

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
Licenciatura em Engenharia Electrotécnica e de Computadores



**PROJECTO DE LINHA DE ALTA TENSÃO
E
ESTUDO DO CAMPO ELECTROMAGNÉTICO PRODUZIDO PELA LINHA**

Relatório do estágio realizado na EDP Distribuição no âmbito da disciplina de
"Projecto, Seminário ou Trabalho Final de Curso"



Idalina de Freitas Ferreira

Aluna Finalista da LEEC – Ramo de Energia

Eng.º Ricardo Pina

Orientador na EDP Distribuição

Prof. Doutor António Machado e Moura

Orientador na FEUP

Porto, Junho de 2007

RESUMO

Este documento apresenta o trabalho desenvolvido durante o estágio curricular realizado no Departamento de Redes AT/MT da EDP Distribuição.

O trabalho divide-se em duas partes, o projecto de uma linha aérea de alta tensão e o estudo e cálculo do campo electromagnético produzido pela linha projectada.

A parte referente ao projecto da linha constitui os três primeiros capítulos deste documento. No primeiro capítulo são apresentadas as bases teóricas necessárias para realizar um projecto de uma linha aérea de alta tensão. No capítulo 2 é apresentada a memória descritiva do projecto da linha aérea a 60 kV Serzedo – Espinho. O capítulo 3 é constituído pelo plano de segurança e saúde em projecto e construção da linha projectada no capítulo 2.

No capítulo 4 é apresentada a segunda parte deste trabalho: o estudo e cálculo do campo magnético e do campo eléctrico produzido pela linha. Nas primeiras páginas deste capítulo encontram-se os principais efeitos conhecidos dos campos electromagnéticos na saúde das pessoas. As páginas seguintes apresentam para cada um dos campos os conceitos básicos associados ao campo em questão, o modelo de cálculo do campo, e a aplicação do modelo a um exemplo.

Em anexo a este documento encontram-se a planta topográfica, o perfil longitudinal e planta parcelar da linha projectada. Também se encontram em anexo os valores máximos dos campos electromagnéticos da linha projectada, calculados ao longo dos perfis transversal e longitudinal da linha; e o perfil longitudinal dos pontos onde se verifica os limites regulamentares, para exposição permanente do público em geral, do campo magnético e do campo eléctrico.

ABSTRACT

This report presents the developed work during the period of training at Departamento de Redes AT/MT da EDP Distribuição.

The work is divided in two parts, the high voltage transmission line project and the study of the electromagnetic field levels from the transmission line.

The first three chapters refer to the first part of the developed work. Chapter 1 introduces the theoretical basis of high voltage transmission line project. Chapter 2 presents the Descriptive and Justification Memoir of Serzedo-Espinho 60 kV transmission line project. Chapter 3 provides the construction Safety and Health Plan.

The second part of this work is presented in Chapter 4. Firstly there is a revision about the known electromagnetic field influence on human health. Next it is reviewed the theory about magnetic and electric fields, followed by the description of the adopted calculation method and model. Finally it is presented a calculation example.

In the appendix B and C there are the topography map, the longitudinal profile and the expropriation map of the transmission line project. Appendix D shows the maximum levels of the electromagnetic field from transmission line. Appendix E and F presents the longitudinal profile and cross-section with standards maximum allowed levels.

PREFÁCIO

A disciplina de “Projecto, Seminário ou Trabalho Final de Curso” (PSTFC), na qual este trabalho se insere, tem por objectivo uma aproximação dos alunos à realidade prática da engenharia, tendo em vista a sua próxima inserção no mundo do trabalho. É tendo em conta estes objectivos que se enquadra o estágio que realizei no Departamento de Redes AT/MT Norte, da EDP Distribuição.

O projecto e construção de uma linha aérea de alta tensão é um processo sistemático com diversas fases que se sucedem, mas é sem dúvida um desafio novo para o Engenheiro que a projecta.

O projecto da linha aérea de alta tensão que efectuei ao longo do estágio proporcionou-me a aplicação prática dos conhecimentos adquiridos ao longo dos últimos 5 anos, e permitiu-me a aquisição de novos conhecimentos e de alguma experiência como projectista.

O acompanhamento das diversas fases de construção da uma linha aérea de alta tensão permitiu-me a melhor compreensão e percepção de algumas considerações e regulamentações necessárias no projecto da linha. Considero esta parte do estágio de grande importância.

O estudo e cálculo do campo electromagnético produzido pela linha projectada, embora de aplicação prática, insere-se neste trabalho como uma componente mais teórica, de pesquisa e desenvolvimento.

Todo o trabalho desenvolvido durante o estágio teve o excelente acompanhamento local do Eng.º Ricardo Pina, ao qual dirijo o meu mais sincero agradecimento por toda a colaboração e disponibilidade sempre demonstradas. A orientação pedagógica esteve a cargo do Professor Doutor António Machado e Moura que merece o meu sincero agradecimento pela orientação e disponibilidade prestada ao longo deste trabalho.

Quero agradecer aos colaboradores do Departamento de Redes AT/MT Norte, da EDP Distribuição, pela cooperação na execução deste trabalho, em particular: aos desenhadores, em especial ao Sr. Carlos Alfredo, pela ajuda na realização dos desenhos anexos a este trabalho; ao Sr. Rui, fiscal da obra, pelo acompanhamento e esclarecimentos prestados nas deslocações ao terreno; e ao Sr. Capela pelas noções de topografia.

Quero também dirigir um agradecimento a todos os colaboradores, em geral, da EDP Distribuição com quem de alguma forma contactei durante o estágio por terem tornado fácil a minha integração na empresa.

A todos o meu sincero agradecimento,

Idalina Ferreira

ÍNDICE

INTRODUÇÃO	8
CAPÍTULO 1 – PROJECTO DE LINHAS AÉREAS DE ALTA TENSÃO	9
1.1 GENERALIDADES	9
1.2 CÁLCULO ELÉCTRICO	9
1.2.1 TENSÃO DE TRANSPORTE	9
1.2.2 SECÇÃO DOS CONDUTORES	10
1.2.3 CARACTERÍSTICAS DAS LINHAS ELÉCTRICAS	10
1.2.4 RESISTÊNCIA ELÉCTRICA	12
1.2.5 COEFICIENTE DE AUTO-INDUÇÃO E REACTÂNCIA INDUTIVA	12
1.2.6 INTENSIDADE E DENSIDADE DE CORRENTE	13
1.2.7 PERDAS DE ENERGIA	14
1.2.8 QUEDA DE TENSÃO	14
1.3 CÁLCULO MECÂNICO	14
1.3.1 CURVA CARACTERÍSTICA DOS CONDUTORES SUSPENSOS	15
1.3.2 ACÇÕES PRÓPRIAS DOS CONDUTORES	15
1.3.3 INFLUÊNCIA DOS AGENTES EXTERNOS SOBRE OS CONDUTORES	15
1.3.4 ESTADOS ATMOSFÉRICOS TIPO E COEFICIENTES DE SOBRECARGA	17
1.3.5 EQUAÇÃO DE ESTADOS	19
1.3.6 PARÂMETRO E FLECHA	20
1.3.7 TIPOS DE APOIOS	20
1.3.8 ESFORÇOS SOBRE OS APOIOS	21
1.4 DISTÂNCIAS MÍNIMAS REGULAMENTARES	21
1.4.1 DISTÂNCIA DOS CONDUTORES AO SOLO	21
1.4.2 DISTÂNCIA DOS CONDUTORES ÀS ÁRVORES	21
1.4.3 DISTÂNCIA DOS CONDUTORES AOS EDIFÍCIOS	22
1.4.4 DISTÂNCIA ENTRE OS CONDUTORES	22
1.4.5 DISTÂNCIA ENTRE OS CONDUTORES E OS CABOS DE GUARDA.....	22
1.4.6 DESVIO TRANSVERSAL DAS CADEIAS DE ISOLADORES DE SUSPENSÃO	22
1.5 PROJECTO DA LINHA AÉREA A 60 KV SERZEDO – ESPINHO	25
CAPÍTULO 2 – MEMÓRIA DESCRITIVA E JUSTIFICATIVA	26
2.1 OBJECTO PROJECTO	26
2.2 CORRENTE E TENSÃO	26
2.3 CÁLCULO ELÉCTRICO	26
2.3.1 CARACTERÍSTICAS	26
2.3.2 INTENSIDADE DE CORRENTE	26
2.3.3 PERDA DE ENERGIA	27
2.3.4 QUEDA DE TENSÃO	27
2.3.5 ÂNGULO DE CARGA	28
2.4 ISOLADORES	29
2.5 CÁLCULO MECÂNICO	29
2.5.1 CONDUTORES E CABO DE GUARDA	29
2.5.2 VERIFICAÇÃO DA DISTÂNCIA MÍNIMA ENTRE OS CONDUTORES E O CABO DE GUARDA	33
2.5.3 APOIOS	34
2.5.4 VERIFICAÇÃO DA ESTABILIDADE DOS APOIOS	34
2.5.5 VERIFICAÇÃO DO DESVIO TRANSVERSAL DAS CADEIAS DE SUSPENSÃO	42
2.5.6 VERIFICAÇÃO DA DISTÂNCIA MÍNIMA ENTRE CONDUTORES	43
2.6 CRUZAMENTOS COM LINHAS DE TELECOMUNICAÇÕES	45
CAPÍTULO 3 – PLANO DE SEGURANÇA E SAÚDE EM PROJECTO E CONSTRUÇÃO DA LINHA	46
3.1 OBJECTIVO E ÂMBITO	47
3.2 CARACTERIZAÇÃO DA OBRA	47

3.3 RISCOS ASSOCIADOS AO MEIO ENVOLVENTE	48
3.4 FASES DA OBRA E PROGRAMA DE EXECUÇÃO DOS DIVERSOS TRABALHOS	48
3.5 RISCOS EVIDENCIADOS E MEDIDAS DE PREVENÇÃO	48
3.6 RISCOS ESPECIAIS	48
3.7 GESTÃO E ORGANIZAÇÃO DO ESTALEIRO	50
3.7.1 ORGANOGRAMA FUNCIONAL DA EMPREITADA	50
3.7.2 DIFUSÃO DA INFORMAÇÃO SOBRE SEGURANÇA	50
3.7.3 IMPLANTAÇÃO DO ESTALEIRO DE APOIO	50
3.8 LISTA DE ANEXOS E DE DOCUMENTOS ASSOCIADOS	51
ANEXO I – RISCOS ASSOCIADOS AO MEIO ENVOLVENTE	52
ANEXO II – RISCOS EVIDENCIADOS E MEDIDAS DE PREVENÇÃO	54
ANEXO III – PLANO DE EMERGÊNCIA	59
CAPÍTULO 4 – ESTUDO DO CAMPO ELECTROMAGNÉTICO PRODUZIDO PELA LINHA	60
4.1 DEFINIÇÕES	60
4.2 JUSTIFICAÇÃO DO ESTUDO	60
4.3 EFEITOS BIOLÓGICOS DOS CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS NAS PESSOAS	61
4.4 CAMPO MAGNÉTICO	62
4.4.1 A LEI DE BIOT-SAVART	63
4.4.2 A LEI DE AMPERE	64
4.4.3 PRINCÍPIO DA SOBREPOSIÇÃO	65
4.5 CÁLCULO DO CAMPO MAGNÉTICO PRODUZIDO POR LINHAS AÉREAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA	65
4.5.1 MODELO DE CÁLCULO	65
4.5.2 EXEMPLO DE CÁLCULO	66
4.6 CAMPO ELÉCTRICO	70
4.6.1 LINHAS DE FORÇA	70
4.6.2 A LEI DE COULOMB	71
4.6.3 A LEI DE GAUSS	72
4.6.4 CAMPO ELÉCTRICO CRIADO POR UM CONDUTOR CILÍNDRICO	72
4.6.5 DIFERENÇA DE POTENCIAL ENTRE DOIS PONTOS	73
4.6.6 INFLUÊNCIA DO SOLO	74
4.7 CÁLCULO DO CAMPO ELÉCTRICO PRODUZIDO POR LINHAS AÉREAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA	76
4.7.1 MODELO DE CÁLCULO	76
4.7.2 EXEMPLO DE CÁLCULO	81
4.8 CAMPO ELECTROMAGNÉTICO PRODUZIDO PELA LINHA AÉREA A 60 kV SERZEDO – ESPINHO	88
CONCLUSÃO	90
ANEXOS	92
ANEXO A – BIBLIOGRAFIA	92
ANEXO B – PLANTA TOPOGRÁFICA	93
ANEXO C – PERFIL LONGITUDINAL E PLANTA PARCELAR	94
ANEXO D – INTENSIDADE DOS CAMPOS ELÉCTRICO E MAGNÉTICO A 1,8 M DO SOLO	95
ANEXO E – PERFIL LONGITUDINAL DOS PONTOS COM IGUAL INTENSIDADE DE INDUÇÃO MAGNÉTICA	96
ANEXO F – PERFIL LONGITUDINAL DOS PONTOS COM IGUAL INTENSIDADE DE CAMPO ELÉCTRICO	97
ANEXO G – MOVIMENTO HARMÓNICO SIMPLES	98

LISTA DE FIGURAS E TABELAS

FIGURA 1 – ESQUEMA EQUIVALENTE EM π DE UMA LINHA	11
FIGURA 2 – ESQUEMA EQUIVALENTE EM π DE UMA LINHA CURTA	12
FIGURA 3 – ESQUEMA EQUIVALENTE EM π DE UMA LINHA MÉDIA	12
FIGURA 4 – ESQUEMA DAS FORÇAS APLICADAS SOBRE UM CONDUTOR	17
FIGURA 5 – ÁRVORE DE DECISÃO DO ESTADO MAIS DESFAVORÁVEL	18
FIGURA 6 – DESVIO TRANSVERSAL DE UMA CADEIA DE ISOLADORES DE SUSPENSÃO, SUBMETIDA À ACÇÃO DO VENTO E A CARGAS VERTICAIS	23
FIGURA 7 – PERFIL LONGITUDINAL DE UM TROÇO DE LINHA	24
FIGURA 8 – ESQUEMA EM π DA LINHA	28
FIGURA 9 – CIRCUITO C QUE CONDUZ UMA CORRENTE I E UM PONTO P NO CAMPO MAGNÉTICO	63
FIGURA 10 – UM FIO LONGO E RECTILÍNEO CONDUZINDO UMA CORRENTE I	64
FIGURA 11 – CAMPO MAGNÉTICO INDUZIDO POR UMA CORRENTE QUE PERCORRE UM CONDUTOR CILÍNDRICO	65
FIGURA 12 – PLANO VERTICAL REPRESENTANDO O PERFIL TRANSVERSAL DE UMA LINHA AÉREA SIMPLES	67
FIGURA 13 – TRAJECTÓRIA ELÍPTICA PULSANTE DA INDUÇÃO MAGNÉTICA EM CADA PERÍODO NO PONTO P	69
FIGURA 14 – EVOLUÇÃO DO VALOR MÁXIMO DA INDUÇÃO MAGNÉTICA NUM PONTO A 1,8 M DO SOLO, AO LONGO DO PERFIL TRANSVERSAL DA LINHA	70
FIGURA 15 – LINHAS DE CAMPO ELÉCTRICO CRIADO POR CARGAS PONTUAIS	71
FIGURA 16 – LINHAS DE FORÇA DO CAMPO ELÉCTRICO PRODUZIDO POR DUAS CARGAS PONTUAIS DE VALOR IDÊNTICO	71
FIGURA 17 – SUPERFÍCIE GAUSSIANA A CONSIDERAR PARA UM CONDUTOR CILÍNDRICO	73
FIGURA 18 – LINHAS EQUIPOTENCIAIS EM TORNO DE UMA CARGA	73
FIGURA 19 – DOIS CONDUTORES COM DIFERENTES RAIOS E CARGAS	74
FIGURA 20 – INFLUÊNCIA DO SOLO NAS LINHAS DO CAMPO ELÉCTRICO	75
FIGURA 21 – CARGAS IMAGEM	75
FIGURA 22 – DISPOSIÇÃO DOS CONDUTORES E CABO DE GUARDA E RESPECTIVAS CARGAS IMAGEM	76
FIGURA 23 – TRAJECTÓRIA ELÍPTICA PULSANTE DO CAMPO ELÉCTRICO EM CADA PERÍODO NO PONTO P ..	87
FIGURA 24 – EVOLUÇÃO DO VALOR MÁXIMO DO CAMPO ELÉCTRICO NUM PONTO A 1,8 M DO SOLO, AO LONGO DO PERFIL TRANSVERSAL DA LINHA	87
TABELA 1 – CARACTERÍSTICAS DO CONDUTOR E DO CABO DE GUARDA	26
TABELA 2 – CARACTERÍSTICAS DOS ISOLADORES	29
TABELA 3 – PARÂMETRO DOS CONDUTORES EM CADA VÃO OU CANTÃO	31
TABELA 4 – PARÂMETRO DO CABO DE GUARDA EM CADA VÃO OU CANTÃO	33
TABELA 5 – PARÂMETRO DOS CONDUTORES E DO CABO DE GUARDA	33
TABELA 6 – ESFORÇOS DOS APOIOS DE ALINHAMENTO	39
TABELA 7 – ÂNGULO DO DESVIO TRANSVERSAL DAS CADEIAS DE SUSPENSÃO DOS APOIOS DE ALINHAMENTO	43
TABELA 8 – FLECHA MÁXIMA DOS CONDUTORES	45
TABELA 9 – FASES DE TRABALHOS COM RISCOS ESPECIAIS	48
TABELA 10 – LISTA DE MATERIAIS COM RISCOS ESPECIAIS	49
TABELA 11 – EFEITOS BIOLÓGICOS, A CURTO PRAZO, PROVOCADOS PELA DENSIDADE DE CORRENTE INDUZIDA	62
TABELA 12 – LIMITES E RECOMENDAÇÕES DE EXPOSIÇÃO DO PÚBLICO EM GERAL A CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS DE FREQUÊNCIA INDUSTRIAL, NA UNIÃO EUROPEIA	62
TABELA 13 – COORDENADAS DOS CONDUTORES NO PERFIL TRANSVERSAL DA LINHA	66
TABELA 14 – CORRENTES NA LINHA AO LONGO DE UM PERÍODO	67
TABELA 15 – VALORES DA INDUÇÃO MAGNÉTICA AO LONGO DE UM PERÍODO	69
TABELA 16 – COORDENADAS DOS CONDUTORES NO PERFIL TRANSVERSAL DA LINHA	81
TABELA 17 – TENSÕES NA LINHA AO LONGO DE UM PERÍODO	81
TABELA 18 – VALORES DO CAMPO ELÉCTRICO AO LONGO DE UM PERÍODO	86

INTRODUÇÃO

O trabalho desenvolvido durante o estágio divide-se em duas partes: o projecto de uma linha aérea de alta tensão, e o estudo e cálculo do campo magnético e do campo eléctrico produzido pela linha projectada.

O projecto de uma linha aérea é como todos os projectos um conjunto de actividades executadas com o propósito de atingir um determinado objectivo, e que implicam a utilização de diversos recursos.

No caso concreto do projecto de uma linha aérea de alta tensão o objectivo do projecto é a transmissão de energia eléctrica entre dois pontos. O projecto consiste essencialmente no dimensionamento dos condutores a utilizar e das estruturas de suporte dos mesmos. O trajecto da linha aérea corresponde ao traçado delineado numa planta de localização, e é também uma etapa importante do projecto.

O dimensionamento dos condutores envolve duas componentes fundamentais: o cálculo eléctrico que deve respeitar as características eléctricas da instalação a alimentar, tendo em atenção as propriedades condutoras do material que os constitui; e o cálculo mecânico que deve ter em conta o comportamento mecânico dos condutores quando expostos à acção dos agentes atmosféricos.

As estruturas de suporte dos condutores correspondem aos apoios, às armações para fixação dos condutores, aos isoladores, e aos restantes acessórios de ligação entre os condutores e os isoladores, e entre estes e as armações.

A necessidade de projectar mais ou menos estruturas de suporte, a altura e a resistência mecânica destas depende do cálculo mecânico dos condutores e do relevo do terreno.

Os efeitos do campo electromagnético na saúde das pessoas expostas ao mesmo são actualmente tema de controvérsias. Neste relatório são abordados alguns dos efeitos biológicos conhecidos e os limites de exposição do público em geral a campos electromagnéticos de frequência industrial.

O campo magnético está associado à movimentação de cargas eléctricas, ou seja à existência de correntes eléctricas. O campo magnético é um campo de forças e define-se, num determinado ponto do espaço, como a força exercida sobre um elemento unitário de corrente localizado nesse ponto. É prática corrente referir a unidade do campo magnético a partir da densidade de fluxo magnético, ou indução magnética.

O campo eléctrico é um conceito introduzido na teoria electromagnética para descrever as forças que se verificam entre cargas eléctricas. O campo eléctrico existente num determinado ponto do espaço é quantificável pela força a que fica sujeita uma carga unitária colocada nesse ponto. Um campo eléctrico é assim um campo de forças.

Os campos eléctricos são invariavelmente criados pela presença de cargas eléctricas e a sua intensidade num determinado ponto é proporcional à quantidade de cargas que são responsáveis pela criação do campo.

Para o cálculo do campo eléctrico e do campo magnético produzido por linhas aéreas de alta tensão são apresentados neste relatório dois modelos de cálculo, um para cada um dos campos. O trabalho desenvolvido durante o estágio também inclui o desenvolvimento de um pequeno programa em macros de Excel que permite o cálculo automático dos valores do campo magnético e do campo eléctrico ao longo da linha.

1.1 GENERALIDADES

As linhas aéreas de alta tensão são constituídas essencialmente por condutores, cabos de guarda, cadeias de isoladores, armações para fixação dos condutores, suportes e respectivos maciços. Naturalmente, o seu projecto engloba a escolha das características e número destes componentes.

O projecto de linhas aéreas de alta tensão é condicionado por factores de natureza diversa: eléctrica, mecânica, ambiental e económica.

Os factores económicos e os factores ambientais, como acontece na generalidade dos projectos, são regularmente antagónicos, e a solução do projecto deve atender aos dois factores de uma forma justa. Um dos factores será normalmente prejudicado em benefício do outro, mas a solução final, escolhida de entre as várias soluções possíveis, deve ser a melhor no conjunto de todos os factores.

Os factores eléctricos determinam o tipo de condutor, a secção, o tipo de isoladores, e o número de condutores por fase.

Os factores mecânicos relacionam-se com as forças mecânicas resultantes de agentes atmosféricos (vento, gelo), a que os componentes da linha são submetidos, e ao próprio peso desses componentes.

No projecto de uma linha aérea, a primeira etapa consiste na determinação do traçado da linha, ou seja, na definição dos locais por onde a linha vai passar. Normalmente o traçado ideal, que corresponde à linha recta que une as extremidades da linha, é inviável. É então necessário considerar um traçado que minimize o comprimento da linha, e portanto o custo da mesma, mas que contorne os obstáculos existentes no terreno.

