linhas. São também simulados matematicamente os comportamentos acústicos dessas mesmas linhas.

O capítulo 5, é condicionado pelo capítulo 4, pois dependendo dos resultados obtidos nos estudos das linhas com três níveis de tensão diferentes, vai procurar soluções para aquelas que apresentarem necessidade de correcção do nível de emissão acústica.

No capítulo 6 são descritas as conclusões obtidas na realização deste trabalho, indicando possíveis soluções e sugestões, para resolver o problema que dá título a este trabalho.



# Capítulo 2- Ruído Acústico com Origem em Linhas Eléctricas

## 2.1 Ruído com Origem Eólica

### 2.1.1 Descrição do fenómeno

Este tipo de ruído ocorre sob condições de vento, quando este incide sobre alguns componentes de uma linha de transporte de energia, por exemplo, os apoios, os condutores, os isoladores ou as esferas de balizagem.

O ruído de origem eólica não depende do nível de tensão da linha, mas sim da velocidade e direcção do vento, em que as diferentes componentes da linha dão origem a diferentes tipos de ruído [1].

A ocorrência de ruído eólico das várias componentes da linha de alta tensão é incomum, uma vez que as condições em que ocorre o ruído são muito específicas:

- Condutores: para velocidades relativamente baixas do vento, ou seja, abaixo de aproximadamente 10m / s, um pequeno e suave ruído pode ocorrer, mas com um baixo nível que raramente é incomodativo. Em altas velocidades do vento, o ruído é semelhante ao som dos aviões.
- Nos Isoladores este tipo específico de ruído ocorre apenas para altas velocidades do vento, determinados ângulos de incidência e apenas para algumas disposições de isoladores
- As esferas de balizagem instaladas em certas condições nos cabos superiores das linhas para sinalização diurna da Aeronáutica são uma componente da linha que pode ser fonte de ruído. A principal razão reside num eventual incorrecto design. Por exemplo, um insuficiente número de pontos de fixação das duas semiesferas pode originar batimento das duas flanges de cada semiesfera que pode ser evitado com a colocação de um anel de borracha resolvendo assim eficazmente este problema.

Através desta natureza o ruído eólico é difícil de prever, ocorrendo muito raramente e dependendo da velocidade do vento. Níveis máximos de ruído superiores a 50 dB (A) podem ser esperados [1].

## 2.2 Ruído com Origem Eléctrica

### 2.2.1 Descrição do fenómeno

O ruído audível nas linhas de alta tensão da RNT é principalmente causado pelo fenómeno conhecido como efeito coroa (EC), que ocorre na superfície dos condutores.

Entende-se por EC, “um conjunto de fenómenos associados às ionizações locais (ou parciais), que antecedem a descarga através do ar em campos muito divergentes” [3]. Este fenómeno provoca um ruído que é caracterizado por uma crepitação (estalos) e ocorre durante os semi-ciclos positivos da tensão da linha.

### 2.2.2 Efeito Coroa

O EC é tanto maior quanto maior for a tensão usada nas linhas de transporte de energia e aumenta também para condições climatéricas adversas (tempo húmido e chuva miudinha, por exemplo), pois por um lado o ar junto dos condutores fica mais condutivo e por outro lado a condensação de depósito de gotas de água na superfície dos condutores é origem de campo eléctrico mais intenso.

**O EC surge na superfície dos condutores de uma linha eléctrica aérea, quando o gradiente potencial aí existente é superior ao valor do gradiente crítico disruptivo do ar (gradiente crítico visual), ocorrendo pequenas descargas em volta do condutor, com a forma de uma coroa [2].**

O EC consiste na aceleração de electrões, provocada por um campo eléctrico, nas linhas de alta tensão, as quais estão em contacto com os átomos do dieléctrico adjacente às linhas, neste caso o ar. Os electrões vão colidir com os átomos livres existentes no ar, provoca a libertação de novos electrões, ionização por impacto. Nesta ionização cada electrão livre vai colidir com átomos de gases, como por exemplo Oxigénio e Nitrogénio, perdendo parte da sua energia cinética. Quando um electrão consegue atingir um átomo com força suficiente, ao ponto de excitá-lo, este último passa para um estado de energia mais elevado, perdendo o electrão parte da sua energia. De seguida o átomo pode voltar ao seu estado inicial, libertando a energia em excesso sob a forma de calor, energia acústica e radiações electromagnéticas induzidas no espectro visível (luz). Pode também ocorrer um processo com o nome de recombinação, em que um electrão colide com um ião positivo e transforma-o num átomo neutro.

Quando o campo eléctrico entre dois condutores paralelos no ar é uniforme, existem uma série de factores que podem controlar a tensão disruptiva do ar, como por exemplo: a pressão do ar, as condições atmosféricas dessa zona, o tipo de tensão aplicada, entre outros. Caso o campo não seja uniforme, em redor de um condutor, a divergência do campo exerce

uma influência adicional, sendo qualquer partícula vizinha a esta linha, como por exemplo a poeira, uma fonte de descargas.

Como a energia libertada em todo este processo vem do campo eléctrico da linha, na qual é transportada a energia eléctrica, o EC vai ser responsável por perdas de energia.

### 2.2.2.1 Estudo do fenómeno Efeito Coroa

O gradiente crítico disruptivo do ar atmosférico  $E_0$ , é aproximadamente 30,5 kV/cm, numa atmosfera padrão de 20°C e pressão barométrica de 760 [mm] de Hg, sendo o seu valor eficaz de 21,6 kV/cm para corrente alternada.

De acordo com F.W.Peek<sup>1</sup> e tendo por base as suas experiências, o EC só se inicia quando valores de gradientes mais elevados ocorrem nas superfícies dos condutores, e simultaneamente se iniciam manifestações luminosas, que o mesmo apelidou de gradiente crítico visual<sup>2</sup>. F.W.Peek acrescenta que um condutor atinge o gradiente crítico visual, quando o gradiente crítico disruptivo é atingido a uma determinada distância  $r$  da superfície do condutor, que Peek intitulou de distância de energia e é igual a  $0,301/\sqrt{r}$  em atmosfera padrão.

Segundo F.W.Peek, o gradiente crítico visual pode ser calculado através da expressão:

$$E_{CRV} = 30,5 \cdot \left( 1 + \frac{0,301}{\sqrt{r}} \right) \text{ kV/cm} \quad (2.1)$$

E em valores eficazes:

$$E_{CRV} = 21,6 \cdot \left( 1 + \frac{0,301}{\sqrt{r}} \right) \text{ kV/cm} \quad (2.2)$$

As experiências de Peek foram feitas sempre com condutores de diâmetros muito pequenos, mas outros investigadores, W. O. Schumann<sup>3</sup>, com resultados publicados em 1923 e mais tarde C. J. Miller Jr<sup>4</sup> que publicou os resultados em 1956/57 ampliaram o seu campo de estudo, verificando que o valor do gradiente crítico visual depende mais das dimensões dos condutores, do que Peek havia concluído.

Apesar de os resultados de Miller serem aqueles que foram publicados mais recentemente e serem considerados os mais reais, as expressões de Peek ainda são muito utilizadas.

---

<sup>1</sup> PEEK estudou o efeito coroa entre os anos 1910 e 1930.

<sup>2</sup> *Gradiente crítico visual* é o campo Eléctrico Crítico.

<sup>3</sup> Schumman estudou e investigou o efeito coroa publicando os seus resultados em 1923.

<sup>4</sup> Miller estudou e investigou o efeito coroa publicando os seus resultados em 1956/57.

Miller estabeleceu então uma nova expressão para o gradiente crítico visual:

$$E_{CRV} = 18,11 \cdot \left( 1 + \frac{0,54187}{\sqrt{r}} \right) \text{ kV/cm} \quad (2.3)$$

Nas suas investigações Miller, conclui que esta última expressão é também válida para condutores múltiplos, tendo para isso que efectuar uma correcção no raio do condutor, sendo o  $r$  considerado o raio equivalente ( $r_{eq}$ ), do conjunto de condutores múltiplos.

A expressão pode então ser reescrita da seguinte forma:

$$E_{CRV} = 18,11 \cdot \left( 1 + \frac{0,54187}{\sqrt{r_{eq}}} \right) \text{ kV/cm} \quad (2.4)$$

Peek através das suas experiências, conclui que, o valor de ECRV, também é influenciado pela densidade do ar, tornando premente introduzir uma correcção na expressão anterior, através da inclusão da pressão atmosférica relativa:

$$\delta = \frac{0,386 \cdot (760 - 0,086h)}{273 + \theta} \quad (2.5)$$

Sendo:

- $\theta$  a temperatura média anual em °C;
- $h$  a altitude média local.

Peek e Miller, alongaram ainda mais a sua investigação, concluindo unanimemente, a existência de um outro factor correctivo, através do estudo não só de condutores reais em situações simuladas, que as condições atmosféricas também influenciam o campo eléctrico crítico. Esse factor correctivo é denominado de factor de superfície ( $m$ ).

O valor do factor de superfície, aumenta com a maior presença de água nos cabos, provocando um aumento do gradiente crítico visual, enquanto os valores mais baixos de  $m$ , são atribuídos a cabos novos e secos, pois estes apresentam pequenas irregularidades, por vezes óleo e graxas nas superfícies, ficando os cabos mais propícios à aderência de poeiras orgânicas e inorgânicas, existindo assim condições favoráveis à ocorrência do efeito EC.

Quando os cabos são novos e estão sujeitos a chuva ou humidade, a água adere mais facilmente à sua superfície, sob a forma de gotículas. Nos cabos usados, as gotículas têm tendência para ser maiores, mas estas são geralmente em menor número.

A acção do campo eléctrico dos condutores deforma, geralmente, as gotículas de água existentes na sua superfície, incutindo-lhes uma forma “aguda”, aumentando o gradiente de potencial e diminuindo o gradiente crítico visual, tornando-se propícia a ocorrência do EC [4].

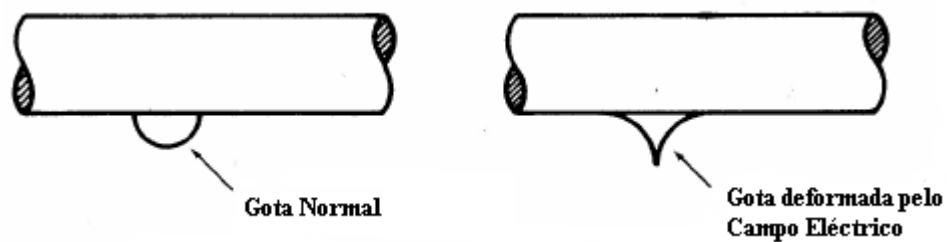


Figura 2.1 - Deformação de gotas de água num condutor sob efeito de um campo eléctrico [5].

A expressão final, do Gradiente Crítico Visual pode então ser reescrita da seguinte forma:

$$E_{CRV} = 18,1 \cdot m \cdot \delta \cdot \left[ 1 + \left( \frac{0,54187}{\sqrt{r \cdot \delta}} \right) \right] \text{ kV/cm} \quad (2.6)$$

Para que uma linha tenha um comportamento satisfatório, relativamente ao EC, é importante que o gradiente de potencial na superfície dos condutores, seja inferior ao gradiente visual dessa mesma linha:

$$E < E_{CRV}$$

### A Campo Elétrico (Gradientes de Potencial) nas superfícies dos condutores

De forma a descrever o processo de cálculo do Campo Elétrico nas superfícies dos condutores é representado na figura seguinte um condutor cilíndrico de raio  $r$  [m], de grande comprimento, para que seja considerado uniforme e sem influência das extremidades, com uma carga  $Q$  [coulomb/km]:

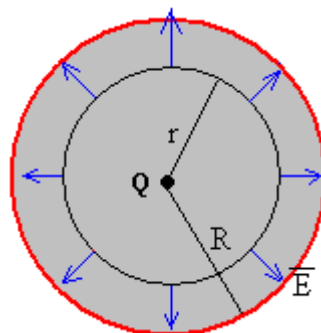


Figura 2.2 - Campo Elétrico de um condutor cilíndrico no espaço.

É também na figura considerando um cilindro concêntrico com o do condutor e de raio  $R$ . Pode observar-se a existência das linhas de força do campo eléctrico que provêm da sua superfície do condutor, correspondente ao raio  $r$  e que é sempre proporcional à carga.

A densidade de fluxo, na superfície do cilindro exterior ao condutor, considerando que este é unitário, é dada por:

$$D_R = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot R} [\text{C/m}^2] \quad (2.7)$$

Sabendo que:  $E = \frac{D}{\varepsilon}$ , onde  $\varepsilon$  é permissividade do meio, torna-se possível obter os valores Campo Eléctrico na superfície do cilindro exterior ao condutor:

$$E_R = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot \varepsilon} [\text{V/m}] \quad (2.8)$$

## B Determinação do Raio Equivalente ( $r_{eq}$ ).

O valor do raio, ou raio equivalente de um ou vários condutores, respectivamente, condicionam o valor o gradiente critico visual, que por sua vez vai condicionar a ocorrência do EC em linhas MAT.

Quando se fala de condutores múltiplos, o raio equivalente, é definido com um raio fictício de um condutor cilíndrico, com o seu eixo longitudinal coincidente com o eixo do conjunto de subcondutores (cabos por fase).

Partindo das expressões dos Campo Eléctrico, para  $r$  e  $r_{eq}$ :

$$E = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot n \cdot r} [\text{kV/cm}] \quad (2.9)$$

$$E = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot r_{eq}} [\text{kV/cm}] \quad (2.10)$$

Em linhas trifásicas transportas com condutores múltiplos:

$$C = \frac{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon}{\ln \frac{D_m}{R_c}} \quad (2.11)$$

em que:

- $D_m$  [m] é a distância média geométrica entre fases;
- $R_c$  [m] é a o raio médio geométrico capacitivo do condutor múltiplo.

A expressão pode ser reescrita da seguinte forma, para um condutor equivalente:

$$C = \frac{1}{\ln \frac{D_m}{R_{eq}}} \quad (2.12)$$

Sabendo que  $Q = C \cdot U$ , podem-se obter as seguintes expressões para os Campo Eléctrico:

$$E = \frac{U}{n \cdot r \cdot \ln \frac{D_m}{r_c}} \text{ [kV/cm]} \quad (2.13)$$

$$E = \frac{U}{r_{eq} \cdot \ln \frac{D_m}{r_{eq}}} \text{ [kV/cm]} \quad (2.14)$$

Igualando as duas expressões anteriores:

$$\frac{D_m}{r_{eq}} = \left( \frac{D_m}{R_c} \right)^{\frac{n \cdot r}{r_{eq}}} \quad (2.15)$$

É assim possível obter o campo eléctrico crítico visual através das equações de Miller para situações de condutores múltiplos.

O raio equivalente ( $r_{eq}$ ) para condutores múltiplos é substancialmente maior do que o diâmetro dos condutores simples normalmente usados, diminuindo assim o valor do gradiente crítico visual para esse tipo de condutores. No entanto, o seu gradiente de potencial, para uma mesma tensão aplicada, é consideravelmente menor, melhorando o desempenho das linhas [2].

O seguinte gráfico representa a evolução dos valores de campo eléctrico crítico e campo eléctrico máximo à superfície dos condutores, indicando o ponto que limita a ocorrência do EC.

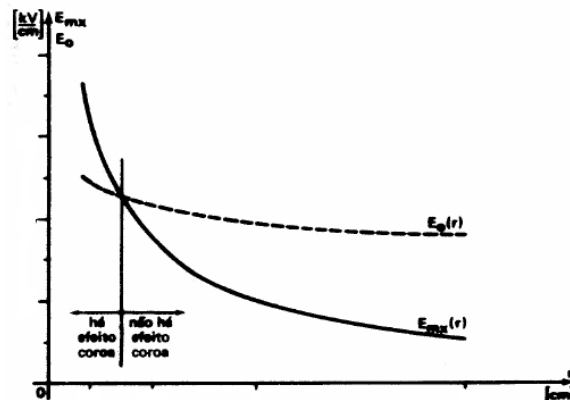


Figura 2.3 - Variação do campo Eléctrico Crítico ( $E_0(r)$ ) e do Campo Eléctrico Máximo na superfície dos condutores ( $E_{mx}(r)$ ).

### 2.2.2.2 Estudo e evolução do Cálculo do Nível do Ruído provocado pelas linhas de MAT

Como é sabido, o ruído produzido pelas linhas de MAT é um constrangimento e um incómodo provocado, na maioria dos casos pela ocorrência do EC.

Torna-se portanto imperativo, que, no projecto de futuras linhas de Muito Alta Tensão (MAT), seja cada vez mais importante a capacidade de controlar o EC. Para isso existem várias metodologias de cálculo do ruído audível, permitindo assim ajudar a compreender melhor estes fenómenos.

Desde o conhecimento destes fenómenos de ruído nas linhas de transmissão de energia, vários estudos foram efectuados, especialmente em linhas com tensão nominal igual ou superior a 400 kV, levando ao estabelecimento de várias metodologias e formulas para o cálculo do ruído audível provocado pelas mesmas. Essas metodologias de cálculo procuraram desde sempre estabelecer uma ligação entre as várias características das linhas (parâmetros, dimensões, número de condutores ou número de condutores múltiplos e raios) e o Campo Eléctrico à superfície dos condutores.

Contudo esta área de estudo tem apresentado algumas dificuldades e mesmo discordância no que diz respeito a resultados, pois nenhuma metodologia consegue explicar ou justificar a diferença de resultados de medição de ruído para linhas diferentes, como por exemplo em situações de bom tempo, registaram-se variações de níveis de ruído em cerca de 12 dB (A), tal facto deve-se ao carácter aleatório do ruído da linha MAT e do ruído ambiente [2].

Devido à matriz aleatória dos fenómenos envolvidos, as metodologias de cálculo do ruído provocado pelas linhas de MAT têm assentado em métodos estatísticos e probabilísticos.

Em 1968 foi realizado, em conjunto pelo IEEE e CIGRÉ, um estudo visando aprofundar o conhecimento nesta área, no qual foram efectuadas medições acústicas a um conjunto de linhas do mundo inteiro, sendo os resultados corrigidos e normalizados de forma a permitir a sua interpretação e análise estatística e publicados em 1972.

Posteriormente os resultados obtidos pelas medições foram comparados com outros obtidos através de processos de cálculo, desenvolvidos por outros grupos de pesquisa. A partir dessa altura, os métodos de cálculo do ruído nas linhas de transmissão foram divididos em dois grandes grupos, que o Comité IEEE-CIGRÉ intitulou de Métodos Analíticos e Comparativos.

- Métodos Analíticos, desenvolvidos pelos grupos Projecto EHV (Extra High Voltage) e EDF (Electricité de France), fundamentam-se essencialmente em ensaios relativamente simples e desenvolvimentos analíticos consideravelmente complexos [6]. A determinação do nível de ruído nestes métodos assenta na função de excitação que é determinada em gaiolas de teste, instalações monofásicas de diferentes arranjos de condutores com condições de superfícies conhecidas e posteriormente é calculado o efeito dos combinados dos campos resultantes das diferentes fases [2].

Verificou-se que com bom tempo o ruído acústico (RA) diminuía significativamente, tornando premente a utilização de factores de correcção de forma a distinguir situações de bom tempo e sob condições de chuva, sendo essas correcções de 17 dB (A) e 20 dB (A), para as equipas do Projecto EHV e EDF, respectivamente. Concluiu-se também que além das condições meteorológicas

também a poluição e a estação do ano influenciam o ruído provocado pelas linhas de transmissão de energia.

Os Métodos Analíticos têm como vantagem a sua versatilidade, permitindo a sua utilização em configurações diversas, desde condutores simples a multicondutores, mas dependendo sempre da determinação da função de excitação e uma grande dependência de programas computacionais bastante complexos.

- Métodos Comparativos, desenvolvidos por outros grupos de pesquisa, desenvolvendo técnicas empíricas e tendo por base o fundamento de que o nível de ruído gerado pelas linhas de transmissão depende das condições superficiais dos condutores, não podendo estas ser calculadas ou previstas.

Apesar destes desenvolvimentos, os resultados de previsões acústicas não eram satisfatórios nem tidos como definitivos.

Em estudos mais recentes, foram efectuadas medições em larga escala e durante um longo período de tempo em todo o mundo de forma a criar uma base de dados, que permitisse convergir para fórmulas e metodologias de cálculo mais satisfatórias. As medições foram efectuadas entre 1988 e 1998, sendo utilizados métodos estatísticos para analisar os resultados [7].

## A Teoria Geral para previsão do ruído audível

PWLi é o nível de potência acústica por fase de uma linha de transporte de energia, sendo o termo de partida necessário para calcular os níveis sonoros, que podem ser calculados para uma qualquer fase usando o nível de ruído audível medido para a linha com as 3 fases (SLT<sub>mea</sub>).

O PWLi, pode ser calculado através da seguinte expressão:

$$PWL_i = 81,7 + 120 \cdot \log\left(\frac{E_i}{16,84}\right) + 55 \cdot \log\left(\frac{d_i}{63,5}\right) \quad (2.16)$$

O PWLi permite, segundo o mesmo artigo, obter o SPLi que corresponde ao nível de pressão sonora medido de cada fase, através da seguinte expressão:

$$SPL_i (dB) = PWL_i - 10 \log R - 5.7 \quad (2.17)$$

em que R, corresponde à distância radial em relação à fonte de ruído.

A partir do valor medido por cada fase, pode-se obter SPL<sub>calc</sub> que corresponde ao nível máximo de ruído audível para todas as fases, descrito na seguinte expressão:

$$SLT_{calc.} = \left[ \sum_{i=1}^P 10^{SPL_i/10} \right] \quad (2.18)$$

em que P corresponde ao número total de fases.

## B Descrição das fórmulas existentes

De seguida é apresentada aquela que foi tida como fórmula de partida para este estudo de cálculo do nível de ruído audível:

$$SLT_{calc.} = k_1 \cdot f_1(G) + k_2 \cdot f_2(N) + k_3 \cdot f_3(d) + k_4 \cdot f_4(D) + k_0 \quad (2.19)$$

em que:

- G (kV/cm), corresponde ao campo eléctrico à superfície dos condutores, numa dada fase;
- N, indica o número de subcondutores por fase;
- d (cm), corresponde ao diâmetro dos subcondutores;
- D (m), corresponde à distância radial dos condutores ao receptor para a mesma fase;
- $f_1(G)$ ,  $f_2(N)$ ,  $f_3(d)$ ,  $f_4(D)$ , são as funções dos parâmetros G, N, d e D;
- $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$ ,  $k_4$ , correspondem a coeficientes das funções;
- $k_0$ , é um factor que permite o ajustamento dos valores de G, N e d.

Para a melhor estruturação possível desta fórmula foram usados dois métodos da Ciência da Computação, a Computação Evolucionária e os Algoritmos Genéticos (AG).

A Computação Evolucionária, é uma técnica que tem por base os mecanismos evolutivos da natureza, relacionados com a Teoria de Darwin da Selecção Natural, que defende que apenas os seres mais fortes e mais adaptados ao ambiente sobrevivem ao longo das gerações. Este ramo da Ciência da Computação, foi inicialmente utilizado pelos biólogos, abrangendo mais tarde outras áreas da sociedade.