A escolha de um primeiro traçado viável faz-se com recurso às cartas da região que fornecem informação sobre o relevo, as vias de comunicação existentes, os cursos de água, as aglomerações habitacionais, as florestas, etc. Para o traçado escolhido é realizado um levantamento topográfico que permite validar ou anular o traçado, e definir o perfil longitudinal do terreno. Para além do perfil longitudinal, também é efectuada a correspondente planta parcelar, contendo a indicação das divisões das propriedades e nomes dos seus proprietários, das suas culturas, dos cursos de água, das estradas e caminhos, das vias-férreas, das linhas aéreas de energia e telecomunicações, das construções, e de outros elementos existentes no terreno condicionantes para o projecto.

A fase seguinte à escolha e validação do traçado da linha a projectar consiste no cálculo eléctrico e no cálculo mecânico, da linha em questão. Os objectivos principais do cálculo eléctrico são a fixação da tensão eléctrica nominal da linha e da secção transversal dos condutores. O cálculo mecânico visa determinar a tensão mecânica de montagem dos condutores, escolher o local de implantação e a altura dos apoios, e o dimensionamento ou verificação da estabilidade dos apoios e maciços escolhidos.

1.2 CÁLCULO ELÉCTRICO

1.2.1 TENSÃO DE TRANSPORTE

O aspecto económico é muito importante no projecto de linhas aéreas. Sabe-se que quanto maior for a tensão eléctrica nominal de uma linha, para uma dada potência a transmitir, menor será a secção dos condutores a empregar, mantendo-se o valor das perdas. A diminuição da secção dos condutores implica uma redução nos custos da linha, quer pelo facto dos condutores de secção menor serem mais baratos, quer por diminuir o peso da linha e conseqüentemente diminuir os custos com os apoios. No entanto, o aumento da tensão eléctrica implica uma maior distância entre condutores e conseqüentemente um maior custo dos apoios da linha. A escolha da tensão eléctrica nominal da linha deve então incidir na tensão que minimizar o custo total da linha.

Existe um número limitado de tensões eléctricas normalizadas e a escolha da tensão nominal para a linha tem de se efectuar sobre uma das tensões normalizadas. A escolha a efectuar deve então ser pelo valor normalizado de tensão eléctrica que minimiza os custos. Em Portugal as tensões eléctricas nominais normalizadas para as redes de transporte e distribuição são definidas no artigo 83º. do Decreto-Lei nº. 43 335 publicado no Diário do Governo de 19 de Novembro de 1960. Para redes de alta tensão a tensão eléctrica normalizada é 60 kV .

1.2.2 SECÇÃO DOS CONDUTORES

A secção dos condutores a empregar na linha depende de vários critérios.

A primeira escolha prende-se com o material condutor a utilizar, pois a secção dos condutores depende do material condutor adoptado para a linha. Actualmente empregam-se dois materiais condutores nas redes eléctricas: o cobre ou o alumínio. O alumínio é mais leve e mais barato que o cobre, mas para as mesmas perdas requer uma secção recta do condutor maior que o cobre. O alumínio é o mais utilizado nas linhas aéreas.

A secção adoptada deve satisfazer o especificado nas normas relativamente ao aquecimento e à resistência mecânica dos condutores. A secção escolhida deve também atender à queda de tensão que não deve exceder determinados valores. A secção resultante da aplicação destes critérios é designada por secção técnica.

Um outro critério de escolha da secção está relacionado com a limitação das perdas a um determinado valor que minimiza o custo total da linha: investimento inicial mais o custo das perdas durante o período de vida da linha. A secção resultante da aplicação deste critério é designada por secção económica.

A secção a empregar pode ser a técnica ou a económica, dependendo dos critérios do projectista. Em qualquer caso, a secção económica só pode ser empregue se for igual ou superior à secção técnica.

Existem secções normalizadas pelos fabricantes de condutores, e para além disso, as empresas de distribuição e transporte de energia empregam apenas nas suas redes algumas das secções apresentadas pelos fabricantes, para reduzir os custos e uniformizar as soluções empregues. Deste modo o valor da secção dos condutores a empregar numa linha aérea de alta tensão está reduzido a um pequeno conjunto de possibilidades.

1.2.3 CARACTERÍSTICAS DAS LINHAS ELÉCTRICAS

Em todas as linhas de energia existem grandezas típicas. As linhas aéreas são caracterizadas pelos parâmetros lineares (constantes físicas eléctricas por quilómetro de comprimento da linha) a seguir apresentados, cujos valores dependem da sua constituição física: tipo e secção dos condutores, disposição geométrica dos condutores, existência de condutores múltiplos, tipo de isolamento. As constantes físicas por quilómetro da linha são as seguintes:

r – resistência (Ω / km)

l – inductância (H / km)

c – capacidade (F / km)

g – condutância (S / km)

Admitindo que a linha constitui um componente equilibrado e simétrico, estas constantes terão valores idênticos nas três fases. A partir destas constantes são definidos os valores por fase da impedância linear complexa z , e da admitância linear complexa y , cujas expressões são apresentadas de seguida.

$$z = r + j\omega l \quad (\Omega/km)$$

$$y = g + j\omega c \quad (S/km)$$

em que:

$\omega = 2\pi f$ é a velocidade angular e

$f = 50 \text{ Hz}$ é a frequência

Com os resultados anteriores pode definir-se para a linha os seguintes valores característicos: impedância característica Z_c , constante de propagação K , e ângulo característico θ , onde L_0 representa o comprimento da linha.

$$Z_c = \sqrt{\frac{z}{y}}$$

$$K = \sqrt{z \times y}$$

$$\theta = K \times L_0$$

Para o funcionamento da linha em regime permanente e simétrico, o esquema equivalente em π da linha é apresentado na figura seguinte.

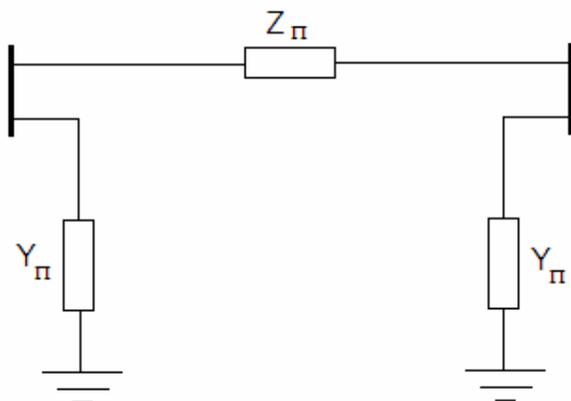


FIGURA 1 – ESQUEMA EQUIVALENTE EM π DE UMA LINHA

Os parâmetros apresentados na figura 1 tomam os valores apresentados a seguir.

$$Z\pi = Z_c \times sh(\theta)$$

$$Y\pi = \frac{ch(\theta) - 1}{Z_c \times sh(\theta)}$$

No caso das linhas aéreas, atendendo aos valores usuais dos seus parâmetros lineares e ao comprimento da linha, é possível obter valores aproximados para os parâmetros do esquema equivalente em π considerando menos termos do desenvolvimento em série das funções hiperbólicas.

Na generalidade, para linhas até 300 km de comprimento é aceitável considerar que $sh(\theta) \cong \theta$ e $ch(\theta) \cong 1 + \theta^2 / 2$. Desta forma os parâmetros do esquema equivalente em π podem ser dados pelas expressões seguintes.

$$Z\pi = Z_c = z \times L_0 = R + jXl = Z$$

$$Y\pi = y \times L_0 / 2 = (g + jBc) / 2 = Y / 2$$

onde:

Z é a impedância série total por fase (R é a resistência e Xl é a reactância indutiva)

Y é a admitância shunt total por fase (G é a condutância e Bc é a susceptância capacitiva)

Com base no atrás referido para linhas curtas em que $L_0 < 100 \text{ km}$ considera-se apenas a impedância série Z , desprezando-se a condutância e a susceptância capacitiva, tal como na figura 2.

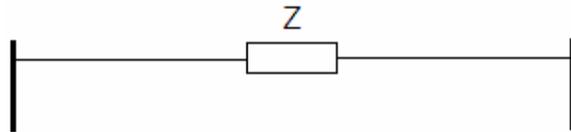


FIGURA 2 – ESQUEMA EQUIVALENTE EM π DE UMA LINHA CURTA

Para linhas médias, em que $L_0 < 300 \text{ km}$, considera-se a impedância série Z e a susceptância capacitiva Bc , desprezando-se a condutância, como na figura 3.

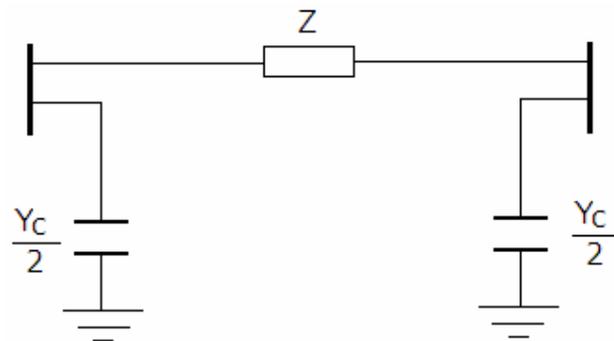


FIGURA 3 – ESQUEMA EQUIVALENTE EM π DE UMA LINHA MÉDIA

Para linhas de comprimento mais elevado, ou para uma maior precisão pode usar-se séries de esquemas equivalentes em π correspondentes a fracções do comprimento total, ou utilizar os parâmetros calculados através das funções hiperbólicas.

1.2.4 RESISTÊNCIA ELÉCTRICA

A resistência dos condutores varia com a temperatura. Para o projecto de linhas aéreas utiliza-se habitualmente o valor da resistência linear a 20°C obtido nas tabelas que os fabricantes dos condutores fornecem.

A resistência por fase da linha é então dada pela expressão seguinte, onde $r^{20^\circ\text{C}}$ é a resistência a 20°C por km , e L_0 é o comprimento da linha em km .

$$R = r^{20^\circ\text{C}} \times L_0$$

1.2.5 COEFICIENTE DE AUTO-INDUÇÃO E REACTÂNCIA INDUTIVA

O coeficiente de auto-indução para um condutor de uma linha é dado pela expressão seguinte.

$$L = \left[\frac{\mu}{2n} + 4,6 \times \log\left(\frac{D}{r'}\right) \right] \times 10^{-4} \text{ H / km}$$

em que:

μ é a permeabilidade do condutor:

$\mu = 1$ para cobre, alumínio, ligas de alumínio e cabos de alumínio-aço,

$\mu = 200$ para o aço galvanizado

n é o número de condutores por fase:

$n = 1$ para fases simples,

$n = 2$ para fases duplas,

$n = 3$ para fases triplas,

$n = n$ para fases de n condutores

D é a separação média geométrica entre fases;

r' é o raio fictício definido por: $r' = \sqrt[n]{nrR^{n-1}}$

onde:

r é o raio do condutor;

R é o raio da circunferência que passa pelos condutores que formam a fase.

No caso de uma fase simples vem: $n = 1$ e $r' = r$ logo o coeficiente de auto-indução vem dado pela seguinte expressão.

$$L = \left[0,5 + 4,6 \times \log\left(\frac{D}{r}\right) \right] \times 10^{-4} \text{ H / km}$$

A reactância indutiva de uma linha aérea de alta tensão, por fase, é definida pela expressão seguinte, onde L_0 é o comprimento da linha em km .

$$X = \omega L L_0 = 2\pi f L L_0 = 100\pi \times L \times L_0$$

1.2.6 INTENSIDADE E DENSIDADE DE CORRENTE

A intensidade de corrente de uma linha aérea de alta tensão pode ser determinada pela expressão seguinte.

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \times Un \times \cos(\varphi)} \quad (A)$$

onde:

P é a potência transmitida pela linha em VA,

Un é a tensão nominal da linha em V e,

$\cos(\varphi)$ é o factor de potência que é habitualmente 0,9

A densidade de corrente na linha, por fase, é obtida pela expressão seguinte, em que S representa a secção do condutor em mm^2 .

$$d = \frac{I}{S} \quad (A / mm^2)$$

1.2.7 PERDAS DE ENERGIA

No projecto de linhas aéreas calculam-se as perdas de energia p por dissipação térmica. Estas perdas são dadas pela seguinte expressão.

$$p = nRI^2$$

onde

n é o número de condutores da linha,

R é a resistência eléctrica da linha e,

I é a corrente nominal da linha

Também é usual apresentar as perdas de energia em percentagem da potência transmitida pela linha, calculando-se este valor pela seguinte expressão, onde as variáveis apresentadas têm o significado apresentado anteriormente.

$$p_{\%} = \frac{nRI^2}{P} \times 100$$

1.2.8 QUEDA DE TENSÃO

A queda de tensão ΔV entre fases numa linha aérea de alta tensão é obtida pela aplicação da expressão seguinte, onde as variáveis apresentadas têm o significado expresso nos pontos anteriores.

$$\Delta V = \sqrt{3}I(R \cos(\varphi) + X \sin(\varphi))$$

A queda de tensão também pode ser apresentada em termos percentuais aplicando a equação seguinte, onde U_n representa a tensão nominal composta da linha.

$$\Delta V_{\%} = \frac{\sqrt{3}I(R \cos(\varphi) + X \sin(\varphi))}{U_n} \times 100$$

1.3 CÁLCULO MECÂNICO

As linhas aéreas de alta tensão estão submetidas às acções do vento e do gelo, assim como às variações de temperatura que ocorrem ao longo do dia e de estação para estação.

Os principais objectivos do cálculo mecânico são determinar a tensão mecânica de montagem dos condutores à qual estes devem ser submetidos no acto de montagem da linha, escolher a altura dos suportes e os respectivos pontos de implantação, e verificar a estabilidade dos tipos de suporte escolhidos e respectivos maciços.

O cálculo mecânico dos condutores baseia-se na conjugação dos diversos factores numa única equação que permite, mediante a introdução de um estado inicial conhecido ou que se pretenda fixar, obter como resultado final, e sob determinadas condições atmosféricas, quais as condições mecânicas a que os condutores são sujeitos.

A tensão mecânica de montagem dos condutores deve ser determinada de acordo com as condições climatéricas que se verificam no momento, e de modo que quaisquer que sejam as condições atmosféricas que se venham a verificar, os condutores nunca sejam solicitados por tensões mecânicas superiores à sua tensão de segurança. A tensão de segurança de um condutor é um valor fixado pelo quociente entre a tensão de ruptura do condutor e um coeficiente de segurança que para as linhas aéreas de alta tensão é 2,5.

A altura dos suportes e os respectivos pontos de implantação devem ser escolhidos para que fique garantido que os condutores nunca se aproximam demasiado do solo ou objectos vizinhos da linha, quaisquer que sejam as condições atmosféricas que se venham a verificar.

O tipo de apoios e respectivos maciços escolhidos devem garantir que quaisquer que sejam as condições atmosféricas que se venham a verificar, a estabilidade do apoio não seja posta em causa.

O cálculo mecânico das linhas aéreas de alta tensão está regulamentado e apresentado no Regulamento de Segurança de Linhas Eléctricas de Alta Tensão (RSLEAT).

1.3.1 CURVA CARACTERÍSTICA DOS CONDUTORES SUSPENSOS

Um fio suficientemente flexível e não elástico estendido entre dois pontos elevados o suficiente para que o fio nunca se apoie no solo, em qualquer ponto intermédio, adquire uma forma característica denominada por catenária. Analogamente e considerando que os condutores de uma linha aérea são igualmente flexíveis, quando os pontos de fixação estão razoavelmente afastados entre si, e os condutores são suspensos nesses pontos, a curva descrita pelos condutores é semelhante à catenária. A distância entre os pontos de fixação corresponde ao vão.

A forma da curva catenária é mais ou menos evidente conforme é maior ou menor a relação tracção/peso linear do condutor. Esta relação define o parâmetro da catenária, que corresponde aproximadamente ao raio de curvatura, no ponto em que a tangente à curva é horizontal.

O modelo matemático da curva catenária traduz-se na equação seguinte.

$$y = k \left(\cosh \frac{x}{k} \right) (m)$$

em que:

k é o parâmetro da catenária em metros;

x é a distância, em metros, medida em projecção horizontal entre o ponto em que a tangente à curva é horizontal e um ponto qualquer na curva catenária e;

y é a distância, em metros, medida em projecção vertical entre o ponto em que a tangente à curva é horizontal e um ponto qualquer na curva catenária.

A distância entre um dos pontos de fixação de um condutor e o ponto em que a tangente à curva catenária é horizontal designa-se por flecha.

1.3.2 ACÇÕES PRÓPRIAS DOS CONDUTORES

Numa situação ideal, os condutores em equilíbrio transmitem aos apoios acções horizontais devidas às componentes horizontais das tracções máximas a que estão sujeitos, e às acções verticais devidas ao seu peso próprio, sendo estas acções de carácter permanente.

1.3.3 INFLUÊNCIA DOS AGENTES EXTERNOS SOBRE OS CONDUTORES

Os condutores de uma linha aérea sofrem solicitações elásticas e térmicas provocadas pelas forças exercidas sobre eles e pela acção dos agentes atmosféricos: o vento, o gelo e a temperatura.

Acção do Vento

O vento soprando sobre os condutores encontra uma resistência, na superfície batida destes, que se manifesta sob a forma de pressão. Essa pressão é proporcional à velocidade do vento, que para os efeitos de dimensionamento se considera actuando em direcção horizontal normal à superfície batida dos condutores, introduzindo uma acção transversal que se transmite aos apoios devendo ser absorvida por estes.

O vento aumenta o valor do peso aparente dos condutores que é agora o resultado da composição vectorial do peso próprio e da força do vento sobre a superfície em que o vento incide.

O RSLEAT apresenta as noções de vento máximo habitual e de vento reduzido no artigo 12º. Os valores da pressão dinâmica a considerar, em função das diferentes alturas acima do solo, são apresentados no artigo 13º. do mesmo regulamento.

No artigo 10º. do RSLEAT é apresentada a expressão de cálculo da força F proveniente da acção do vento sobre cada condutor. Essa expressão é aqui repetida.

$$F = \alpha \cdot c \cdot q \cdot s \quad (N)$$

em que:

α é o coeficiente de redução,

c é o coeficiente de forma,

q é o valor da pressão dinâmica do vento em pascal (Pa) e,

s é a área de superfície batida pelo vento em metros quadrados

Os valores a considerar para os coeficientes de redução e de forma são apresentados nos artigos 14º. e 15º. do RSLEAT, respectivamente.

Acção do Gelo

Nas zonas de gelo, classificadas no RSLEAT como as zonas cuja altitude é superior a 700 metros quando inseridas nos concelhos indicados no quadro 2.1 desse regulamento, verifica-se a formação de uma manga de gelo que envolve os condutores, aumentando o seu diâmetro aparente e consequentemente o seu peso e a superfície batida pelo vento.

Variação da Temperatura

Os condutores de uma linha aérea estão sujeitos a variações de temperatura ambiente de amplitude acentuada ao longo do dia, e principalmente ao longo de um ano. Simultaneamente a temperatura de um condutor depende em cada instante do equilíbrio entre o calor ganho e o calor cedido ao meio ambiente.

O ganho de calor deve-se ao efeito de Joule, resultante da passagem da corrente eléctrica nos condutores, e ao aquecimento dos condutores pela radiação solar. A perda de calor é para o meio ambiente por irradiação, e que depende da diferença de temperatura entre o condutor e o meio ambiente.

Uma vez que os condutores são constituídos por elementos metálicos, cujo coeficiente de dilatação térmica linear é positivo, o conhecimento da influência da temperatura para o cálculo mecânico é essencial. A variação da temperatura traduz-se na variação do comprimento do condutor e consequentemente na variação da tracção a que os condutores estão sujeitos.

1.3.4 ESTADOS ATMOSFÉRICOS TIPO E COEFICIENTES DE SOBRECARGA

O cálculo mecânico é realizado atendendo às condições atmosféricas a que a linha pode ser submetida. Para o cálculo mecânico é necessário definir três estados atmosféricos: o estado de inverno, o estado de primavera, e o estado de verão.

O estado de inverno caracteriza-se por temperatura mínima (-5°C ou -10°C em zonas de gelo); vento reduzido; e possibilidade de formação de manga de gelo.

O estado de primavera, ou estado de vento máximo, caracteriza-se por temperatura moderada (15°C); vento máximo; e ausência de gelo.

O estado de verão, ou estado de flecha máxima, caracteriza-se por temperatura máxima (80°C : valor considerado na EDP para as linhas de alta tensão); e ausência de vento e de gelo. Ao estado de verão corresponde um coeficiente de sobrecarga unitário porque neste estado não há vento nem gelo.

O estado mais desfavorável a considerar no projecto da linha será o estado de inverno, ou o estado de primavera. Para determinar qual o estado mais desfavorável é necessário calcular o coeficiente de sobrecarga associado a cada um dos estados anteriormente referidos.

O coeficiente de sobrecarga confere ao peso próprio do condutor um agravamento que traduz a acção do vento e do gelo eventualmente existente, como se as respectivas acções se resumissem a um aumento de peso próprio dos condutores. As acções a considerar sobre o condutor são genericamente a acção da gravidade sobre o condutor F_c , a acção da gravidade sobre a manga de gelo eventualmente existente F_g , e a força exercida pelo vento F . A esquematização destas forças pode ser visualizada na figura 4.

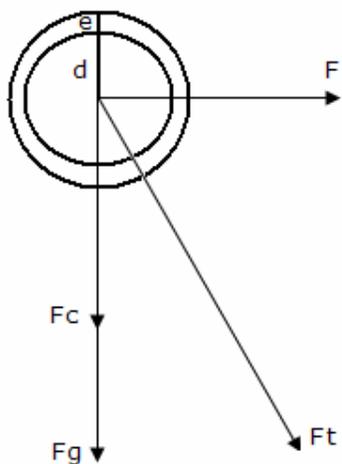


FIGURA 4 – ESQUEMA DAS FORÇAS APLICADAS SOBRE UM CONDUTOR

Da figura anterior pode deprender-se o valor da força resultante F_t , cuja expressão de cálculo é apresentada a seguir.

$$F_t = \sqrt{\left[\omega_v \cdot \sigma + \omega_g \frac{\pi}{4} \left[(d + 2e)^2 - d^2 \right] \right]^2 + F^2}$$

em que:

σ é a secção do condutor,

d é o diâmetro do condutor,

e é a espessura da manga de gelo,

ω_v é o peso específico volumétrico da substância de que o condutor é constituído e,

$\omega_g = 0,9 \text{ kgf/dm}^3$ é o peso específico volumétrico do gelo

O coeficiente de sobrecarga é por definição dado pela expressão seguinte.

$$m = \frac{Ft}{Fc} = \frac{\sqrt{\left[\omega_v \cdot \sigma + \omega_g \frac{\pi}{4} \left[(d + 2e)^2 - d^2 \right] \right]^2 + F^2}}{\omega_v \cdot \sigma}$$

A partir da expressão anterior pode calcular-se o valor assumido pelo coeficiente de sobrecarga nos diferentes estados atmosféricos. Para o estado de verão, como já foi referido, o coeficiente de sobrecarga é unitário.

Definindo o estado de inverno como o estado 1 ao qual corresponde o coeficiente de sobrecarga m_1 e a temperatura ambiente θ_1 , e o estado de primavera como o estado 2 ao qual corresponde o coeficiente de sobrecarga m_2 e a temperatura ambiente θ_2 , o estado mais desfavorável é determinado através da árvore de decisão apresentada na figura 5.

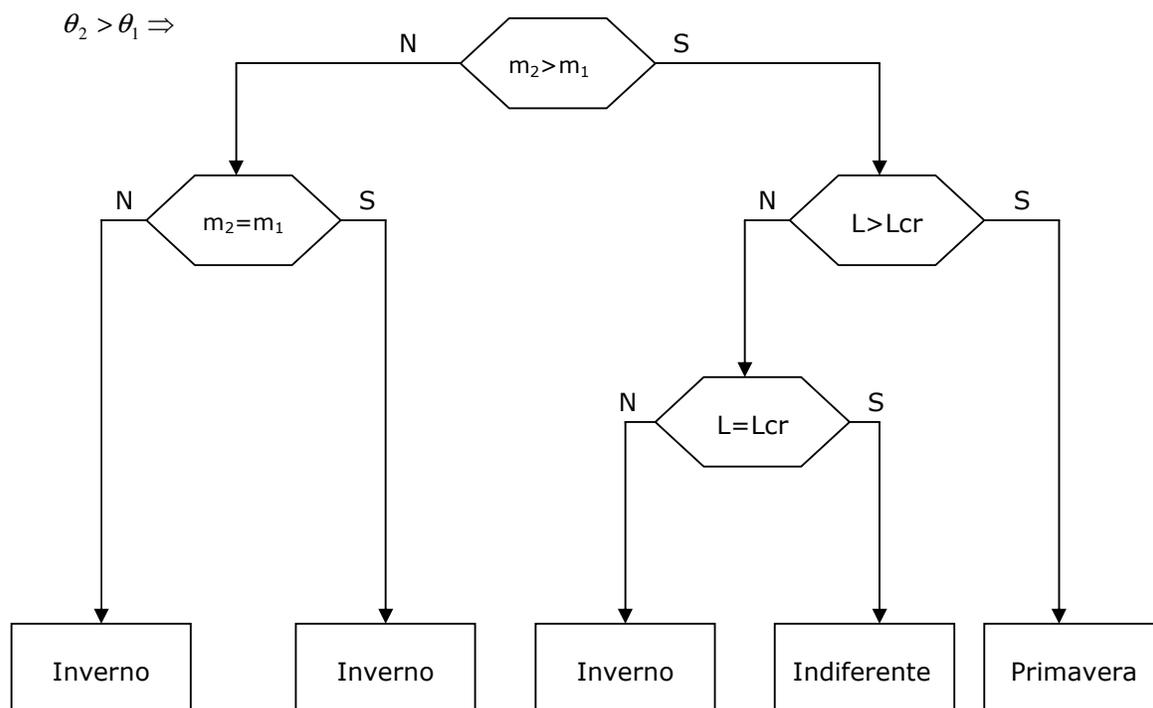


FIGURA 5 – ÁRVORE DE DECISÃO DO ESTADO MAIS DESFAVORÁVEL

Na árvore de decisão apresentada atrás L significa o comprimento do vão considerado, e Lcr o vão crítico. Designa-se por vão crítico o valor do vão para qual os condutores submetidos à tensão máxima t_{max} num dos estados de Inverno ou Primavera adquirem a mesma tensão máxima quando ficam sujeitos às condições do outro desses dois estados. A expressão seguinte obtém-se a partir da equação de estados aplicando-a aos estados de inverno e primavera considerando as tensões de ambos os estados igual à tensão máxima. Na expressão seguinte ω é o peso linear do condutor e as restantes variáveis têm o significado já apresentado anteriormente.

$$Lcr = \frac{\sigma \cdot t_{max}}{\omega} \sqrt{\frac{24 \cdot \alpha \cdot (\theta_2 - \theta_1)}{m_2^2 - m_1^2}}$$

1.3.5 EQUAÇÃO DE ESTADOS

A conjugação das acções próprias dos condutores com as acções que lhe são impostas pelos agentes externos, que se traduzem em variações do seu comprimento e tracção, permite a obtenção de uma equação de equilíbrio mecânico: a equação dos estados.

Considerando, para já, os vãos compreendidos entre cadeias de isoladores de amarração onde se pode admitir que os pontos de fixação dos condutores são praticamente imóveis, e através da aproximação parabólica à curva catenária, pode escrever-se a equação de estados. Para um dado vão de comprimento L , de uma linha aérea de características conhecidas, aplicando a equação de estados pode calcular-se a tensão mecânica nos condutores num estado atmosférico qualquer desde que seja conhecido o seu valor noutra estado, e os dois estados estejam definidos pelos valores das respectivas temperaturas e dos coeficientes de sobrecarga.

Conhecido um determinado estado k à temperatura θ_k com coeficiente de sobrecarga m_k e tensão mecânica dos condutores t_k é possível determinar a tensão mecânica dos condutores t num outro estado à temperatura θ e com coeficiente de sobrecarga m resolvendo a equação de estados apresentada a seguir.

$$\theta + \frac{t}{\alpha E} - \frac{m^2 \omega^2 L^2}{24 \cdot \alpha \cdot \sigma^2 \cdot t^2} = \theta_k + \frac{t_k}{\alpha E} - \frac{m_k^2 \omega^2 L^2}{24 \cdot \alpha \cdot \sigma^2 \cdot t_k^2}$$

Na equação anterior as variáveis têm o significado já apresentado para as expressões anteriores.

A aplicação da equação de estados permite determinar as tensões de montagem fixando a tensão máxima a que os condutores podem ficar sujeitos no estado mais desfavorável.

A expressão e equação anterior são válidas dentro da aproximação parabólica e para vãos em patamar e delimitados por cadeias de amarração.

Para vãos compreendidos entre cadeias de isoladores de suspensão e desnivelados a equação de estados aplica-se para um lança de vãos compreendidos entre cadeias de isoladores de amarração.

Introduzindo as tensões fictícias τ e τ_k definidas, respectivamente, por $\tau = \lambda t$ e $\tau_k = \lambda t_k$ em que λ é definido pela expressão seguinte e onde L_i é o comprimento do vão i e L_{1i} é o comprimento da recta que passa pelos pontos de suspensão dos condutores no vão i .

$$\lambda = \frac{\sum_i \frac{L_{1i}^3}{L_i^2}}{\sum_i \frac{L_{1i}^2}{L_i}}$$

O vão fictício equivalente ao lança de vãos compreendidos entre dois pontos de amarração é dado pela expressão seguinte.

$$\mathcal{L} = \sqrt{\frac{\sum_i L_i^3}{\sum_i \frac{L_{1i}^2}{L_i}}} \cdot \lambda$$

Com as variáveis introduzidas anteriormente é possível aplicar a equação de estados apresentada a seguir para o lança de vãos compreendidos entre cadeias de amarração.

$$\theta + \frac{\tau}{\alpha E} - \frac{m^2 \omega^2 \xi^2}{24 \cdot \alpha \cdot \sigma^2 \cdot \tau^2} = \theta_k + \frac{\tau_k}{\alpha E} - \frac{m_k^2 \omega^2 \xi^2}{24 \cdot \alpha \cdot \sigma^2 \cdot \tau_k^2}$$

1.3.6 PARÂMETRO E FLECHA

A flecha de um condutor ou de um cabo de guarda é a distância entre o ponto do condutor ou do cabo de guarda onde a tangente é paralela à recta que passa pelos pontos de fixação e a intersecção da vertical que passa por esse ponto com esta recta, supostos o condutor ou o cabo de guarda não desviados pelo vento.

Para vãos não muito grandes e no caso de terreno pouco acidentado pode usar-se a seguinte expressão aproximada para determinar a flecha f , onde as variáveis apresentadas têm o significado já exposto nas expressões anteriores.

$$f = \frac{m \cdot \omega \cdot L^2}{8 \cdot \sigma \cdot t} \quad (m)$$

A determinação da flecha máxima assumida pelos condutores de uma linha permite verificar as distâncias mínimas a manter entre os condutores e o solo ou objectos vizinhos. A flecha máxima é obtida com a expressão anterior substituindo o valor de t pelo valor determinado aplicando a equação de estados para as condições do estado de verão.

O conhecimento do parâmetro dos condutores no estado de verão é importante para definir o comprimento dos vãos e a altura dos apoios, no projecto de uma linha aérea de alta tensão. O parâmetro P da catenária, que representa geometricamente o raio de curvatura no ponto onde a tangente à curva é horizontal, é representado pela relação entre a força de tracção horizontal do condutor T a uma dada temperatura e o peso linear ω do condutor.

$$P = \frac{T}{\omega} \quad (m)$$

A tracção horizontal T do condutor, a uma dada temperatura, corresponde ao produto da tensão mecânica t que se verifica no condutor, naquela dada temperatura, pela secção σ do condutor.

$$T = t \cdot \sigma \quad (Kg)$$

1.3.7 TIPOS DE APOIOS

Nas linhas aéreas de alta tensão são aplicados apoios de duas naturezas diferentes: apoios de betão e apoios metálicos.

Os apoios de betão apresentam a vantagem de ocuparem menos espaço no solo e são por isso mais facilmente aceites pelos proprietários dos locais onde são implantados. Os apoios de betão são também vantajosos do ponto de vista económica, uma vez que têm um preço mais baixo que os apoios metálicos. Por outro lado, o seu transporte para os locais de implantação é difícil pois são transportados montados e quando o comprimento do apoio é grande e o local destinado para o apoio é de difícil acesso a sua aplicação pode ser impossível.

Os apoios metálicos ultrapassam a desvantagem apresentada anteriormente para os apoios de betão. Estes apoios são transportados divididos em partes e são montados e aparafusados no local o que facilita e possibilita a sua colocação em qualquer lugar. No

entanto são apoios cuja base apresenta grandes dimensões e tanto maiores quanto maior a altura do apoio, e são apoios cujo preço é mais elevado.

Ainda, de acordo com a localização do apoio no traçado da linha, os apoios podem ser de alinhamento, de ângulo, de derivação, de reforço em alinhamento, de reforço em ângulo, de reforço em derivação, e de fim de linha.

1.3.8 ESFORÇOS SOBRE OS APOIOS

Na generalidade, os esforços a que os apoios são sujeitos são a sobrecarga do vento actuando sobre o apoio, as travessas, os isoladores, e os condutores e cabos de guarda dos vãos adjacentes; a resultante das componentes horizontais das tracções exercidas pelos condutores e pelos cabos de guarda; e o peso próprio do apoio, das travessas, dos isoladores, dos condutores e dos cabos de guarda.

Os fabricantes de apoios fornecem os valores das forças máximas, segundo cada direcção, que cada apoio pode aguentar e é com base nestes valores que os apoios são escolhidos.

As hipóteses de cálculo dos esforços previstos sobre cada um dos tipos de apoios (alinhamento, derivação, ângulo, fim de linha, de reforço, ...) são apresentadas nos artigos 56º. a 62º. do RSLEAT.

1.4 DISTÂNCIAS MÍNIMAS REGULAMENTARES

1.4.1 DISTÂNCIA DOS CONDUTORES AO SOLO

No artigo 27º. do RSLEAT é indicada a distância mínima regulamentar entre os condutores das linhas aéreas e o solo, nas condições de flecha máxima dos condutores, desviados ou não pelo vento.

No caso das linhas aéreas de alta tensão (a 60 kV) a distância mínima D permitida entre os condutores e o solo é dada pela expressão seguinte. À distância D obtida pela expressão seguinte pode ser subtraído um metro nos locais de difícil acesso.

$$D = 6,0 + 0,005 \times 60 = 6,3 \text{ m}$$

1.4.2 DISTÂNCIA DOS CONDUTORES ÀS ÁRVORES

No artigo 28º. do RSLEAT é indicada a distância mínima regulamentar entre os condutores das linhas aéreas e as árvores, nas condições de flecha máxima dos condutores, desviados ou não pelo vento.

No caso das linhas aéreas de alta tensão (a 60 kV) a distância mínima D permitida entre os condutores e o solo é dada pela expressão seguinte.

$$D = 2,0 + 0,0075 \times 60 = 2,5 \text{ m}$$

Deve existir uma especial atenção nos locais onde existam sobreiros ou outra espécie protegida uma vez que não é permitido o corte e decote deste tipo de árvores.

1.4.3 DISTÂNCIA DOS CONDUTORES AOS EDIFÍCIOS

No artigo 29º. do RSLEAT é indicada a distância mínima regulamentar entre os condutores das linhas aéreas e os edifícios, nas condições de flecha máxima dos condutores, desviados ou não pelo vento.

Em relação às coberturas, chaminés e todas as partes salientes susceptíveis de ser normalmente escaladas por pessoas, a distância mínima entre os condutores das linhas de alta tensão e estas é dada na expressão seguinte.

$$D = 3,0 + 0,0075 \times 60 = 3,5 \text{ m}$$

1.4.4 DISTÂNCIA ENTRE OS CONDUTORES

No artigo 31º. do RSLEAT é indicada a distância mínima regulamentar entre os condutores das linhas aéreas atendendo às oscilações provocadas pelo vento.

Para linhas de alta tensão a distância mínima entre condutores é dada pela expressão seguinte.

$$D = k\sqrt{f + d} + \frac{60}{150} \text{ (m)}$$

em que:

k é um coeficiente que vale 0,6 para condutores de cobre, bronze, aço e alumínio-aço; e vale 0,7 para condutores de alumínio e ligas de alumínio;

f é a flecha máxima dos condutores, em metros e;

d é o comprimento das cadeias de isoladores susceptíveis de oscilarem transversalmente à linha, em metros.

Fora das zonas de gelo a distância anterior pode ser menor desde que a distância entre os planos horizontais que passa pelos pontos de fixação dos condutores não seja inferior a dois terços do valor dado pela expressão anterior.

Em qualquer dos casos, para as linhas de alta tensão a distância mínima é no mínimo de 0,6 metros.

1.4.4 DISTÂNCIA ENTRE OS CONDUTORES E OS CABOS DE GUARDA

O artigo 32º. do RSLEAT indica que a distância mínima entre os condutores e os cabos de guarda não deve ser inferior à distância mínima regulamentar entre condutores.

1.4.6 DESVIO TRANSVERSAL DAS CADEIAS DE ISOLADORES DE SUSPENSÃO

Em geral, numa linha aérea de alta tensão aplicam-se dois tipos de cadeias de isoladores: as cadeias de suspensão e as cadeias de amarração. A cadeia de suspensão posiciona-se na vertical, enquanto a cadeia de amarração é aplicada quase na horizontal.

A acção do vento transversal à linha sobre os condutores faz com que as cadeias de isoladores de suspensão se desviem podendo aproximar de modo perigoso os condutores, ao apoio e entre si.

O efeito do vento é o de elevar os cabos e, por último, as cadeias. Segundo o local que cada apoio ocupa no perfil longitudinal, o peso do cabo que gravita sobre uma cadeia define o vão. Do mesmo modo, a semi-soma dos vãos contíguos ao apoio determina o peso provocado pela pressão do vento. Se o peso sobre os apoios do cabo é menor do que o da

pressão provocada pelo vento teremos a chamada “perda de peso”, expressão ortodoxa pelo habitual na linguagem da especialidade e que define perfeitamente o fenómeno.

Os apoios de ângulo podem ter cadeias de amarração ou de suspensão. Neste último caso, a aproximação das cadeias ao apoio é devida ao desvio produzido pelo vento e também ao ângulo, o que aumenta o perigo de aproximação excessiva. Mesmo sem vento, as cadeias de suspensão nos apoios de ângulo tendem para uma posição desviada e não vertical como sucede nos apoios de alinhamento. Por este motivo, sempre que os apoios de ângulo não são em número elevado, e possa por isso desprezar-se o acréscimo de investimento resultante da utilização de cadeias de amarração ao invés de cadeias de suspensão, as de amarração são as escolhidas.

Nos apoios de alinhamento são usualmente aplicadas cadeias de suspensão. Nestes casos é necessário proceder ao cálculo do máximo desvio transversal que a cadeia sofre, para verificar se este não ultrapassa o máximo indicado no Regulamento de Segurança de Linhas Eléctricas de Alta Tensão.

As cadeias de suspensão de um apoio de alinhamento não terão à partida desvio transversal se não existir vento, mas caso este exista a cadeia sofrerá o desvio apresentado na figura seguinte.

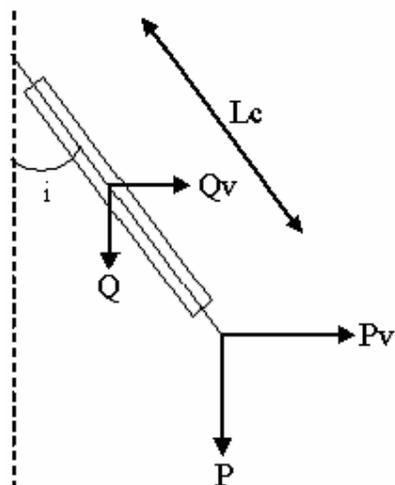


FIGURA 6 – DESVIO TRANSVERSAL DE UMA CADEIA DE ISOLADORES DE SUSPENSÃO, SUBMETIDA À ACÇÃO DO VENTO E A CARGAS VERTICAIS

Na figura anterior (figura 6), i representa o ângulo do desvio transversal da cadeia de isoladores, L_c o comprimento da cadeia de isoladores em metros, Q_v a acção do vento na cadeia de isoladores em Kg, Q o peso da cadeia e dos seus acessórios em Kg, P_v a acção do vento no cabo condutor em Kg, e P o peso do cabo condutor em Kg.

Considerando o perfil longitudinal de um troço de linha, tal como o apresentado na figura 7, facilmente se verifica que o vão considerado para o cálculo do peso do cabo condutor P é diferente do vão que se considera para o cálculo da acção do vento no cabo condutor P_v . Para o cálculo de P interessa a distância horizontal que há entre os vértices das catenárias dos vãos adjacentes ao apoio, ou seja L_g . Para o cálculo de P_v importa a soma dos meios vãos adjacentes ao apoio, ou seja $(L_1 + L_2)/2$. As fórmulas para o cálculo de P e P_v correspondem às equações seguintes.

$$P = w \times L_g$$

$$P_v = \alpha \times c \times \frac{q}{2} \times d \times \frac{L_1 + L_2}{2}$$

em que:

w é o peso linear do cabo;

α é o coeficiente de redução;

c é o coeficiente de forma;

q é a pressão dinâmica do vento;

d é o diâmetro do condutor.

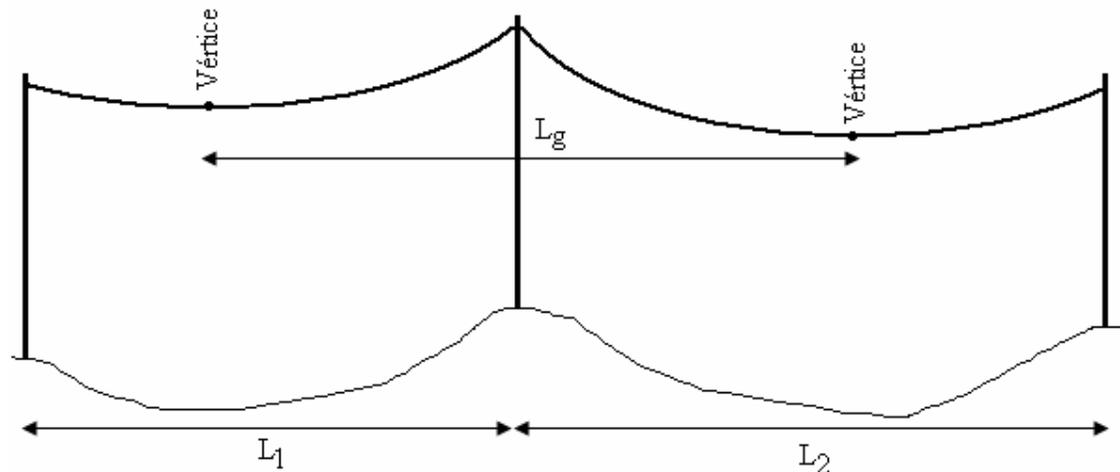


FIGURA 7 – PERFIL LONGITUDINAL DE UM TROÇO DE LINHA

Admitindo que a posição de equilíbrio do sistema de forças é a representada na figura 6, e supondo que a cadeia é completamente rígida e que as forças Q e Q_v são aplicadas no ponto médio da cadeia, trasladando-as para o extremo da cadeia (dividindo-as por 2 de acordo com a lei dos momentos) as condições de equilíbrio do sistema vêm dadas por:

$$\left| P_v + \frac{Q_v}{2} \right| \times L_c \times \cos(i) = \left| P + \frac{Q}{2} \right| \times L_c \times \sin(i)$$

Resolvendo a equação anterior chega-se ao seguinte resultado para o valor de i :

$$\frac{\left| P_v + \frac{Q_v}{2} \right|}{\left| P + \frac{Q}{2} \right|} = \frac{L_c \times \sin(i)}{L_c \times \cos(i)} \Rightarrow \operatorname{tg}(i) = \frac{P_v + \frac{Q_v}{2}}{P + \frac{Q}{2}} \Rightarrow i = \operatorname{arctg} \left(\frac{P_v + \frac{Q_v}{2}}{P + \frac{Q}{2}} \right)$$

Por outro lado e sendo L_c o comprimento da cadeia de isoladores, o ângulo de desvio transversal máximo que a cadeia pode fazer sem ultrapassar a distância máxima regulamentar D_{\max} é dado pela seguinte expressão.

$$i_{\max} = \operatorname{arctg} \left(\frac{D_{\max}}{L_c} \right)$$

Se o ângulo de desvio i que a cadeia sofre for menor que o ângulo de desvio máximo i_{\max} fica cumprida a norma regulamentar. Caso contrário será necessário substituir a cadeia de isoladores por outra que satisfaça a norma regulamentar. Normalmente, nestes casos, substitui-se as cadeias de suspensão por cadeias de amarração.

A distância máxima a considerar, para verificar se o desvio transversal máximo está dentro do regulamentar, é apresentada no artigo 33.º do RSLEAT.

1.5 PROJECTO DA LINHA AÉREA A 60 KV SERZEDO – ESPINHO

O objectivo deste projecto é a interligação de duas subestações, em linha aérea de alta tensão, para fecho de um anel. A linha do projecto tem início na subestação de Serzedo e termina na subestação de Espinho. A localização da linha pode ser observada na planta topográfica apresentada no anexo B.

No início do projecto definiu-se o traçado da linha, nomeadamente a localização dos apoios de ângulo, e escolheu-se o condutor e cabo de guarda a utilizar. Também se definiu que a linha a projectar é uma linha simples.

Com base nas definições anteriores, o projecto iniciou-se com a determinação/escolha das tensões mecânicas máximas a que o condutor e o cabo de guarda podem ser sujeitos.

A etapa seguinte consistiu na definição dos estados atmosféricos, nomeadamente no cálculo dos coeficientes de sobrecarga, e na determinação do vão crítico.

Para três vãos médios a considerar utilizar na linha: 200 m, 300 m, e 400 m foi determinado o estado atmosférico mais desfavorável e seguidamente a tracção dos condutores no estado de verão. Com o valor da tracção determinou-se o parâmetro da catenária descrita pelos condutores em cada um dos vãos médios considerados.

Com a catenária definida em cada um dos vãos médios a escolha dos locais de implantação dos apoios teve em conta que quanto maior os vãos empregues menor é o número de apoios necessários, mas em contrapartida é maior a altura dos apoios para se garantir as distâncias mínimas dos condutores ao solo, edifícios ou outras linhas existentes. O local de implantação dos apoios foi sempre que possível no extremo das propriedades existentes.