A Computação Evolucionária tem por base 3 fundamentos, são eles a criação de: uma população de soluções, uma função de avaliação e de operadores de selecção, recombinação e mutação. A população inicial será avaliada e testada pela função de avaliação, podendo também ser modelada e alterada através de processos de recombinação e mutação de forma a melhor se adaptar ao meio.

Esta área da Computação Evolucionária sofreu uma modelação passando a ser conhecida como AG, muito graças à contribuição do cientista John Holland para esta área, no início dos anos 70.

Os AG são uma técnica de procura de soluções aproximadas em problemas de optimização e busca. Não se baseiam apenas na Selecção Natural, mas permitem a evolução da espécie, neste caso específico das soluções, sendo por isso considerados algoritmos evolutivos, que usam técnicas inspiradas pela biologia evolutiva como por exemplo: mutação, hereditariedade e crossing over (recombinação).

Os AG, assentem essencialmente nos seguintes pontos:

- Indivíduo, que é unicamente o portador do seu código genético, que neste caso pode ser entendido com a melhor solução até então. O código genético deve ser uma representação capaz de representar todo o conjunto dos valores no espaço de busca, e precisa ter tamanho finito [8];

- Função - Objectivo, que não é mais que uma função avaliadora para o indivíduo, que permite a optimização do problema, eliminando as “soluções fracas”;
- A Selecção, que é feita ordenando os indivíduos da população de acordo com a Função - Objectivo, sendo-lhes atribuídas probabilidades decrescentes de serem eles os seleccionados. A escolha é feita então aleatoriamente de acordo com essas probabilidades. É assim possível escolher como pais os mais bem adaptados, não deixando de lado a diversidade dos menos adaptados. Estas formas de selecção podem variar dependendo do problema a ser tratado [8];
- A reprodução, que pode ser decomposta em três etapas: acasalamento, crossing over (recombinação) e mutação;
- Por acasalamento entende-se o processo de escolha de dois indivíduos para se reproduzirem, gerando estes dois descendentes de modo a manter o tamanho populacional;
- O crossing over ou recombinação, corresponde ao processo no qual os descendentes recebem código genético do pai e código genético da mãe, permitindo uma troca de informações entre si levando os mais aptos a sobreviver, ficando os descendentes cada vez mais aptos;
- As mutações, têm como função permitir uma maior variabilidade genética da população, impedindo que a busca fique estagnada apenas num local, possibilitando procurar mais soluções que aquelas existentes.

Importa ainda referir que os AG são muito utilizados na procura de coeficientes de funções e de factores de correcção, como o presente caso de estudo.

Após os estudos exaustivos das linhas, das suas características e medições acústicas e ainda com a implementação dos AG, foi obtida a seguinte expressão final para que corresponderá ao nível sonoro equivalente contínuo de cada fase, utilizado na metodologia de cálculo de ruído, com o nome as variáveis devidamente adaptadas:

$$SLT_{calc.} = 179,3 \cdot \log(G_i) + 58,71 \cdot \log(d_i) - 55,02 \cdot \log(2 \cdot D_i \cdot G + 206 \cdot G) - 3,81 \quad [7](2.20)$$

## 2.3 Incidência deste fenómeno em linhas MAT

As linhas aéreas de transporte de energia, têm sido, desde sempre, apontadas por alguns, como causadoras de impacto visual. Mais recentemente com o progressivo aumento de tensão nas linhas eléctricas de transporte de energia, que implica também um aumento do fenómeno EC, dois novos tipos de perturbações são determinantes na concepção das linhas: o RA e a Radiointerferência.

As descargas individuais provocadas pelo EC provocam pulsos de tensão e corrente de curta duração, propagando-se estes ao longo das linhas, resultando em campos electromagnéticos nas suas superfícies. Apesar de as descargas de coroa ocorrerem durante ambos os semi-ciclos de tensão, apenas os semi-ciclos positivos são capazes de emitir ruídos capazes de interferir na radiorrecepção das nas faixas de frequência em Amplitude Modulada (AM).

### 2.3.1 Isoladores

As cadeias de isoladores também são uma fonte ruído sendo este mais sentido que ao longo da linha, devido à poeira que normalmente se acumula nos isoladores mesmos, tornando-se propícia a existência de correntes de fuga através da matéria que se deposita nas nos mesmo.

Este problema existe mais nos isoladores de cerâmica e vidro devido às suas que os tornam aderentes, havendo uma maior tendência para acumular poeira. Uma solução para este problema, principalmente nas zonas de maior poluição, onde tende a haver mais resíduos que aderem à superfície dos isoladores é a lavagem periódica das cadeias de isoladores ou o uso de isoladores de compósitos que são menos aderentes que os restantes.

## 2.4 Enquadramento Legal do Ruído

No mundo moderno, a poluição sonora é apresentada como um problema crescente, que afecta o bem-estar e a saúde humana. Para salvaguardar o conforto da população, no que diz respeito ao ruído, existe uma “Lei do Ruído”, que estabelece limites e horários sobre os quais devem ser cumpridos determinados valores de ruído, classificados em dB (A) (decibéis).

Em Portugal a legislação relacionada com o ruído surgiu pela primeira vez em 1987, desde então tem sofrido alterações e renovações, procurando cada vez mais adaptar-se às necessidades ambientais e às normas comuns da Comunidade Europeia.

A definição de Ruído Residual torna-se fundamental para um enquadramento da definição de ruído em termos legais. Por Ruído Residual, entende-se, segundo a legislação em vigor, como o ruído ambiente a que se suprime um ou mais ruídos particulares [9].

### 2.4.1 Evolução da “Lei do Ruído” em Portugal

#### 1987

Neste ano a regulação do Ruído passou, pela primeira vez, a fazer parte integrante da legislação Portuguesa, através da interpretação da Lei n.º 11/87, de 11 de Abril (Lei de Bases do Ambiente), e do Decreto-Lei n.º 251/87, de 24 de Junho. Este Decreto-Lei foi Revogado pelo Decreto-Lei n.º 292/2000, de 14 de Novembro.

#### 1989 a 1996

Durante os anos seguintes à implementação da primeira lei sobre o ruído, mais propriamente entre 1989 e 1996, foram efectuadas pequenas alterações/actualizações na legislação relacionada com o Ruído e Poluição Sonora.

#### 2000

Em 2000, o decreto Decreto-Lei n.º 251/87 foi destituído e a legislação que regulava o ruído passava então a ser assente no Decreto-Lei n.º 292/2000, de 14 de Novembro, que reforçava a prevenção do ruído e aprova o RPLS (Regulamento Legal de Poluição Sonora).

Alterado pelo Decreto-Lei n.º 76/2002, de 26 de Março.

Alterado pelo Decreto-Lei n.º 259/2002, de 23 de Novembro.

#### 2001

Ocorre uma pequena alteração na legislação do ruído, apenas relacionada com o tráfego automóvel.

#### 2002 e 2003

No ano de 2002, devido à aprovação da “directiva 2002/49/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 25 de Junho de 2002, relativa à avaliação e gestão do ruído ambiente”

(decreto-lei nº9/2007), tornou-se necessário efectuar ajustamentos, na então existente, “Lei do Ruído”, mais propriamente, no Decreto-Lei n.º 292/2000, de 14 de Novembro.

O Decreto-Lei nº 259/2002, de 23 de Novembro, altera então o Decreto-Lei nº 292/2000, de 14 de Novembro, aprovando assim o Regulamento Geral do Ruído.

O Decreto-Lei nº 76/2002, de 26 de Março, aprova o Regulamento das Emissões Sonoras para o Ambiente do Equipamento para Utilização no Exterior, alterando também o Decreto-Lei nº 292/2000, de 14 de Novembro e transpondo a Directiva 2000/14/CE. JO L162 2000-7-03.

#### **2004 e 2005**

Nos anos de 2004 e 2005, ocorrem pequenas alterações na legislação, principalmente relacionada com o tráfego aéreo.

#### **2006**

No ano de 2006 é publicado o Decreto-Lei nº 146/2006, de 31 de Julho que transpõe para ordem jurídica interna a Directiva nº 2002/49/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 25 de Junho, relacionada com a avaliação e gestão do ruído ambiente. Neste ano é também publicado o Decreto-Lei nº 221/2006, de 8 de Novembro, que transpõe para a ordem jurídica interna a Directiva nº 2005/88/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 14 de Dezembro, que altera a Directiva 2000/14/CE, visando aproximar as legislações dos Estados membros em matéria de emissões sonoras para o ambiente dos equipamentos para utilização exterior.

#### **2007**

No ano de 2007, com a publicação do Decreto-Lei n.º 9/2007 de 17 de Janeiro, foi aprovado o Regulamento Geral do Ruído (RGR) e revogado o Regime Legal de Poluição Sonora (RPLS), aprovado pelo Decreto-Lei n.º292/2000, de 14 de Novembro, que já continha alterações introduzidas pelo Decreto-Lei n.º259/2002, de 23 de Novembro.

O Decreto-Lei n.º 9/2007, de 17 de Janeiro, prevê no artigo 4.º que os municípios que dispõem de mapas de ruído à data da sua publicação devem proceder à respectiva adaptação até 31 de Março de 2007.

Em Março do mesmo ano, através da Declaração de Rectificação n.º 18/2007, de 16 de Março, o Decreto-Lei n.º 9/2007, de 17 de Janeiro, foi rectificado de forma a corrigir pequenas inexactidões deste último.

Em Agosto do mesmo ano, através do Decreto-Lei 278/2007, de 1 de Agosto, foi alterado o artigo 4.º do Decreto-Lei n.º 9/2007, de 17 de Janeiro, que estabelecia a data limite de 31 de Março para actualização dos Mapas de Ruídos dos Municípios que já possuíssem o mesmo. A nova data limite estabelecida para a adaptação de ruídos passou a ser 31 de Dezembro de 2007. Além desta alteração foram também corrigidos lapsos de redacção do Decreto-Lei anterior.

## 2.4.2 O Regulamento Geral do Ruído

O Regulamento Geral do Ruído (RGR) actualmente em vigor foi aprovado através do Decreto-Lei 9/2007, de 17 de Janeiro, tendo sofrido apenas pequenas alterações posteriores, tal como já foi referido anteriormente. O objectivo do RGR é, segundo o Capítulo I artigo 1.º, salvaguardar a saúde e o bem-estar das populações, e aplica-se entre outras a fontes de ruído permanentes susceptíveis de causar incomodidade, de acordo com o Capítulo I artigo 2.º.

Como pontos mais relevantes do Regulamento Geral do Ruído, destacam-se:

### 2.4.2.1 Indicador de Ruído Diurno-Entardecer-Nocturno

No Regulamento Geral do Ruído, o índice de avaliação de Ruído trata-se do indicador de Ruído diurno-entardecer-nocturno, que está associado ao incómodo global. O Ruído diurno-entardecer-nocturno, segundo a alínea j) do artigo 3º do Regulamento Geral do Ruído pelo Decreto-Lei n.º 9/2007 de 17 de Janeiro, é obtido através da seguinte expressão:

$$L_{den} = 10 \times \log \frac{1}{24} \left[ 13 \times 10^{L_d/10} + 3 \times 10^{(L_e+5)/10} + 8 \times 10^{(L_n+10)/10} \right] \quad (2.21)$$

Nesta expressão são considerados 3 períodos de referência, de acordo com a alínea p) do artigo 3º do Regulamento Geral do Ruído:

- $L_d$  -  $L_{Aeq}$  período diurno - das 07h00 às 20h00 horas, (artigo 3.º alínea l);
- $L_e$  -  $L_{Aeq}$  período entardecer - das 20h00 às 23h00 horas, (artigo 3.º alínea m);
- $L_n$  -  $L_{Aeq}$  período nocturno - das 23h00 às 07h00 horas, (artigo 3.º alínea n)

O indicador de ruído nocturno ( $L_n$  ou  $L_{night}$ ) é o nível sonoro médio de longa duração, segundo a Norma NP 1730-1:1996, ou na versão actualizada correspondente, determinado durante uma série de períodos nocturnos representativos de um ano.

### 2.4.2.2 Critério de Incomodidade

De acordo com o artigo 13.º do Regulamento Geral do Ruído em vigor, é necessário satisfazer o critério de incomodidade: “ e ao cumprimento do critério de incomodidade, considerado como a diferença entre o valor do indicador  $L_{Aeq}$  do ruído ambiente determinado durante a ocorrência do ruído particular da actividade ou actividades em avaliação e o valor do indicador  $L_{Aeq}$  do ruído residual”.

As diferenças que não podem ser excedidas são as seguintes:

- Não pode exceder 5 dB (A) no período diurno;
- Não pode exceder 4 dB (A) no período entardecer;
- Não pode exceder 3 dB (A) período nocturno.

Contudo este critério de incomodidade, não se aplica, segundo o n.º 5 do mesmo artigo 13º do RGR, para valores de “ $L_{Aeq}$  do ruído ambiente no exterior, iguais ou inferiores a 45 dB(A), ou para um valor do indicador  $L_{Aeq}$  do ruído ambiente no interior de locais de recepção igual ou inferior a 27 dB(A).” (artigo 13.º ponto 5º)

Torna-se portanto imperativo efectuar uma caracterização do ambiente sonoro e determinação do ruído residual nas zonas envolventes da implantação de uma nova futura linha de transporte de energia.

#### 2.4.2.3 Zonas Sensíveis e Zonas Mistas. Mapas de Ruído

Segundo o artigo 6.º do Decreto-Lei 9/2007, de 17 de Janeiro, é dever das Câmaras Municipais, através dos seus planos municipais de ordenamento de território assegurar a qualidade do ambiente sonoro.

É portanto, competência de todos os municípios, estabelecer nos planos municipais de ordenamento de território a classificação e delimitação de Zonas Sensíveis e Zonas Mistas. De forma sucinta, os dois tipos de zonas podem ser descritos da seguinte forma: se um local possui uma ou mais habitações isoladas, trata-se de uma zona sensível, enquanto se a uma zona habitacional se juntarem outras utilizações, como comércio, indústria ou serviços, é considerada uma zona mista.

As câmaras municipais, devem também, elaborar Mapas de Ruído de forma a auxiliar a elaboração, alteração e revisão dos planos directores municipais (PDM), segundo o ponto 1 do artigo 7.º Regulamento Geral do Ruído aprovado no Decreto-Lei 9/2007, de 17 de Janeiro.

Os mapas de Ruído, pode ser descritos como ferramentas estratégicas de análise e planeamento que permitem integrar a prevenção e controle de ruído em Ordenamento do Território, facilitando a divulgação e o acesso público à informação.

Os mapas de ruído, são fundamentados pelas exigências do Decreto-Lei n.º 292/2000, de 14 de Novembro, bem como o disposto na proposta de Directiva Comunitária 2002/49/CE, de 25 de Junho.

De acordo com o disposto no ponto 5 do artigo 7.º do Regulamento Geral do Ruído, “os mapas de Ruído são elaborados para os indicadores de  $L_{den}$  e  $L_n$  reportados a uma altura de 4m acima do solo.” (ponto 5 artigo 7.º do RGR do DL 9/2007)

#### 2.4.2.4 Valores Limite de Exposição ao Ruído

Como melhor forma de controlar o Ruído, existem limites legais, que estabelecem o limite máximo de ruído admissível para uma dada área e num dado período.

Segundo o artigo 11.º Regulamento Geral do Ruído presente no Decreto-Lei 9/2007, de 17 de Janeiro, os valores máximos de ruído, aos quais um dado local pode estar sujeito, sem infringir a legislação, dependem da classificação, como zona sensível ou zona mista do local em questão, sendo considerados os seguintes valores limite de exposição ao ruído:

**Tabela 2.1 – Valores Limite de Exposição ao Ruído.**

Tipo de Zona	Descritor $L_{den}$ [dB(A)]	Descritor $L_n$ [dB(A)]
Zona Mista	$\leq 65$	$\leq 55$
Zona Sensível	$\leq 55$	$\leq 45$



## Capítulo 3 - Ruído emitido por linhas. Modelos de cálculo e Modelos experimentais

Depois de um enquadramento legal do ruído, é necessário proceder a uma descrição de possíveis formas de obter e prever o ruído emitido pelas linhas da Rede Nacional de Transporte (RNT).

Ainda que esta matéria do cálculo do RA provocado pelas linhas de transmissão ainda não seja tida como definitiva, a actual metodologia assenta nos estudos mais recentes e já referidos anteriormente.

### 3.1 Cálculo dos Campos Eléctricos Superficiais e do Efeito Coroa

Para o cálculo do campo eléctrico  $E_i$ , é necessário começar por estabelecer a altura a que se encontra a linha, mais especificamente os condutores. Considera-se que o condutor se dispõe de acordo com uma linha recta paralela ao solo cuja altura é a seguinte:

$$h_{med} = h_{milkn} + \frac{2}{3} \cdot f \quad (3.1)$$

Com:

- $h_{milkn}$  (m) a corresponder à distância ao solo, sendo os valores mínimos de:
  - 14 m para os 400 kV;
  - 12 m para os 220 kV;
  - 10 m para os 150 kV
- $f$ , em metros, é a flecha dos condutores.

Para o cálculo de  $f$  é suficiente a aproximação parabólica para a curva dos condutores. O valor de  $f$  pode ser obtido através da seguinte expressão:

$$f = \frac{a^2}{8 \cdot P} \quad (3.2)$$

onde:

- $p$  (m), é o parâmetro da catenária (relação  $T/w$ , entre tracção e peso linear dos condutores);
- $a$  (m), é o valor do vão médio ao longo da linha.

Importa conhecer os valores dos campos máximos à superfície dos condutores, para isso, utiliza-se a seguinte expressão:

$$[E] = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon} \cdot [D] \cdot [A]^{-1} \cdot [U] \quad (3.3)$$

Sendo:

- $[E]$ , o vector dos fasores de campo eléctrico;
- $\epsilon = \epsilon_r \cdot \epsilon_0$ , em que  $\epsilon_r = 1$  e  $\epsilon_0 = 8,859E^{-12}$  A.s/V.m;
- $[D] = \left[ \frac{1}{r_i} \right]$ , com  $i = 1 \dots 18$ ;
- $[A]^{-1}$ , a inversa da matriz dos coeficientes de potencial (A.s/V.m);
- $[U]$ , o vector dos fasores de tensão fase-terra (V).

São também neste modelo de cálculo incluídos os cabos de guarda, considerando-se que eles têm o potencial do solo.

Como já foi referido, o campo eléctrico crítico é definido como o valor limite de campo eléctrico, a partir do qual, o EC surge. Esse valor, depende principalmente da geometria dos condutores e de parâmetros atmosféricos que afectam as condições de ionização do ar. É então considerada, para o cálculo do campo eléctrico crítico, a expressão de PEEK:

$$E_0 = 18,1 \cdot m \cdot \delta \cdot \left[ 1 + \left( \frac{0,54187}{\sqrt{r \cdot \delta}} \right) \right] \text{ [kV/cm]} \quad (3.4)$$

em que:

- $r$ , é o raio dos cabos em centímetros;
- $m$  é o factor de superfície;

$$\delta = \left[ 0,386 \cdot \frac{760 - 0.086 \cdot h}{273 + \theta} \right], \text{ sendo:}$$

- $\delta$ , é a pressão atmosférica
- $h$ , a altitude média da linha;
- $\theta$ , a temperatura média anual (15°C).

As perdas por EC com bom tempo, são calculadas através da expressão de PETERSON:

$$P = 20,945 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{f \cdot U^2 \cdot \phi}{\left( \log \left( \frac{D_m}{r} \right) \right)} \text{ [kW/km]} \quad (3.5)$$

onde:

- $U$  é a tensão eficaz entre a fase e neutro em kV;
- $r$  corresponde ao raio do condutor em cm;
- $D_m$  é a distância média geométrica entre condutores;
- $f$  indica a frequência do sistema ( 50Hz);
- $\phi$  corresponde a um factor experimental que depende da relação  $E/E_0$ , em que:
  - $E$ , é o campo eléctrico à superfície do condutor
  - $E_0$  corresponde ao campo eléctrico crítico.

Como é sabido, as perdas por EC dependem em grande parte das condições climatéricas, podendo elas crescer várias dezenas de vezes acima do valor calculado para bom tempo. É portanto usual, utilizar um factor multiplicativo para determinar o valor médio anual das perdas, que pode variar entre 3 e 9, no entanto nos recentes casos de estudo de linhas em Portugal, é utilizado o factor multiplicativo<sup>5</sup> de 5.

---

<sup>5</sup> Valor considerado e incluído no modelo de cálculo da REN é 5.

## 3.2 Cálculo do Nível de Ruído

Depois de descrita a metodologia de cálculo do campo eléctrico à superfície dos condutores e do campo eléctrico crítico, é necessário efectuar a descrição da metodologia de cálculo do ruído, que surge a partir da relação desses dois elementos.

A metodologia de cálculo do ruído provocado pelas linhas de transporte de energia actualmente utilizada no nosso país e tida em consideração neste estudo, é a seguinte:

1. Calcular o nível sonoro equivalente contínuo, ponderado A, de cada fase a partir da expressão para um receptor a controlar:

$$L_{Aeq,i} = 179,3 \cdot \log(E_i) + 58,71 \cdot \log(d_i) - 55,02 \cdot \log(2 \cdot R_i \cdot E + 206 \cdot E) - 3,81 \quad (3.6)$$

em que:

- $E_i$  [kV/cm] é campo eléctrico à superfície dos condutores, na fase  $i$
- $d_i$  [cm] corresponde ao diâmetro dos condutores, na fase  $i$
- $R_i$  [m] é a distância radial dos condutores ao receptor, para a fase  $i$

2. Calcular o nível máximo de ruído audível para todas as fases, através da seguinte expressão SLT (ou SLA<sup>6</sup>):

$$SLT_{calc.} = \left[ \sum_{i=1}^P 10^{SPL_i/10} \right] \quad (2.18)$$

em que:

- $P$  corresponde ao número de fases:
  - nas linhas simples  $nf=3$ ;
  - nas duplas  $nf=6$ .
- $SPL_i$  corresponde a  $SPL_i(dB) = PWL_i - 10 \log R - 5,7$

em que:

- $R$  corresponde à distância radial em relação à fonte de ruído;
- $PWL_i$  pode ser calculado através da seguinte expressão:

---

<sup>6</sup> Segundo a Environmental Protection Agency (EPA), USA, o nível máximo de ruído audível, susceptível de não provocar queixas a 30m do eixo da linha é de 52,5 dB(A).

$$PWL_i = 81,7 + 120 \cdot \log\left(\frac{E_i}{16,84}\right) + 55 \cdot \log\left(\frac{d_i}{63,5}\right)$$

com:

- $E_i$  [kV/cm] é campo eléctrico à superfície dos condutores, na fase  $i$
- $d_i$  [cm] corresponde ao diâmetro dos condutores, na fase  $i$

3. Calcular a contribuição do conjunto de todas as fases a partir da expressão:

$$L_{Aeq} = 10 \cdot \log\left[\sum_{i=1}^{nf} 10^{\frac{L_{Aeq,i}}{10}}\right] \quad (3.7)$$

Sendo:

- $nf$ : nº de fases:

4. Calcular o valor do nível sonoro equivalente de longa duração para um período climático de um ano, tendo por base a expressão:

$$L_{Aeq,LT} = L_{Aeq} + 10 \cdot \log\left[p + (1 - p) \cdot 10^{\frac{-\Delta L}{10}}\right] \quad (3.8)$$

Com um valor de  $\Delta L$  em conformidade com a tensão da linha:

- Para 150 e 220 kV:  $\Delta L=20$  dB;
- Para 400 kV:  $\Delta L=12,5$  dB;
- O valor de probabilidade  $p$  obtido a partir de informação climatológica adequada à localização geográfica da linha de acordo com os critérios seguintes e considerando como condições desfavoráveis<sup>7</sup> as seguintes:
  - de aguaceiros de chuva fraca (até 1 mm por dia) - todo o período;

---

<sup>7</sup> Condições Desfavoráveis do ponto de vista climático.