A indicação da localização dos apoios e as curvas descritas pelos cabos no estado de verão (estado de flecha máxima) é apresentada no perfil longitudinal e planta parcelar que se encontra no anexo C.

A memória descritiva e justificativa desta linha, assim como o plano de segurança e saúde em projecto e construção da linha são apresentados respectivamente nos capítulos 2 e 3 deste relatório.

PROJECTO DA LINHA AÉREA DE TRANSPORTE DE ENERGIA ELÉCTRICA A 60 kV
SERZEDO – ESPINHO

MEMÓRIA DESCRITIVA E JUSTIFICATIVA

2.1 – OBJECTO PROJECTO

A EDP Distribuição – Energia, S.A pretende interligar a Subestação de Serzedo, situada no concelho de Vila Nova de Gaia, à Subestação de Espinho, situada no concelho de Espinho, fechando assim um anel e aumentando portanto a fiabilidade do Sistema Eléctrico.

Para tal terá de ser construída a respectiva linha de transporte de energia a 60 kV, a qual terá início na Subestação de Serzedo e terminará na Subestação de Espinho.

É o licenciamento da linha de 60 kV Serzedo – Espinho a finalidade do presente projecto.

2.2 – CORRENTE E TENSÃO

A linha a estabelecer poderá transportar uma potência de 60 MW, sob a forma de corrente alternada trifásica, com a frequência de 50 Hertz e à tensão de 63 000 Volt.

2.3 – CÁLCULO ELÉCTRICO

2.3.1 – CARACTERÍSTICAS

A linha terá um comprimento de 4993 metros e serão montados três condutores de cabo alumínio – aço e um cabo de guarda de fibra óptica com as características apresentadas na tabela seguinte.

TABELA 1 – CARACTERÍSTICAS DO CONDUTOR E DO CABO DE GUARDA

	Cabo alumínio – aço	Cabo óptico
Total	326,1 mm ²	204 mm ²
Secção	Alumínio	-
	Aço	-
Diâmetro	23,45 mm	19 mm
Composição	30x3,35mmΦ+7x3,35mmΦ	-
Resistência por Km a 20°C	0,1093 Ω	0,19 Ω
Peso por metro	1,218 kg	0,732 kg
Carga de rotura	11150 kg	7000 kg
Módulo de Elasticidade	7850 kg/mm ²	7500 kg/mm ²
Coefficiente de dilatação linear	17,7x10 ⁻⁶ °C ⁻¹	19,5x10 ⁻⁶ °C ⁻¹

2.3.2 – INTENSIDADE DE CORRENTE

$$I = \frac{60000000}{\sqrt{3} \times 63000 \times 0,9} = 611 \text{ A}$$

e a densidade de corrente será $d = \frac{611}{326,1} = 1,874 \text{ A/mm}^2$

2.3.3 – PERDA DE ENERGIA

A resistência ôhmica de um condutor com 4,993 km é:

$$R = 4,993 \times 0,1093 = 0,546 \text{ } \Omega$$

e a perda de energia por resistência ôhmica será:

$$p = 3RI^2 = 3 \times 0,546 \times 611^2 = 611,5 \text{ kW}$$

ou seja:

$$\frac{611,5 \times 100}{60000} = 1,02\% \text{ da potência total transportada.}$$

2.3.4 – QUEDA DE TENSÃO

O coeficiente de auto-indução médio, por fase e por quilómetro é dado por:

$$L = (0,5 + 4,605 \times \log \frac{D}{a}) \times 10^{-4} \text{ H/km}$$

com:

$$a = \frac{d}{2} = \frac{23,45}{2} = 11,725 \text{ mm}$$

$$D = \sqrt[3]{D_{1-2} \times D_{1-3} \times D_{2-3}}$$

com armação G3 vem:

$$D = \sqrt[3]{4,57 \times 2,5 \times 4,57} = 3,738 \text{ m} = 3738 \text{ mm}$$

$$L = (0,5 + 4,605 \times \log \frac{3738}{11,725}) \times 10^{-4} = 12 \times 10^{-4} \text{ H/km}$$

pelo que:

$$X = \omega L = 2\pi f L = 2 \times \pi \times 50 \times 12 \times 10^{-4} = 0,3770 \text{ } \Omega / \text{km}$$

com armação EVFR-AT vem:

$$D = \sqrt[3]{1,5 \times 3 \times 1,5} = 1,890 \text{ m} = 1890 \text{ mm}$$

$$L = (0,5 + 4,605 \times \log \frac{1890}{11,725}) \times 10^{-4} = 10,665 \times 10^{-4} \text{ H/km}$$

pelo que:

$$X = \omega L = 2\pi f L = 2 \times \pi \times 50 \times 10,665 \times 10^{-4} = 0,3351 \text{ } \Omega / \text{km}$$

e a reactância da linha, por fase, será:

$$X = 0,3770 \times 4,698 + 0,3351 \times 0,325 = 1,880 \text{ } \Omega$$

e a queda de tensão entre fases será:

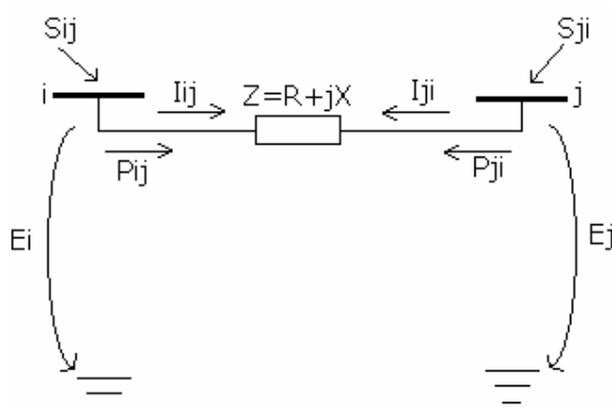
$$V - V_0 = \sqrt{3}I(R \cos \psi + X \sin \psi) = \sqrt{3} \times 611 \times (0,546 \times 0,9 + 1,880 \times \sin(\cos^{-1} 0,9)) = 1387V$$

ou seja:

$$\frac{1387 \times 100}{63000} = 2,2\% \text{ da tensão de serviço.}$$

2.3.5 – ÂNGULO DE CARGA

Sendo válida para esta linha (com 5 km de comprimento) a aproximação para linhas curtas: $L < 100\text{km}$ vem:



Para linhas curtas:

$$E_i = V_i e^{j\theta_i}$$

$$E_j = V_j e^{j\theta_j}$$

$$\delta = \theta_i - \theta_j$$

FIGURA 8 – ESQUEMA EQUIVALENTE EM π DA LINHA

$$P_{ij} = \frac{1}{R^2 + X^2} (RV_i^2 - RV_i V_j \cos \delta + XV_i V_j \sin \delta)$$

Sendo:

$$P_{ij} = 60\text{MW} = 60000000\text{W}$$

$$R = 0,546\Omega$$

$$X = 1,880\Omega$$

$$V_i = 63\text{KV} = 63000\text{V}$$

$$V_j = 63000 - 1382 = 61618\text{V}$$

o ângulo de carga é:

$$60000000 = \frac{1}{0,546^2 + 1,880^2} (0,546 \times 63000^2 - 0,546 \times 63000 \times 61618 \times \cos \delta +$$

$$+ 1,880 \times 63000 \times 61618 \times \sin \delta)$$

$$\Rightarrow \delta = 1,6^\circ$$

Com este ângulo de carga a linha apresenta uma margem de estabilidade suficiente.

2.4 – ISOLADORES

Os condutores serão suspensos em cadeias de isoladores com 6 elementos de cerâmica do tipo AAB 508, da Empresa Cerisol ou equivalentes.

As cadeias de amarração terão 6 isoladores do tipo AAB 508.

São apresentadas na tabela seguinte as características dos isoladores de cadeia a utilizar.

TABELA 2 – CARACTERÍSTICAS DOS ISOLADORES

TIPO		AAB 508
DIMENSÕES		
	Diâmetro do espigão	16 mm
	Passo	130 mm
	Diâmetro	254 mm
	Comprimento da linha de fuga	300 mm
CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS		
	Tensão suportável ao choque	110 kV
	Tensão suportável a seco	70 kV
	Tensão suportável sob chuva	45 kV
	Tensão de perfuração	115 kV
CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS		
	Carga de rotura electromecânica	8000 daN
	Carga máxima de trabalho	3400 daN
PESO		4,2 kg
COR		Cinzento

Serão montadas hastes de descarga nas cadeias.

2.5 – CÁLCULO MECÂNICO

2.5.1 – CONDUTORES E CABO DE GUARDA

Os condutores e cabo de guarda serão montados de modo a que a tracção máxima a que fiquem sujeitos não ultrapasse, nas condições mais desfavoráveis, respectivamente:

Vão P – 1:	0,5 Kg/mm ² por condutor	2 Kg/mm ² por cabo de terra
Vãos 1 – 18:	8 Kg/mm ² por condutor	11 Kg/mm ² por cabo de terra
Vão 18 – P:	0,5 Kg/mm ² por condutor	2 Kg/mm ² por cabo de terra

Nestas condições, o parâmetro da curva de equilíbrio dos condutores e do cabo de guarda toma os valores calculados a seguir.

Estados atmosféricos a considerar conforme artigos 12º, 13º, 16º e 21º do RSLEAT:

Inverno:	Temperatura: -5 °C Pressão dinâmica do vento: 360 Pa Acção do gelo: Zona sem gelo
Primavera:	Temperatura: 15 °C Pressão dinâmica do vento: 900 Pa
Verão:	Temperatura: 80 °C Pressão dinâmica do vento: 0 Pa

CONDUTORESCoefficientes de sobrecarga:

Para o estado de Inverno (1) o coeficiente de sobrecarga é dado por:

$$m_1 = \frac{\sqrt{w^2 + F_{V_1}^2}}{w} = \frac{\sqrt{1,218^2 + 0,5065^2}}{1,218} = 1,0830$$

$$F_{V_1} = 0,6 \times 1 \times 36 \times \frac{23,45}{1000} = 0,5065 \text{ kg/m}$$

Para o estado de Primavera (2) o coeficiente de sobrecarga é dado por:

$$m_2 = \frac{\sqrt{w^2 + F_{V_2}^2}}{w} = \frac{\sqrt{1,218^2 + 1,2663^2}}{1,218} = 1,4425$$

$$F_{V_2} = 0,6 \times 1 \times 90 \times \frac{23,45}{1000} = 1,2663 \text{ kg/m}$$

Para o estado de Verão o coeficiente de sobrecarga é igual à unidade: $m_{\text{Verão}} = 1$.

Cálculo do parâmetro dos condutores do cantão 2 (apoio nº 1 ao apoio nº 8):

Dados:

$$\text{Vão } 1-2: L = 270\text{m}$$

$$\text{Vão } 2-3: L = 305\text{m}$$

$$\text{Vão } 3-4: L = 283\text{m}$$

$$\text{Vão } 4-5: L = 280\text{m}$$

$$\text{Vão } 5-6: L = 370\text{m}$$

$$\text{Vão } 6-7: L = 267\text{m}$$

$$\text{Vão } 7-8: L = 337\text{m}$$

Considerando que os vãos se encontram em patamar, o vão equivalente é dado por:

$$L_{eq} = \sqrt{\frac{270^3 + 305^3 + 283^3 + 280^3 + 370^3 + 267^3 + 337^3}{270 + 305 + 283 + 280 + 370 + 267 + 337}} = 308 \text{ m}$$

e o vão crítico equivalente é:

$$L_{cr} = \frac{326,1 \times 8}{1,218} \times \sqrt{\frac{24 \times 17,7 \times 10^{-6} \times (15 - (-5))}{1,4425^2 - 1,0830^2}} = 207 \text{ m}$$

Como $L_{eq} > L_{cr}$ e $m_2 > m_1$, o estado mais desfavorável é a primavera e por isso a tracção máxima por condutor: $t_{\text{max}} = 8 \text{ kg/mm}^2$ ocorre para $\theta = 15^\circ\text{C}$ e $m = 1,4425$. Aplicando a equação de estados vem para o estado de verão:

$$15 + \frac{8}{17,7 \times 10^{-6} \times 7850} - \frac{1,4425^2 \times 1,218^2 \times 308^2}{24 \times 17,7 \times 10^{-6} \times 326,1^2 \times 8^2} = 80 + \frac{t_{mk}}{17,7 \times 10^{-6} \times 7850} - \frac{1^2 \times 1,218^2 \times 308^2}{24 \times 17,7 \times 10^{-6} \times 326,1^2 \times t_{mk}^2} \Rightarrow t_{mk} (80^\circ C) = 4,6786 \text{ Kg/mm}^2$$

$$T (80^\circ C) = 4,6786 \times 326,1 = 1526 \text{ Kg}$$

e o parâmetro dos condutores do 2º cantão no estado de verão (80°C) é então:

$$P_{cd} (80^\circ C) = \frac{1526}{1,218} = 1253 \text{ m}$$

Da mesma forma, pode-se calcular o parâmetro dos condutores dos restantes cantões. Os resultados obtidos, para o parâmetro dos condutores dos cantões da linha, apresentam-se na tabela seguinte.

TABELA 3 – PARÂMETRO DOS CONDUTORES EM CADA VÃO OU CANTÃO

Cantão/ vão	Vãos	L (m)	L _{eq} (m)	L _{cr} (m)	Estado mais desfavorável	t _{mk} (80°C) (Kg/mm ²)	T (80°C) (Kg)	P _{cd} (80°C) (m)
1	P-1	25	25	26	Inverno	0,2959	97	79
2	1-2	270	308	207	Primavera	4,6786	1526	1253
	2-3	305						
	3-4	283						
	4-5	280						
	5-6	370						
	6-7	267						
	7-8	337						
3	8-9	343	316	207	Primavera	4,7067	1535	1260
	9-10	278						
4	10-11	330	299	207	Primavera	4,6430	1514	1243
	11-12	363						
	12-13	212						
	13-14	263						
	14-15	287						
	15-16	325						
	16-17	200						
5	17-18	240	240	207	Primavera	4,2450	1417	1163
6	18-P	15	15	26	Inverno	0,2435	79	65

CABO DE GUARDA

Coeficientes de sobrecarga:

Para o estado de Inverno (1) o coeficiente de sobrecarga é dado por:

$$m_1 = \frac{\sqrt{w_{CG}^2 + Fv_{1CG}^2}}{w_{CG}} = \frac{\sqrt{0,732^2 + 0,4104^2}}{0,732} = 1,1464$$

$$Fv_{1CG} = 0,6 \times 1 \times 36 \times \frac{19}{1000} = 0,4104 \text{ kg/m}$$

Para o estado de Primavera (2) o coeficiente de sobrecarga é dado por:

$$m_2 = \frac{\sqrt{w_{CG}^2 + Fv_{2CG}^2}}{w_{CG}} = \frac{\sqrt{0,732^2 + 1,0260^2}}{0,732} = 1,7218$$

$$Fv_{2CG} = 0,6 \times 1 \times 90 \times \frac{19}{1000} = 1,0260 \text{ kg/m}$$

Para o estado de Verão o coeficiente de sobrecarga é igual à unidade: $m_{\text{Verão}} = 1$.

Cálculo do parâmetro do cabo de guarda do cantão 2 (apoio nº 1 ao apoio nº 8):

Da mesma forma que é calculado o parâmetro dos condutores é calculado o parâmetro do cabo de guarda. O cálculo do parâmetro do cabo de guarda do 2º cantão é apresentado a seguir.

O vão crítico equivalente do cabo de guarda é:

$$t_{\max} = 11 \text{ Kg/mm}^2$$

$$L_{cr} = \frac{204 \times 11}{0,732} \times \sqrt{\frac{24 \times 19,5 \times 10^{-6} \times (15 - (-5))}{1,7218^2 - 1,1464^2}} = 231 \text{ m}$$

Como $L_{eq} > L_{cr}$ e $m_2 > m_1$, o estado mais desfavorável é a primavera e por isso a tracção máxima do cabo de guarda: $t_{\max} = 11 \text{ kg/mm}^2$ ocorre para $\theta = 15^\circ C$ e $m = 1,7218$. Aplicando a equação de estados vem para o estado de verão:

$$15 + \frac{11}{19,5 \times 10^{-6} \times 7500} - \frac{1,7218^2 \times 0,732^2 \times 308^2}{24 \times 19,5 \times 10^{-6} \times 204 \times 11^2} = 80 + \frac{t_{mk}}{19,5 \times 10^{-6} \times 7500} - \frac{1^2 \times 0,732^2 \times 308^2}{24 \times 19,5 \times 10^{-6} \times 204 \times t_{mk}^2} \Rightarrow t_{mk}(80^\circ C) = 5,3723 \text{ Kg/mm}^2$$

$$T(80^\circ C) = 5,3723 \times 204 = 1096 \text{ Kg}$$

E o parâmetro do cabo de guarda do 2º cantão no estado de verão (80°C) é então:

$$P_{CG}(80^\circ C) = \frac{1096}{0,732} = 1497 \text{ m}$$

Do mesmo modo pode-se calcular o parâmetro do cabo de guarda dos restantes cantões. Os resultados obtidos apresentam-se na tabela seguinte.

TABELA 4 – PARÂMETRO DO CABO DE GUARDA EM CADA VÃO OU CANTÃO

Cantão/ vão	Vãos	L (m)	L _{eq} (m)	L _{cr} (m)	Estado mais desfavorável	t _{mk} (80°C) (Kg/mm ²)	T (80°C) (Kg)	P _{CG} (80°C) (m)
1	P-1	25	25	42	Inverno	0,4653	94	129
2	1-2	270	308	231	Primavera	5,3723	1096	1497
	2-3	305						
	3-4	283						
	4-5	280						
	5-6	370						
	6-7	267						
	7-8	337						
3	8-9	343	316	231	Primavera	5,4029	1102	1506
	9-10	278						
4	10-11	330	299	231	Primavera	5,3338	1088	1486
	11-12	363						
	12-13	212						
	13-14	263						
	14-15	287						
	15-16	325						
	16-17	200						
5	17-18	240	240	231	Primavera	5,0183	1024	1399
6	18-P	15	15	42	Inverno	0,2872	58	80

2.5.2 – VERIFICAÇÃO DA DISTÂNCIA MÍNIMA ENTRE OS CONDUTORES E O CABO DE GUARDA

Para garantir a distância mínima entre os condutores e o cabo de guarda, exposta no *Artigo 32.º do RSLEAT*, é usual garantir que o parâmetro do cabo de guarda é igual ou superior a 15% do parâmetro dos condutores.

Como se pode constatar na tabela seguinte, a condição anterior é verificada em toda a linha, e por isso a distância mínima entre os condutores e o cabo de guarda é verificada.

TABELA 5 – PARÂMETRO DOS CONDUTORES E DO CABO DE GUARDA

Cantão/ vão	Vãos	L (m)	P _{cd} (80°C) (m)	115%P _{cd} (80°C) (m)	P _{CG} (80°C) (m)	P _{CG} ≥ 115%P _{cd}
1	P-1	25	79	91	129	Sim
2	1-2	270	1253	1441	1497	Sim
	2-3	305				
	3-4	283				
	4-5	280				
	5-6	370				
	6-7	267				
	7-8	337				
3	8-9	343	1260	1449	1506	Sim
	9-10	278				
4	10-11	330	1243	1429	1486	Sim
	11-12	363				
	12-13	212				
	13-14	263				
	14-15	287				
	15-16	325				
	16-17	200				
5	17-18	240	1163	1337	1399	Sim
6	18-P	15	65	75	80	Sim

2.5.3 – APOIOS

A linha será constituída por apoios metálicos do tipo P e por apoios de betão do tipo K.

2.5.4 – VERIFICAÇÃO DA ESTABILIDADE DOS APOIOS

APOIOS DE FIM DE LINHA: ESFORÇOS CONFORME ARTIGO 62.º DO RSLEAT

APOIO 1:

HIPÓTESE 1 (VENTO PERPENDICULAR À LINHA):

→ No sentido normal à linha:

- Vento sobre a cadeia de isoladores: 30 Kg
- Vento sobre 1 condutor da linha: $0,6 \times 1 \times 90 \times 0,02345 \times \frac{270}{2} = 171 \text{ Kg}$
- Vento sobre o cabo de guarda da linha: $0,6 \times 1 \times 90 \times 0,019 \times \frac{270}{2} = 139 \text{ Kg}$
- Vento sobre 1 condutor da saída da subestação:
 $0,6 \times 1 \times 90 \times 0,02345 \times \frac{25}{2} \times \cos^2(68,14g) = 4 \text{ Kg}$
- Vento sobre o cabo de guarda da saída da subestação:
 $0,6 \times 1 \times 90 \times 0,019 \times \frac{25}{2} \times \cos^2(68,14g) = 3 \text{ Kg}$
- Tracção de um condutor da saída da subestação: $326,1 \times 0,5 \times \text{sen}(68,14g) = 143 \text{ Kg}$
- Tracção do cabo de guarda da saída da subestação: $204 \times 2 \times \text{sen}(68,14g) = 358 \text{ Kg}$

Resultante: $F_y = 3 \times (30 + 30 + 171 + 4 + 143) + 139 + 3 + 358 = 1634 \text{ Kg}$

→ No sentido da linha:

- Vento sobre um condutor da saída da subestação:
 $0,6 \times 1 \times 90 \times 0,02345 \times \frac{25}{2} \times \cos(68,14g) \times \text{sen}(68,14g) = 7 \text{ Kg}$
- Vento sobre o cabo de guarda da saída da subestação:
 $0,6 \times 1 \times 90 \times 0,019 \times \frac{25}{2} \times \cos(68,14g) \times \text{sen}(68,14g) = 5 \text{ Kg}$
- Tracção de um condutor da linha: $326,1 \times 8 = 2609 \text{ Kg}$
- Tracção do cabo de guarda da linha: $204 \times 11 = 2244 \text{ Kg}$
- Tracção de um condutor da saída da subestação: $326,1 \times 0,5 \times \cos(68,14g) = -78 \text{ Kg}$
- Tracção do cabo de guarda da saída da subestação: $204 \times 2 \times \cos(68,14g) = -196 \text{ Kg}$

Resultante: $F_x = 3 \times (7 + 2609 - 78) + 5 + 2244 - 196 = 9667 \text{ Kg}$

→ Esforço vertical:

- Peso da cadeia de isoladores: 30 Kg
- Peso de um condutor da linha: $1,218 \times \frac{270}{2} = 164 \text{ Kg}$
- Peso do cabo de guarda da linha: $0,732 \times \frac{270}{2} = 99 \text{ Kg}$
- Peso de um condutor da saída da subestação: $1,218 \times \frac{25}{2} = 15 \text{ Kg}$
- Peso do cabo de guarda da saída da subestação: $0,732 \times \frac{25}{2} = 9 \text{ Kg}$

Resultante: $F_z = 3 \times (30 + 30 + 164 + 15) + 99 + 9 = 825 \text{ Kg}$

HIPÓTESE 2 (ACÇÕES EXCEPCIONAIS):

Os condutores neste apoio são amarrados ao fuste, ou seja no eixo do apoio, e por isso a resultante da torção é nula. A resultante das componentes horizontais das tracções máximas exercidas pelos condutores e pelo cabo de guarda, considerando a rotura de um qualquer condutor ou cabo de guarda é menor que a resultante obtida na hipótese 1 como pode ser confirmado de seguida, pelo que pode ser dispensada a verificação desta hipótese.