- de nevoeiro (ocorrências de oito horas de nevoeiro por cada dia registado pelo Instituto de Meteorologia) - 8 horas;
- de precipitação moderada (entre 1mm e 10 mm) - 10 minutos após o registo de cada ocorrência;
- de precipitação forte (mais de 10 mm) - 10 minutos após o registo de cada ocorrência;
- Ou na impossibilidade da sua obtenção por falta de elementos adopta-se o valor de  $p = 0,10$ .

### 3.2.1 Verificação do cumprimento do critério de exposição máxima:

Para verificação do Critério de Exposição Máxima, disposto no artigo 11.º do Decreto-Lei 9/2007, de 17 de Janeiro, é necessário efectuar os seguintes procedimentos:

- Considerar dois tipos de períodos em cada ciclo climatológico com a duração de um ano, usualmente descritos como período de Inverno e período de Verão:
  - Período de referência correspondente a condições desfavoráveis, caracterizado por aguaceiros de chuva fraca e nevoeiro, conducentes à acumulação de água nos condutores;
  - Período de referência correspondente a condições favoráveis, definido como o restante período do ano.
- Com base em dados climatológicos disponíveis para uma zona específica da linha onde se deseje efectuar o controlo de conformidade em tempo de projecto, obter a probabilidade de ocorrência de condições desfavoráveis  $p$ ;
- A partir dos valores de nível sonoro contínuo equivalente ( $L_{Aeq,i}$ ), em dB, calcular o valor do nível sonoro médio de longa duração, para o intervalo temporal de um ano, para cada um dos dois tipos climatológicos anteriormente indicados (com condições favoráveis e desfavoráveis);
- Realizar a verificação de conformidade com os valores limites estabelecidos pelo Regulamento Geral do Ruído tendo por base o indicador  $L_{den}$  e o indicador  $L_n$ .

### 3.2.2 Verificação do cumprimento do critério de incomodidade

A verificação do cumprimento do critério de incomodidade, tem por base o já referido artigo 13º do Decreto - Lei n.º 9/2007 de 17 Janeiro. O procedimento para a verificação do cumprimento deste critério deve ser o seguinte:

- Segundo os valores das Normais Climatológicas estabelecer qual o mês mais crítico do ano e obter a probabilidade de ocorrência de condições desfavoráveis  $p$ , referente ao período desse mês.
- De seguida calcular o valor de  $L_{Aeq}$  para o mês mais crítico, através da expressão:

$$L_{Aeq,LT} = L_{Aeq} + 10 \cdot \log \left[ p + (1 - p) \cdot 10^{\frac{-\Delta L}{10}} \right] \quad (3.9 \text{ igual a } 3.8)$$

- Realizar a verificação de conformidade com os valores limites estabelecidos no Regulamento Gera do Ruído tendo por base a diferença entre o valor do indicador  $L_{Aeq}$  do ruído ambiente determinado durante a ocorrência do ruído particular da linha em avaliação e o valor do indicador  $L_{Aeq}$  do ruído residual.

### 3.3 Exemplo de uma Monitorização de Ruído

Um Programa de Monitorização de Ruído, corresponde a uma metodologia que visa efectuar leitura, avaliação e análise do Ruído em zonas de implantação de futuras e/ou actuais linhas MAT. Para avaliação do impacte sonoro introduzido por uma linha de transporte de energia é necessário efectuar dois tipos de monitorizações, uma para a situação de referência, isto é, antes de a linha ser construída e outra para a linha em exploração. Depois das duas monitorizações efectuadas é possível efectuar a comparação das duas situações e analisar impacte sonoro introduzido pela linha de transmissão de energia.

#### A Metodologia Geral

Com Programas de Monitorização de Ruído, pretende-se recolher informação necessária e adequada à avaliação e validação de eventuais impactes introduzidos no ambiente sonoro local pelo normal funcionamento das linhas MAT, de forma a averiguar o cumprimento dos critérios estabelecidos na legislação aplicável em vigor, nomeadamente no Regulamento Geral do Ruído.

#### B Consulta às Câmaras Municipais

Sempre que é efectuado um programa de Monitorização de Ruído, nas zonas envolventes das linhas MAT, é necessário efectuar uma solicitação aos Municípios abrangidos por zonas de implantação de futuras linhas MAT, de forma a ter conhecimento das classificações acústicas das referidas zonas, de acordo com o ponto 3 do Artigo 6.º do RGR. Apenas com o conhecimento da classificação acústica de cada zona, é possível verificar o cumprimento dos valores limite de exposição, segundo o artigo 11.º do RGR.

#### C Análise da envolvente acústica

Para uma correcta apreciação dos condicionantes dos trabalhos de forma a dar credibilidade aos dados recolhidos, é necessário efectuar uma análise a envolvente acústica, que pode ser baseada em dois tempos, uma correspondente à preparação dos trabalhos de campo e uma outra já no terreno onde decorrerão os trabalhos.

Na fase precedente à realização do trabalho de campo, deve ser analisada toda a cartografia da envolvente das linhas, nas quais será efectuada a monitorização do ruído.

Posteriormente, já em campo, devem ser tomados em atenção alguns aspectos, relacionados com a zona envolvente das linhas nas quais se efectuará a Monitorização do Ruído, tais como:

- Identificar e tipificar o tipo de usos do solo com sensibilidade ao ruído, como por exemplo, habitação, comércio, hospitais, escolas, etc;
- Localizar, identificar e avaliar o grau de influência para o estabelecimento do ruído ambiente local de possíveis fontes sonoras concorrentes com as linhas MAT, por exemplo infra-estruturas rodoviárias, aéreas ou industriais;

## D Parâmetros a monitorizar

Na Monitorização Acústica é efectuada avaliação do nível sonoro contínuo equivalente ponderado em malha A de longa duração  $L_{Aeq}$ , segundo a actual legislação.

A avaliação deve ser feita, considerando a existência dos três períodos de referência, descritos no RGR e já referenciados anteriormente no relatório, que possibilitam a determinação dos valores para os indicadores de ruído:

- $L_d \rightarrow L_{Aeq}$ , correspondente ao período diurno (7h às 20h)
- $L_e \rightarrow L_{Aeq}$ , correspondente ao período entardecer (20h às 23h)
- $L_n \rightarrow L_{Aeq}$ , correspondente ao período nocturno (23h às 7h)

Com o valor de cada um destes índices é possível determinar o indicador de ruído diurno-entardecer-nocturno,  $L_{den}$ , também já referenciado anteriormente no relatório:

$$L_{den} = 10 \times \log \frac{1}{24} \left[ 13 \times 10^{L_d/10} + 3 \times 10^{(L_e+5)/10} + 8 \times 10^{(L_n+10)/10} \right] \quad (3.10)$$

Os valores obtidos para este índice, nos diferentes locais de medição, bem como os valores do índice  $L_n$ , permitem uma comparação directa com os valores limite estabelecidos na legislação em vigor e com os valores registados nos estudos base, se estes existirem, de forma a verificar o cumprimento do “critério de incomodidade” e os valores limite de exposição máxima.

De carácter mais técnico, do ponto de vista acústico, são ainda efectuadas medições de espectro em bandas de 1/3 de oitava (50 kHz e 8kHz), de forma a permitir a identificação de possíveis características tonais do sinal sonoro emitido pelas linhas MAT, sendo o ruído considerado tonal, se o nível de uma banda excede o das adjacentes em 5 dB (A) ou mais.

Deve, também, ser estudada a possível existência de componentes impulsivas do ruído emitido pelas linhas eléctricas. Para tal devem ser registados os valores do nível sonoro contínuo equivalente,  $L_{Aeq}$ , juntamente com a característica impulsiva e integração “fast”, sendo o ruído emitido pela linha eléctrica considerado impulsivo se a diferença entre essas duas características for superior a 6 dB (A).

Os valores a adoptar para estas correcções são acréscimos de 3 dB (A) por cada componente, tonal ou impulsiva, que seja detectado nas características do ruído.

## E Selecção dos locais de avaliação acústica

A escolha de Locais de Monitorização de ruído é efectuada, tendo em conta o tipo de uso da área envolvente das linhas MAT até uma distância do eixo da linha cujo valor do ruído produzido por esta, obtido por cálculo seja já desprezável (sem suporte científico ainda e

dependendo de diversos factores como sejam o nível de tensão e a orografia do terreno pode considerar-se como valor de referência 100m).

A selecção dos Locais de avaliação acústica deve ter em conta os seguintes factores:

- o tipo de ocupação humana com sensibilidade ao ruído existente na zona envolvente do corredor de implantação da linha;
- a proximidade dos usos do solo com sensibilidade ao ruído relativamente ao eixo da linha;
- a existência de novos usos do solo com sensibilidade ao ruído que não constem da cartografia disponibilizada/analizada;
- a existência de reclamações de ocupantes de usos do solo nas zonas envolventes da linha;
- as características topográficas dos locais de implantação dos usos do solo com sensibilidade ao ruído.

Importa também referir que os locais de Monitorização de Ruído devem ser situados perto de zonas com ocupação com sensibilidade ao ruído, tais como: casa de habitação, hospitais, edifícios escolares e espaços de lazer e recreio, sendo portanto considerados Receptores Sensíveis.

## F Procedimentos Experimentais

Todos os procedimentos experimentais que são efectuados aquando da realização de monitorizações acústicas, devem estar em concordância com o recomendado pelas Normas Portuguesas aplicáveis, mais especificamente de acordo com a Norma Portuguesa NP-1730 (Acústica. Medição e descrição do ruído ambiente).

Quando os “locais” de monitorização acústica estão escolhidos, é necessário, seleccionar os pontos exactos no terreno, onde serão efectuadas as medições acústicas. A selecção desses pontos é efectuada para uma melhor caracterização acústica do local, para isso são tidos em conta alguns aspectos:

- Os pontos devem situar-se em locais com ocupação com sensibilidade ao ruído, como por exemplo, habitações, hospitais, escolas, entre outros;
- Todos os pontos de Monitorização acústica deverão ser de fácil acesso público para que a caracterização acústica possa ser repetida sempre que necessário;
- Os pontos de Monitorização devem encontrar-se a pelo menos 3,5m de qualquer estrutura reflectora (muro ou fachada), com excepção do solo;
- Os pontos de Monitorização Acústica devem situar-se a uma altura entre 3,8m e 4,2m acima do solo, sempre que possível, ou entre 1,2m e 1,5m de altura do solo ou ao nível de cada piso de interesse relacionados com a utilização do espaço, nos restantes casos.

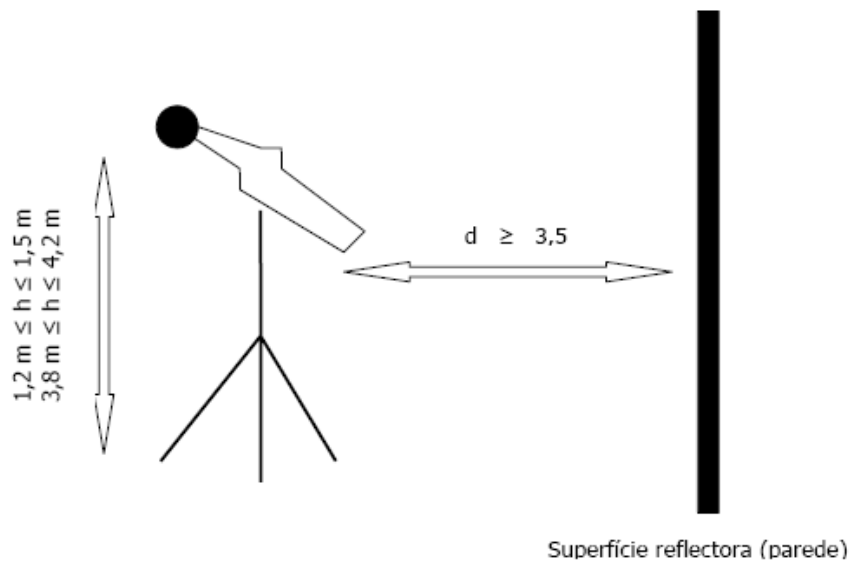


Figura 3.1 - Posicionamento do Sonómetro.

Se o ambiente sonoro nos quais estão localizados os pontos de monitorização acústica se encontrem na proximidade de outras fontes sonoras perceptíveis, como vias de comunicação ou indústrias, pode ser necessária a recolha de dados acústicos em pontos com características similares e cujo ambiente sonoro sofra apenas influência da linha, para análise do ambiente sonoro e avaliação de conformidade legal da linha MAT.

Aquando das medições o Operador de Medição<sup>8</sup> acústica deve estar afastado do equipamento de medição em pelo menos 0,5m, para evitar reflexões.

Quando às medições acústicas em cada ponto de medição, o operador deve registar:

- Valores do nível sonoro contínuo equivalente do ruído ambiente,  $L_{Aeq}$ , com as constantes de integração fast e impulse;
- Os valores de outros índices acústicos que podem assessorar a análise acústica, como por exemplo, o L50;
- Espectros de Frequência, em bandas de 1/3 de oitava;
- Valores dos indicadores das condições meteorológicas relevantes, como a velocidade média e direcção do vento, o valor médio da temperatura e a humidade relativa;
- Observação e classificação das condições atmosféricas de emissão e propagação sonora:
- “favoráveis”, quando se verificam aguaceiros de chuva fraca e neblina.
- “desfavoráveis<sup>9</sup>”, em todas as outras situações.

<sup>8</sup> Técnico Responsável pelas Medições Acústicas.

- Identificação visual e auditiva das influências de diferentes fontes de ruído determinantes no estabelecimento do ambiente sonoro local; a preponderância dessas fontes deverá ser hierarquizada segundo a sua importância no estabelecimento do ambiente sonoro local; Deve também ser registada a audibilidade do ruído proveniente directamente da linha eléctrica;
- A data de realização da recolha de dados;
- Os intervalos de duração das medições acústicas;
- Registo Cartográfico ou coordenadas SIG, em formato standard, por exemplo Datum Lisboa, e sempre que possível registo fotográfico do ponto de medição acústica.

## G Instrumentação

Os aparelhos de medição devem ser de modelos homologados e devem estar verificados por um Laboratório Primário de Metrologia Acústica.

Devem ser usados também os seguintes aparelhos:

- Sonómetros digitais integradores de Classe 1, com análise de frequência por bandas de terços de oitava e analisadores de ruído em tempo real também com análise em frequência por terços de oitava;
- O Microfone do sonómetro deve ser equipado com um protector de vento para evitar sinais espúrios de baixa frequência devidos ao vento. O Microfone deve também possuir características “omnidireccionais” e ser orientado para o eixo da actual/futura linha MAT;
- Calibrador para calibração do equipamento a utilizar antes do início das medições. A calibração deve ser confirmada no final das medições, com intuito de verificar a ausência, de desvios das posições de calibração;
- Um Tripé, para colocar o equipamento de medição de forma a garantir a estabilidade do equipamento de medição;

---

<sup>9</sup> Desfavoráveis do ponto de vista de propagação do ruído acústico.



Figura 3.2 - Sonómetro com protector de vento e tripé.

- Um Termómetro, para o registo da temperatura à data da realização das medidas acústicas. O Termómetro deve ser verificado por entidade credenciada para o efeito;
- Um Anemómetro, de forma a ser possível registar a velocidade do vento aquando da realização das medições. O Anemómetro deve também ele, ser verificado por uma entidade credenciada para o efeito;
- Um Higrómetro, para possibilitar o registo da humidade relativa da atmosfera durante o processo de medições. O Higrómetro deve ser verificado por uma entidade credenciada para o efeito.

## H Períodos de Avaliação Acústica

A avaliação acústica deve ser efectuada em três períodos distintos, tendo por base a alínea p) do artigo 3.º do RGR, para cada um dos quais será registado o seu respectivo indicador de ruído:

- Período diurno (7h às 20h) →  $L_d (L_{Aeq})$ ;
- Período entardecer (20h às 23h) →  $L_e (L_{Aeq})$ ;
- Período nocturno (23h às 7h) →  $L_n (L_{Aeq})$ .

## I Intervalos de amostragem das medições acústicas

As medições acústicas para cada um dos diferentes períodos devem ter durações necessárias de forma a garantir que os sinais possam ser estáveis e seja também possível a representação estatística dos registos em relação à duração total do intervalo de referência, segundo a norma Portuguesa NP-1370.

Os intervalos de duração das medições devem permitir a obtenção de um valor representativo do nível sonoro de longa duração a caracterizar, não devendo em caso de dúvida, a duração das medições ser inferior a 30 minutos, para cada um dos períodos de referência.

De forma a tornar as medições mais eficientes, podem ocorrer medições em dias distintos, para permitir também o cumprimento dos requisitos de representatividade temporal. Sempre que se efectuar mais que uma medição para um local, em cada um dos períodos de referência, deve ser calculado o valor médio, através da média logarítmica:

$$L_{Aeq,T} = 10 \cdot \log \left[ \sum_{i=1}^n 10^{\frac{L_{Aeq,i}}{10}} \right]$$

Durante o processo de medições, devem ser identificados os seguintes aspectos:

- O comportamento do ambiente sonoro local, no que diz respeito a influências sonoras de outras fontes;
- A ocorrência de fenómenos sazonais que introduzam fontes sonoras temporárias, como por exemplo obras, ou a ausência das mesmas fontes, no caso de se tratar de feriados locais, férias escolares, por exemplo;
- Condições atmosféricas características;

## J Periodicidade das campanhas de avaliação acústica

Devem ser realizadas duas campanhas de Monitorização de Ruído durante cada ano, sendo uma representativa do Verão e a outra do Inverno.

A principal diferença entre estas duas campanhas incide nas diferentes condições meteorológicas que as mesmas são realizadas. A campanha de Verão é realizada quando as condições meteorológicas são consideradas “desfavoráveis” (desfavoráveis à geração e propagação do som emitido pelas linhas MAT, no entanto favoráveis sob o ponto de vista de cálculo). Por outro lado, a campanha de Inverno é efectuada quando as condições meteorológicas são “favoráveis” (favoráveis à geração e propagação do som emitido pelas linhas MAT, no entanto desfavoráveis sob o ponto de vista de cálculo).

## Capítulo 4 - Análise das soluções normalizadas da RNT quanto ao comportamento acústico

### 4.1 150kV: Linha Tunes - Estói

Neste capítulo são efectuadas análises do comportamento acústico de 3 linhas de diferentes valores de tensão, para tentar perceber até que ponto estas introduzem perturbações sonoras nos locais onde são construídas. A título de exemplo a linha Tunes - Estói terá um tratamento de dados mais completo, enquanto das linhas seguintes apenas são apresentados os resultados.

Para o estudo desta linha de 150 kV foi considerada a Linha MAT Tunes - Estói, que foi projectada e executada em três fases distintas, sendo elas descritas por Troços (1,2 e 3). Torna-se premente referir que apesar de esta linha ter sido licenciada e esteja a ser explorada a 150kV possui apoios geralmente destinados a linhas de 220 kV.

Nesta linha, os condutores são dispostos em dupla bandeira, com um terno de cada um dos lados dos apoios na maior parte da linha (Poste 1 a 61 e 88 a 125), estando os restantes apoios com os cabos dispostos horizontalmente. A linha possui um cabo por fase. Na seguinte figura, estão representadas simbolicamente as distribuições de fases nos apoios ao longo de toda a linha.

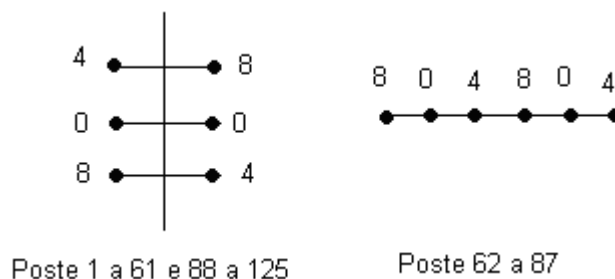


Figura 4.1 - Distribuição das Fases nos Apoios com vista de Tunes.

### 4.1.1 Condutores

A linha possui cabos condutores, do tipo ACSR 485 “Zebra”.

O cabo do tipo Zebra, apresenta um diâmetro inferior aos cabos “Zambeze” e “Rail AW”. Também os coeficientes de dilatação térmica e de efeito peculiar são menores neste cabo do tipo Zebra, em relação aos outros dois. Quanto à carga de rotura, esta apresenta, quando comparando os mesmo três tipos de cabos, o valor mais elevado.

A carga de rotura do condutor de Zebra é superior à do condutor Zambeze e inferior à do condutor “Rail AW”.

Este cabo tem ainda a particularidade de possuir iguais diâmetros nas partes constituintes de alumínio e aço.

### 4.1.2 Cadeias de isoladores

A linha MAT Tunes - Estói, contém isoladores de calote e haste, do tipo U70BS e U160 BS<sup>10</sup>, podendo ser considerados, segundo o Projecto de execução desta linha, como isoladores “normais”, estando adaptados às zonas de poluição ligeira, sendo todo o corredor de linhas classificado desta forma.

### 4.1.3 Apoios

Na maior parte do traçado da linha Tunes - Estoi, os apoios são de linha dupla e os condutores dispostos em esteira vertical (designados por CW e BW ou AW), com um terno de cada lado e portanto quatro planos.

Ao longo da linha, são usados apoios do tipo:

- CW, tendo uma altura máxima de 40,60m e uma altura mínima de 22,6m.

Dentro da “família” de apoios CW são usados:

- Postes do tipo CWLS e CWS, em suspensão, 17,0 graus;
- Postes do tipo CWR, CWA e CWT, em amarração, 16,0 graus.

- BW, possuindo uma altura máxima total de 54m e uma altura mínima das consolas inferiores de 18m.

Dos tipos de apoios da “família” BW, são usados:

- Postes do tipo BWS em suspensão, 19 graus;
- Postes dos tipos BWR, BWA e BWT, em amarração, 26 graus.

- Em parte do troço 2 da linha Tunes - Estoi, os apoios são também de linha dupla mas os condutores dispostos em esteira horizontal e portanto dois planos (designados por YD).

---

<sup>10</sup> Vd. Norma CEI-60 305.

#### 4.1.4 Monitorização

As monitorizações de ruído efectuadas nas linhas de MAT destinam-se a analisar o impacto acústico introduzido pelas mesmas sendo para isso necessário efectuar medições de ruído em duas fases distintas, uma anterior e outra posterior à sua construção

Na primeira fase deve ser efectuada a monitorização do ruído na situação de referência, ainda antes da construção da linha, sendo obtido o valor de ruído residual. A segunda fase, já com a linha em exploração deve considerar duas campanhas distintas, uma de Verão e outra de Inverno.

A linha de 150 kV Tunes - Estói servirá de exemplo apresentando os valores desde as medições até aos valores finais de verificação das exigências legais, passando pelos tratamentos de dados, enquanto que nas linhas de 220 kV Fanhões - Trajouce e 400 kV Batalha - Pego apenas serão apresentados os valores finais.

No que diz respeito à linha de transporte de energia Tunes-Estoi, na tabela seguinte estão indicados os valores de ruído residual obtidos aquando da medição na situação de referência, nos estudos ambientais prévios à instalação da linha, para os 14 receptores sensíveis considerados nos três períodos: diurno, entardecer e nocturno.

**Tabela 4.1** – Valores de Ruído Residual medidos durante na situação de referência [dB (A)].

Receptores Sensíveis	L <sub>d</sub> [dB(A)]	L <sub>e</sub> [dB(A)]	L <sub>n</sub> [dB(A)]
1	52,1	52,1	52,1
2	58,3	58,3	58,3
3	53,8	43,5	48,2
4	53,1	53,1	53,1
5	53,6	53,6	53,6
6	43,9	40,3	47
7	39,6	43,5	50,2
8	59,6	59,6	52,4
9	60,2	60,2	52,4
10	60,2	60,2	52,4
11	47,9	38,2	31
12	45,8	48,1	51,7
13	41,9	43,5	40,6
14	45,5	41,6	40,3

As medições de ruído ambiente já com a linha em exploração, efectuadas numa campanha de Verão e noutra campanha de Inverno vieram complementar os valores já existentes de ruído residual, os elementos necessários para o estudo, análise e avaliação do RA nesta linha de 150 kV. Como é usual, cada campanha teve 2 medições em dois dias distintos. Nas duas tabelas seguintes estão os valores do Ruído Ambiente medido em cada medição das duas Campanhas, para os três períodos de referência.

Tabela 4.2 – Valores de Ruído medidos durante a campanha de monitorização de Inverno [dB (A)].

1ª Campanha - Inverno						
Receptores Sensíveis	1 Medição			2 Medição		
	L <sub>d</sub> [dB(A)]	L <sub>e</sub> [dB(A)]	L <sub>n</sub> [dB(A)]	L <sub>d</sub> [dB(A)]	L <sub>e</sub> [dB(A)]	L <sub>n</sub> [dB(A)]
1	56,1	53	48	54,7	48,6	44,5
2	50,2	44,8	46,1	51,5	43,8	41,3
3	49,8	46,2	43,8	52,3	45,4	40,8
4	52,1	51,5	45,1	52,1	47,8	46,5
5	50,8	50,3	42,8	50	43,9	42
6	45,2	37,2	45,7	43,8	42,3	49
7	40,4	35	52,2	41,5	46,2	47,8
8	61,5	57,7	56,2	64,4	55,2	31,9
9	65,1	49,2	52,4	58,2	44,3	38,1
10	58,3	57,8	51,8	65,2	47,7	30,5
11	39,9	44	33,8	47,1	41,9	27,1
12	39,6	39,4	55,1	48,7	51,1	33,4
13	54,8	46,5	43,8	42	46,6	26,2
14	48,6	43,9	43,4	41	39,2	24,9

Tabela 4.3 – Valores de Ruído medidos durante a campanha de monitorização de Verão [Db (A)].

2ª Campanha - Verão						
Receptores Sensíveis	1 Medição			2 Medição		
	L <sub>d</sub> [dB(A)]	L <sub>e</sub> [dB(A)]	L <sub>n</sub> [dB(A)]	L <sub>d</sub> [dB(A)]	L <sub>e</sub> [dB(A)]	L <sub>n</sub> [dB(A)]
1	55,7	56,3	47,9	53	54,7	55
2	61,4	46,5	47,2	44,6	62,1	45,3
3	51,3	43,2	50,8	53,4	46,7	44,8
4	50,7	41,2	39	55,2	46,3	39,7
5	53,5	41,3	31,5	55,4	46,7	39,8
6	39,8	59,5	25,6	35,7	50,6	38,8
7	36,6	51,7	29,8	36,8	40,2	48,8
8	61,5	53,5	61,6	58,7	64,1	58,6
9	55,9	58,5	59,4	58,1	62,5	59,6
10	60,8	58,5	23,6	59,7	63,9	58,6
11	58,3	43,9	46,6	42,2	44,5	55,3
12	39,8	45,5	46,5	36,8	34,6	48,8
13	44,4	41,3	41,6	41,7	42	54,7
14	34,5	39	43,8	40,5	39,1	45,9

Partindo dos valores das medições efectuadas, procedeu-se ao tratamento de dados, sendo que em cada campanha foi efectuada, para cada receptor sensível em cada um dos três períodos de referência, a média logarítmica das duas medições, através da expressão:

$$L_{Aeq} = 10 \cdot \log \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{\frac{L_{Aeq,i}}{10}} \right]$$

em que:

- $n$  é o número de medições;
- $L_{Aeq,i}$  é o valor do nível sonoro correspondente à medição  $i$ .

De seguida é calculado, para cada um dos receptores sensíveis para cada uma das campanhas o índice de avaliação de Ruído: o indicador de Ruído diurno-entardecer-nocturno, já referenciado o presente relatório e descrito no artigo 3º do RGR, que está associado ao incómodo global, através da seguinte expressão:

$$L_{den} = 10 \times \log \frac{1}{24} \left[ 13 \times 10^{L_d/10} + 3 \times 10^{(L_e+5)/10} + 8 \times 10^{(L_n+10)/10} \right]$$

em que:

- $L_d$  corresponde ao  $L_{Aeq}$  período diurno - das 07h00 às 20h00 horas;
- $L_e$  corresponde ao  $L_{Aeq}$  período entardecer - das 20h00 às 23h00 horas;
- $L_n$  corresponde ao  $L_{Aeq}$  período nocturno - das 23h00 às 07h00 horas.

São apresentados, na tabela seguinte, os valores das médias logarítmicas de cada campanha, em cada intervalo de referência, bem como os valores de  $L_{den}$  posteriormente obtidos:

Tabela 4.4 – Valores médios de ruído para cada campanha de medição [dB (A)].

Receptores Sensíveis	1ª Campanha - Inverno				1ª Campanha - Verão			
	L <sub>d</sub> [dB(A)]	L <sub>e</sub> [dB(A)]	L <sub>n</sub> [dB(A)]	L <sub>den</sub> [dB(A)]	L <sub>d</sub> [dB(A)]	L <sub>e</sub> [dB(A)]	L <sub>n</sub> [dB(A)]	L <sub>den</sub> [dB(A)]
1	55,5	51,3	46,6	56,0	54,6	55,6	52,8	59,7
2	50,9	44,3	44,3	52,2	58,5	59,2	46,4	59,3
3	51,2	45,8	42,6	51,7	52,5	45,3	48,8	55,6
4	52,1	50,0	45,9	54,1	53,5	44,5	39,4	52,1
5	50,4	48,2	42,4	51,6	54,6	44,8	37,4	52,7
6	44,6	40,5	47,7	53,3	38,2	57,0	36,0	53,3
7	41,0	43,5	50,5	55,9	36,7	49,0	45,8	52,1
8	63,2	56,6	53,2	63,0	60,3	61,5	60,4	66,8
9	62,9	47,4	49,5	61,4	57,1	60,9	59,5	65,7
10	63,0	55,2	48,8	61,7	60,3	62,0	55,6	63,8
11	44,8	43,1	31,6	44,7	55,4	44,2	52,8	59,2
12	46,2	48,4	52,1	57,7	38,6	42,8	47,8	53,3
13	52,0	46,6	40,9	51,6	43,3	41,7	51,9	57,3
14	46,3	42,2	40,5	48,2	38,5	39,1	45,0	50,5

Segundo o Relatório de Monitorização da linha Tunes-Estoi, a linha não foi audível em quase nenhuma situação de medição e das poucas vezes que foi audível, o ruído era provocado pelas esferas de balizagem e apenas em duas ou três situações, as descrições de “crepitar” que podem corresponder ao ruído provocado pelo EC.

É assim possível, com todos estes dados, efectuar a verificação ou não do cumprimento legal no que diz respeito ao RA da presente linha Tunes-Estoi ou do ruído ambiente envolvente.

#### 4.1.4.1 Verificação do Critério de Incomodidade

Para o cumprimento do critério de incomodidade, descrito no artigo 13º do RGR, a diferença entre o valor do indicador L<sub>Aeq</sub> do ruído ambiente determinado durante a ocorrência do ruído particular da actividade ou actividades em avaliação não deve ultrapassar o valor do indicador L<sub>Aeq</sub> do ruído residual, nos seguintes valores, para os três períodos de referência considerados:

- Não pode exceder 5 dB (A) no período diurno;
- Não pode exceder 4 dB (A) no período entardecer;
- Não pode exceder 3 dB (A) período nocturno.

Nas duas tabelas seguintes, são apresentados as diferenças entre o valor de ruído ambiente e ruído residual e a respectiva indicação de cumprimento ou não do critério de incomodidade. Importa referir que os valores estão em módulo, portanto em situações que o ruído ambiente, já com a linha em exploração, é inferior ao valor de ruído residual, o valor apresentados nas tabelas é de 0.

Tabela 4.5 – Verificação do Critério de Incomodidade para a campanha de Inverno.

Receptores Sensíveis	Período de Referência					
	Diurno		Entardecer		Nocturno	
	Diferença	< 5	Diferença	< 4	Diferença	< 3
1	3	CUMPRE	0	CUMPRE	0,0	CUMPRE
2	0	CUMPRE	0	CUMPRE	0,0	CUMPRE
3	0	CUMPRE	2	CUMPRE	0,0	CUMPRE
4	0	CUMPRE	0	CUMPRE	0,0	CUMPRE
5	0	CUMPRE	0	CUMPRE	0,0	CUMPRE
6	1	CUMPRE	0	CUMPRE	0,7	CUMPRE
7	1	CUMPRE	0	CUMPRE	0,3	CUMPRE
8	4	CUMPRE	0	CUMPRE	0,8	CUMPRE
9	3	CUMPRE	0	CUMPRE	0,0	CUMPRE
10	3	CUMPRE	17	FALSO	0,0	CUMPRE
11	0	CUMPRE	0	CUMPRE	0,6	CUMPRE
12	0	CUMPRE	5	FALSO	0,4	CUMPRE
13	10	FALSO	5	FALSO	0,3	CUMPRE
14	1	CUMPRE	1	CUMPRE	0,2	CUMPRE

Tabela 4.6 – Verificação do Critério de Incomodidade para a campanha de Verão.

Receptores Sensíveis	PERÍODO DE REFERÊNCIA					
	Diurno		Entardecer		Nocturno	
	Diferença	< 5	Diferença	< 4	Diferença	< 3
1	2	CUMPRE	3	CUMPRE	1	CUMPRE
2	0	CUMPRE	1	CUMPRE	0	CUMPRE
3	0	CUMPRE	2	CUMPRE	1	CUMPRE
4	0	CUMPRE	0	CUMPRE	0	CUMPRE
5	1	CUMPRE	0	CUMPRE	0	CUMPRE
6	0	CUMPRE	17	FALSO	0	CUMPRE
7	0	CUMPRE	5	FALSO	0	CUMPRE
8	1	CUMPRE	2	CUMPRE	8	FALSO
9	0	CUMPRE	1	CUMPRE	7	FALSO
10	0	CUMPRE	24	FALSO	3	FALSO
11	7	FALSO	0	CUMPRE	22	FALSO
12	0	CUMPRE	0	CUMPRE	0	CUMPRE
13	1	CUMPRE	0	CUMPRE	11	FALSO
14	0	CUMPRE	0	CUMPRE	5	FALSO

Tendo em consideração que o ruído na envolvente dos receptores sensíveis analisados depende predominantemente do ruído de tráfego rodoviário existente nas vias nas proximidades, as divergências encontradas devem-se essencialmente ao tráfego rodoviário, podendo a linha de MAT Tunes-Estoi ser considerada cumpridora do critério de incomodidade.

#### 4.1.4.2 Verificação do Critério de Exposição Máxima

No critério de Exposição Máxima, segundo o artigo 11.º do RGR, os valores máximos de ruído, aos quais um dado local pode estar sujeito, devem cumprir os limites máximos estabelecidos na seguinte tabela, por indicador e tipo de zona:

**Tabela 4.7** – Valores Máximos Legais de exposição ao ruído.

Tipo de Zona	Descritor $L_n$ [dB(A)]	Descritor $L_{den}$ [dB(A)]
Zona Mista	≤ 55	≤ 65
Zona Sensível	≤ 45	≤ 55

A seguinte tabela expõe os valores máximos obtidos nas medições dos 14 receptores sensíveis, para os indicadores de ruído  $L_{den}$  e  $L_n$ :

**Tabela 4.8** – Valores Máximos obtidos nas medições por campanha [dB (A)].

	1ª Campanha - Inverno		2ª Campanha - Verão	
	$L_n$	$L_{den}$	$L_n$	$L_{den}$
Máximo	53	63	60	67
Mínimo	32	45	36	50

Também para a verificação do critério de exposição máxima o tráfego rodoviário vai condicionar os valores de medição, não permitindo ter percepção do real ruído provocado pela linha. O RA medido ultrapassou em poucos casos o limite máximo legal, ainda que ligeiramente, dado tratar-se de zonas mistas, como nesses casos o ruído da linha não era perceptível pode concluir-se que também que o ruído provocado pela linha cumpre o critério de exposição máxima.

#### 4.1.5 Estudo do Ruído da Linha através do Programa de Cálculo

Foram simulados, através de um programa implementado no Excel, que tem por base a metodologia de cálculo EC e do RA provocado pelas linhas de transmissão de energia, as situações de todos os receptores sensíveis para tentar analisar quantitativamente o ruído provocado pela linha Tunes - Estói.

Para efectuar essa simulação foram extraídas da memória descritiva do projecto de execução e das plantas e perfis, todas as características da linha necessárias ao cálculo do RA provocado pela mesma. Nas tabelas seguintes estão descritas as características mais importantes que permitiram obter os níveis de ruído provocados pela linha Tunes - Estói e os valores de ruído obtidos para cada um dos receptores sensíveis da linha em presente estudo, respectivamente:

Tabela 4.9 – Características da linha Tunes - Estói em todos os receptores sensíveis.

Receptores Sensíveis	Tipo de Apoio	P (Parâmetro)	Vão (m)	Altura Mínima (m)	F	Altura Média (m)
1	CWT3	1909,0	316,76	15,0	6,57	19,4
2	CWT3	1909,0	316,76	15,0	6,57	19,4
3	CWT3	1909,0	316,76	15,0	6,57	19,4
4	CWT3	1909,0	316,76	15,0	6,57	19,4
5	BWS2	1909,0	353,75	20,0	8,19	25,5
6	CWT1	1887,0	768,12	20,0	39,08	46,1
7	CWT2	1887,0	768,12	20,0	39,08	46,1
8	CWT2	1889,0	635,51	14,0	26,73	31,8
9	CWT2	1889,0	635,51	14,0	26,73	31,8
10	CWR3	1889,0	697,12	15,0	32,16	36,4
11	CWR3	1909,0	378,41	15,0	9,38	21,3
12	CWR4	1909,0	378,41	15,0	9,38	21,3
13	CWR5	1909,0	378,41	15,0	9,38	21,3
14	CWR6	1909,0	378,41	15,0	9,38	21,3

Tabela 4.10 – Níveis de Ruído da linha Tunes - Estói em cada receptor sensível.

Receptores Sensíveis	Campo Eléctrico máximo à superfície de um subcondutor [kV/m]	EO [kV/m]	SLA [dB(A)] a 30m (<52dB(A))	Distância ao eixo da linha (m)	L <sub>Aeq,LT</sub> [dB(A)]
1	10,04	15,93	20,89	25	11,92
2	10,04	15,93	20,89	25	11,92
3	10,04	15,93	20,89	30	11,27
4	10,04	15,93	20,89	25	11,92
5	10,06	15,88	20,37	30	10,75
6	10,04	15,76	20,89	70	6,64
7	10,04	15,76	20,89	65	7,12
8	12,51	15,60	29,08	22	20,62
9	12,51	15,60	29,08	18	21,19
10	10,07	15,60	20,93	20	12,58
11	10,07	15,61	20,93	18	12,82
12	10,07	15,61	20,93	16	13,05
13	10,07	15,61	20,93	35	10,66
14	10,07	15,61	20,93	41	9,89

Através da interpretação destes resultados da linha Tunes - Estói, servindo de exemplo de estudo para as linhas de 150 kV, pode-se concluir que estas não apresentam fenómenos relevantes do ponto de vista acústico. O campo eléctrico na superfície dos condutores é sempre inferior ao campo eléctrico crítico. O Nível Máximo de RA a 30 metros, apenas em duas situações pontuais atinge valores perto dos 30 dB(A), sendo também que apenas nessas duas situações o RA de Longa Duração ultrapassa os 20 dB(A).

## 4.2 220kV: Linha Fanhões - Trajouce

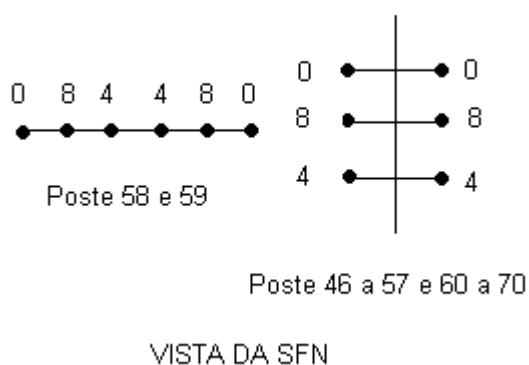


Figura 4.2 - Distribuição das Fases nos Apoios com vista de Fanhões.

### 4.2.1 Condutores

Os cabos condutores utilizados na linha Fanhões - Trajouce são do tipo alumínio-aço, industrializados em Portugal e designados pelos nomes de código de ACSR 595 “Zambeze”. Ao longo de toda a linha são usadas diversas configurações, desde circuito simples com feixe duplo a circuito duplo com feixe simples, sendo este último, aquele que coincidirá com o troço da linha para os quais existem resultados de monitorização sonora, entre os apoios nº 49 e nº75 da linha em questão, com a excepção de uma medição efectuada do apoio nº 75 ao pórtico da subestação de Trajouce.

### 4.2.2 Cadeias de isoladores

A linha MAT Fanhões - Trajouce, contém isoladores de calote e haste, do tipo U70BS e U160 BS<sup>11</sup>, podendo ser considerados, segundo o Projecto de execução desta linha, como isoladores “normais”, estando adaptados às zonas de poluição ligeira, sendo todo o corredor de linhas classificado desta forma.

### 4.2.3 Apoios

Os Apoios existentes na linha Fanhões - Trajouce são da família: “CW”, “DL” e “YDR”.

Os apoios da família “DL” foram usados, devido aos grandes comprimentos de vãos de vento, ângulos muito fortes, cargas verticais elevadas e necessidade de obter maior altura útil em alguns apoios. Apesar de estes apoios estarem preparados para linha dupla com feixe duplo, foi apenas usada linha dupla com um condutor por fase.

<sup>11</sup> Vd. Norma CEI-60 305.

Outros tipos de apoios utilizados foram do tipo “YDR”, projectados para linhas duplas em esteira horizontal com feixe simples. O objectivo da utilização deste apoio foi, tornar a linha com uma menor altura em relação ao solo, de forma a cumprir todas as restrições altimétricas impostas pela servidão aeronáutica da Base Aérea n.º1 de Sintra e expressas no “Estudo de Grandes Condicionantes” [10]. Apesar de esta alteração ser uma desvantagem do ponto de vista de ruído, era fundamental o cumprimento dessas restrições, contudo é de prever, que o ruído esteja mesmo assim dentro dos limites legais.

#### 4.2.4 Monitorização

As monitorizações de ruído residual e ambiental assim como o posterior tratamento de dados, da linha Fanhões-Trajouce a 220 kV, foram efectuados de forma semelhante à linha anterior, Tunes-Estoi, pelo que não é necessário descrever esse processo, sendo apenas analisados os cumprimentos ou não da legislação em vigor, nos pontos seguintes.

##### 4.2.4.1 Verificação do Critério de Incomodidade

Nas tabelas seguintes estão os resultados obtidos, de diferença entre os valores de ruído ambiental e ruído residual da linha Fanhões - Trajouce e respectiva indicação de cumprimento ou não do critério de incomodidade.

Tabela 4.11 – Verificação do Critério de Incomodidade para a campanha de Inverno.

Receptores Sensíveis	Período de Referência					
	Diurno		Entardecer		Nocturno	
	Diferença	< 5	Diferença	< 4	Diferença	< 3
1	2	CUMPRE	0	CUMPRE	0	CUMPRE
2	0	CUMPRE	0	CUMPRE	0	CUMPRE
3	0	CUMPRE	0	CUMPRE	0	CUMPRE
4	0	CUMPRE	0	CUMPRE	0	CUMPRE
5	0	CUMPRE	0	CUMPRE	2	CUMPRE
6	5	CUMPRE	2	CUMPRE	2	CUMPRE
7	5	FALSO	5	FALSO	2	CUMPRE
8	0	CUMPRE	0	CUMPRE	0	CUMPRE
9	0	CUMPRE	0	CUMPRE	0	CUMPRE
10	0	CUMPRE	0	CUMPRE	0	CUMPRE

Tabela 4.12 – Verificação do Critério de Incomodidade para a campanha de Verão.

Receptores Sensíveis	Período de Referência					
	Diurno		Entardecer		Nocturno	
	Diferença	< 5	Diferença	< 4	Diferença	< 3
1	0	CUMPRE	4	CUMPRE	0	CUMPRE
2	0	CUMPRE	0	CUMPRE	0	CUMPRE
3	2	CUMPRE	0	CUMPRE	0	CUMPRE
4	0	CUMPRE	1	CUMPRE	0	CUMPRE
5	0	CUMPRE	0	CUMPRE	0	CUMPRE
6	0	CUMPRE	3	CUMPRE	1	CUMPRE
7	0	FALSO	0	FALSO	1	CUMPRE
8	0	CUMPRE	0	CUMPRE	0	CUMPRE
9	0	CUMPRE	0	CUMPRE	0	CUMPRE
10	0	CUMPRE	0	CUMPRE	0	CUMPRE

Tal como a linha Tunes - Estói, também a maior parte dos receptores sensíveis da presente linha em estudo, Fanhões - Trajouce, possuem um ambiente sonoro largamente afectado pelo tráfego rodoviário. O único receptor sensível que aparentemente não cumpre o critério de incomodidade, que segundo o relatório de monitorização, é uma das várias situações que o tráfego rodoviário é bastante audível, sendo este o responsável pelo excessivo nível de ruído. Segundo o mesmo relatório o ruído proveniente da linha de MAT é classificado como “pouco audível” na maior parte das situações e “audível” num pequeno número de situações [11]. Pode então concluir-se que a linha Fanhões - Trajouce não introduz qualquer complicação para o cumprimento do critério de incomodidade presente no RGR.