$$F_x = 2 \times (2609 - 78) + 2244 - 196 = 7110 \text{ Kg}$$

Resultante: *ou*

$$F_x = 3 \times (2609 - 78) = 7593 \text{ Kg}$$

ESTABILIDADE DO APOIO: K 20

$$F_{pvp} = F_x = 9667 \text{ Kg}$$

$$F_{svp} = F_y = 1634 \text{ Kg}$$

$$q = 900 \text{ Pa}$$

vento na direcção principal

$$\frac{F_{pvp}}{16295} + \frac{F_{svp}}{6222} = 1 \Rightarrow \frac{9667}{16295} + \frac{1634}{6222} = 0,85 < 1 \quad \checkmark$$

APOIO 18

HIPÓTESE 1 (VENTO PERPENDICULAR À LINHA):

→ No sentido normal à linha:

- Vento sobre a cadeia de isoladores: 30 Kg
- Vento sobre um condutor da linha: $0,6 \times 1 \times 90 \times 0,02345 \times \frac{240}{2} = 152 \text{ Kg}$
- Vento sobre o cabo de guarda da linha: $0,6 \times 1 \times 90 \times 0,019 \times \frac{240}{2} = 123 \text{ Kg}$

- Vento sobre um condutor da entrada da subestação:

$$0,6 \times 1 \times 90 \times 0,02345 \times \frac{15}{2} \times \cos^2(23,24g) = 8 \text{ Kg}$$

- Vento sobre o cabo de guarda da entrada da subestação:

$$0,6 \times 1 \times 90 \times 0,019 \times \frac{15}{2} \times \cos^2(23,24g) = 7 \text{ Kg}$$

- Tracção de um condutor da entrada da subestação: $326,1 \times 0,5 \times \sin(23,24g) = 58 \text{ Kg}$

- Tracção do cabo de guarda da entrada da subestação: $204 \times 2 \times \sin(23,24g) = 146 \text{ Kg}$

$$\text{Resultante: } F_y = 3 \times (30 + 30 + 152 + 8 + 58) + 123 + 7 + 146 = 1110 \text{ Kg}$$

→ No sentido da linha:

- Vento sobre um condutor da entrada da subestação:

$$0,6 \times 1 \times 90 \times 0,02345 \times \frac{15}{2} \times \cos(23,24g) \times \sin(23,24g) = 3 \text{ Kg}$$

- Vento sobre o cabo de guarda da entrada da subestação:

$$0,6 \times 1 \times 90 \times 0,019 \times \frac{15}{2} \times \cos(23,24g) \times \sin(23,24g) = 3 \text{ Kg}$$

- Tracção de um condutor da linha: $326,1 \times 8 = 2609 \text{ Kg}$

- Tracção do cabo de guarda da linha: $204 \times 11 = 2244 \text{ Kg}$

- Tracção de um condutor da entrada da subestação: $326,1 \times 0,5 \times \cos(23,24g) = -152 \text{ Kg}$

- Tracção do cabo de guarda da entrada da subestação: $204 \times 2 \times \cos(23,24g) = -381 \text{ Kg}$

$$\text{Resultante: } F_x = 3 \times (3 + 2609 - 152) + 3 + 2244 - 381 = 9246 \text{ Kg}$$

→ Esforço vertical:

- Peso da cadeia de isoladores: 30 Kg

- Peso de um condutor da linha: $1,218 \times \frac{240}{2} = 146 \text{ Kg}$

- Peso do cabo de guarda da linha: $0,732 \times \frac{240}{2} = 88 \text{ Kg}$

- Peso de um condutor da entrada da subestação: $1,218 \times \frac{15}{2} = 9 \text{ Kg}$

- Peso do cabo de guarda da entrada da subestação: $0,732 \times \frac{15}{2} = 5 \text{ Kg}$

$$\text{Resultante: } F_z = 3 \times (30 + 30 + 146 + 9) + 88 + 5 = 738 \text{ Kg}$$

HIPÓTESE 2 (ACÇÕES EXCEPCIONAIS):

Os condutores neste apoio são amarrados ao fuste, ou seja no eixo do apoio, e por isso a resultante da torção é nula. A resultante das componentes horizontais das tracções máximas exercidas pelos condutores e pelo cabo de guarda, considerando a rotura de um qualquer condutor ou cabo de guarda é menor que a resultante obtida na hipótese 1 como pode ser confirmado de seguida, pelo que pode ser dispensada a verificação desta hipótese.

$$F_x = 2 \times (2609 - 152) + 2244 - 381 = 6777 \text{ Kg}$$

Resultante: *ou*

$$F_x = 3 \times (2609 - 152) = 7371 \text{ Kg}$$

ESTABILIDADE DO APOIO: K 18

$$F_{pvp} = F_x = 9246 \text{ Kg}$$

$$F_{svp} = F_y = 1110 \text{ Kg}$$

$$q = 900 \text{ Pa}$$

vento na direcção principal

$$\frac{F_{pvp}}{14307} + \frac{F_{svp}}{5624} = 1 \Rightarrow \frac{9246}{14307} + \frac{1110}{5624} = 0,84 < 1 \quad \checkmark$$

APOIOS DE ALINHAMENTO: ESFORÇOS CONFORME ARTIGO 56.º DO RSLEAT

APOIO 2

HIPÓTESE 1 (VENTO PERPENDICULAR À LINHA):

→ No sentido normal à linha:

- Vento sobre a cadeia de isoladores: 30 Kg
- Vento sobre um condutor da linha: $0,6 \times 1 \times 90 \times 0,02345 \times \frac{270 + 305}{2} = 364 \text{ Kg}$
- Vento sobre o cabo de guarda da linha: $0,6 \times 1 \times 90 \times 0,019 \times \frac{270 + 305}{2} = 295 \text{ Kg}$

$$\text{Resultante: } F_y = 3 \times (30 + 364) + 295 = 1477 \text{ Kg}$$

→ Esforço vertical:

- Peso da cadeia de isoladores: 30 Kg
- Peso de um condutor da linha: $1,218 \times \frac{270 + 305}{2} = 350 \text{ Kg}$
- Peso do cabo de guarda da linha: $0,732 \times \frac{270 + 305}{2} = 210 \text{ Kg}$

$$\text{Resultante: } F_z = 3 \times (30 + 350) + 210 = 1350 \text{ Kg}$$

HIPÓTESE 2 (SEM VENTO):

→ No sentido da linha: $F_x = \frac{1}{5} F_y = \frac{1477}{5} = 295 \text{ Kg}$

→ Esforço vertical: $F_z = 1350 \text{ Kg}$

ESTABILIDADE DO APOIO: P2000

Força horizontal por cabo: $30 + 350 = 380 \text{ Kg} < 667 \text{ Kg} \checkmark$

Força vertical por cabo: $30 + 364 = 394 \text{ Kg} < 700 \text{ Kg} \checkmark$

Força horizontal total: $1477 \text{ Kg} < 2000 \text{ Kg} \checkmark$

Força vertical total: $1350 \text{ Kg} < 2000 \text{ Kg} \checkmark$

APOIO 17 (COM CADEIA DE AMARRAÇÃO)

HIPÓTESE 1 (VENTO PERPENDICULAR À LINHA):

→ No sentido normal à linha:

- Vento sobre a cadeia de isoladores: 30 Kg
- Vento sobre um condutor da linha: $0,6 \times 1 \times 90 \times 0,02345 \times \frac{200 + 240}{2} = 279 \text{ Kg}$
- Vento sobre o cabo de guarda da linha: $0,6 \times 1 \times 90 \times 0,019 \times \frac{200 + 240}{2} = 226 \text{ Kg}$

Resultante: $F_y = 3 \times (30 + 30 + 279) + 226 = 1243 \text{ Kg}$

→ Esforço vertical:

Peso da cadeia de isoladores: 30 Kg

Peso de um condutor da linha: $1,218 \times \frac{200 + 240}{2} = 268 \text{ Kg}$

Peso do cabo de guarda da linha: $0,732 \times \frac{200 + 240}{2} = 161 \text{ Kg}$

Resultante: $F_z = 3 \times (30 + 30 + 268) + 161 = 1145 \text{ Kg}$

HIPÓTESE 2 (SEM VENTO):

→ No sentido da linha: $F_x = \frac{1}{5} F_y = \frac{1243}{5} = 249 \text{ Kg}$

→ Esforço vertical: $F_z = 1145 \text{ Kg}$

ESTABILIDADE DO APOIO: P4000

Força horizontal por cabo: $30 + 30 + 279 = 339 \text{ Kg} < 1333 \text{ Kg} \checkmark$

Força vertical por cabo: $30 + 30 + 268 = 328 \text{ Kg} < 700 \text{ Kg} \checkmark$

Força horizontal total: $1243 \text{ Kg} < 4000 \text{ Kg} \checkmark$

Força vertical total: $1145 \text{ Kg} < 2000 \text{ Kg} \checkmark$

Para os restantes apoios de alinhamento os esforços calculados apresentam-se resumidos na tabela seguinte.

TABELA 6 – ESFORÇOS DOS APOIOS DE ALINHAMENTO

Nº APOIO	FORÇA HORIZONTAL POR CABO	FORÇA VERTICAL POR CABO	FORÇA HORIZONTAL TOTAL	FORÇA VERTICAL TOTAL	TIPO DE APOIO
3	402	388	1508	1379	P2000
4	386	373	1448	1325	P2000
5	442	426	1658	1516	P2000
6	433	418	1626	1487	P2000
7	412	398	1547	1415	P2000
9	423	408	1588	1451	P2000
11	469	452	1762	1610	P2000
12	394	380	1477	1350	P2000
13	331	319	1236	1131	P2000
14	378	365	1417	1296	P2000
15	417	403	1566	1432	P2000
16	362	350	1355	1242	P2000

APOIOS DE ÂNGULO: ESFORÇOS CONFORME ARTIGO 57.º DO RSLEAT

APOIO 8

HIPÓTESE 1 (VENTO PARALELO À BISSECTRIZ DO ÂNGULO):

→ No sentido da bissetriz do ângulo:

- Vento sobre a cadeia de isoladores: 30 Kg
- Vento sobre um condutor da linha:

$$0,6 \times 1 \times 90 \times 0,02345 \times \frac{337 + 343}{2} \times \cos^2(17,20g) = 400 \text{ Kg}$$

- Vento sobre o cabo de guarda da linha:

$$0,6 \times 1 \times 90 \times 0,019 \times \frac{337 + 343}{2} \times \cos^2(17,20g) = 324 \text{ Kg}$$

- Tracção de um condutor da linha: $2 \times 326,1 \times 8 \times \sin(17,20g) = 1393 \text{ Kg}$
- Tracção do cabo de guarda: $2 \times 204 \times 11 \times \sin(17,20g) = 1198 \text{ Kg}$

Resultante: $F_y = 3 \times (30 + 30 + 400 + 1393) + 324 + 1198 = 7081 \text{ Kg}$

→ No sentido perpendicular à bissetriz do ângulo:

- Vento sobre um condutor da linha:

$$0,6 \times 1 \times 90 \times 0,02345 \times \frac{337 + 343}{2} \times \cos(17,20g) \times \sin(17,20g) = 111 \text{ Kg}$$

- Vento sobre o cabo de guarda da linha:

$$0,6 \times 1 \times 90 \times 0,019 \times \frac{337 + 343}{2} \times \cos(17,20g) \times \sin(17,20g) = 90 \text{ Kg}$$

Resultante: $F_x = 3 \times 111 + 90 = 423 \text{ Kg}$

→ Esforço vertical:

- Peso da cadeia de isoladores: 30 Kg

- Peso de um condutor da linha: $1,218 \times \frac{337 + 343}{2} = 414 \text{ Kg}$

- Peso do cabo de guarda da linha: $0,732 \times \frac{337 + 343}{2} = 249 \text{ Kg}$

Resultante: $F_z = 3 \times (30 + 30 + 414) + 249 = 1671 \text{ Kg}$

HIPÓTESE 2 (SEM VENTO):

→ Esforço vertical: $F_z = 1415 \text{ Kg}$

→ No sentido normal à bissetriz do ângulo: $F_x = \frac{1}{5} F_y = \frac{7081}{5} = 1416 \text{ Kg}$

ESTABILIDADE DO APOIO: P9000

Força horizontal por cabo: $30 + 30 + 400 + 1393 + 111 = 1964 \text{ Kg} < 3000 \text{ Kg} \checkmark$

Força vertical por cabo: $30 + 30 + 414 = 474 \text{ Kg} < 700 \text{ Kg} \checkmark$

Força horizontal total: $7081 + 423 = 7504 \text{ Kg} < 9000 \text{ Kg} \checkmark$

Força vertical total: $1671 \text{ Kg} < 2000 \text{ Kg} \checkmark$

APOIO 10

HIPÓTESE 1 (VENTO PARALELO À BISSECTRIZ DO ÂNGULO):

→ No sentido da bissetriz do ângulo:

- Vento sobre a cadeia de isoladores: 30 Kg
- Vento sobre um condutor da linha:

$$0,6 \times 1 \times 90 \times 0,02345 \times \frac{278 + 330}{2} \times \cos^2(12,69g) = 370 \text{ Kg}$$

- Vento sobre o cabo de guarda da linha:

$$0,6 \times 1 \times 90 \times 0,019 \times \frac{278 + 330}{2} \times \cos^2(12,69g) = 300 \text{ Kg}$$

- Tracção de um condutor da linha: $2 \times 326,1 \times 8 \times \sin(12,69g) = 1033 \text{ Kg}$
- Tracção do cabo de guarda: $2 \times 204 \times 11 \times \sin(12,69g) = 889 \text{ Kg}$

$$\text{Resultante: } F_y = 3 \times (30 + 30 + 370 + 1033) + 300 + 889 = 5578 \text{ Kg}$$

→ No sentido perpendicular à bissetriz do ângulo:

- Vento sobre um condutor da linha:

$$0,6 \times 1 \times 90 \times 0,02345 \times \frac{278 + 330}{2} \times \cos(12,69g) \times \sin(12,69g) = 75 \text{ Kg}$$

- Vento sobre o cabo de guarda da linha:

$$0,6 \times 1 \times 90 \times 0,019 \times \frac{278 + 330}{2} \times \cos(12,69g) \times \sin(172,69g) = 61 \text{ Kg}$$

$$\text{Resultante: } F_x = 3 \times 75 + 61 = 286 \text{ Kg}$$

→ Esforço vertical:

- Peso da cadeia de isoladores: 30 Kg

- Peso de um condutor da linha: $1,218 \times \frac{278 + 330}{2} = 370 \text{ Kg}$

- Peso do cabo de guarda da linha: $0,732 \times \frac{278 + 330}{2} = 224 \text{ Kg}$

$$\text{Resultante: } F_z = 3 \times (30 + 30 + 370) + 224 = 1514 \text{ Kg}$$

HIPÓTESE 2 (SEM VENTO):

→ No sentido normal à bissetriz do ângulo: $F_x = \frac{1}{5} F_y = \frac{5578}{5} = 1116 \text{ Kg}$

→ Esforço vertical: $F_z = 1514 \text{ Kg}$

ESTABILIDADE DO APOIO: P6000

Força horizontal por cabo: $30 + 30 + 370 + 1033 + 75 = 1538 \text{ Kg} < 2000 \text{ Kg} \checkmark$

Força vertical por cabo: $30 + 30 + 370 = 430 \text{ Kg} < 700 \text{ Kg} \checkmark$

Força horizontal total: $5578 + 286 = 5864 \text{ Kg} < 6000 \text{ Kg} \checkmark$

Força vertical total: $1514 \text{ Kg} < 2000 \text{ Kg} \checkmark$

2.5.5 – Verificação do desvio transversal das Cadeias de Suspensão

Para garantir a distância mínima entre os condutores e os apoios, exposta no artigo 33.º do RSLEAT, é necessário que o ângulo de desvio transversal das cadeias de suspensão não seja maior que o ângulo de desvio transversal máximo.

Para linhas aéreas cuja tensão nominal é 63 kV as distâncias a garantir, entre os condutores e os apoios, são as seguintes.

$$D = 0,1 + 0,0065 \times 63 = 0,51 \text{ m}, \text{ para condutores nus em repouso e,}$$

$$D = 0,0065 \times 63 = 0,41 \text{ m}, \text{ para condutores nus desviados pelo vento.}$$

Para os condutores em repouso a distância mínima é verificada em toda a linha, uma vez que as armações usadas garantem uma distância dos condutores ao apoio superior a 0,51 m.

Para os condutores desviados pelo vento é necessário garantir no mínimo 0,41 m entre os condutores e o apoio. Como as cadeias de suspensão, aplicadas na linha, têm 1,2 m de comprimento o máximo ângulo de desvio transversal permitido é dado por:

$$\theta_{\max}^{\text{permitido}} = \cos^{-1}\left(\frac{0,41}{1,2}\right) = 78 \text{ grados}$$

Para se garantir uma maior margem de segurança vai-se utilizar 60 grados para ângulo de desvio transversal máximo: $\theta^{\max} = 60 \text{ grados}$.

O ângulo do desvio transversal da cadeia de suspensão dos apoios de alinhamento é dado por:

$$i = \text{tg}^{-1} \left[\frac{P_v + \frac{Q_v}{2}}{P + \frac{Q}{2}} \right]$$

CÁLCULO DO DESVIO TRANSVERSAL DA CADEIA DE SUSPENSÃO DO APOIO 2

$$\text{Acção do vento no cabo condutor: } P_v = 0,6 \times 1 \times \frac{90}{2} \times 0,02345 \times \frac{270 + 305}{2} = 182 \text{ Kg}$$

$$\text{Acção do vento na cadeia de isoladores: } Q_v = 30 \text{ Kg}$$

$$\text{Peso do condutor sobre o apoio: } P = 1,218 \times 285 = 347 \text{ Kg}$$

$$\text{Peso da cadeia de isoladores: } Q = 30 \text{ Kg}$$

$$\text{Desvio transversal da cadeia de suspensão: } i = \text{tg}^{-1} \left[\frac{182 + \frac{30}{2}}{347 + \frac{30}{2}} \right] = 32 \text{ grados} < \theta_{\max}$$

Verifica-se assim que os condutores não se aproximam excessivamente ao apoio, uma vez que os desvios transversais das cadeias de isoladores, devidos à acção do vento, não ultrapassam o máximo.

Tal como para as cadeias de suspensão do apoio 2, pode-se calcular o desvio transversal das cadeias de suspensão dos restantes apoios (com cadeias de suspensão). Os resultados são apresentados na tabela seguinte.

TABELA 7 – ÂNGULO DO DESVIO TRANSVERSAL DAS CADEIAS DE SUSPENSÃO DOS APOIOS DE ALINHAMENTO

Apoio	P (Kg)	Pv (Kg)	Q (Kg)	Qv (Kg)	i (grados)
2	347	182	30	30	32
3	259	186	30	30	40
4	267	178	30	30	38
5	510	206	30	30	25
6	356	202	30	30	34
7	396	191	30	30	30
9	393	197	30	30	31
11	369	219	30	30	35
12	180	182	30	30	50
13	371	150	30	30	26
14	342	174	30	30	31
15	470	194	30	30	26
16	238	166	30	30	40

Analisando a tabela anterior verifica-se que a distância mínima entre os condutores e os apoios é garantida. Os ângulos de desvio transversal obtidos são inferiores ao máximo.

2.5.6 – Verificação da Distância Mínima Entre Condutores

De acordo com o exposto no artigo 31.º do RSLEAT, os condutores devem ser estabelecidos de forma a não poderem aproximar-se perigosamente entre si, atendendo às oscilações provocadas pelo vento.

Para linhas aéreas cuja tensão nominal é 63 kV a distância a garantir entre condutores é dada a seguir.

$$D = k \sqrt{f + d + \frac{63}{150}}$$

em que:

k – é um coeficiente dependente da natureza dos condutores, cujo valor é 0,6 para condutores de alumínio-aço;

f – é a flecha máxima dos condutores, em metros;

d – é o comprimento das cadeias de isoladores susceptíveis de oscilarem transversalmente à linha, em metros.

Como a linha está projectada para uma zona sem gelo, a distância entre os condutores nus pode ser inferior à obtida pela expressão anterior, desde que a distância entre os planos horizontais que passam pelos respectivos pontos de fixação não seja menor que dois terços daquele valor. Em qualquer caso, a distância entre os condutores (nus), da linha de 63 kV, não pode ser inferior a 0,63 m.

Com os resultados já obtidos para as tracções dos condutores no estado mais desfavorável, é possível determinar a flecha máxima dos condutores em cada um dos cantões.

Para o primeiro cantão, o cálculo da flecha máxima e da distância a garantir entre condutores é apresentado a seguir.

A flecha máxima do primeiro cantão vale:

$$f_{\max} = \frac{w \times L^2}{8 \times \sigma \times t_{mk}} = \frac{1,218 \times 25^2}{8 \times 326,1 \times 0,2959} = 0,99 \text{ m}$$

A distância mínima a garantir entre condutores junto do apoio 1 é:

$$D = 0,6 \sqrt{0,99 + 0 + \frac{63}{150}} = 0,71 \text{ m}$$

↓ Zona sem gelo

$$D_{\min} = \frac{2}{3} \times 0,71 = 0,47 \text{ m} < 0,6 \text{ m} \Rightarrow D_{\min} = 0,63 \text{ m}$$

Na armação do apoio 1 (EVFR-AT), a distância mínima entre os planos horizontais dos condutores, passando pelos respectivos pontos de fixação, é de 1,5 m. Assim sendo, está garantida a distância mínima entre os condutores no primeiro cantão.

Para o segundo cantão o cálculo da flecha máxima e da distância mínima a garantir entre condutores encontra-se a seguir.

A flecha máxima do segundo cantão vale

$$f_{\max} = \frac{wL^2}{8\sigma_{mk}} = \frac{1,218 \times 308^2}{8 \times 326,1 \times 4,6786} = 9,47 \text{ m}$$

A distância mínima a garantir entre condutores junto do apoio 1 é:

$$D = 0,6 \sqrt{9,47 + 0 + \frac{63}{150}} = 1,89 \text{ m}$$

↓ Zona sem gelo

$$D_{\min} = \frac{2}{3} \times 1,89 = 1,26 \text{ m}$$

A armação do apoio 1 (EVFR-AT) verifica esta distância.

A distância mínima a garantir entre condutores junto dos apoios intermédios (e mais desfavorável que a anterior) é:

$$D = 0,6 \sqrt{9,47 + 1,2 + \frac{63}{150}} = 2,00 \text{ m}$$

↓ Zona sem gelo

$$D_{\min} = \frac{2}{3} \times 2,00 = 1,33 \text{ m}$$

A armação G3, utilizada em todos os apoios à excepção dos pórticos e dos apoios de fim de linha, apresenta uma distância mínima entre os planos horizontais dos condutores que passam pelos respectivos pontos de fixação de 2,5 m. Conclui-se assim que a distância mínima entre os condutores também é garantida junto dos apoios intermédios. Junto do apoio 8, como este é de amarração, a distância mínima a garantir é inferior à calculada para os apoios intermédios (uma vez que $d = 0 \text{ m} < 1,2 \text{ m}$). Sendo igual a armação usada, então a distância mínima entre condutores é também verificada.