#### 4.2.4.2 Verificação do Critério de Exposição Máxima

A seguinte tabela indica os valores máximos obtidos nas medições dos 10 receptores sensíveis, para os indicadores de ruído  $L_{den}$  e  $L_n$ :

Tabela 4.13 – Verificação do cumprimento de Exposição Máxima dB (A).

	1ª Campanha - Inverno		2ª Campanha - Verão	
	$L_n$	$L_{den}$	$L_n$	$L_{den}$
Máximo	55,6	63,4	54,3	62,8
Mínimo	42,3	49,4	38,7	46,4

Os índices de ruído  $L_{den}$  e  $L_n$  ultrapassaram em poucos casos o limite máximo legal, ainda que ligeiramente, para zonas mistas. Como nessas situações a grande percentagem de ruído era provocado pelo tráfego rodoviário, tendo sido considerado que a linha de transmissão de energia era apenas audível, pode-se afirmar que a linha Fanhões - Trajouce, cumpre como fonte sonora, o critério de exposição máxima ao ruído.

#### 4.2.5 Estudo do Ruído da Linha através do Programa de Cálculo

Tal como já havia sido efectuado para o estudo da linha Tunes - Estói, também para linha Fanhões - Trajouce a 220 kV, foi efectuada uma simulação, através de um programa implementado em Excel, do comportamento acústico da linha para cada receptor sensível.

Para efectuar essa simulação foram extraídas da memória descritiva do projecto de execução, das plantas e perfis, as características necessárias para cálculo do RA provocado pela linha de transporte de energia [10]. Na tabela seguinte estão descritas as características mais importantes que permitiram obter os níveis de ruído:

Tabela 4.14 – Características da linha Fanhões - Trajouce em todos os receptores sensíveis

Receptores Sensíveis	Tipo de Apoio	P (Parametro)	Vão (m)	Altura Mínima (m)	F	Altura média (m)
1	CWT3	375,0	56,98	13,0	1,08	13,7
2	CWA3	1488,0	322,18	25,0	8,72	30,8
3	CWT2	1488,0	287,40	28,0	6,94	32,6
4	YDR1	1488,0	203,51	12,0	3,48	14,3
5	YDR1	1488,0	203,51	12,0	3,48	14,3
6	DLA10	1488,0	422,85	40,0	15,02	50,0
7	DLA10	1488,0	422,85	40,0	15,02	50,0
8	DLT4	1488,0	773,14	15,0	50,21	48,5
9	DLT4	1488,0	773,14	15,0	50,21	48,5
10	DLT4	1488,0	773,14	15,0	50,21	48,5

Os valores de ruído obtidos para cada um dos receptores sensíveis da linha em presente estudo estão na seguinte tabela:

Tabela 4.15 – Níveis de Ruído da linha Fanhões - Trajouce em cada receptor sensível

Receptores Sensíveis	Campo Eléctrico máximo à superfície de um subcondutor [kV/m]	E0 [kV/m]	SLA [dB(A)] a 30m (<52dB(A))	Distância ao eixo da linha (m)	L <sub>Aeq,LT</sub> [dB(A)]
1	13,48	15,55	39,29	30	29,66
2	13,48	15,45	37,61	30	27,99
3	13,48	15,51	37,44	35	27,23
4	14,28	15,48	41,74	50	28,81
5	14,28	15,48	41,74	35	28,91
6	13,52	15,52	35,87	35	25,72
7	13,52	15,52	35,87	70	22,05
8	12,99	15,50	33,39	35	23,26
9	12,99	15,50	33,39	80	22,63
10	12,99	15,50	33,39	25	30,40

Pode-se, através da interpretação da tabela anterior, verificar que o campo eléctrico máximo à superfície dos condutores é para todas as situações inferior ao campo eléctrico crítico. O nível máximo de RA (SLA) está numa gama de valores audível e perceptível, mas a uma distância segura de causar incómodo significativo. O ruído ambiente de longa duração, mal atinge os 30 dB(A), sendo este um valor de fácil supressão por qualquer outra fonte sonora.

Pode-se então concluir, que à semelhança das linhas de 150 kV, também as linhas de 220 kV, aqui exemplificadas por aquela que é tida como a mais problemática, não apresentam problemas de nível de ruído, do ponto de vista legal e do ponto de vista quantitativo.

### 4.3 400kV: Linha Batalha - Pego

Na linha de 400kV, será considerado para estudo comparativo entre as metodologias de cálculo do ruído e as monitorizações, a linha de alta tensão que liga a Batalha ao Pego.

Em termos técnicos, segundo o projecto de execução da linha Batalha - Pego, esta é composta por um circuito simples, em esteira horizontal, com dois cabos condutores por fase, estando dimensionada para a classe de tensão de 400 kV, tendo as seguintes características:

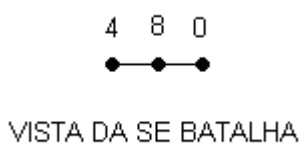


Figura 4.3 - Distribuição das Fases nos Apoios com vista da Batalha.

#### 4.3.1 Condutores

A linha possui dois cabos condutores, por fase, do tipo ACSR/AW 510 “RAIL AW”, sendo este cabo cada vez mais usado, por ter um menor diâmetro e conseqüentemente menor campo eléctrico à superfície dos condutores quando comparado o ACSR 595 “Zambeze”.

O Cabo “RAIL AW” é um cabo muito usado na Espanha, por isso é necessário usar este cabo de forma a permitir as interligações das Linhas Eléctricas de MAT, Nacionais com as Espanholas.

#### 4.3.2 Cadeias de isoladores

Foram usadas nesta linha de 400kV, isoladores de calote e haste, do tipo U160 BS<sup>12</sup>, podendo ser considerados, segundo o Projecto de execução desta linha, como isoladores “normais”, estando adaptados às zonas de poluição ligeira, sendo todo o corredor de linhas classificado desta forma.

#### 4.3.3 Apoios

Os apoios implantados, licenciados pela DGGE, são dos tipos “Q” e “DL” (apenas usados à saída da subestação) da REN, para o escalão de tensão de 400 kV, sendo circuito simples e duplo respectivamente, com feixe duplo de condutores e dois cabos de guarda.

---

<sup>12</sup> Vd. Norma CEI-60305.

Segundo o projecto de execução, da Linha Eléctrica de 400 kV Batalha - Pego, todos os tipos de apoios são constituídos por estruturas metálicas treliçadas convencionais, em aço, compostas por cantoneiras de abas iguais e chapas, ligadas por aparafusamento, com todos os elementos constituintes galvanizados por imersão quente.

#### 4.3.4 Monitorização

As monitorizações de ruído residual e ambiental assim como o posterior tratamento de dados, da linha Batalha - Pego a 400 kV, foram efectuados de forma semelhante às linhas anteriores, Tunes - Estói e Fanhões - Trajouce, pelo que não é necessário descrever esse processo, sendo apenas analisados os cumprimentos ou não da legislação em vigor, nos pontos seguintes. Por questões de espaço são apenas considerados no relatório os 13 primeiros receptores sensíveis.

##### 4.3.4.1 Verificação do Critério de Incomodidade

As seguintes tabelas representam o cumprimento ou não do critério de incomodidade na linha Batalha - Pego:

Tabela 4.16 – Verificação do Critério de Incomodidade para a campanha de Inverno.

Receptores Sensíveis	Período de Referência					
	Diurno		Entardecer		Nocturno	
	Diferença	< 5	Diferença	< 4	Diferença	< 3
1	11	FALSO	1	CUMPRE	11	FALSO
2	0	CUMPRE	0	CUMPRE	9	FALSO
3	1	CUMPRE	0	CUMPRE	1	CUMPRE
4	20	FALSO	6	FALSO	6	FALSO
5	10	FALSO	0	CUMPRE	0	CUMPRE
6	4	CUMPRE	0	CUMPRE	4	FALSO
7	11	FALSO	0	CUMPRE	0	CUMPRE
8	8	FALSO	0	CUMPRE	1	CUMPRE
9	14	FALSO	0	CUMPRE	0	CUMPRE
10	0	CUMPRE	7	FALSO	6	FALSO
11	0	CUMPRE	0	CUMPRE	0	CUMPRE
12	0	CUMPRE	0	CUMPRE	0	CUMPRE
13	0	CUMPRE	1	CUMPRE	4	FALSO
13	1	CUMPRE	0	CUMPRE	7	FALSO

Tabela 4.17 – Verificação do Critério de Incomodidade para a campanha de Verão.

Receptores Sensíveis	Período de Referência					
	Diurno		Entardecer		Nocturno	
	Diferença	< 5	Diferença	< 4	Diferença	< 3
1	2	CUMPRE	0	CUMPRE	9	FALSO
2	0	CUMPRE	0	CUMPRE	10	FALSO
3	0	CUMPRE	0	CUMPRE	8	FALSO
4	12	FALSO	7	FALSO	1	CUMPRE
5	7	FALSO	0	CUMPRE	4	FALSO
6	0	CUMPRE	0	CUMPRE	1	CUMPRE
7	0	CUMPRE	0	CUMPRE	0	CUMPRE
8	0	CUMPRE	0	CUMPRE	0	CUMPRE
9	0	CUMPRE	0	CUMPRE	0	CUMPRE
10	0	CUMPRE	1	CUMPRE	0	CUMPRE
11	3	CUMPRE	3	CUMPRE	0	CUMPRE
12	3	CUMPRE	2	CUMPRE	0	CUMPRE
13	2	CUMPRE	0	CUMPRE	0	CUMPRE
13	1	CUMPRE	0	CUMPRE	7	FALSO

Grande parte dos receptores sensíveis da linha Batalha - Pego, possui, à semelhança das linhas anteriores, o seu ambiente sonoro largamente afectado por tráfego rodoviário existente nas proximidades. Contudo, apresenta já descrições de “ruído da linha bastante audível” segundo o relatório de Monitorização de Ambiente Sonoro em alguns dos receptores sensíveis [12]. O mesmo relatório acrescenta que existem alguns pontos onde se podem vir a configurar situações de incomodidade, mas o grande espaçamento temporal entre a monitorização do ruído residual e o ruído ambiental pode justificar tal incumprimento.

#### 4.3.4.2 Verificação do Critério de Exposição Máxima

A seguinte tabela indica os valores máximos obtidos nas medições dos 13 receptores sensíveis, para os indicadores de ruído  $L_{den}$  e  $L_n$ :

Tabela 4.18 – Verificação do cumprimento de Exposição Máxima

	1ª Campanha - Inverno		2ª Campanha - Verão	
	$L_n$	$L_{den}$	$L_n$	$L_{den}$
Máximo	60	67	59	65
Mínimo	36	47	35	43

Os índices de ruído  $L_{den}$  e  $L_n$  ultrapassaram em poucos casos o limite máximo legal, ainda que ligeiramente, para zonas mistas. Em relação às linhas de 150 e de 220 kV cujas conclusões dos estudos foram apresentadas nos pontos anteriores, a linha Batalha - Pego de

400 kV, apresenta um número superior de receptores sensíveis com valores máximos de ruído ambiente acima dos valores legais, tal facto pode ou não ser justificado pela linha de MAT.

#### 4.3.5 Estudo do Ruído da Linha através do Programa de Cálculo

Tal como já havia sido efectuado para os estudos das linhas Tunes - Estói a 150 kV e Fanhões - Trajouce a 220 kV, também para linha Batalha - Pego a 400 kV foi efectuada uma simulação, através de um programa implementado em Excel, do comportamento acústico da linha para cada receptor sensível.

Para efectuar essa simulação foram extraídas da memória descritiva do projecto de execução, das plantas e perfis, as características necessárias para cálculo do RA provocado pela linha de transporte de energia [13]. Na tabela seguinte estão descritas as características mais importantes que permitiram obter os níveis de ruído:

Tabela 4.19 – Características da linha Batalha - Pego em todos os receptores sensíveis

Receptores Sensíveis	Tipo de Apoio	P (Parametro)	Vão (m)	Altura Mínima (m)	F	Altura média (m)
1	DLS	1707,2	231,00	25,0	3,91	27,6
2	DLS	1707,2	231,00	25,0	3,91	27,6
3	QRA	1707,2	175,00	37,0	2,24	38,5
4	QS	1814,8	309,00	23,0	6,58	27,4
5	QS	1814,8	309,00	21,0	6,58	25,4
6	QT	1855,7	201,02	21,0	2,72	22,8
7	QT	1855,7	329,00	16,0	7,29	20,9
8	QT	1855,7	329,00	16,0	7,29	20,9
9	QT	1855,7	329,00	16,0	7,29	20,9
10	QS	1717,5	417,00	20,0	12,66	28,4
11	QS	1717,5	417,00	20,0	12,66	28,4
12	QS	1717,5	417,00	20,0	12,66	28,4
13	QS	1717,5	417,00	20,0	12,66	28,4

Os valores de ruído obtidos para cada um dos receptores sensíveis da linha em presente estudo estão na seguinte tabela:

Tabela 4.20 – Níveis de Ruído da linha Batalha - Pego em cada receptor sensível

Receptores Sensíveis	Campo Eléctrico máximo à superfície de um subcondutor [kV/m]	E0 [kV/m]	SLA [dB(A)] a 30m (<52dB(A))	Distância ao eixo da linha (m)	L <sub>Aeq,LT</sub> [dB(A)]
1	17,07	15,63	43,93	30	35,70
2	17,07	15,63	43,93	30	35,70
3	16,14	15,59	41,96	35	33,11
4	16,51	15,39	43,99	50	32,93
5	16,51	15,39	43,99	35	35,06
6	16,72	15,37	46,17	35	37,10
7	15,85	15,37	42,69	70	28,64
8	15,85	15,37	42,69	35	33,72
9	15,85	15,37	42,69	80	27,32
10	16,51	15,46	43,78	25	36,23
11	16,51	15,46	43,78	45	33,48
12	16,51	15,46	43,78	45	33,48
13	16,51	15,46	43,78	65	30,75

Através dos resultados obtidos pode-se verificar que o valor de campo eléctrico máximo à superfície dos condutores é, ao contrário das linhas de anterior estudo, superior para todas as situações ao valor de campo eléctrico crítico. Prevê-se portanto a ocorrência do fenómeno EC.

O nível máximo de RA (SLA) está muito próximo dos valores máximos legais para o período nocturno, para receptores pertencentes a zonas sensíveis, sem ultrapassar esses limites máximos. O ruído ambiente de longa duração, mal atinge valores próximos dos 40 dB(A), podendo bem ser perceptível no ambiente sonoro.

Pode-se então concluir, que contrariamente às de 150 kV e 220 kV, as linhas de 400 kV podem produzir valores de RA incomodativos e próximos dos limites legais.

É necessário portanto estudar e criar soluções, do ponto de vista de comportamento acústico, para as linhas de 400 kV, que podem passar pela tentativa de diminuição do EC.



## Capitulo 5 - Identificação de áreas de melhoria e análise de medidas de mitigação (normalizada e de remédio)

### 5.1 Desenvolvimento de soluções de feixe para os 400kV

Como foi observado aquando do comportamento acústico de linhas de MAT, o problema do ruído, normalmente associado ao EC incide e tem proporções relevantes a partir dos 400kV. Sendo este o nível máximo de tensão existente em Portugal, será sobre ele que reincidirão os estudos e as consequentes procuras de melhorias.

Voltando à questão do EC, que é amplamente responsável pelo ruído e incómodo acústico causado pelas linhas de 400 kV, uma possível solução pode ser partir do início, isto é, das causas e das condições que proporcionam a existência de tal fenómeno.

Com base nos documentos consultados de fontes fidedignas, uma possível solução pode ser encontrada, tendo como fundamento frases já referenciadas, mas que devido à sua importância são de novo transcritas e comentadas de seguida:

**“O EC surge na superfície dos condutores de uma linha eléctrica aérea, quando o gradiente potencial aí existente é superior ao valor do gradiente crítico disruptivo do ar (gradiente critico visual), ocorrendo pequenas descargas em volta do condutor, com a forma de uma coroa”, isto é, quando:  $E > E_{CRV}$**

É portanto importante tentar diminuir o campo eléctrico (gradiente de potencial) na superfície dos condutores, de forma a tentar diminuir ao máximo possível a existência de condições propícias à ocorrência do EC.

Consideram-se então para o mesmo raio equivalente ( $r_{eq}$ ), as expressões de Campo Eléctrico Critico e Campo Eléctrico à superfície dos condutores, respectivamente:

$$E_{CRV} = 18,1 \cdot m \cdot \delta \cdot \left[ 1 + \left( \frac{0,54187}{\sqrt{r_{eq} \cdot \delta}} \right) \right] \quad (5.1)$$

$$E_r = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot r_{eq} \cdot \epsilon} \quad (5.2)$$

Através da análise das expressões, pode-se então constatar que “O raio equivalente ( $r_{eq}$ ) para condutores múltiplos é substancialmente maior do que o raio dos condutores simples normalmente usados, diminuindo assim o valor do gradiente crítico visual para esse tipo de condutores. No entanto, o seu gradiente de potencial, para uma mesma tensão aplicada, é consideravelmente menor, melhorando o desempenho das linhas”.

Por isso, com o aumento do raio equivalente, o EC terá menor incidência, que provocará também uma diminuição do RA provocado por este fenómeno. Por sua vez o raio equivalente de um condutor pode ser aumentado, aumentando o número de cabos por fase.

A utilização de feixes de condutores múltiplos é assim interessante sobretudo para os níveis de tensão mais elevados, tanto na perspectiva de redução de perdas como de ruído de origem no efeito coroa.

### 5.1.1 Adaptação do Programa de Cálculo

Em Portugal a RNT, possui nos 400 kV o máximo de 2 cabos por fase (feixe duplo), existindo um programa que permite o cálculo do ruído em EXCEL e VBA, utilizando a metodologia de cálculo já referenciada, estando também este limitado ao cálculo máximo de dois cabos por fase.

Devido à necessidade de explorar e estudar o comportamento a nível de campo eléctrico e RA, para linhas com três cabos por fase (feixe triplo), foi, numa fase deste estudo, desenvolvido o programa de forma a estudar essa e outras situações.

De entre várias modificações efectuadas no programa, destacam-se:

- **Geometria dos Cabos.** Alteração da Geometria dos cabos, passando a ser possível a utilização de mais um cabo por cada fase, para isso é considerada a seguinte topologia:

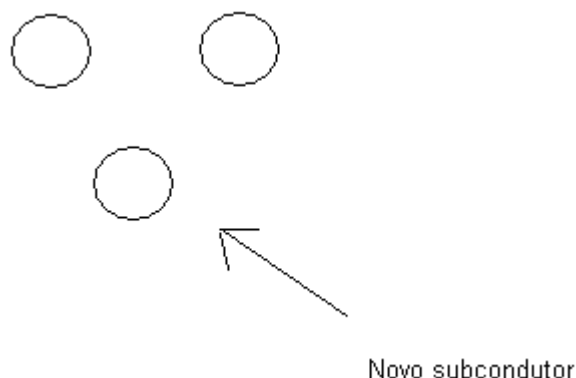


Figura 5.1 - Imagem da distribuição dos três cabos por fase em feixe triplo.

Os três cabos encontram-se à mesma distância, formando um triângulo equilátero invertido. Esta topologia foi adoptada tendo em consideração a estrutura de separadores existentes;

- **Distância entre cabos no feixe triplo.** A alteração anterior e a importância da distância entre os cabos do feixe no que diz respeito ao raio equivalente, dado de extrema importância neste estudo, foi criada uma Macro e alterada a construção de toda a geometria de cabos de forma a permitir alterar a alteração em qualquer momento da distância entre os cabos do feixe. Esta alteração é aplicada para dois ou três cabos por fase;
- **Tipos de Apoios (Postes).** Alteração, através da introdução da criação de uma Macro que permitisse a introdução de tipos de apoios, devidamente acompanhada com os dados de todos os tipos de apoios utilizados em linhas de 220 e 400 kV.

O tipo de apoio passa a ser definido especificamente em vez de ser generalizado por “família” pertencente. Por exemplo em vez de tipo de apoio da “família DL”, passa a conter todos os tipos de postes inseridos na mesma família, como DLA, DLS, DLT, etc. Esta alteração foi efectuada para tentar tornar cada situação de simulação, o mais próximo possível de situações reais;

- **Altura Mínima.** Mais uma vez, com intuito de tornar mais próximas as situações de simulação de estudo do ruído com situações reais, foi criada a opção de poder alterar a altura a que a linha se encontra do solo, isto é, permite a alteração da altura dos apoios. Esta alteração foi efectuada com auxílio de uma Macro e o facto de estabelecer a altura mínima a que os cabos condutores estão do solo, torna desnecessário definir se trata de amarração ou suspensão;
- **Escolha dos tipos de Cabo Condutor e do Cabo de Guarda.** Foram criadas também duas Macros que permitem a escolha dos cabos condutores e dos cabos de guarda;

Nas figuras seguintes são apresentadas as interfaces de introdução de dados, da folha de cálculo que permite o cálculo do RA produzido por linhas MAT, para a situação inicial e para a situação final.

## EMISSÃO DE RADIAÇÃO ELECTROMAGNÉTICA

### Cálculo do Campo Eléctrico de Linhas MAT

**DADOS**

Apoios :	DL
Cond. Geminados:	SIM
Nº de ternos:	2

C. Condutor:	ZEBRA
Diâmetro CC [m] =	2,862E-02

C. Guarda:	DORKING
Diâmetro CG [m] =	1,60E-02

Uc=	400,00 [kV]
Us=	230,94 [kV]

**Silhueta Utilizada**  
número 1

**Tensão**

Correcção: -31,00

**GEOMETRIA DOS CABOS [m]**

	Fase	X	Y	Ynom.
a	0	-8,70	14,00	45,00
b	0	-8,30	14,00	45,00
c	4	-8,20	22,25	53,25
d	4	-7,80	22,25	53,25
e	8	-8,20	30,50	61,50
f	8	-7,80	30,50	61,50
g	8	8,30	14,00	45,00
h	8	8,70	14,00	45,00
i	4	7,80	22,25	53,25
j	4	8,20	22,25	53,25
k	0	7,80	30,50	61,50
l	0	8,20	30,50	61,50
u	-1	-6,00	33,55	67,60
v	-1	6,00	33,55	67,60

Figura 5.2 - Introdução de dados da Versão Inicial do Programa

## EMISSÃO DE RADIAÇÃO ELECTROMAGNÉTICA

### Cálculo do Campo Eléctrico de Linhas MAT

**DADOS**

C. Condutor:	RAIL A4	<b>Condutor</b>
Diâmetro CC [m] =	2,96E-02	
C. Guarda:	DORKING	<b>C.G.</b>
Diâmetro CG [m] =	1,60E-02	

Uc=	400,00 [kV]
Us=	230,94 [kV]

**Silhueta Utilizada**  
2

**Tipo de Poste**  
GS

**Distância Entre Subcondutores**  
0,4 (m)  
Distância (a--b)

**Altura mínima**  
14 (m)  
Altura (a--solo)

**Nº Subcond/Fase**  
3

Y nom  
40,6 (m)

Distância (c,l - eixo)  
10 (m)

Distância (f,o - eixo)  
0 (m)

Distância (j,r - eixo)  
10 (m)

Distância (CG - eixo)  
6,85 (m)

Altura(a,b---c)  
0,35 (m)

Altura(a---d)  
0 (m)

Altura(g---CG)  
3,95 (m)

Correcção  
-26,6 (m)

**GEOMETRIA DOS CABOS [m]**

	Fase	X	Y	Ynom.
a:	0	-10,20	14,00	40,60
b:	0	-9,80	14,00	40,60
c:	0	-10,00	13,65	40,25
d:	4	-0,20	14,00	40,60
e:	4	0,20	14,00	40,60
f:	4	0,00	13,65	40,25
g:	8	9,80	14,00	40,60
h:	8	10,20	14,00	40,60
i:	8	10,00	13,65	40,25
j:	0	0,00	0,00	0,00
k:	0	0,00	0,00	0,00
l:	0	0,00	0,00	0,00
m:	0	0,00	0,00	0,00
n:	0	0,00	0,00	0,00
o:	0	0,00	0,00	0,00
p:	0	0,00	0,00	0,00
q:	0	0,00	0,00	0,00
r:	0	0,00	0,00	0,00
u:	-1	-6,85	17,95	44,55
v:	-1	6,85	17,95	44,55

Figura 5.3 - Introdução de dados da Versão Final do Programa

### 5.1.2 Soluções alternativas e análise de desempenho

Nesta fase do trabalho, para melhor compreensão e análise de uma nova configuração das linhas de 400 kV, possuindo três cabos por fase, foi estudada a importância de algumas características das linhas. Foi tido sempre como objectivo a comparação entre a configuração da linha com dois e três cabos por fase.

#### 5.1.2.1 Escolha do cabo condutor

Para analisar a importância da escolha do cabo condutor e a sua resposta quantitativa em termos de ruído, comparando o comportamento da linha tendo dois ou três cabos por fase, foi considerada um troço de linha simples com as seguintes características:

- apoio do tipo QS (um circuito);
- cabo de guarda Dorking;
- altura mínima de 14m;
- altitude de 300m;
- 0,4m de distância entre cabos no feixe.

Nas seguintes tabelas, são considerados dois e três cabos por fase, respectivamente, sendo apresentados alguns dados que permitam analisar a diferença de comportamento entre estas duas configurações de linha de transporte de energia, bem como a importância da escolha do cabo permitindo e o seu comportamento sob o ponto de vista acústico.

Tabela 5.1 – Características para a linha com 2 cabos por fase.

Condutor	Diâmetro (mm)	Campo Eléctrico [kV/cm]			Perdas médias Anuais por Efeito Coroa (Kw/km)	Ruído Acústico de Pico (EPA,USA) 30m dB(A)	Ruído Acústico de Longa Duração (30m) dB(A)
		E(h=0m) com x=10m	A superfície de um subcondutor	E0 (E_crit)			
RAIL AW	29,61	3,43	16,52	15,48	8,91	45,42	37,20
ZEBRA	28,62	3,42	17,03	15,57	9,99	46,20	37,97
ZAMBEZE	31,80	3,45	15,50	15,32	7,00	43,80	35,58
ASTER 570	31,05	3,45	15,84	15,37	7,51	44,34	36,12
ASTER1144	44,00	3,57	11,61	14,62	3,48	36,46	28,24
BEAR	23,45	3,35	20,36	16,08	24,34	50,75	42,53

Tabela 5.2 – Características para linha com três cabos por fase.

Condutor	Diâmetro (mm)	Campo Eléctrico [kV/cm]			Perdas médias Anuais por Efeito Coroa (Kw/km)	Ruído Acústico de Pico (EPA,USA) 30m dB(A)	Ruído Acústico de Longa Duração (30m) dB(A)
		E(h=0m) com x=10m	À superfície de um subcondutor	E0 (E_crit)			
RAIL AW	29,61	3,90	12,48	15,48	5,85	31,61	23,39
ZEBRA	28,62	3,89	12,88	15,57	6,02	32,38	24,16
ZAMBEZE	31,80	3,92	11,69	15,32	5,49	30,02	21,80
ASTER 570	31,05	3,92	11,95	15,37	5,61	30,55	22,33
ASTER1144	44,00	4,02	8,68	14,62	0,00	23,01	14,79
BEAR	23,45	3,84	15,47	16,08	9,15	36,90	28,68

Como era de esperar, a escolha dos cabos condutores é um aspecto primordial no dimensionamento de uma linha MAT, quando se pretende obter uma boa resposta do ponto de vista acústico, isto é, quando espera que este tenha o melhor nível possível. Quanto maior é o diâmetro de um cabo condutor, menor será o seu campo eléctrico crítico e menor será também o seu campo eléctrico à superfície dos condutores, sendo que este último, sofrerá uma redução maior, o que vem creditar as fundamentações teóricas. O facto de a diminuição do campo eléctrico máximo à superfície dos condutores ser maior que a diminuição do campo crítico, contribui também para a redução do efeito coroa, do RA de pico e ainda do RA de longa duração. Os campos eléctricos são mais intensos quando são usados cabos condutores com um maior diâmetro.

Os cabos condutores com menores diâmetros, principalmente o Bear, devido ao seu menor diâmetro têm comportamentos menos satisfatórios (com maior nível de ruído em dB(A), enquanto que num extremo oposto, o cabo Aster 1444, devido ao seu “grande” diâmetro obtém os resultados mais satisfatórios do ponto de vista sonoro. Contudo o cabo condutor Aster 1444 apresenta uma grande desvantagem, que é o elevado valor do seu peso, não sendo comumente usado em linhas MAT, apenas em casos especiais.

Os cabos Rail AW, Zebra, Zambeze e Aster 570, podem ser considerados cabos mais equilibrados, pois estão mais próximos de conciliar o diâmetro com o peso, apresentando resultados de EC e acústicos muito próximos, ainda que uns melhores que outros.

Quanto à comparação do comportamento da linha, usando feixe duplo e feixe triplo, obtiveram-se, como era de esperar, valores inferiores de ruído quando se tratava de uma linha com três cabos por fase.

Com o aumento do número de cabos por fase, o campo eléctrico à superfície dos condutores diminui drasticamente, diminuindo por sua vez as perdas por EC, o RA de pico e ainda o RA de longa duração. O RA de longa duração diminui cerca de 14 dB(A).

### 5.1.2.2 Alteamento dos apoios

Outra característica que foi utilizada para comparar o comportamento de uma linha de MAT, no que diz respeito à utilização de feixe triplo e feixe duplo, foi aumentar a altura (alteamento) dos apoios.

Para este estudo comparativo, foram consideradas as seguintes características da linha:

- tipo de poste QS;
- condutor RAIL AW<sup>13</sup>;
- cabo de guarda Dorking;
- distancia entre cabos no feixe de 0,4m;
- altitude de 300m.

Os resultados do estudo da importância do alteamento dos apoios, comparando as linhas que possuem três e dois condutores por fase, estão nas seguintes tabela:

**Tabela 5.3 – Características para a linha com 2 feixe duplo.**

Altura mínima (m)	Campo Eléctrico [kV/cm]			Ruído Acústico de Pico (EPA, USA) 30m dB(A)	Ruído Acústico de Longa Duração (30m) dB(A)
	E(h=0m) com x=10m	À superfície de um subcondutor	E0 (E_crit)		
14	3,90	16,52	15,48	8,91	45,42
16	2,69	16,51	15,48	8,76	45,13
20	1,74	16,50	15,48	8,53	44,65
25	1,08	16,50	15,48	8,35	44,12
30	0,70	16,51	15,48	8,20	43,63

**Tabela 5.4 – Características para linha com feixe triplo.**

Altura mínima (m)	Campo Eléctrico [kV/cm]			Ruído Acústico de Pico (EPA, USA) 30m dB(A)	Ruído Acústico de Longa Duração (30m) dB(A)
	E(h=0m) com x=10m	À superfície de um subcondutor	E0 (E_crit)		
14	1,98	12,48	15,48	5,85	31,61
16	3,06	12,47	15,48	5,83	31,34
20	1,97	12,47	15,48	5,79	30,90
25	1,22	12,47	15,48	5,75	30,42
30	0,79	12,48	15,48	5,71	29,97

<sup>13</sup> O cabo RAIL AW foi o cabo condutor utilizado ao longo deste estudo devido ao facto de ser utilizado no caso real de estudo da linha Batalha - Pego.

O alteamento dos apoios das linhas de MAT influencia, como era de esperar, os fenómenos acústicos das mesmas. Essa influência é sentida de igual modo nas linhas de feixes duplo e triplo. Foram estudados os níveis acústicos para cinco alturas diferentes. Um alteamento de 16 metros pode provocar diminuições de ruído acústico de longa duração de cerca de 2 dB(A).

### 5.1.2.3 Distância entre cabos no feixe

Também a distância entre os cabos no feixe é um factor que pode condicionar o ruído, pois uma alteração pode alterar a incidência do campo eléctrico nas imediações nos condutores, alterando também o seu valor.

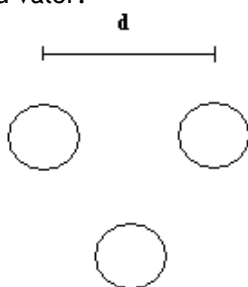


Figura 5.4 - Distribuição dos 3 cabos por fase.

Neste estudo comparativo foram consideradas as seguintes características de linha:

- tipo de poste QS;
- altura de 14 m;
- condutor RAIL AW;
- cabo de guarda Dorking;
- altitude de 300m;

Os resultados do estudo da importância da distância entre cabos no feixe, comparando as linhas que possuem três e dois condutores por fase, estão nas seguintes tabela:

Tabela 5.5 – Características para a linha com dois cabos por fase.

Distância entre cabos no feixe (m)	Campo Eléctrico [kV/cm]			Ruído Acústico de Pico (EPA, USA) 30m dB(A)	Ruído Acústico de Longa Duração (30m) dB(A)
	E(h=0m) com x=10m	À superfície de um subcondutor	E0 (E_crit)		
0,5	3,51	16,93	15,48	46,74	38,52
0,4	3,55	16,52	15,48	45,42	37,20
0,35	3,39	16,29	15,48	44,65	36,43
0,3	3,34	16,03	15,48	43,78	35,56
0,25	3,28	15,73	15,48	42,77	34,55
0,2	3,33	15,38	15,48	41,57	33,35

Tabela 5.6 – Características para linha com três cabos por fase.

Distância entre cabos no feixe (m)	Campo Eléctrico [kV/cm]			Ruído Acústico de Pico (EPA,USA) 30m dB(A)	Ruído Acústico de Longa Duração (30m) dB(A)
	E(h=0m) com x=10m	À superfície de um subcondutor	E0 (E_crit)		
0,5	4,05	12,95	15,48	33,51	25,29
0,4	4,04	12,48	15,48	31,61	23,39
0,35	3,82	12,22	15,48	30,52	22,30
0,3	3,73	11,93	15,48	29,29	21,07
0,25	3,63	11,60	15,48	27,88	19,66
0,2	0,2	3,64	11,22	26,24	18,02

Como já foi referido, a distância entre os cabos no feixe é outro factor, aqui estudado, que pode condicionar o nível acústico de uma linha de MAT. Foram consideradas quatro distâncias diferentes, ainda que algumas possam ser complicadas do ponto de vista técnico, mas com objectivo de perceber até que ponto este factor pode influenciar.

Uma diminuição de 0,25m na distância entre cabos no feixe, provoca uma diminuição de 5 dB(A) de nível de ruído de longa duração e quase 6 dB(A) no nível acústico de ruído máximo.

O valor do campo eléctrico obtido ao nível do solo campo e o campo eléctrico à superfície dos condutores, diminui também, com a diminuição da distância entre cabos no feixe, como era de esperar.

#### 5.1.2.4 Apoios de Circuito Duplo

A configuração de duplo circuito ainda crescentemente utilizada porque permite uma maior capacidade de transporte de energia, sem um aumento do número de traçados. Pela sua importância é também estudado, neste ponto, o comportamento sonoro desse tipo de linhas.

As linhas estudadas neste ponto, possuem as seguintes características:

- tipo de apoio DLS;
- cabo condutor RAIL AW;
- cabo de guarda DORKING;
- distância entre os cabos no feixe de 0,4m;
- altitude igual a 300m.

Nas seguintes tabelas podem observar-se as características das linhas para feixe duplo e feixe triplo.

Tabela 5.7 – Características para a linha com feixe duplo.

Altura mínima (m)	Campo Eléctrico [kV/cm]			Ruído Acústico de Pico (EPA,USA) 30m dB(A)	Ruído Acústico de Longa Duração (30m) dB(A)
	E(h=0m) com x=10m	À superfície de um subcondutor	E0 (E_crit)		
14	2,85	17,18	15,48	50,65	42,43
16	2,24	17,19	15,48	50,41	42,19
20	1,45	17,18	15,48	49,96	41,74
25	0,92	17,18	15,48	50,65	42,43
30	0,63	17,18	15,48	48,87	40,64

Tabela 5.8 – Características para linha com feixe triplo.

Altura mínima (m)	Campo Eléctrico [kV/cm]			Ruído Acústico de Pico (EPA,USA) 30m dB(A)	Ruído Acústico de Longa Duração (30m) dB(A)
	E(h=0m) com x=10m	À superfície de um subcondutor	E0 (E_crit)		
14	3,29	13,07	15,48	38,31	30,09
16	2,58	13,07	15,48	38,16	29,93
20	1,67	13,07	15,48	37,83	29,61
25	1,06	13,07	15,48	37,40	29,18
30	0,74	13,06	15,48	36,96	28,74

Os valores de campo eléctrico no solo, aquando da utilização deste tipo de linha, serão menores que quando se utiliza linha simples, que é justificado pela disposição das fases em oposição. De forma a contrariar os efeitos de campo eléctrico, as fases são colocadas de forma oposta, nos dois ternos, como se pode observar na seguinte figura:

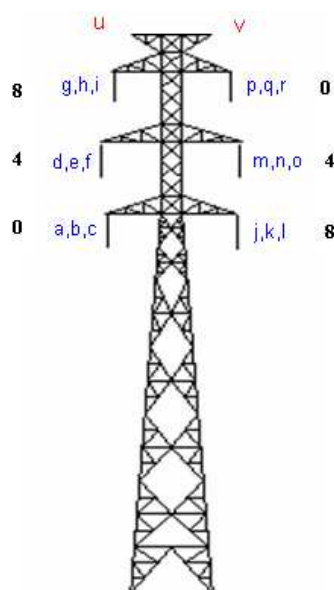


Figura 5.5 - Apoio de linha com duplo terno (2 circuitos) e 'phase shifting'.

No que diz respeito ao comportamento sonoro das linhas de MAT com duplo circuito, estas apresentam valores mais elevados de ruído, devendo-se como sempre ao EC, sendo também aqui o campo eléctrico à superfície dos condutores mais elevado que nas linhas simples. A diferença entre níveis de ruído aquando utilização de feixe duplo e feixe triplo é menor nos circuitos duplos que nos circuitos simples.

### 5.1.2.5 Tensão Nominal e Tensão Máxima de funcionamento

Por vezes as linhas de MAT funcionam a tensões superiores aos valores nominais, podendo atingir no caso das linhas de 400 kV o valor de 420 kV. É, portanto, tido em atenção esse factor neste estudo comparativo do ruído para linhas de feixe duplo e de feixe triplo. Pode também ser comparado para cada um dos casos, o comportamento acústico da linha para o mesmo tipo de feixe, o seu comportamento sonoro aquando do funcionamento em tensão normal e em tensão máxima.

Para este ponto, são consideradas as seguintes características da linha:

- tipo de poste QS;
- condutor RAIL AW;
- cabo de guarda Dorking;
- distância entre os cabos no feixe de 0,4m;
- altitude de 300m.

As seguintes tabelas representam os valores obtidos para as características da linha para as tensões de funcionamento nominais e máximas.

**Tabela 5.9 – Resultados com a linha em funcionamento a 400 kV.**

Nº Subcondutores /Fase	Altura Mínima (m)	Campo Eléctrico [kV/cm]			Ruído Acústico de Pico (EPA,USA) 30m dB(A)	Ruído Acústico de Longa Duração (30m) dB(A)
		E(h=0m) com x=10m	À superfície de um subcondutor	E0 (E_crit)		
2	14	3,43	16,52	15,48	45,42	37,20
2	16	2,69	16,51	15,48	45,13	36,91
2	20	1,74	16,50	15,48	44,65	36,43
2	25	1,08	16,50	15,48	44,12	35,90
2	30	0,70	16,51	15,48	43,63	35,41
3	16	3,06	12,47	15,48	31,34	23,12
3	20	1,97	12,47	15,48	30,90	22,67
3	14	3,90	12,48	15,48	31,61	23,39
3	25	1,22	12,47	15,48	30,42	22,20
3	30	0,79	12,48	15,48	29,97	21,75

Tabela 5.10 – Resultados para a linha em funcionamento a 420 kV.

Nº Subdutores /Fase	Altura Mínima (m)	Campo Eléctrico [kV/cm]			Ruído Acústico de Pico (EPA, USA) 30m dB(A)	Ruído Acústico de Longa Duração (30m) dB(A)
		E(h=0m) com x=10m	À superfície de um subcondutor	E0 (E_crit)		
2	14	3,60	17,35	15,48	48,05	39,83
2	16	2,83	17,33	15,48	47,76	39,54
2	20	1,83	17,33	15,48	47,28	39,06
2	25	1,13	17,33	15,48	46,75	38,53
2	30	0,74	17,34	15,48	46,26	38,04
3	14	4,10	13,11	15,48	34,13	25,91
3	16	3,21	13,10	15,48	33,85	25,63
3	20	2,07	13,09	15,48	33,40	25,18
3	25	1,28	13,09	15,48	32,92	24,70
3	30	0,83	13,10	15,48	32,46	24,24

Da análise das duas últimas tabelas, ressalta como resultado importante a diferença de quase 3 dB(A) de nível de ruído de longa duração, quando comparado o funcionamento da linhas em tensão nominal e à tensão máxima.

### 5.1.3 Análise das alternativas como soluções normalizadas e de remédio (Análise Técnica, Económica e Ambiental)

#### 5.1.3.1 Análise Ambiental

Para a análise ambiental foi considerada, a título de exemplo, a linha Batalha - Pego.

Na seguinte tabela estão os valores obtidos, através do programa de cálculo, o ruído ambiente de longa duração para a linha com feixe triplo e com feixe duplo e a diferença entre essas duas situações.

**Tabela 5.11** – Comparação de nível de ruído ambiente de longa duração para a linha com feixe duplo e com feixe triplo.

Receptores Sensíveis	$L_{Aeq,LT}$ [dB(A)]	$L_{Aeq,LT}$ [dB(A)]	Diferença [dB(A)]
	Da linha Actual	Da linha com 3 cabos por fase	
1	35,70	22,94	12,76
2	35,70	22,94	12,76
3	33,11	19,63	13,48
4	32,93	20,26	12,67
5	35,06	21,62	13,44
6	37,10	19,70	17,4
7	28,64	16,73	11,91
8	33,72	19,98	13,74
9	27,32	15,90	11,42
10	36,23	22,29	13,94
11	33,48	20,58	12,9
12	33,48	20,58	12,9
13	30,75	18,86	11,89

A diferença de valores entre as duas situações é considerável, ultrapassando em todos os casos os 10 dB (A). O seguinte gráfico ilustra a diferença que pode ser obtida entre as duas situações.

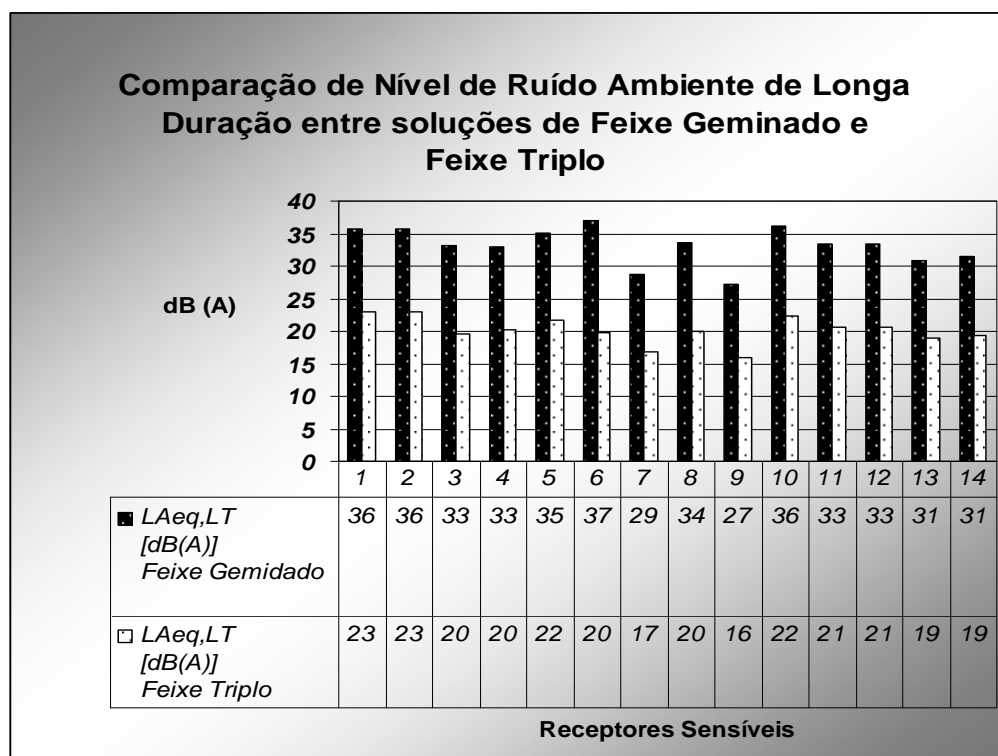


Figura 5.6 - Comparação de nível de Ruído Ambiente de Longa Duração entre soluções de Feixe Duplo e Feixe Triplo.

Do ponto de vista ambiental, a solução de feixe triplo é francamente positiva, como se pode observar no gráfico com diminuições significativas de nível acústico.

### 5.1.3.2 Análise Técnica

Neste estudo técnico são indicados as principais alterações técnicas a efectuar, aquando da mudança de uma linha de feixe duplo para feixe triplo. A alteração e adaptação dos apoios ao feixe triplo, podia ser considerada uma alteração técnica, mas dada a sua complexidade foi englobada no estudo mecânico. As principais alterações necessárias efectuar, aquando da mudança de uma linha MAT de feixe duplo para feixe triplo são:

- Para a suspensão: Cadeia de Isoladores de suspensão dupla (em vez de simples);
- Para a amarração: Cadeia de isoladores de amarração tripla (em vez de dupla);
- Separadores de feixe triplo em forma de triângulo;
- Aumento da quantidade de cabo condutor, passando de 6 cabos condutores (feixe duplo) para 9 condutores (feixe triplo);
- As charneiras que, para linha geminada poderiam ser do tipo CF 150 ou CF 300 (designação do acessório nas especificações da REN - CF - caixa de fixação da cadeia ao apoio respectivamente com carga de rotura de 150 e 300 kN) que no caso da cadeia tripla terá de ser obrigatoriamente de 300 kN portanto CF 300;
- O número de pinças de amarração e suspensão deve aumentar em número proporcional ao aumento dos cabos condutores.