Para os restantes cantões o valor da flecha máxima e da distância mínima, mais desfavorável, a garantir entre condutores encontra-se na tabela seguinte.

TABELA 8 – FLECHA MÁXIMA DOS CONDUTORES

Cantão/vão	Vãos	L (m)	Leq (m)	t_{mk} (80°C) (Kg/mm ²)	f_{max} (m)	D_{min} (m) mais desfavorável
1	P-1	25	25	0,2959	0,99	0,63
2	1-2	270	308	4,6786	9,47	1,33
	2-3	305				
	3-4	283				
	4-5	280				
	5-6	370				
	6-7	267				
3	7-8	337	316	4,7067	9,91	1,36
	8-9	343				
4	9-10	278	299	4,6430	8,99	1,30
	10-11	330				
	11-12	363				
	12-13	212				
	13-14	263				
	14-15	287				
	15-16	325				
16-17	200					
5	17-18	240	240	4,2450	6,34	1,13
6	18-P	15	15	0,2435	0,43	0,63

Da análise da tabela anterior e do apresentado anteriormente pode concluir-se que as distâncias mínimas entre condutores são verificadas.

2.6 – CRUZAMENTOS COM LINHAS DE TELECOMUNICAÇÕES

A linha cruzará com traçados de telecomunicações nos vãos 2-3; 3-4; 6-7; 8-9; 14-15; 15-16; 17-18.

A distância vertical entre o condutor inferior da linha de alta tensão e o superior dos traçados de telecomunicações é superior ao mínimo regulamentar.


SISTEMA DE GESTÃO DA SEGURANÇA

Título:

**PLANO DE SEGURANÇA E SAÚDE EM PROJECTO
E CONSTRUÇÃO DA LN 60kV SERZEDO – ESPINHO**

Natureza	Versão	Data	Autor
<i>Plano de Segurança e Saúde</i>	<i>Versão 1</i>	<i>21/04/2007</i>	<i>INLN</i>

<p>Lista de Distribuição:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Autor do Projecto - Gestor da Obra - Fiscal da Obra - Dep. Prevenção e Segurança - Empreiteiros a consultar 	<p>Lista de Anexos:</p> <p>Foram previamente fornecidos pelo dono de obra à entidade executante os seguintes documentos associados ao PSS:</p> <ul style="list-style-type: none"> - As Fichas de Segurança e Saúde (FSS); - Manual de Segurança - Prevenção do Risco Eléctrico - Manual de Segurança - Trabalhos em Apoios e Fachadas - Regulamento de Consignações AT, MT e BT. - Regul. Segurança para Execução de Trabalhos na EDP - Regul. Para Atribuição de Títulos de Habilitação - Regulamento do Passaporte de Segurança
	<p>Observações:</p>

Autorização para Edição**Acessibilidade**

Aprovado por: Data: Substitui:	Livre	
	EDP Distribuição	
	Restrita	X
	Confidencial	



CONSTRUÇÃO DE LINHA AT 60 KV

PLANO DE SEGURANÇA E SAÚDE NA FASE DE PROJECTO

3.1 OBJECTIVO E ÂMBITO

O presente Plano de Segurança e Saúde (PSS) tem por objectivo principal dar a conhecer:

- os riscos associados ao processo construtivo e aos materiais a aplicar, que não puderam ser evitados na fase de projecto;
- a organização e gestão da segurança que se pretende ver aplicada na obra que se projecta levar a execução.

Pretende ser um documento dinâmico que deverá ser desenvolvido e especificado para a fase de execução da obra, em conformidade com os meios materiais e humanos que vierem a ser envolvidos e os processos construtivos adoptados, tendo como objectivo a prevenção dos riscos profissionais, no respeito pelos seguintes princípios gerais de prevenção:

- avaliação dos riscos;
- eliminação dos riscos;
- combate dos riscos na origem;
- organização do trabalho;
- adaptação do trabalho ao homem;
- prioridade da protecção colectiva face à individual;
- informação e formação.

As disposições contidas no presente PSS não anulam ou modificam as disposições legais em vigor sobre segurança, higiene e saúde no trabalho.

A estrutura do PSS é constituída pelos seguintes capítulos:

- Caracterização da obra;
- Riscos associados ao meio envolvente;
- Fases da obra e programa de execução dos diversos trabalhos;
- Riscos evidenciados e medidas de prevenção;
- Riscos especiais;
- Gestão e organização do estaleiro de apoio;
- Lista de documentos associados e de regulamentação aplicável.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DA OBRA

A obra a executar consiste na construção de uma Linha de 60 kV, com comprimento de 4993 metros.

Local: A obra em causa desenvolver-se-á nas freguesias de Serzedo, S. Félix da Marinha e Grijó, no concelho de Vila Nova de Gaia, e na freguesia de Anta no concelho de Espinho.

Nesta obra serão montados postes metálicos, constituídos por estruturas reticuladas e postes em betão armado com as respectivas armações metálicas para fixação dos condutores. Os cabos condutores, a instalar, serão em alumínio – aço de 326 mm² de secção, sendo o cabo de guarda equipado com fibra óptica e de 204 mm² de secção.



CONSTRUÇÃO DE LINHA AT 60 KV

PLANO DE SEGURANÇA E SAÚDE NA FASE DE PROJECTO

3.3 RISCOS ASSOCIADOS AO MEIO ENVOLVENTE

Os riscos associados ao meio envolvente e as respectivas medidas de prevenção encontram-se assinalados no Anexo I.

3.4 FASES DA OBRA E PROGRAMA DE EXECUÇÃO DOS DIVERSOS TRABALHOS

A obra tem uma duração previsível de 4 meses assinalando-se as diversas fases e programa previstos, no Anexo II (Gráfico de Gant).

O desenvolvimento do programa dos trabalhos para a execução da obra deverá apresentar as cargas de mão-de-obra, expressos em homens e homens×hora, globalmente e por categorias profissionais.

3.5 RISCOS EVIDENCIADOS E MEDIDAS DE PREVENÇÃO

Os riscos evidenciados e habitualmente mais frequentes, associados ao processo construtivo e aos materiais a aplicar que não puderam ser eliminados em fase de projecto, bem como as respectivas medidas preventivas, de acordo com os princípios gerais de prevenção, encontram-se assinalados no Anexo III.

3.6 RISCOS ESPECIAIS

As fases de trabalhos e tipos de materiais que envolvem riscos especiais encontram-se, nas duas tabelas seguintes, identificados e avaliados:

TABELA 9 – FASES DE TRABALHOS COM RISCOS ESPECIAIS

Identificação		Avaliação			Prevenção
Fases de trabalho	Riscos especiais	B	M	E	
Montagem / desmontagem de estaleiro de apoio à obra	Montagem de elementos pré-fabricados	X			FSS 1.1, FSS 1.2, FSS 1.3
Piquetagem	Quedas em altura	X			
Abertura de faixa	Quedas em altura		X		FSS 3.1
	Proximidade de linhas eléctricas MT e AT			X	FSS 2.2, MSPRE, Reg. Consignações AT, MT, BT
	Efectuados em vias ferroviárias ou rodoviárias			X	FSS 2.4, FSS 3.5, FSS 10.5
Abertura de caboucos	Soterramento	X			FSS 4.1, FSS 4.2
	Quedas em altura	X			FSS 3.1
	Utilização de explosivos			X	FSS 6.1
Assemblagem de bases (a)	Montagem de elementos pré- -fabricados	X			FSS 1.1, FSS 1.2, FSS 1.3
Betonagem	Quedas em altura	X			FSS 3.1
	Soterramento	X			FSS 4.4
Assemblagem e levantamento / desmontagem de postes	Montagem de elementos pré- -fabricados		X		FSS1.1, FSS 1.2, FSS 1.3
	Quedas em altura			X	FSS 3.1, FSS 3.2, Manual Seg. Apoios e Fachadas
	Riscos químicos			X	FSS 6.2

	CONSTRUÇÃO DE LINHA AT 60 KV PLANO DE SEGURANÇA E SAÚDE NA FASE DE PROJECTO
---	--

	Proximidade de linhas eléctricas MT e AT			X	FSS 2.2, MSPRE, Reg. Consignações AT, MT, BT
Montagem / desmontagem de armações	Montagem de elementos pré-fabricados		X		FSS1.1, FSS1.2, FSS1.3
	Proximidade de linhas eléctricas MT e AT			X	FSS2.2, MSPRE, Reg. Consignações AT, MT, BT
	Quedas em altura			X	FSS3.1, FSS3.2, Manual Seg. Apoios e Fachadas
Montagem / desmontagem de condutores	Montagem de elementos pré-fabricados			X	FSS 1.1, FSS 1.2, FSS 1.3
	Quedas em altura			X	FSS 3.1, FSS 3.2, Manual Seg. Apoios e Fachadas
	Proximidade de linhas eléctricas MT e AT			X	FSS 2.2, MSPRE, Reg. Consignações AT, MT, BT
	Efectuados em vias ferroviárias ou rodoviárias			X	FSS 2.4, FSS 3.5, FSS 10.5
	Afogamento		X		FSS 2.4
Montagem / desmontagem de cadeias	Montagem de elementos pré-fabricados			X	FSS 1.1, FSS 1.2, FSS1.3
	Quedas em altura			X	FSS3.1, FSS3.2, Manual Seg. Apoios e Fachadas
	Proximidade de linhas eléctricas MT e AT			X	FSS2.2, MSPRE, Reg. Consignações AT, MT, BT

TABELA 10 – LISTA DE MATERIAIS COM RISCOS ESPECIAIS

Identificação		Avaliação			Prevenção
Fases de trabalho	Riscos especiais	B	M	E	
Postes de betão	Montagem de elementos pré-fabricados			X	FSS 1.1, FSS 1.2, FSS 1.3
Postes metálicos	Montagem de elementos pré-fabricados			X	FSS 1.1, FSS 1.2, FSS 1.3
Bobinas de cabo	Montagem de elementos pré-fabricados			X	FSS 1.1, FSS 1.2, FSS 1.3
Cadeias de isoladores	Montagem de elementos pré-fabricados		X		FSS 1.1, FSS 1.2
Armações para postes de betão	Montagem de elementos pré-fabricados		X		FSS 1.1, FSS 1.2

* - B (Baixo); M (Médio); E (Elevado)



CONSTRUÇÃO DE LINHA AT 60 KV
PLANO DE SEGURANÇA E SAÚDE NA FASE DE PROJECTO

3.7 GESTÃO E ORGANIZAÇÃO DO ESTALEIRO

O estaleiro de apoio à obra terá de estar organizado de forma que seja perfeitamente distinto a área das instalações sociais; o parque de máquinas; a armazenagem dos materiais para aplicação; a armazenagem de resíduos e a armazenagem das ferramentas e equipamentos.

O estaleiro de obra deve ser sinalizado e delimitado sempre que necessário, com especial incidência nas fases de maior potencial de ocorrência de acidente (nomeadamente, abertura de caboucos; arvoreamento de apoios; movimentação de máquinas).

O Adjudicatário deverá implementar as medidas de organização e gestão do estaleiro de forma a dar cumprimento às obrigações constantes do Caderno de Encargos, nomeadamente:

- Disposições sobre Segurança, Higiene e Saúde no Trabalho insertas nas Condições Gerais do Contrato;
- Regulamento de Segurança na Execução de Trabalhos para as Empresas do Grupo EDP.

3.7.1 Organograma Funcional da Empreitada

A Entidade Executante deverá elaborar o Organograma Funcional da Empreitada e afixá-lo no estaleiro para que possa ser consultado por todos os trabalhadores presentes.

3.7.2 Difusão da Informação sobre Segurança

A Entidade Executante colocará vitrine destinada às informações relativas à segurança com o objectivo de manter informados os trabalhadores presentes no estaleiro.

Nos estaleiros de apoio, caso existam, deverá ser afixada a documentação imposta legalmente, nomeadamente por imposição do DL 273/2003.

Cada entidade empregadora deverá informar a Entidade Executante da identidade dos técnicos afectos aos serviços de segurança, higiene e saúde no trabalho e dos representantes dos trabalhadores em matéria de segurança, higiene e saúde no trabalho, com vista a eventual convocatória para participação em reuniões, nos assuntos relacionados com a segurança, higiene e saúde nos trabalhos do estaleiro.

3.7.3 Implantação do Estaleiro de Apoio

Localização

[A preencher pela entidade executante]

Acessos ao Estaleiro

[A preencher pela entidade executante, com indicação precisa (lugar, rua;etc...)]



CONSTRUÇÃO DE LINHA AT 60 KV
PLANO DE SEGURANÇA E SAÚDE NA FASE DE PROJECTO

Vedações

O estaleiro de apoio terá de ser vedado, de tal modo que apenas permita a entrada no interior do estaleiro a partir dos portões de acesso, local onde deverá ser controlada a entrada de estranhos.

Redes Técnicas do Estaleiro

A área social do estaleiro (dormitórios; refeitórios; balneários e sanitários) que poderá estar fisicamente afastada do estaleiro de apoio, terá de ser dotada de energia eléctrica, esgotos ligados à rede pública ou a fossa séptica; água potável e água aquecida.

3.8 LISTA DE ANEXOS E DE DOCUMENTOS ASSOCIADOS

ANEXO I – RISCOS ASSOCIADOS AO MEIO ENVOLVENTE

ANEXO II – RISCOS EVIDENCIADOS E MEDIDAS DE PREVENÇÃO

ANEXO III – PLANO DE EMERGÊNCIA

ANEXO IV – CRONOGRAMA DE TRABALHOS NO DECURSO DA OBRA
[A preencher pela entidade executante]

REGULAMENTO DE SEGURANÇA NA EXECUÇÃO DE TRABALHOS PARA AS EMPRESAS DO GRUPO EDP

MANUAL DE SEGURANÇA – PREVENÇÃO DO RISCO ELÉCTRICO

MANUAL DE SEGURANÇA – TRABALHOS EM APOIOS E FACHADAS

FICHAS DE SEGURANÇA E SAÚDE

REGULAMENTO DE CONSIGNAÇÕES AT, MT E BT

 EDP Distribuição	CONSTRUÇÃO DE LINHAS AT 60 KV ANEXO I – RISCOS ASSOCIADOS AO MEIO ENVOLVENTE
---	---

	E	O	RISCOS/SITUAÇÕES PERIGOSAS	MEDIDAS DE PREVENÇÃO
Localização da obra / estaleiro				
Estradas e Acessos	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> Deterioração <input type="checkbox"/> Desabamentos <input type="checkbox"/> Zonas de acidentes frequentes <input checked="" type="checkbox"/> Zonas de trânsito congestionado Restrições de circulação	<input checked="" type="checkbox"/> -FSS 10.1 – Delimitação e acessos ao estaleiro <input checked="" type="checkbox"/> -Colocar sinalização e demarcar a zona <input checked="" type="checkbox"/> -Definir zonas de circulação <input checked="" type="checkbox"/> -Solicitar autorizações legais <input checked="" type="checkbox"/> -Criar trajectos alternativos
Geologia				
Geologia (solo, subsolo, lençóis de água, poços, etc.) Relevo Terrenos agrícolas	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> Afogamento <input type="checkbox"/> Afundamento <input type="checkbox"/> Atolamento de máquinas <input type="checkbox"/> Capotamento de máquinas <input type="checkbox"/> Culturas <input type="checkbox"/> Desabamentos <input type="checkbox"/> Deslizamento ou aluimento <input type="checkbox"/> Despenhadeiros <input type="checkbox"/> Inundações <input type="checkbox"/> Produtos químicos <input type="checkbox"/> Quedas a nível diferente <input type="checkbox"/> Subida dos níveis freáticos <input type="checkbox"/> Vedações	<input type="checkbox"/> -FSS 2.4 – Cruzamento e travessia de obstáculos <input type="checkbox"/> -FSS 12.7 – Geologia <input type="checkbox"/> -FSS 12.8 – Relevo <input type="checkbox"/> -Reconhecimento / estudo preliminar geotécnico da natureza do solo <input type="checkbox"/> -Ancoragem de taludes <input type="checkbox"/> -Eliminação de elementos instáveis <input type="checkbox"/> -Colocar sinalização e demarcar a zona
Interferências com redes técnicas				
Proximidade de linhas aéreas de electricidade	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> Acidente eléctrico / Queimaduras	<input checked="" type="checkbox"/> -FSS 2.2 – Trabalhos na vizinhança de instalações eléctricas em tensão <input checked="" type="checkbox"/> -FSS 2.4 – Cruzamento e travessia de obstáculos
Proximidade de redes subterrâneas de electricidade	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> Acidente eléctrico / Queimaduras <input checked="" type="checkbox"/> Incêndio	<input type="checkbox"/> -FSS 12.9 – Interferência com redes eléctricas subterrâneas
Proximidade de linhas aéreas de telefones Proximidade de redes subterrâneas de telefones	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> Corte de comunicações <input checked="" type="checkbox"/> Electrocussão	<input checked="" type="checkbox"/> -FSS 2.4 – Cruzamento / travessia de obstáculos <input type="checkbox"/> -FSS 12.5 – Interferência com redes telefónicas
Proximidade de redes de águas Proximidade de redes de esgotos	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> Rotura de condutas / Inundações <input type="checkbox"/> Desabamentos <input type="checkbox"/> Intoxicações/Infecções	<input type="checkbox"/> -FSS 12.3 – Interferência c/ redes de águas <input type="checkbox"/> -FSS 12.4 – Interferência c/ redes de esgotos
Proximidade de oleodutos e gasodutos	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> Rotura de condutas <input type="checkbox"/> Explosão/Projectão de objectos <input type="checkbox"/> Intoxicação/Asfixia	<input type="checkbox"/> -FSS 12.2 – Interferência com oleodutos e gasodutos
Cruzamentos / travessias				
Linhas eléctricas	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> Acidente eléctrico / Queimaduras	<input checked="" type="checkbox"/> -FSS 2.4 – Cruzamento e travessia de obstáculos

	CONSTRUÇÃO DE LINHAS AT 60 KV ANEXO I – RISCOS ASSOCIADOS AO MEIO ENVOLVENTE
---	---

Caminhos de ferro	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> Catenárias (indução e electrocussão) <input type="checkbox"/> Atropelamentos	<input type="checkbox"/> –FSS 2.4 – Cruzamento e travessia de obstáculos <input type="checkbox"/> –FSS 12.6 – Proximidade de linhas de caminho de ferro
Linhas / Cursos de água	<input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> Afogamento / <input type="checkbox"/> Afundamento <input type="checkbox"/> Subida dos níveis freáticos <input type="checkbox"/> Inundações <input checked="" type="checkbox"/> Afogamento <input type="checkbox"/> Deslizamento / aluimento de terras <input type="checkbox"/> Capotamento de máquinas	<input type="checkbox"/> –FSS 2.4 – Cruzamento e travessia de obstáculos <input type="checkbox"/> –Estudo do relevo <input type="checkbox"/> –Medidas de salvamento aquático
Edifícios / habitações/muros	<input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> Transposição de edifícios <input checked="" type="checkbox"/> Quedas de altura <input type="checkbox"/> Desmoronamento	<input checked="" type="checkbox"/> –FSS 2.4 – Cruzamento e travessia de obstáculos <input type="checkbox"/> –FSS 3.4 – Trabalhos em cobertura de edifícios

E – Estaleiro O – Obra

	CONSTRUÇÃO DE LINHA AT 60 KV
---	-------------------------------------

ANEXO II – RISCOS EVIDENCIADOS E MEDIDAS DE PREVENÇÃO

OPERAÇÕES	MATERIAIS	EQUIPAMENTOS	RISCOS	PREVENÇÃO
Organização do estaleiro <input checked="" type="checkbox"/>	Combustíveis Ferro Madeiras Inertes Cimento Bobinas de cabo Tubos e barras de Fe/Cu/Al	Infra-estruturas: - acessos - delimitação - circulações - escritório - armazéns - instalações sociais - carpintarias - estaleiro de ferro - estaleiro de metalomecânica - instalação eléctrica da obra Máquinas Ferramentas	Atropelamento Colisão Queda ao mesmo nível Queda de altura Queda de objectos Cortes Entalamentos Esmagamento Electrocussão Incêndio Explosão Queimaduras Intoxicação	FSS 10.1 – Delimitação e acessos do estaleiro FSS 10.2 – Armazenagem de materiais, equipamentos e resíduos FSS 10.3 – Instalação eléctrica do estaleiro FSS 3.1 – Trabalhos em altura – escadas portáteis
FUNDAÇÕES				
Abertura da cova ou caboucos <input checked="" type="checkbox"/>	Explosivos Madeira Inertes	Retroescavadora Compressor Martelo pneumático Ferramentas manuais	Manuseamento de explosivos Quedas a nível diferente Queda de objectos Poeiras e gases Ruído Soterramento Vibrações	FSS 1.1 – Movimentação manual de cargas FSS 4.1 – Movimentação de terras FSS 4.2 – Abertura de caboucos para maciços de fundação FSS 6.1 – Emprego de explosivos FSS 13.2 – Exposição ao ruído FSS 13.3 – Exposição a vibrações

	CONSTRUÇÃO DE LINHA AT 60 KV
---	-------------------------------------

Betonagem <input checked="" type="checkbox"/> - Execução de maciços em betão - Execução de cabeças de diamante	Cofragens Inertes Água Cimento	Betoneira Ferramentas manuais Veículo de transporte de betão Vibrador	Entalamento Cortes Quedas a nível diferente Queda de objectos Sobreesforços	FSS 1.1 – Movimentação manual de cargas FSS 4.4 – Betonagem
Montagem de eléctrodo de terra com brocagem de furo <input checked="" type="checkbox"/>	Braçadeiras Inertes Cabo eléctrico Carvão vegetal Tubo galvanizado Eléctrodo de terra	Equipamento de perfuração	Poeiras e gases Ruído Vibrações	FSS 13.2 – Exposição ao ruído FSS 13.3 – Exposição a vibrações
Cobertura e terraplanagem <input checked="" type="checkbox"/> - Enchimento das covas ou caboucos - Regularização do terreno - Transporte dos produtos de escavação	Inertes	Ferramentas manuais Retro escavadora	Atropelamentos Colisão Quedas a nível diferente	FSS 1.1 – Movimentação manual de cargas FSS 1.2 – Movimentação de cargas pesadas FSS 4.1 – Movimentação de terras
POSTES E ARMAÇÕES				
Transporte de postes <input checked="" type="checkbox"/> - Carregamento em fábrica ou armazém - Transporte para o local de montagem - Descarga no local de montagem	Postes de betão Postes metálicos	Camião com grua Cabos de aço Estropos Empilhadores	Atropelamento Colisão Entalamento Esmagamento Queda de objectos Sobreesforços	FSS 1.1 - Movimentação manual de cargas FSS 1.2 - Movimentação de cargas pesadas FSS 1.3 - Utilização de cabos de aço
Arvoreamento de postes de betão <input checked="" type="checkbox"/>	Postes de betão	Camião com grua Cabos de aço Cordas de espiamento Estropos	Electrocussão Entalamento Esmagamento Quedas de altura	FSS 1.1 - Movimentação manual de cargas FSS 1.2 - Movimentação de cargas pesadas