### 5.1.3.3 Estudo Mecânico dos Apoios (Postes)

De forma a tornar possível a alteração de uma linha de MAT, é necessário fazer um estudo mecânico dos apoios, pois estes estarão sujeitos a um esforço mecânico bem mais elevado. No caso exemplo, a linha Batalha-Pego tendo um circuito, passará de 6 condutores a 9 condutores (de feixe duplo para feixe triplo), podendo este aumento ser significativo principalmente nos apoios de amarração. Foi considerada a tracção máxima de 4000 daN para o cabo condutor e 2100 daN para o cabo de guarda. O cabo condutor considerado neste estudo é o “RAIL AW”, dado ser o cabo condutor utilizado na linha tida como exemplo, Batalha - Pego.

Na tabela seguinte estão descritas as quantidades de apoio existentes por cada tipo, utilizados na linha Batalha - Pego:

Tabela 5.12 – Número de apoios por cada tipo da actual linha Batalha - Pego.

Tipo de Apoio	Quantidade
QRS	71
QRA	14
QS	41
QT	15
QA	12
DLT	3
DLA	1
DLS	1
Total	158

Para testar a resistência mecânica dos apoios para a situação de linha de feixe triplo (LFT), foram testadas as situações normalizadas dos apoios para os 400 kV, para todos os apoios do tipo Q, para os apoios do tipo DL, visto terem sido usados por situações pontuais, não foram testados. Na tabela seguinte encontram-se os tipos de apoios normalizados para linhas de 400 kV e licenciados pela Direcção Geral Energia e Geologia (DGEG), mas que apenas estão actualmente preparados para feixe duplo:

Tabela 5.13 – Tipos de Apoios Normalizados

Tipo de Apoio	Vão de Vento (m)	Vão Gravítico (m)	Ângulo (Grados)	Ângulo (Graus)
QS	400	600	0	0
QRS	560	1000	0	0
QRA	400	580	12,6	11,34
QA	400	580	33	29,7
QT	400	600	50	45

As silhuetas destes tipos de apoios seguem em anexo. Estes tipos de apoios são constituídos por estruturas metálicas treliçadas convencionais, em aço, formadas por

cantoneiras de abas iguais e chapas, ligadas por aparafusamento, com todos os elementos constituintes galvanizados por imersão a quente [13].

Para este estudo mecânico foram utilizadas as ferramentas informáticas PLSCAD e TOWER, muito úteis para o cálculo mecânico, possuindo ainda a vantagem de poderem trabalhar em simultâneo com importações e exportações de dados. No PLSCAD foram efectuadas as representações esquemáticas de solicitações de carga com o feixe triplo, foram criadas as situações de cálculo de vão gravítico e vão de vento, que permitiriam depois obter a resposta individual dos postes a essas situações.

O programa TOWER, além de permitir o desenho mecânico inicial dos apoios normalizados, possibilita também a resposta mecânica dos mesmos quando sujeitos a forças mecânicas através de um mapa de cores ao longo da estrutura do poste que indica a percentagem de esforço a que está sujeito, não devendo ser superior a 100%. Caso a percentagem de esforço seja superior a 100% é necessário fazer uma reformulação do poste, que pode ir de pequenos ajustes a uma necessidade de alterar toda a estrutura do poste. Na figura seguinte está representado a título de exemplo, um apoio solicitado a um dado esforço mecânico, com o respectivo mapa de cores e escala de esforço.

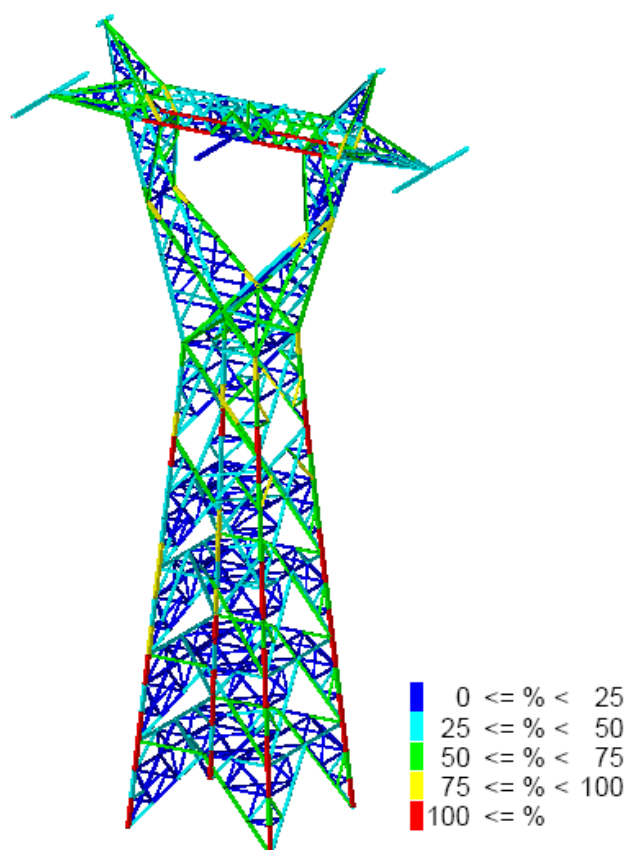


Figura 5.7 - Exemplo de um apoio e seu “mapa de esforços”.

As cores “quentes” representam os pontos da estrutura que estão sujeitos a um maior esforço mecânico, sendo que o vermelho indica situações desaconselháveis, ultrapassando o esforço de 100%, valor máximo aceitável de esforço.

Importa referir que este estudo foi efectuado, apesar de ter sido efectuado com o máximo rigor possível, apenas deve ser considerado um estudo aproximado.

Foram então considerados cálculos mecânicos para duas soluções, uma normalizada e outra de remédio, em que a primeira passa por tornar uma linha de raiz e na sua totalidade com a configuração de feixe triplo e a segunda corresponde a uma solução para um troço da linha que necessite um tratamento especial do ponto de vista de ruído, por exemplo níveis elevados de ruído, um grande número de receptores sensíveis, ou por qualquer outra razão pontual.

## A Solução Normalizada

Na realização deste estudo mecânico, começaram por se testar os apoios normalizados existentes, para as situações de cálculo, para a situação em que a linha possuía já três cabos por fase.

Foram então realizados testes a todos os tipos de apoios Q:

- QS

O apoio QS quando testado para situação de feixe triplo apresentou um excesso de carga de 13% (estava sujeito a um esforço era de 113%), para a situação de vento máximo. Foi necessário proceder a tentativas de alteração do apoio de forma a adaptá-lo mecanicamente para a situação de 3 cabos por fase.

As alterações efectuadas que permitiram diminuir o esforço mecânico para valores que garantissem a estabilidade do poste, foram apenas substituições da classe do aço dos parafusos de 5,6 para 8,8 nas barras que se encontravam em esforço excessivo.

Na figura seguinte estão representados os apoios, QS\_Limite e QS\_Modificado, em que o primeiro corresponde ao apoio QS normalizado para os 400 kV de feixe duplo, quando sujeito a feixe triplo, enquanto que o segundo já ao apoio QS preparado mecanicamente para o feixe triplo.

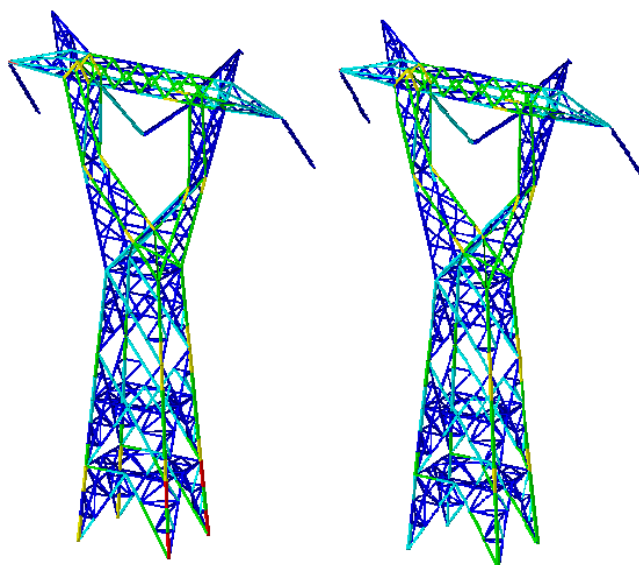


Figura 5.8 -QS\_Limite (lado esquerdo) e QS\_Modificado (lado direito).

- QRS

O apoio QRS apresentou, para feixe triplo, um excesso de carga de 26% para a situação de vento máximo, era portanto necessário proceder a alterações neste apoio.

As alterações efectuadas neste apoio foram:

- Mudança da classe do aço dos parafusos de 5,6 para 8,6;
- Aumento da espessura das barras;
- Aumento da largura das barras;

Na figura seguinte estão representados os apoios, QRS\_Limite e QRS\_Modificado, em que o primeiro corresponde ao apoio QS normalizado para os 400 kV de feixe duplo, quando sujeito a feixe triplo, enquanto que o segundo já ao apoio QS preparado mecanicamente para o feixe triplo.



Figura 5.9 -QRS\_Limite (lado esquerdo) e QRS\_Modificado (lado direito).

- QRA

O apoio QRA é um tipo de apoio de amarração que permite para uma linha de feixe duplo ângulos até 12,6 graus. Apresentou um excesso de carga de 85,2% (apresentando um esforço total de 185,2%) para a situação de rotura de cabo condutor, para feixe triplo. O elevado valor é justificado pelo esforço QRA se tratar de um apoio de amarração, pois está normalmente sujeito a esforços muito superiores aos apoios de suspensão.

Foram testadas várias alternativas, mas não se conseguiu adaptar o poste para uma linha transporte de energia de feixe triplo. Na figura seguinte está o poste que se intitulou QRA\_Limite para uma situação de esforço que não se conseguiu colocar a valores aceitáveis.

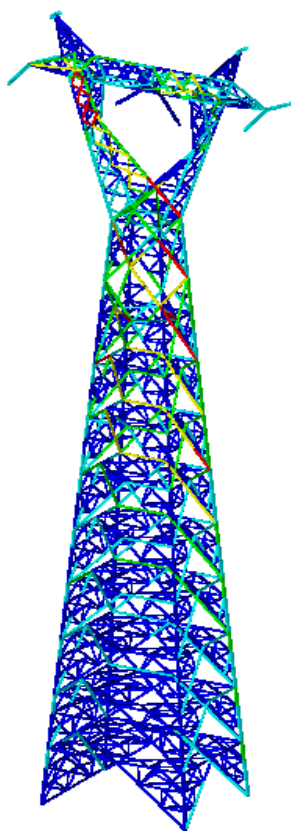


Figura 5.10 -QRA\_Limite.

Seria necessário adaptar ou criar outros postes de amarração que permitissem o uso de feixe triplo em linhas de MAT.

- QA

O apoio QA, é um apoio de amarração, usado em linhas até feixe duplo existente na RNT, tal como os anteriores, que permite ângulos até 33 graus.

Foi testado este poste para as linhas de feixe triplo, apresentando um esforço mecânico inicial de 262% (excesso de 162%) para a situação de rotura do cabo condutor, comum aos tipos de apoios de amarração.

De forma a adaptar este apoio para feixe triplo e diminuir o seu esforço mecânico para valores abaixo máximo de 100%, foram efectuadas as seguintes alterações em alguns pontos críticos do apoio que apresentavam inicialmente valores críticos:

- Mudança da classe do aço dos parafusos de 5,6 para 8,6;
- Aumento da espessura das barras;
- Aumento da largura das barras;
- Aumento do número de parafusos por barra.

Após as várias alterações efectuadas conseguiu-se adaptar este apoio para LFT, atingido o valor de 99% de esforço mecânico mas para ângulos de apenas 15 graus. Era portanto, necessário criar postes de amarração que permitissem ângulos até 50 graus.

Na figura seguinte, encontra-se os apoios intitulados de QA\_Limite e QA\_Modificado, em que o primeiro corresponde ao apoio QA para a situação inicial de não cumprimento do esforço mecânico para feixe triplo e o segundo corresponde ao mesmo apoio numa versão já modificada e adaptada ao feixe triplo.

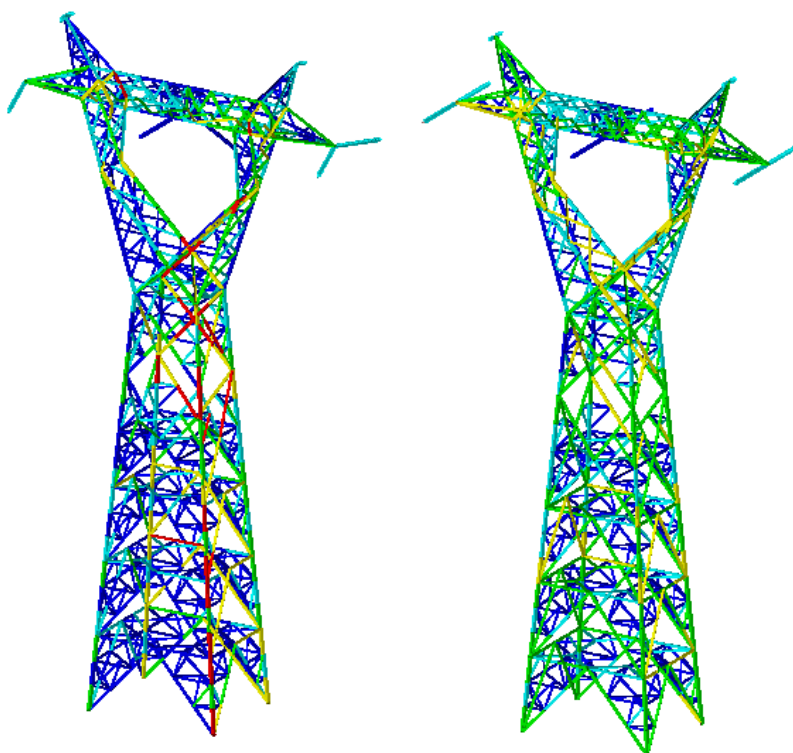


Figura 5.11 -QA\_Limite (lado esquerdo) e QA\_Modificado (lado direito).

- QT

O apoio QT, é um apoio de amarração por vezes usado em fim de linha, preparado para linhas simples de feixe duplo de, tal como os anteriores, que permite ângulos até 50 graus.

Foi testado este poste para as linhas de feixe triplo, apresentando um esforço mecânico inicial de 399,4% (excesso de 299,4%) para a situação de rotura do cabo condutor, comum aos tipos de apoios de amarração.

Tal como o apoio QA foram efectuadas as seguintes alterações de forma a diminuir o seu esforço mecânico para valores abaixo máximo de 100, em pontos críticos do apoio, essas alterações foram:

- Mudança da classe do aço dos parafusos de 5,6 para 8,6;
- Aumento da espessura das barras;
- Aumento da largura das barras;
- Aumento do número de parafusos por barra.

Com as várias alterações efectuadas conseguiu-se adaptar o apoio QT para feixe triplo e para ângulos até 29,7 graus, atingindo um esforço mecânico de 96%, abaixo do valor limite de 100%.

Na figura seguinte, encontra-se os apoios intitulados de QT\_Limite e QT\_Modificado, em que o primeiro corresponde à situação inicial de não cumprimento do esforço mecânico para feixe triplo e o segundo corresponde ao mesmo apoio numa versão já modificada e adaptada ao feixe triplo.

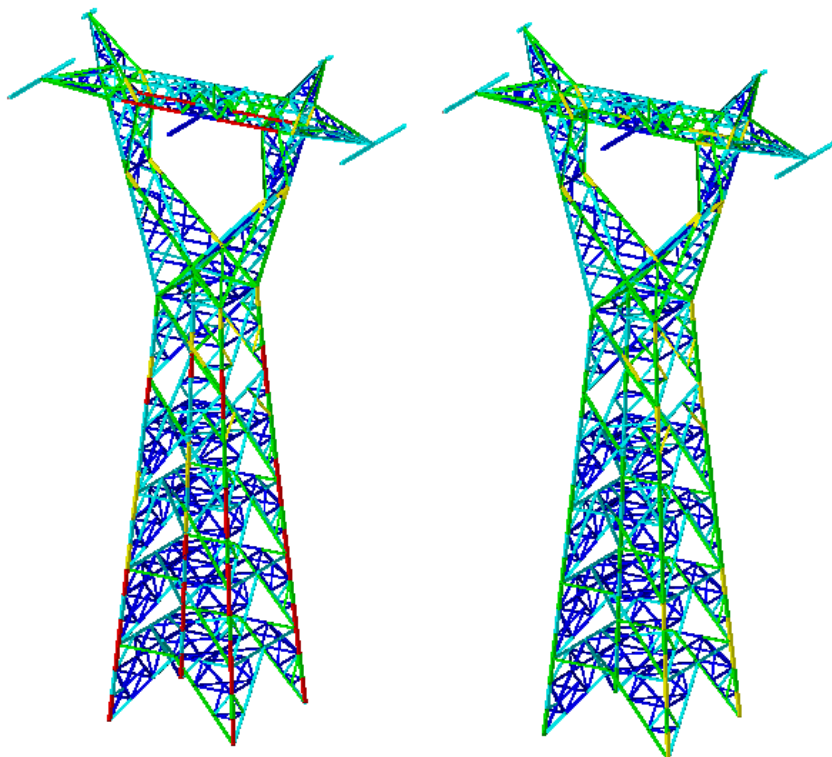


Figura 5.12 -QT\_Limite (lado esquerdo) e QT\_Modificado (lado direito).

Era necessário conseguir criar um último apoio de amarração que fosse capaz de atingir, para feixe triplo, os 50 graus. Para isso foi testado o apoio QT\_Modificado para essa situação, apresentando um esforço de 118%. Com um aumento de número de parafusos em algumas barras e mudança da sua classe de 5,6 para 8,8 conseguiu-se atingir o valor de 99%, passando este apoio a que se intitulou de apoio QT\_Modificado\_2 a estar adaptado para feixe triplo para ângulos até 50 graus.

Na figura seguinte estão os apoios, QT\_Modificado e QT\_Modificado\_2, para as situações de não cumprimento e cumprimento de esforço mecânico, respectivamente, para um ângulo de 50 graus.

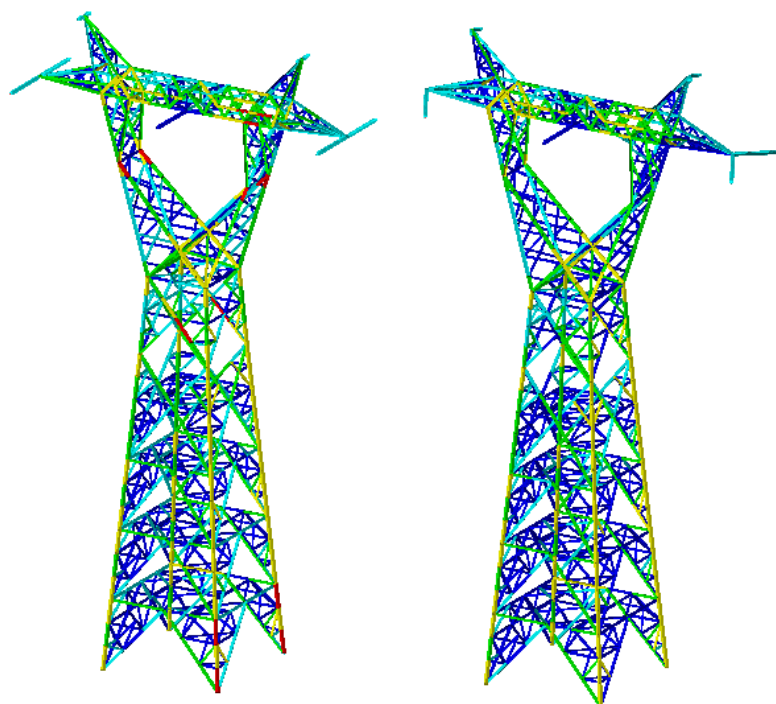


Figura 5.13 -QT\_Modificado (lado esquerdo) e QT\_Modificado\_2 (lado direito).

Constatou-se que nenhum dos apoios estava preparado do ponto de vista mecânico para suportar a nova configuração da linha, sendo que os apoios de amarração eram aqueles que estavam apresentavam piores resultados. Mas através de alterações conseguiram encontrar-se soluções de apoios que permitem a criação de linhas de feixe triplo, esses apoios e suas características podem ser encontrados na tabela seguinte:

Tabela 5.14 – Tipos de Apoios adaptados para a solução de feixe triplo

Tipo de Apoio	Vão de Vento (m)	Vão Gravítico (m)	Ângulo (Graus)	Esforço Mecânico
QS_Modificado	400	600	0	99,0%
QRS_Modificado	560	1000	0	99,0%
QA_Modificado	400	580	13,5	99,2%
QT_Modificado	400	600	29,7	96,0%
QT_Modificado_2	400	600	45	99,0%

Na seguinte tabela estão representados as quantidades por tipo apoios que existiriam na linha batalha, se esta possui-se o feixe triplo, na qual deixariam de existir apoios do tipo QRA, sendo estes englobados nos apoios QA, cumprindo todos os requisitos.

**Tabela 5.15** – Número de apoios por cada tipo da linha Batalha - Pego para feixe triplo.

Tipo de Apoio	Quantidade
QRS (QRS_Modificado)	71
QRA	0
QS (QS_Modificado)	41
QT (QT_Modificado e QT_Modificado2)	15
QA (QA_Modificado)	26
DLT	3
DLA	1
DLS	1
Total	158

## B Solução de Remédio

Esta solução de remédio pode ser entendida como uma resolução pontual da problemática do ruído nas linhas MAT, através de uma alteração da configuração normal da linha para um pequeno troço.

Algumas das alterações que podem ser efectuadas, para um pequeno troço crítico da linha, tendo por base os estudos anteriores são:

- Diminuir a distância entre cabos no feixe de 0,4 até 0,2m no mínimo;
- Alçamento dos postes;
- Alterar a linha de feixe duplo para feixe triplo, apenas numa zona crítica.

De forma a tornar possível a alteração da linha de feixe duplo para feixe triplo, num pequeno troço de uma zona crítica é necessário que os apoios estejam preparados para tal situação, era então necessário adaptar um apoio em amarração que permitisse, no mesmo apoio, efectuar a transição entre feixe duplo para feixe triplo. Foi então considerado o apoio QT\_Modificado\_2, anteriormente obtido para uma linha de feixe triplo e que permitia ângulos até 45 graus (50 grados) e testado para uma situação em que seria efectuada, no mesmo, uma transição de feixe duplo para feixe triplo. Numa situação inicial o apoio apresentou um esforço mecânico de 116% (16% em excesso). De forma a abrandar este excesso de esforço mecânico, foi reduzido o ângulo de amarração de 45 para 25 graus (50 para 27,8 grados), diminuindo assim o esforço para 96%, passando este apoio a estar adaptado à situação pretendida, ainda que com um ângulo menor. Este apoio, foi denominado de apoio QT\_Modificado\_2\_DES\_25.