	CONSTRUÇÃO DE LINHA AT 60 KV			
		Ferramentas manuais Forquilhas Mastro Tirfor	Queda de objectos	FSS 1.3 - Utilização de cabos de aço FSS 2.2 - Trabalhos na vizinhança de instalações em tensão Manual de Seg. Trabalhos em Apoios e Fachadas
Montagem da armação <input checked="" type="checkbox"/>	Travessas metálicas	Camião com grua Cordas de serviço Escadas Ferramentas manuais	Entalamento Esmagamento Quedas de altura Queda de objectos	FSS 1.1 - Movimentação manual de cargas FSS 1.2 - Movimentação de cargas pesadas FSS 1.3 - Utilização de cabos de aço FSS 3.1 - Trabalhos com escadas FSS 3.2 - Trabalhos em altura - postes metálicos Manual de Seg. Trabalhos em Apoios e Fachadas
Assemblagem e montagem de postes metálicos <input checked="" type="checkbox"/>	Postes metálicos	Camião com grua Cabos de aço Cordas de espiamento Estropos Ferramentas manuais Forquilhas Mastro Tirfor	Electrocussão Entalamento Esmagamento Cortes Quedas de altura Queda de objectos	FSS 1.1 - Movimentação manual de cargas FSS 1.2 - Movimentação de cargas pesadas FSS 1.3 - Utilização de cabos de aço FSS 2.2 - Trabalhos na vizinhança de instalações em tensão FSS 3.2 - Trabalhos em altura - postes metálicos FSS 5.1 - Assemblagem e montagem de postes

	CONSTRUÇÃO DE LINHA AT 60 KV
---	-------------------------------------

CONDUTORES				metálicos
Cruzamento e travessia de obstáculos <input checked="" type="checkbox"/> - Montagem de estruturas tipo pórtico para protecção de travessias de obstáculos - Fundações	Cofragens Inertes Água Cimento Cordas Espias de aço Estruturas metálicas Varolas de madeira	Ferramentas manuais Martelo pneumático Compressor Camião com grua Escadas Estropos	Electrocussão Quedas de altura Queda de objectos Ruído Vibrações	FSS 1.1 - Movimentação manual de cargas FSS 1.2 - Movimentação de cargas pesadas FSS 2.2 - Trabalhos na vizinhança de instalações em tensão FSS 2.4 - Cruzamento e travessia de obstáculos
Montagem de cadeias e isoladores <input checked="" type="checkbox"/> - Montagem de cadeias no solo - Elevação das cadeias ou isoladores rígidos e fixação ao poste	Isoladores Acessórios de cadeias	Cordas de serviço Escadas Ferramentas manuais	Quedas de altura Queda de objectos	FSS 1.1 - Movimentação manual de cargas FSS 3.2 - Trabalhos em altura - postes metálicos Manual de Seg. Trabalhos em Apoios e Fachadas
Desenrolamento de condutores <input checked="" type="checkbox"/>	Bobinas de condutores e cabo de guarda Espias de aço	Cavaletes de desenrolamento Equipamento de desenrolamento em tensão mecânico Cordas de serviço Guincho Ligação à terra Roldanas	Electrocussão Entalamento Quedas de altura Queda de objectos	FSS 5.2 - Desenrolamento e colocação de condutores em tensão mecânica FSS 5.3 - Desenrolamento e colocação de condutores (regulação manual)
Regulação de condutores <input checked="" type="checkbox"/> - Por medição das flechas dos cabos - Por dinamómetro		Cordas de serviço Dinamómetro Equipamento de medição de flechas Estropos de aço	Electrocussão Quedas de altura Queda de objectos	FSS 3.2 - Trabalhos em altura - postes metálicos Manual de Seg. Trabalhos em

	CONSTRUÇÃO DE LINHA AT 60 KV
---	-------------------------------------

		Ligação à terra Mordentes Tirfor/tirvit/morris		Apoios e Fachadas
Fixação de condutores <input checked="" type="checkbox"/>	Filaças Pinças de amarração e de suspensão Vareta de protecção	Cordas de serviço Compressores, prensas e matrizes Equipamento de corte Escadas Ligação à terra Ferramentas manuais	Electrocussão Quedas em altura Queda de objectos	FSS 3.2 - Trabalhos em altura - postes metálicos Manual de Seg. Trabalhos em Apoios e Fachadas
Montagem de equipamento acessório <input checked="" type="checkbox"/>	Anti-vibrador Esferas de sinalização Descarregadores de sobretensões Espanta-pássaros Ferragem para ninho de cegonha	Corda de serviço Ferramentas manuais Máquina de fita "band-it"	Quedas de altura Queda de objectos	FSS 1.1 - Movimentação manual de cargas FSS 3.2 - Trabalhos em altura - postes metálicos Manual de Seg. Trabalhos em Apoios e Fachadas
Limpeza de vegetação <input checked="" type="checkbox"/> - Desrame e corte de árvores		Cabos de aço Cordas de espionamento Escadas Ferramentas manuais Motosserra Tirfor	Cortes e dilacerações Entalamento Quedas em altura Queda de objectos	FSS 3.1 - Trabalhos com escadas FSS 12.1 - Abate e desrame de árvores

	CONSTRUÇÃO DE LINHA AT 60 KV
---	-------------------------------------

ANEXO III – PLANO DE EMERGÊNCIA

- Constitui obrigação do empregador o estabelecimento das medidas a adoptar em caso de ocorrência de acidente ou mesmo de uma catástrofe (incêndios, explosões, sismos, inundações).
- Deverão ser previstas medidas eficazes para primeiros socorros e para evacuação de sinistrados ou de todos os trabalhadores em caso de acidente.

TELEFONES DE EMERGÊNCIA

(Distrito: Porto)

SOS – NÚMERO NACIONAL DE SOCORRO BOMBEIROS INTOXICAÇÕES (CENTRO INFORMAÇÕES ANTI-VENENO) PROTECÇÃO CIVIL POLÍCIA GUARDA NACIONAL REPUBLICANA	     	112 808250143	IDICT - INST. DE DESENVOLVIMENTO E INSPECCÃO DAS CONDIÇÕES DE TRABALHO SEGURADORA DA EMPREITADA ELECTROMECHANICA COORDENADOR DE SEGURANÇA E SAUDE SERVIÇOS DE SEGURANÇA DA EMPRESA DIRECTOR DA OBRA ELECTROMECHANICA	    
HOSPITAL			INSTALAÇÃO	
ÁGUA ESGOTOS ELECTRICIDADE GÁS TELEFONES TELEVISÃO POR CABO	     			

4.1 DEFINIÇÕES

O campo electromagnético produzido por uma linha aérea de alta tensão consiste no campo eléctrico e no campo magnético induzido pela mesma, aquando do seu funcionamento.

O conceito de campo eléctrico foi introduzido pela teoria electromagnética para descrever as forças existentes entre as cargas eléctricas. O campo eléctrico, num ponto do espaço, produzido por uma ou várias cargas eléctricas, define-se em termos da força que uma carga situada no dito ponto experimenta. Se as cargas que induzem o campo são de igual sinal a força exercida será repulsiva, caso contrário a força será atractiva.

A intensidade do campo eléctrico criado por uma carga num dado ponto é inversamente proporcional ao quadrado da distância do ponto à carga. O seu valor é também função da tensão do sistema eléctrico, quanto mais elevada é a tensão mais intenso é o campo eléctrico gerado. Esta intensidade expressa-se em Volt por metro (V/m) ou no seu múltiplo: kV/m.

O campo magnético é um conceito introduzido pela teoria electromagnética para explicar as forças que aparecem entre correntes eléctricas. O campo magnético é produzido por cargas em movimento, ou seja por correntes eléctricas, embora também possa ser produzido por ímanes permanentes.

A intensidade do campo magnético, tal como a intensidade do campo eléctrico, diminui rapidamente com a distância ao ponto que o gera. O seu valor é proporcional ao valor da corrente que o gera: quanto mais elevada é a intensidade de corrente, maior é o campo magnético resultante.

O campo eléctrico existe sempre que há cargas eléctricas na proximidade, mas o campo magnético só existe se essas cargas estiverem em movimento.

Os campos eléctricos e magnéticos podem ser classificados de naturais ou de artificiais, conforme tenham origem na natureza, ou resultem da intervenção humana. O campo electromagnético produzido por uma linha aérea de alta tensão é logicamente artificial.

4.2 JUSTIFICAÇÃO DO ESTUDO

A exposição a campos electromagnéticos não é um fenómeno novo. No entanto, no século XX a exposição ambiental aumentou de forma contínua de acordo com o crescente consumo de electricidade e o constante avanço das tecnologias.

As mudanças nos hábitos sociais geram cada vez mais fontes artificiais de campos electromagnéticos. Todos estamos expostos a uma combinação de campos eléctricos e magnéticos fracos, tanto em casa, como no local de trabalho, desde os campos induzidos pela geração e transmissão de electricidade, aos induzidos pelos electrodomésticos e equipamentos industriais, e aos induzidos pelas telecomunicações e pela difusão da rádio e televisão.

Os campos eléctricos afectam o normal funcionamento do organismo humano, como afectam qualquer outro material formado por partículas carregadas. Na presença de um campo eléctrico a distribuição das cargas eléctricas é afectada, originando uma corrente que atravessa o organismo. No entanto se a intensidade do campo existente for pequena não são registados efeitos perturbantes no funcionamento do organismo.

Também os campos magnéticos exercem influências sobre o funcionamento do organismo humano, na presença destes campos são induzidas correntes eléctricas que circulam no organismo. Se a intensidade do campo existente for suficientemente elevada a corrente induzida pode estimular os nervos e músculos e afectar outros processos biológicos.

Numa altura em que populações portuguesas se manifestam, preocupadas com o seu bem-estar, contra a construção de linhas aéreas de alta tensão, e estão acesas discussões sobre os eventuais efeitos nefastos na saúde das populações residentes na proximidade de linhas

aéreas de alta tensão, devidos à exposição aos campos electromagnéticos induzidos pelas linhas, faz sentido o estudo e cálculo do campo electromagnético induzido por uma linha aérea de alta tensão.

4.3 EFEITOS BIOLÓGICOS DOS CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS NAS PESSOAS

No interior e no exterior de todas as células do corpo humano existe uma grande quantidade de cargas eléctricas livres, cujo movimento gera múltiplas correntes eléctricas. O corpo humano funciona em grande parte graças a estas correntes eléctricas endógenas, por exemplo, o bater do coração apresenta actividade eléctrica que os médicos podem detectar através de um electrocardiograma.

A densidade de corrente natural do corpo humano é aproximadamente de 1 a 10 mA/m², mas pode no entanto ser muito superior em determinadas zonas. Uma contracção ventricular do coração pode alcançar 1400 mA/m².

Existe um campo magnético terrestre natural, estático, de aproximadamente 40 μT de intensidade. Este campo, embora sendo estático, pode induzir correntes numa pessoa quando esta se move dentro do mesmo. Por exemplo, girar a cabeça de cima para baixo, num gesto rápido, como um assentimento, induz correntes equivalentes a uma exposição de 2 μT .

A exposição a um campo magnético ou eléctrico faz com que as cargas eléctricas no interior do organismo sejam submetidas a uma certa força e se movam. Desta forma induzem-se correntes eléctricas no interior do organismo, cuja magnitude depende da intensidade do campo a que está exposto. Estas correntes induzidas apresentam diferentes sentidos consoante sejam induzidas por campos eléctricos, ou por campos magnéticos.

A intensidade da corrente induzida, que se pode expressar na forma de densidade de corrente (A/m²), depende de muitos factores tais como: a intensidade do campo externo, a distância do corpo à fonte, a presença de objectos que podem dispersar ou concentrar o campo, a forma e postura do corpo, etc. Por exemplo, a corrente induzida numa pessoa que se encontre debaixo de uma linha aérea de tensão não é a mesma se a pessoa estiver de pé ou sentada.

Uma das propriedades do campo electromagnético é a de transmitir energia a grandes distâncias por meio de ondas, em ausência de meio material. A frequência de transmissão determina a quantidade de energia transmitida e também o tipo de efeitos que a onda electromagnética pode produzir num organismo. Quanto mais elevada é a frequência, mais curto é o comprimento da onda e mais pequena é a distância entre uma onda e a seguinte. Deste modo é maior a quantidade de energia que se transmite, mas são também mais fortes os efeitos nos organismos atravessados por estas ondas. O espectro de frequências pode-se dividir em duas partes claramente distintas. Radiações ionizantes e radiações não ionizantes.

Com frequências elevadas a radiação é muito energética e pode ionizar os átomos: pode produzir alterações genéticas e doenças como o cancro. É nesta gama de frequências que se encontram os raios X e os raios gamma.

Os campos gerados pela energia eléctrica têm uma frequência de 50 Hz, frequência industrial utilizada no transporte e distribuição de energia, e por isso níveis de energia muito baixos que não podem produzir ionização.

De acordo com o guia da Comissão Internacional para a Protecção Frente a Radiações Não Ionizantes (ICNIRP), avaliado pelo Comité Científico Director da União Europeia, os únicos efeitos nocivos conhecidos e comprovados dos campos eléctricos e magnéticos de frequência industrial são os efeitos a curto prazo que se produzem quando a densidade de

corrente induzida ultrapassa certos valores. Os efeitos conhecidos resumem-se na tabela seguinte.

TABELA 11 – EFEITOS BIOLÓGICOS, A CURTO PRAZO, PROVOCADOS PELA DENSIDADE DE CORRENTE INDUZIDA.

Densidade de corrente induzida	Efeitos biológicos
< 1 mA/m ²	Não há efeitos biológicos.
1-10 mA/m ²	Efeitos biológicos mínimos, não significativos.
10-100 mA/m ²	Possíveis efeitos no sistema visual e no sistema nervoso: pequenas contracções musculares, mas sem riscos para a saúde.
100-1000 mA/m ²	Estimulação de tecidos, por exemplo de nervos ou músculos: contracções musculares e arritmias, com possíveis riscos para a saúde.
>1000 mA/m ²	Fibrilação ventricular, com riscos comprovados para a saúde.

Em função destes resultados existem normas internacionais sobre a exposição laboral e pública a campos electromagnéticos de frequência industrial. Na tabela seguinte são apresentados os valores considerados na União Europeia.

TABELA 12 – LIMITES E RECOMENDAÇÕES DE EXPOSIÇÃO DO PÚBLICO EM GERAL A CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS DE FREQUÊNCIA INDUSTRIAL, NA UNIÃO EUROPEIA.

Campo Eléctrico (kV/m)	Campo magnético (μT)
5	100

A exposição a campos electromagnéticos está portanto sujeita a regulamentação, e por isso não é de esperar que, se cumprida regulamentação, haja efeitos nocivos na saúde da população.

A controvérsia actual centra-se na existência ou na ausência de efeitos prejudiciais na saúde das populações expostas a longo prazo a campo eléctricos e magnéticos de baixo valor. Ao longo dos últimos anos têm-se realizado diversos estudos, mas nenhum até hoje se relevou conclusivo neste aspecto.

Os campos electromagnéticos são usualmente associados a linhas de transporte e linhas de distribuição de energia. Muita preocupação tem surgido em relação aos possíveis efeitos adversos na saúde das populações na vizinhança de linhas eléctricas. A maior parte da pesquisa efectuada, ao longo das últimas décadas, para determinar o risco de efeitos negativos na saúde das populações que vivem na proximidade de linhas eléctricas, tem-se revelado insuficiente para estabelecer uma relação causa-efeito definitiva.

4.4 CAMPO MAGNÉTICO

Em física denomina-se por campo a zona do espaço onde se exercem forças. O campo magnético é gerado na presença de ímanes, ou de cargas eléctricas em movimento (correntes eléctricas). O campo magnético exerce forças sobre cada electrão em movimento. Essa força é grande quando o electrão se desloca perpendicularmente às linhas do campo, e é zero quando o electrão se move na mesma direcção do campo magnético. A direcção da força exercida é perpendicular tanto à direcção do movimento como à do campo magnético.

O campo magnético expressa-se em ampere por metro (A/m). No entanto é mais usual representar o campo magnético mediante a indução magnética ou densidade de fluxo magnético B , que se exprime habitualmente em microtesla (μT).

4.4.1 A LEI DE BIOT-SAVART

Na primeira metade do século XIX houve muitas investigações acerca do campo magnético criado por correntes. Biot e Savart determinaram que na vizinhança de um circuito eléctrico C , tal como o apresentado na figura a seguir, que conduz uma corrente estacionária I , existe um campo magnético que num ponto P do espaço é dado pela expressão seguinte.

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \oint_C \frac{d\vec{l} \times \hat{r}}{r^2}$$

em que:

B é a indução magnética;

μ_0 é a permeabilidade do espaço livre: $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$;

I é a intensidade de corrente que percorre o circuito;

$d\vec{l}$ é uma porção do circuito;

\hat{r} é o vector unitário que aponta da fonte para o ponto de observação P ;

r é distancia entre a fonte e o ponto de observação.

Este integral também se aplica a campos de correntes alternadas, desde que o tempo r/c , onde c é a velocidade da luz, seja uma fracção pequena de um período.

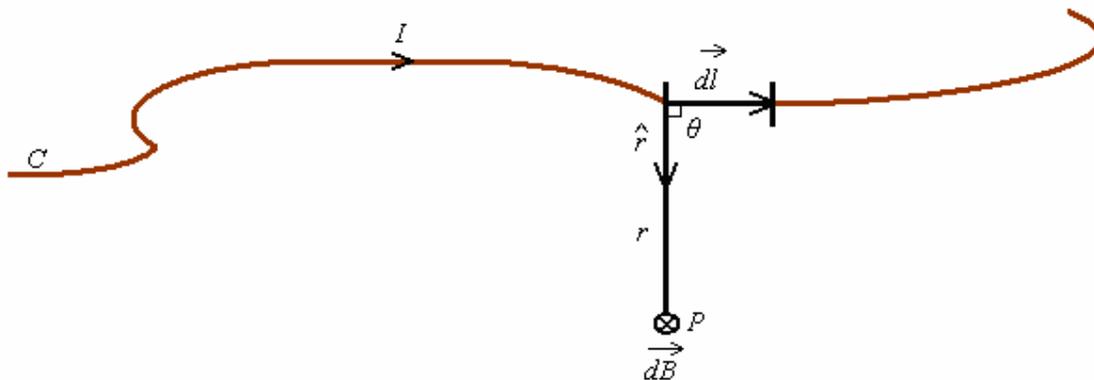


FIGURA 9 – CIRCUITO C QUE CONDUZ UMA CORRENTE I E UM PONTO P NO CAMPO MAGNÉTICO PRODUZIDO PELA CORRENTE.

Em particular, o campo magnético criado por um fio rectilíneo e infinito pode ser obtido a partir da expressão apresentada a seguir somando todas as contribuições para esse campo com origem em todos os elementos infinitesimais do fio tal como se mostra na figura seguinte, onde d é a distância do ponto P ao fio de corrente e \hat{e} é o vector unitário perpendicular ao papel que aponta "para lá".

$$\vec{B} = \int_C \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{d\vec{l} \times \hat{r}}{r^2} = \frac{\mu_0 I}{2\pi d} \hat{e}$$

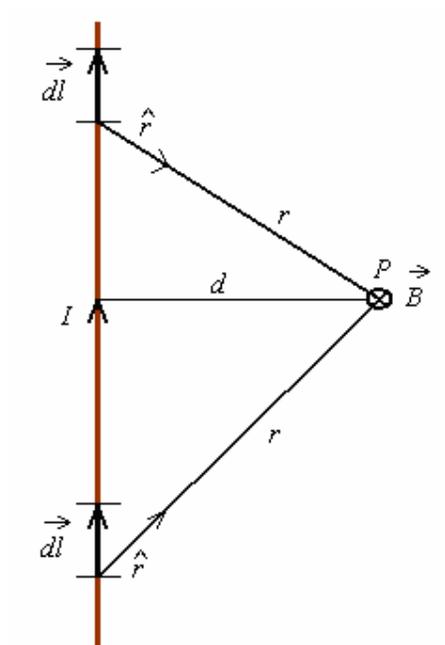


FIGURA 10 – UM FIO LONGO E RECTILÍNEO CONDUZINDO UMA CORRENTE I.

O campo magnético produzido pela corrente eléctrica num fio rectilíneo depende basicamente de dois factores: da intensidade de corrente e da distância ao fio. Quanto maior for o valor da corrente, maior será o campo magnético criado por ela. Por outro lado, quanto maior for a distância ao fio, menor será o valor do campo magnético. As linhas do campo magnético são circulares, centradas no fio.

O sentido das linhas do campo magnético pode ser obtido pela regra da mão direita: segurando o condutor com a mão direita, de maneira a que o polegar aponte no sentido da corrente, os dedos apontarão no sentido das linhas do campo.

4.4.2 A LEI DE AMPÈRE

A Lei de Biot-Savart é geral, mas a sua aplicação pode ser trabalhosa pois envolve um integral. Existe uma expressão equivalente que permite obter os campos magnéticos a partir de uma distribuição de correntes: a Lei de Ampère, que pode ser muito útil em certas circunstâncias, designadamente por os cálculos envolvidos serem mais simples.

Sabe-se já que fora do condutor o campo magnético criado por uma corrente I, rectilínea e infinita, é em módulo dada pela expressão seguinte. Sabe-se também que o campo é tangente à circunferência num plano perpendicular à corrente, com centro num ponto da corrente. Na figura seguinte é apresentada a direcção e o sentido do campo magnético criado por um condutor cilíndrico percorrido por uma corrente i.

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi d}$$

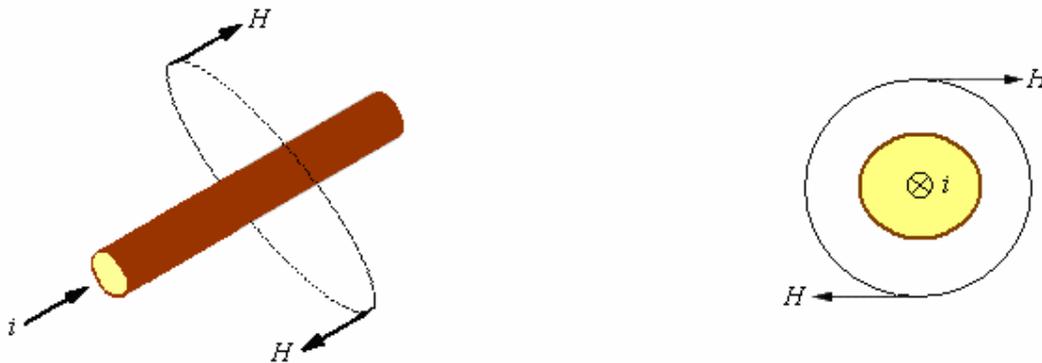


FIGURA 11 – CAMPO MAGNÉTICO INDUZIDO POR UMA CORRENTE QUE PERCORRE UM CONDUTOR CILÍNDRICO

4.4.2 PRINCÍPIO DA SOBREPOSIÇÃO

O princípio da sobreposição aplica-se a campos magnéticos e a campos eléctricos. Uma vez que estes são dados por integrais, se existirem várias distribuições de correntes, então o campo magnético total será igual à soma dos campos individuais.