Na seguinte figura estão representados os apoios QT\_Modificado\_2 e QT\_Modificado\_2\_DES\_25:

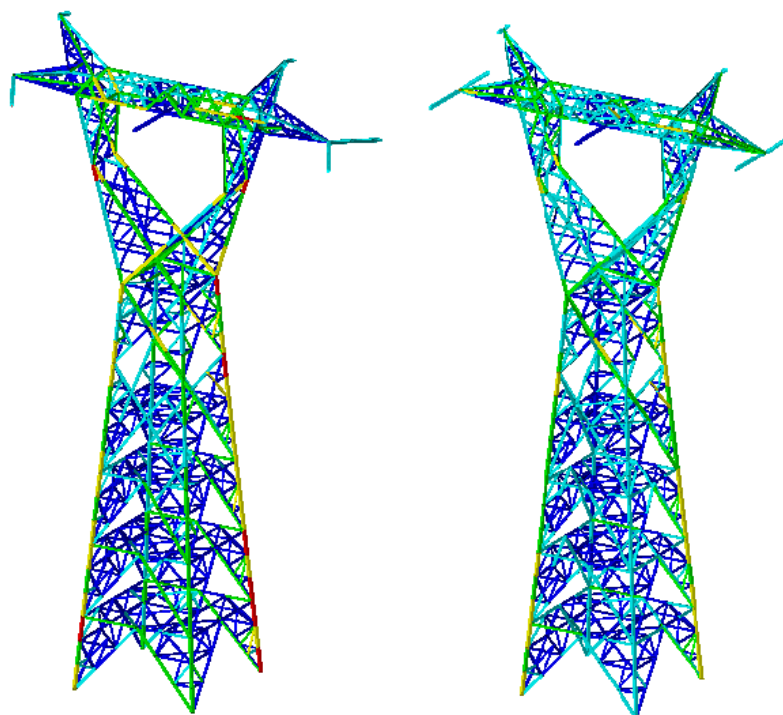


Figura 5.14 - QT\_Modificado\_2 (lado esquerdo) e QT\_Modificado\_2\_DES\_25 (lado direito).

Para tornar esta situação totalmente viável, seria ainda necessário criar ligadores que permitissem fazer a ligação da linha geminada para a linha tripla nos apoios de amarração. Esses ligadores devem permitir a passagem de 3 para 2 e de 2 para 3 condutores por fase, de forma equilibrada (em termos de corrente) e segura.

#### 5.1.3.4 Análise Económica

O estudo económico foi realizado para a situação de remédio normalizada, de forma a obter os aumentos de custos de construção de uma linha com feixe triplo em relação a uma linha com feixe duplo, tendo por base a mesma linha Batalha - Pego, que tem um comprimento de aproximadamente 66 km.

Foram considerados os diversos apoios e os seus tipos de maciços de forma a prever as alterações efectuadas. Na seguinte tabela estão os tipos de apoios considerados inicialmente e as suas características.

Tabela 5.16 – Tipos de Maciços e suas características por tipo de Apoio.

Fundações					
Tipo de poste	Quantidade	Tipo de Maciço	Escavação (m3)	Betão (m3)	Armação (m3)
QRS(QRS_Modificado)	71	DRN 066R	37,46	9,03	260,00
QRA	14	DRN 060R	32,86	8,19	260,00
QS (QS_Modificado)	41	DRN 035R	20,69	6,09	220,00
QT (QT_Modificado e QT_Modificado2)	15	DRN 135R	88,42	21,03	460,00
QA (QA_Modificado)	12	DRN 101R	58,82	13,15	400,00
DLT	3	DRN 266R	220,86	56,86	600,00
DLA	1	DRN 184R	153,96	41,63	540,00
DLS	1	DRN 101R	58,82	13,15	400,00
TOTAL	158		6875,48	1704,18	45560,00

Como os 14 apoios QRA deixarão de existir para uma configuração de linha de feixe triplo e serão substituídos por apoios do tipo QA, era necessário calcular o que isto implicaria em termos de aumento de Betão e Armação. Na tabela seguinte está indicado o aumento das quantidades de material aquando da substituição de um apoio do tipo QRA por um QA, para um apoio e para a totalidade dos 14 apoios.

Tabela 5.17 – Diferença das características das fundações substituindo apoios do tipo QA por apoios QRA.

QA-QRA	Fundações		
	Escavação (m3)	Betão (m3)	Armação (m3)
Aumento para 1 apoio	25,956	4,962	140
Aumento para 14 apoios	363,384	69,468	1960

Com estes aumentos de características, obtiveram-se os valores totais e respectivos aumentos percentuais, das características dos tipos de fundação dos apoios, esses valores estão na seguinte tabela.

Tabela 5.18 – Aumentos em quantidade e percentuais das características dos maciços de fundação.

	Fundações		
	Escavação (m3)	Betão (m3)	Armação (m3)
Quantidades Totais	7238,86	1773,65	47520,00
Aumento em percentagem	5,02%	3,92%	4,12%

Os aumentos percentuais para os tipos de fundações dos apoios, aquando da substituição de uma linha de feixe duplo para feixe triplo são um pouco inferiores a 5%, mas será esse o valor considerado, conferindo a esta análise um carácter ligeiramente pessimista, mas com uma certa margem de segurança. Esse aumento de 5% será também generalizado ao aumento de custo dos apoios e prestação de serviços. Quanto à adaptação das cadeias de amarração de feixe duplo para feixe triplo, será considerado um aumento aproximado de 30%, com base no aumento de preço por unidade. Na tabela seguinte são descritas, de forma sucinta, as alterações de materiais e serviços que seriam necessárias efectuar se a linha possuísse feixe triplo em vez de feixe duplo. Enquanto que, para a maior parte dos materiais são apresentadas as quantidades necessárias, para mudança da linha para feixe triplo, nos serviços, estruturas metálicas e separadores, o aumento é indicado em percentagem.

Tabela 5.19 – Diferença de Custos quando implementada uma linha feixe triplo para 66 km.

(M)Material /(S)Serviço	Aumento em quantidade	Aumento em percentagem	Aumento de Preço
(M) Estruturas Metálicas		5,00%	84.223,83 €
(M) Pinça de Amarração Cabo	270		15.381,90 €
(M) Pinça de Suspensão Cabo	342		16.631,46 €
(M) Conjunto Amarração Cabo	117		5.689,71 €
(M) Conjunto Suspensão Cabo	21		924,42 €
(M) Charneiras CF 150	-321		-4.262,88 €
(M) Charneiras CF 300	321		8.580,33 €
(M) Amortecedor "RAIL AW"	870		14.703,00 €
(M) Uniões Cabo "RAIL AW"	95		2.074,80 €
(M) Separadores de Cabos		30,00%	5.194,55 €
(M) Cadeias de Amarr. e Susp.		30,00%	24.970,11 €
(M) Cabo ACSR 510 "RAIL AW"	203,98 km		952.727,35 €
(S) Fundações		5,00%	22.673,62 €
(S) Montagem de Postes		5,00%	17.150,45 €
(S) Montagem dos Cabos		5,00%	19.589,96 €
Aumento de Custo para metade da linha			1.186.252,60 €
Aumento de Custo para a linha completa			2.372.505,20 €

Na tabela são indicados os valores de aumento de custo para metade de linha e linha completa, porque normalmente as linhas são divididas em dois troços de construção, sendo cada um adjudicado a cada empresa, como os cálculos foram efectuados para meia linha, houve a necessidade de duplicar esse valor.

Considerando que uma MAT custa em média, para uma distância de aproximadamente 66 km, cerca de 13 Milhões de Euros, um aumento de custos de aproximadamente 2,37 Milhões de Euros traduz um aumento de 18,23% dos custos da linha.

### 5.1.3.5 Estudo comparativo da utilização Cabo condutor ACSR 485 “Zebra” versus Cabo condutor ACSR/AW 517 “RAIL AW”

Neste ponto do relatório foi estudada a possibilidade de utilizar o cabo ACSR 485 (Zebra) em vez do cabo ACSR/AW 517 (RAIL AW).

#### A Comparação Técnica

Optou-se ainda por realizar um estudo expedito tomando ainda como referência a linha Batalha - Pego mas em que feixe triplo era constituído pelo cabo ACSR 485 “Zebra” (de utilização intensiva nas linhas da RNT de 150 e 220 kV) em vez do cabo ACSR 517 “RAIL AW”,

De facto o cabo ACSR 485 “Zebra” quando comparado com o ACSR 517 “RAIL AW” tem uma menor secção total de cabo, apresentando por isso um pior comportamento em termos de ruído e de capacidade de transporte, pois esta depende do diâmetro dos condutores. Por outro lado o cabo ACSR 485 “Zebra” tem uma maior secção de aço, tendo um maior peso, e uma melhor resposta em termos de aquecimento. O cabo ACSR 485 “Zebra” possui também, em relação ao cabo ACSR 517 “RAIL AW”, uma maior carga de ruptura, um menor coeficiente de dilatação térmica e um maior módulo de elasticidade, apresentando por isso uma menor flecha para a mesma temperatura.

A título de exemplo foi testado o apoio QT\_Modificado\_2 para perceber até que ponto seria excedido o esforço dos apoios devido ao maior peso do cabo ACSR 485 “Zebra. O excesso de esforço obtido foi de 16% (116% no total), pelo que era de prever, que neste e nos restantes apoios, com um pequeno reforço da estrutura, ficariam preparados para o cabo ACSR 485 “Zebra”,

O cabo ACSR 485 “Zebra”, devido à sua maior carga de ruptura, permitiria também uma diminuição da flecha, ficando o cabo mais esticado. Segundo o programa TOWER, utilizado para verificação de dimensionamento dos apoios, é possível nas mesmas condições diminuir a flecha em aproximadamente 61cm.

#### B Comparação Económica

O cabo ACSR 485 “Zebra” pode apresentar também vantagens do ponto de vista económico, pois este cabo apresenta valores de mercado mais competitivos.

Na tabela seguinte está indicada a diferença de preços (preços de referência utilizados nas estimativas da RNT e excluindo os preços da montagem que se considera idêntica) utilizando o cabo ACSR 485 “Zebra” e o cabo ACSR 517 “RAIL AW”, sendo o valor apresentado representativo da poupança que é possível atingir em termos de cabo.

Tabela 5.20 – Poupança em termos de cabo para uma linha de feixe triplo com cabo Zebra em vez de RAIL AW.

Quantidade	Diferença de Custos
611,4 Km	428.358,00 €

Os 611,4 km seriam a quantidade de cabo necessária para a utilizar o feixe triplo na linha em questão.

### C Comparação Ambiental

Neste estudo ambiental são apresentados os valores calculados do campo e do ruído acústico, respectivamente para cada um dos cabos ACSR 485 “Zebra” e ACSR 517 “RAIL AW”, e com as seguintes características:

- feixe triplo,
- apoios QS;
- cabo de guarda Dorking;
- altitude 300m;
- distância entre cabos do feixe de 0,4m.

Os resultados obtidos para comparação destes dois cabos estão na tabela seguinte:

Tabela 5.21 – Poupança em termos de cabo para uma linha de feixe triplo com cabo Zebra em vez de RAIL AW.

Condutor	Altura Mínima	Campo Eléctrico [kV/cm]			Ruído Acústico de Pico (EPA,USA) 30m dB(A)	Ruído Acústico de Longa Duração (30m) dB(A)
		E(h=0m) com x=10m	À superfície de um condutor	E0 (E_crit)		
RAIL AW	14	3,90	12,48	15,48	31,61	23,39
RAIL AW	16	3,06	12,47	15,48	31,34	23,12
RAIL AW	20	1,97	12,47	15,48	30,90	22,67
RAIL AW	25	1,22	12,47	15,48	30,42	22,20
RAIL AW	30	0,79	12,48	15,48	29,97	21,75
ZEBRA	14	3,89	12,88	15,57	32,38	24,16
ZEBRA	16	3,05	12,87	15,57	32,10	23,88
ZEBRA	20	1,97	12,86	15,57	31,66	23,43
ZEBRA	25	1,21	12,87	15,57	31,17	22,95
ZEBRA	30	0,79	12,87	15,57	30,72	22,50

Como era de prever ainda que o cabo ACSR 517 “RAIL AW” apresenta melhor comportamento em termos de produção de ruído, o mesmo é insignificativo nunca excedendo 1 dB (A).

Deste estudo comparativo, pode-se então concluir que embora o cabo ACSR 517 “RAIL AW” possa apresentar melhores comportamentos em termos de dos valores do campo eléctrico, de ruído e suficiência mecânica, a opção de substituição daquele cabo pelo ACSR 485 “Zebra”, ainda que implique a necessidade de implementar um pequeno reforço dos apoios, é claramente positiva, pois embora para as mesmas condições haja um acréscimo dos valores dos campos e do ruído produzidos é claramente compensada pelas vantagens que se obtêm em termos económicos.



## Capítulo 6 - Conclusões

Cada vez mais o Efeito Coroa (EC) e o ruído acústico (RA), são determinantes no projecto de uma linha de MAT, pois este último pode introduzir perturbações no ambiente sonoro das zonas de implementação.

A partir do estudo teórico inicial, constatou-se que o EC, é o principal causador do RA nas linhas de transmissão de energia, tornando-se necessário aprofundar o conhecimento sobre este tema para perceber até que ponto a solução poderia passar pela tentativa de redução da incidência deste fenómeno.

Sabe-se que o EC surge na superfície dos condutores de uma linha eléctrica aérea, quando o campo eléctrico aí existente é superior ao valor do campo eléctrico crítico presente, ocorrendo pequenas descargas em volta do condutor, com a forma de uma coroa. Era de esperar que quanto mais elevado fosse o valor da tensão maior seria o RA produzido por esse fenómeno, tal previsão veio-se a confirmar com o estudo e simulação do ambiente sonoro de linhas reais, para vários níveis de tensão, em que as linhas de 400 kV apresentavam valores preocupantes de ruído, ainda que dentro dos cumprimentos legais, mas introduzindo algumas perturbações no ambiente sonoro das zonas de implementação. Era necessário portanto, tentar desenvolver uma solução, que permitisse diminuir os níveis de ruído provocados pelas linhas de 400 kV.

Através da interpretação das expressões, de campo eléctrico crítico e campo eléctrico à superfície dos condutores, pôde constatar-se que aumentando o raio equivalente dos condutores, o valor do segundo iria diminuir mais que o valor do primeiro, diminuindo assim a incidência do EC nas linhas MAT. Por sua vez, o raio equivalente dos condutores, pode ser aumentado, incrementando o número de condutores por fase, pois a carga estará mais distribuída.

De forma a melhor compreender a importância de algumas características das linhas MAT, para diminuição da incidência do EC e conseqüente diminuição do RA, foram testadas várias situações, tendo sempre como referência a comparação da solução de feixe triplo com a solução de feixe duplo. Conclui-se então que as seguintes características interferem no comportamento acústico das linhas de transporte de energia:

- Escolha do cabo condutor: quanto maior for o seu diâmetro, menor será a incidência do EC logo haverá menos ruído, só que o aumento de diâmetro implica a maior parte das vezes aumento de peso, o que traz desvantagens do ponto de vista mecânico dos apoios;
- Alteamento dos Apoios: quanto mais alto estiver o apoio, menos ruído existirá;

- Distância entre cabos no feixe: quanto menor for a distância entre cabos, menor será o ruído, contudo a distância não pode ser excessivamente diminuída porque implicaria o uso de mais separadores;
- Apoios de Circuito Duplo e de Circuito Simples: o campo eléctrico obtido no solo é menor para a situação de circuito duplo, devido à utilização da disposição da sequência de fases (em oposição de fase), mas essa configuração terá um nível superior de RA, provocado pelo EC;
- Funcionamento da linha em tensão normal ou em tensão máxima: as diferenças de níveis de ruído para estas duas situações quase atingem os 3 dB (A).

Como as linhas de 400 kV em Portugal possuem no máximo dois condutores por fase, procedeu-se a uma simulação matemática, em que o número de cabos por fase seria elevado de 2 para 3. Essa simulação indicou uma boa resposta dada pela nova solução de 3 cabos por fase, em que era possível diminuir em média 14 dB (A), aquando da passagem de feixe duplo para feixe triplo. Um possível aumento para quatro condutores por fase, foi ponderado, mas a diminuição acústica em relação à solução de feixe triplo, não era compensadora.

Sendo a configuração de feixe triplo uma possível solução para o problema do ruído nas linhas MAT, procedeu-se à realização de um estudo que permitisse sustentar esta solução. Esse estudo foi efectuado para três componentes distintas, técnica, económica e ambiental sendo utilizado o cabo ACSR/AW 517 “RAIL AW”.

A componente ambiental do estudo mostrou ser claramente positiva, concluindo-se que esta solução viria, do ponto de vista ambiental, solucionar o problema do ruído.

Quanto à componente técnica, na qual está englobada a mecânica, era necessário, para tornar a solução de feixe triplo possível, proceder a várias alterações, de feixe duplo para feixe triplo, na configuração da linha, das quais se destacam:

- Cadeia de Isoladores de suspensão dupla, (em vez de simples) para a suspensão;
- Cadeia de isoladores de amarração tripla (em vez de dupla) para a amarração;
- Separadores de feixe triplo em forma de triângulo em vez de tradicional;
- Aumento da quantidade de cabo condutor, passando de 6 cabos condutores (feixe duplo) para 9 condutores (feixe triplo);
- As charneiras que, para linha geminada poderiam ser do tipo CF 150 ou CF 300, têm agora que ser obrigatoriamente CF 300;
- O número de pinças de amarração e suspensão tem aumento em número proporcional ao aumento dos cabos condutores;
- Adaptação dos apoios para a LFT. Neste processo de adaptação foram obtidos os seguintes apoios, para as várias situações de cálculo:

Tabela 6.1 – Tipos de Apoios Adaptados a linhas de feixe triplo

Tipo de Apoio	Vão de Vento (m)	Vão Gravítico (m)	Ângulo (Graus)	Esforço Mecânico
QS_Modificado	400	600	0	99,0%
QRS_Modificado	560	1000	0	99,0%
QA_Modificado	400	580	13,5	99,2%
QT_Modificado	400	600	29,7	96,0%
QT_Modificado_2	400	600	45	99,0%

Por fim a análise económica, da solução de passagem da linha MAT de feixe duplo para feixe triplo. O diferencial de custo obtido, entre a construção de uma linha de feixe duplo para uma LFT, foi de 2.372.505,20 €, para uma linha de aproximadamente 65 km. Considerando o valor de médio de 14 dB (A) que uma LFT pode ter a menos que uma linha de feixe duplo, pode-se concluir, de forma simbólica, que por cada dB (A) que se tem a menos, paga-se 169.285,71 €.

Tendo em conta a melhoria de desempenho no que concerne ao RA (que pode atingir valores médios de 14 dB (A)), considera-se que constitui uma opção interessante e a considerar.

Existem por fim algumas linhas de estudo que poderão vir a ser desenvolvidas futuramente, como sejam a utilização no feixe triplo mas utilizando no feixe outros tipos de cabos como seja por exemplo o cabo ACSR 485 “Zebra” e a “optimização” das famílias de apoios actualmente existentes para os diversos níveis de tensão de modo a permitir a utilização de feixes triplos e/ou o desenvolvimento de novas famílias para utilização deste tipo de cadeias. Num breve estudo de comparação entre a utilização de cabo ACSR 485 “Zebra” em vez do cabo ACSR 517 “RAIL AW”, concluiu-se que embora o cabo ACSR “RAIL AW” possa apresentar melhores comportamentos em termos de dos valores do campo, de ruído e suficiência mecânica, a opção de substituição daquele cabo pelo ACSR “Zebra”, ainda que implique a necessidade de implementar um pequeno reforço dos apoios, é claramente positiva, pois embora para as mesmas condições haja um acréscimo dos valores dos campos e do ruído produzidos é claramente compensada pelas vantagens que se obtêm em termos económicos.



## Referências

- [1] Acoustical Noise in Electricity Networks, Union of The Electricity Industry, July 2003
  - [2] Transmissão de Energia Elétrica Linhas Aéreas, Rubens Dario Fuchs
  - [3] Técnicas de Alta Tensão, Domingos Moura, 1980
  - [4] Projecto EHV - EHV Transmission Line Reference Book. Edison Electric Institute, NY, 1968
  - [5] T. Vinh, C.H. Shih, J. V. King, and W. R. Roy, “Audible Noise and corona loss performance of 9-conductor bundle for UHV transmission lines,” IEE Trans. on PAS, vol. PAS-104, no. 10, pp. 2764-2770, Oct. 1985.
  - [6] “A comparison of methods for calculating audible noise for high voltage transmission lines,” IEEE trans. on PAS, vol. PAS-101, no. 10, pp 4090-4099, Oct 1982.
  - [7] “New Formulas for Predicting Audible Noise from Overhead HVAC Lines Using Evolutionary Computations”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 15, No.4, October 2000.
  - [8] Goldberg, David E.. *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*. EUA: Addison-Wesley, 1989.
  - [9] Assessoria Tecnológica em Ruído de Linhas MAT, ACustiControl, Maio 2008
  - [10] Projecto de execução da Linha Fanhões - Trajouce a 220 kV, 2005
  - [11] Relatório de Monitorização do ambiente sonoro da Linha Fanhões Trajouce, Março 2008
  - [12] Relatório de Monitorização do ambiente sonoro da Linha Batalha - Pego, Abril 2007
  - [13] Projecto de Execução da Linha Batalha - Pego a 400 kV, 2005
- “Les Bruits Éoliens des Lignes Électriques” par H. Arbey, J. Delcambre, R. Michaud, J.M. Parot, M. Moreau, L. Pargamin, Cigré 1981

“Nouveaux Résultats concernant l’effet couronne en tension alternative. Corrélations pertes, perturbations radioélectriques, bruit acoustique” par D. Cristescu, M. Ungureanu et P. Postolache, Cigré 1988

“Ligne expérimentale a 1000 kV réalisée A. Akagi par le criepi description dès installations relatives aux mesures de l’effet de couronne et résultats obtenus jusqu’en 1983” par Y. Sawada, M. Fukushima et M. Yasui, Cigré 1984

“Études des effets de couronne sur les lignes de transport EHT et UHT.” Par N.P. Emelyanov, V.A. Kostyushko, A.I. Tamazanov, L.V. Timashova et M.M. Zizter

“Water drops on high voltage transmission lines”, Claudia Roero and Timm H. Teich

“Tonal Noise emission from wet high voltage transmission lines”, C. Roero, T.H. Teich, M. Semmler and U. Straumann, High Voltage Laboratory ETH Zurich, 2005

“Audible Noise from high voltage overhead transmission lines”, Ueli Straumann, Timm H. Teich, Hans-Jurg Weber,

# ANEXOS