4.5 CÁLCULO DO CAMPO MAGNÉTICO PRODUZIDO POR LINHAS AÉREAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA

4.5.1 MODELO DE CÁLCULO

Neste modelo de cálculo, do campo magnético das linhas aéreas de transmissão de energia, considera-se que os condutores são paralelos entre si e de extensão infinita. Na generalidade dos casos das linhas de transporte e distribuição de energia, dado o comprimento dos vãos, as considerações efectuadas não introduzem erros de cálculo significativos. Também são desprezadas as correntes de retorno pela terra e correntes nos cabos de guarda. As correntes de defeito que se escoam pelos cabos de guarda produzem picos de campo magnético de muita curta duração, cujos efeitos não são relevantes.

Utilizando um modelo bidimensional, onde a geometria é definida num plano vertical transversal à linha, e aplicando a *Lei de Ampère* pode-se escrever a expressão seguinte. O valor da indução magnética B num ponto p de coordenadas (x_p, y_p) em resultado da corrente I_i que circula no condutor i , centrado no ponto de coordenadas (x_i, y_i) é dado pela expressão seguinte.

$$\vec{B}_{p,i} = \frac{\mu_0 I_i}{2\pi r_{ip}} \vec{r}_{ip}$$

Na expressão anterior r_{ip} é a distância entre o ponto p e o condutor i , e \vec{r}_{ip} é o versor que indica a direcção do campo magnético no ponto p .

$$r_{ip} = \sqrt{(x_i - x_p)^2 + (y_i - y_p)^2}$$

e

$$\vec{r}_{ip} = \frac{x_i - x_p}{r_{ip}} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} + \frac{y_i - y_p}{r_{ip}} \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \end{bmatrix}$$

Aplicando o princípio da sobreposição, o campo magnético total é dado pela soma das contribuições devidas às correntes em todos os n condutores da linha. Chega-se assim à seguinte expressão.

$$\vec{B}_p = \sum_{i=1}^n \frac{\mu_0 I_i}{2\pi r_{ip}} \vec{r}_{ip}$$

A transmissão de energia nas linhas aéreas, em Portugal, faz-se em corrente alternada com uma frequência de 50 Hz. As expressões deduzidas anteriormente apoiam-se na lei de Ampère que se aplica às correntes estacionárias, ou a correntes alternadas desde que a condição seguinte seja satisfeita, onde c é a velocidade da luz, r é a distância à fonte de corrente ao ponto, e T é o período da corrente.

$$\frac{r}{c} \ll T$$

Sabe-se também que o campo magnético diminui com o aumento da distância entre a fonte e o ponto, o que permite para grandes distâncias desprezar o campo induzido pela linha. Para uma distância de 1000 m, a uma linha de alta tensão, já não há influência da linha no campo magnético existente.

Sabendo-se que $c = 2,9979 \times 10^8 \text{ m/s}$ e que $T = \frac{1}{f} = \frac{1}{50} = 0,02 \text{ s}$, então para uma

distância igual ou inferior a 1000 m a condição 1 é verificada, como se pode ver na seguinte expressão.

$$\frac{r}{c} = \frac{1000}{2,9979 \times 10^8} = 3,34 \times 10^{-6} \text{ s} \ll 0,02 \text{ s}$$

A transmissão de energia nas linhas faz-se em corrente alternada e o campo magnético criado por uma linha num determinado ponto do espaço é então um vector de fasores à frequência de 50 Hz da forma apresentada na expressão seguinte. Este vector descreve no plano xy uma trajectória elíptica pulsante.

$$\vec{B} = \left(\tilde{B}_x, \tilde{B}_y \right) = \left(B_{x,real} + jB_{x,imag}, B_{y,real} + jB_{y,imag} \right)$$

A componente máxima do fasor do campo magnético B_{max} num dado ponto do espaço é dada pelo valor do semi-eixo maior daquela elipse.

No anexo G é explicado o método de construção da trajectória elíptica pulsante.

4.5.1 EXEMPLO DE CÁLCULO

O cálculo da indução magnética induzido por uma linha aérea de alta tensão simples (três condutores), com uma corrente nominal de 600 A, funcionando à frequência de 50 Hz e com os condutores dispostos em galhardete, é apresentado a seguir.

Para um plano xy vertical e perpendicular ao perfil longitudinal da linha, esquematizado na figura 12, apresentam-se as coordenadas dos condutores na tabela seguinte.

TABELA 13 – COORDENADAS DOS CONDUTORES NO PERFIL TRANSVERSAL DA LINHA

	Condutor 1	Condutor 2	Condutor 3
Coordenada x (m)	2,2	-2,2	2,2
Coordenada y (m)	14	15,25	16,5

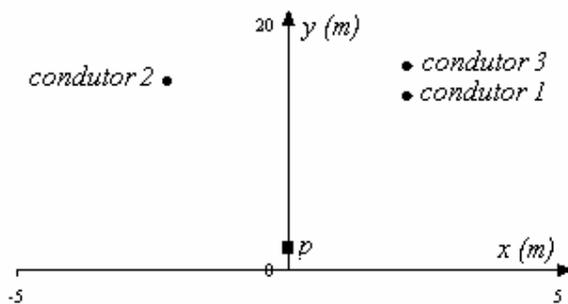


FIGURA 12 – PLANO VERTICAL REPRESENTANDO O PERFIL TRANSVERSAL DE UMA LINHA AÉREA SIMPLES AT COM ARMAÇÃO EM GALHARDETE

Em primeiro lugar calcula-se para um período a distribuição temporal das correntes em cada um dos condutores. Como a linha é um sistema trifásico simétrico, as correntes na linha são dadas pelas equações seguintes.

$$I_1(t) = I_n \times (\cos(\omega t) - j \sin(\omega t))$$

$$I_2(t) = I_n \times (\cos(\omega t - 2\pi/3) - j \sin(\omega t - 2\pi/3))$$

$$I_3(t) = I_n \times (\cos(\omega t - 4\pi/3) - j \sin(\omega t - 4\pi/3))$$

Como a frequência da linha é 50Hz, um período vale $T = 1/50 = 0,02 \text{ s}$, e a frequência angular vale $\omega = 2\pi f = 2\pi \times 50 = 314,16 \text{ rad/s}$. Conhecidos estes parâmetros e sabendo que a corrente nominal da linha vale 600 A , pode-se calcular a distribuição temporal das correntes ao longo de um período. A tabela seguinte apresenta os valores da corrente para 20 instantes de tempo de um período.

TABELA 14 – CORRENTES NA LINHA AO LONGO DE UM PERÍODO

t (s)	I_1 (A)	I_2 (A)	I_3 (A)
0,001	570,63 + j185,41	-445,89 + j401,48	-124,75 - j586,89
0,002	485,41 + j352,67	-548,13 + j244,04	62,72 - j596,71
0,003	352,67 + j485,41	-596,71 + j62,72	244,04 - j548,13
0,004	185,41 + j570,63	-586,89 - j124,75	401,48 - j445,89
0,005	0,00 + j600,00	-519,62 - j300,00	519,62 - j300,00
0,006	-185,41 + j570,63	-401,48 - j445,89	586,89 - j124,75
0,007	-352,67 + j485,41	-244,04 - j548,13	596,71 + j62,72
0,008	-485,41 + j352,67	-62,72 - j596,71	548,13 + j244,04
0,009	-570,63 + j185,41	124,75 - j586,89	445,89 + j401,48
0,01	-600,00 + j0,00	300,00 - j519,62	300,00 + j519,62
0,011	-570,63 - j185,41	445,89 - j401,48	124,75 + j586,89
0,012	-485,41 - j352,67	548,13 - j244,04	-62,72 + j596,71
0,013	-352,67 - j485,41	596,71 - j62,72	-244,04 + j548,13
0,014	-185,41 - j570,63	586,89 + j124,75	-401,48 + j445,89
0,015	0,00 - j600,00	519,62 + j300,00	-519,62 + j300,00
0,016	185,41 - j570,63	401,48 + j445,89	-586,89 + j124,75
0,017	352,67 - j485,41	244,04 + j548,13	-596,71 - j62,72
0,018	485,41 - j352,67	62,72 + j596,71	-548,13 - j244,04
0,019	570,63 - j185,41	-124,75 + j586,89	-445,89 - j401,48
0,02	600,00 + j0,00	-300,00 + j519,62	-300,00 - j519,62

O passo seguinte é calcular as distâncias entre os condutores e o ponto onde se pretende determinar o campo magnético. Considerando um ponto p a $1,8 \text{ m}$ acima do solo (altura média ao nível da cabeça de um homem) e no eixo da linha, com coordenadas $(0;1,8)$ no plano xy considerado, pode calcular-se as distâncias e o versor que indica a direcção do campo no ponto considerado, tal como é apresentado a seguir.

A distância entre o condutor 1 e o solo é dada pela equação seguinte.

$$r_{1p} = \sqrt{(2,2-0)^2 + (16,5-1,8)^2} = 14,8637 \text{ m}$$

A distância entre o condutor 2 e o solo é dada pela equação seguinte.

$$r_{2p} = \sqrt{(-2,2-0)^2 + (15,25-1,8)^2} = 13,6287 \text{ m}$$

A distância entre o condutor 3 e o solo é dada pela equação seguinte.

$$r_{3p} = \sqrt{(2,2-0)^2 + (14-1,8)^2} = 12,3968 \text{ m}$$

Os versores unitários que indicam a direcção do campo induzido por cada condutor no ponto p são dados nas equações seguintes.

$$\vec{r}_{1p} = \frac{2,2-0}{14,8637} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} + \frac{16,5-1,8}{14,8637} \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,148 \hat{x} \\ -0,989 \hat{y} \end{bmatrix}$$

$$\vec{r}_{2p} = \frac{-2,2-0}{13,6287} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} + \frac{15,25-1,8}{13,6287} \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,161 \hat{x} \\ -0,987 \hat{y} \end{bmatrix}$$

$$\vec{r}_{3p} = \frac{2,2-0}{12,3968} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} + \frac{14-1,8}{12,3968} \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,177 \hat{x} \\ -0,984 \hat{y} \end{bmatrix}$$

Com os valores obtidos pelas equações anteriores pode-se agora calcular a indução magnética no ponto p . Na equação seguinte é apresentado o cálculo da indução magnética para o instante de tempo $t = 0,001 \text{ s}$.

$$\vec{B}_p = \frac{4\pi \times 10^{-7}}{2\pi} \left(\frac{570,63 + j185,41}{14,8637} \begin{bmatrix} 0,148 \hat{x} \\ -0,989 \hat{y} \end{bmatrix} + \frac{-445,89 + j401,48}{13,6287} \begin{bmatrix} -0,161 \hat{x} \\ -0,987 \hat{y} \end{bmatrix} + \frac{-124,75 - j586,89}{12,3968} \begin{bmatrix} 0,177 \hat{x} \\ -0,984 \hat{y} \end{bmatrix} \right)$$

$$\vec{B}_p = \begin{bmatrix} (1,83 - j2,26) \hat{x} \\ (0,84 + j1,03) \hat{y} \end{bmatrix} \mu\text{T}$$

Para os restantes instantes de tempo, do período, os resultados obtidos para a indução magnética são apresentados na tabela seguinte.

TABELA 15 – VALORES DA INDUÇÃO MAGNÉTICA AO LONGO DE UM PERÍODO

t (s)	$B_x (\mu T)$	$B_y (\mu T)$
0,001	1,83 -j2,26	0,84+j1,03
0,002	2,44 -j1,58	0,48+j1,25
0,003	2,81 -j0,75	0,07+j1,33
0,004	2,91+j0,16	-0,34+j1,29
0,005	2,72+j1,05	-0,72+j1,12
0,006	2,26+j1,84	-1,04+j0,84
0,007	1,58+j2,44	-1,25+j0,48
0,008	0,75+j2,81	-1,33+j0,07
0,009	-0,16+j2,91	-1,29 -j0,34
0,01	-1,05+j2,72	-1,12 -j0,72
0,011	-1,84+j2,26	-0,84 -j1,04
0,012	-2,44+j1,58	-0,48 -j1,25
0,013	-2,81+j0,75	-0,07 -j1,33
0,014	-2,91 -j0,16	0,34 -j1,29
0,015	-2,72 -j1,05	0,72 -j1,12
0,016	-2,26 -j1,84	1,04 -j0,84
0,017	-1,58 -j2,44	1,25 -j0,48
0,018	-0,75 -j2,81	1,33 -j0,07
0,019	0,16 -j2,91	1,29+j0,34
0,02	1,05 -j2,72	1,12+j0,72

Estes valores representam a trajectória elíptica pulsante que a indução magnética apresenta em cada período de corrente. Essa trajectória é visível na figura que é apresentada a seguir.

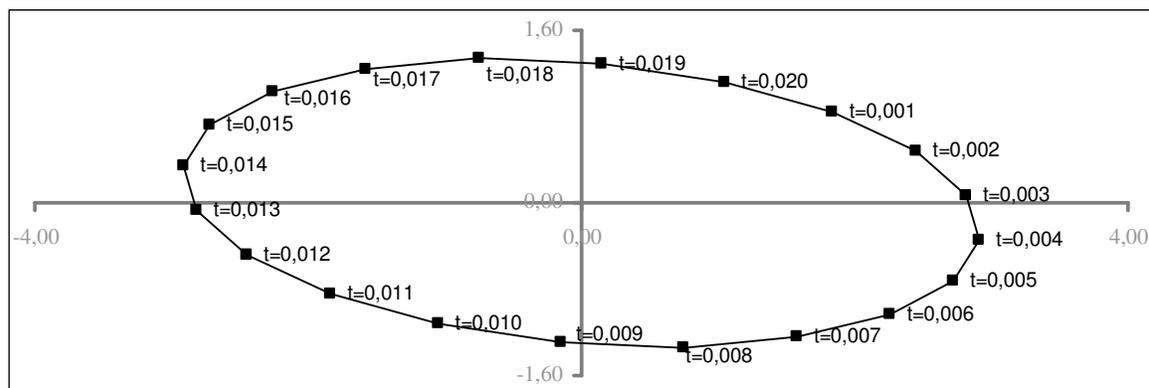


FIGURA 13 – TRAJECTÓRIA ELÍPTICA PULSANTE DA INDUÇÃO MAGNÉTICA EM CADA PERÍODO NO PONTO P

O valor máximo da indução magnética no ponto p, B_p^{\max} , corresponde ao semi-eixo maior da elipse representada na figura anterior. Esse valor corresponde ao valor obtido pela expressão seguinte.

$$B_p^{\max} = \sqrt{2,91^2 + 0,34^2} = 2,93 \mu T$$

Como a indução magnética, num dado ponto, varia com a distância à fonte, é interessante analisar a evolução do valor máximo da indução magnética no ponto p, quando este se desloca ao longo do perfil transversal da linha. Na figura 14 é apresentada essa evolução.

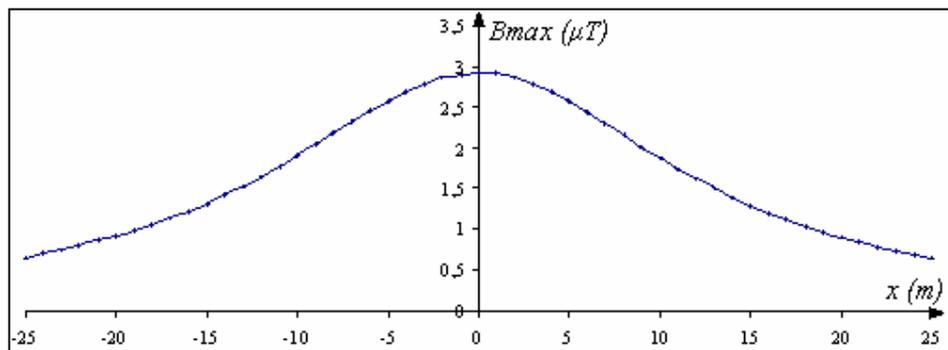


FIGURA 14 – EVOLUÇÃO DO VALOR MÁXIMO DA INDUÇÃO MAGNÉTICA NUM PONTO A 1,8 M DO SOLO, AO LONGO DO PERFIL TRANSVERSAL DA LINHA

Como se pode constatar a indução magnética aumenta à medida que o ponto se aproxima do eixo da linha e tende a anular com o afastamento ao eixo da linha.

4.6 CAMPO ELÉCTRICO

O conceito de campo eléctrico foi introduzido para descrever as forças que se exercem entre cargas. Uma carga eléctrica exerce forças em todas as cargas presentes na proximidade da carga eléctrica. A força entre duas cargas eléctricas Q_a e Q_b resulta da interacção de Q_b com o campo de Q_a na posição de Q_b , ou vice-versa. Assim define-se campo eléctrico E num ponto como a força exercida sobre uma carga de prova unitária, situada sobre esse ponto.

4.6.1 LINHAS DE FORÇA

O conceito de linhas de força foi introduzido pelo físico inglês Faraday com a finalidade de representar o campo eléctrico através de diagramas. As linhas de força são linhas imaginárias que mostram a actuação do campo eléctrico. Existe uma relação bem definida entre campo e as linhas de força, de modo que conhecendo-se um pode determinar-se o outro.

Em cada ponto do espaço, a direcção do campo é determinada pela tangente à linha de força, e o valor do campo é determinado pelo número de linhas por unidade de área transversal. Quanto maior a densidade de linhas de campo, maior a intensidade do campo. Isto significa que as linhas são mais próximas entre si onde o campo eléctrico é maior, e mais afastadas onde o campo eléctrico é menor.

A figura seguinte é um exemplo de linhas de força representativas do campo de uma carga eléctrica pontual positiva, e do campo de uma carga eléctrica pontual negativa. A simetria do caso sugere que são rectas no sentido radial e, portanto, as tangentes são as próprias rectas coincidindo com a actuação do campo. Quanto maior a distância à carga mais afastadas entre si estão as linhas do campo, uma vez que o campo eléctrico diminui com o aumento da distância à carga.

O sentido positivo de uma linha de força é atribuído considerando o sentido em que uma carga eléctrica pontual positiva colocada sobre a linha de força é deslocada.

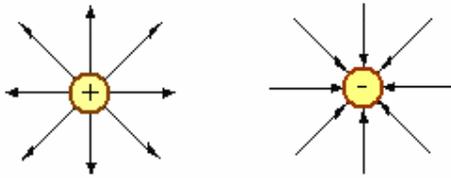


FIGURA 15 – LINHAS DE CAMPO ELÉCTRICO CRIADO POR CARGAS PONTUAIS

Apesar de no campo eléctrico existir uma infinidade de linhas de força, por cada ponto do campo passa só uma linha de força, porque duas linhas de força nunca se cruzam.

Quando o campo eléctrico é produzido por mais que uma carga, as linhas de força passam a ser curvas, em vez de rectas. Na figura seguinte, do lado esquerdo apresenta-se as linhas de força para duas cargas pontuais positivas de valores idênticos, e do lado direito apresenta-se as linhas de força do campo eléctrico para duas cargas pontuais de sinais contrários e valores idênticos.

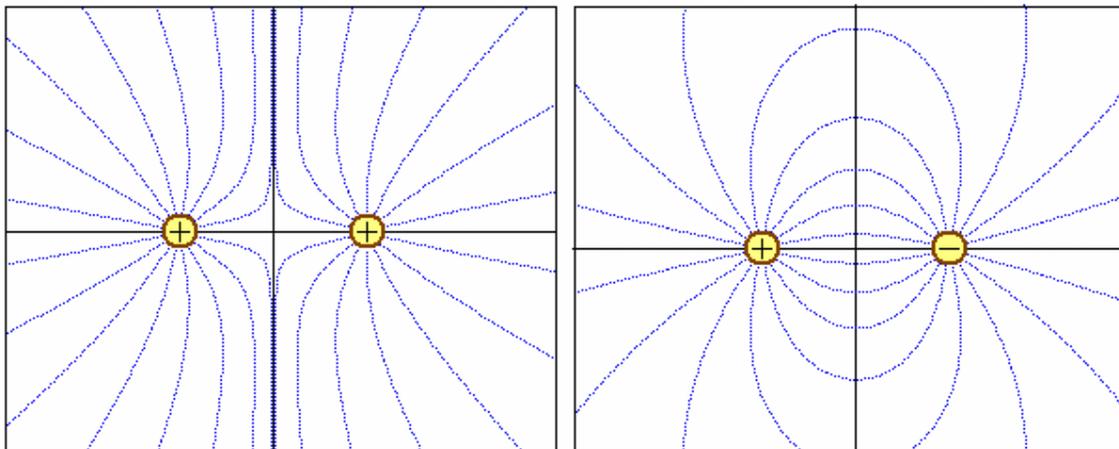


FIGURA 16 – LINHAS DE FORÇA DO CAMPO ELÉCTRICO PRODUZIDO POR DUAS CARGAS PONTUAIS DE VALOR IDÊNTICO

Uma propriedade importante das cargas eléctricas é exercerem entre si interacções ou forças de atracção e de repulsão. As cargas eléctricas com o mesmo sinal repelem-se, e de sinal contrário atraem-se. O mesmo acontece para as linhas de força do campo eléctrico.

4.6.2 A LEI DE COULOMB

A lei de Coulomb permite calcular a força F_{ab} exercida pela carga Q_a na carga Q_b situada a uma distância r . Esta lei é dada pela equação seguinte, onde \hat{r}_{ab} indica o sentido da força e $\epsilon_0 = 8,85418782 \times 10^{-12}$ farad / metro é a permissividade do vazio.

$$F_{ab} = \frac{Q_a \times Q_b}{4\pi \times \epsilon_0 \times r^2} \hat{r}_{ab} \text{ (Newton)}$$

Tendo em conta a lei de Coulomb e a definição de campo eléctrico, a intensidade do campo eléctrico E_a criado pela carga Q_a num ponto a uma distância r é dada pela seguinte equação, onde \hat{r} é o versor que indica a direcção e o sentido do campo eléctrico produzido pela carga Q_a no ponto considerado.

$$Ea = \frac{Fab}{Qb} = \frac{Qa}{4\pi \times \epsilon_0 \times r^2} \hat{r} \quad (V/m)$$

4.6.3 A LEI DE GAUSS

A lei de Gauss relaciona o fluxo do campo eléctrico E que atravessa uma superfície fechada com a carga total cercada por essa superfície.

Considerando um volume finito v delimitado por uma superfície fechada A que contém uma carga Q , pode-se calcular o fluxo de E que atravessa para o exterior através da equação seguinte. O fluxo de E através do elemento de área dA é igual ao resultado seguinte.

$$E \cdot dA = \frac{Q}{4\pi \times \epsilon_0} \frac{\hat{r} \cdot dA}{r^2}$$

Onde $\hat{r} \cdot dA$ é a projecção de dA sobre um plano normal a \hat{r} , e assim sendo pode-se escrever a equação seguinte se $d\Omega$ for o ângulo sólido envolvido por dA no ponto de cálculo de E .

$$E \cdot dA = \frac{Q}{4\pi \times \epsilon_0} d\Omega$$

Para encontrar o fluxo de E para o exterior integra-se a equação anterior ao longo da área A , ou ao longo do ângulo sólido 4π . Obtém-se assim a lei de Gauss na sua forma integral, apresentada a seguir.

$$\int_A E \cdot dA = \frac{Q}{\epsilon_0}$$

4.6.4 CAMPO ELÉCTRICO CRIADO POR UM CONDUTOR CILÍNDRICO

Considerando um condutor cilíndrico, com carga uniforme, longo e perfeito (com resistividade nula), o campo eléctrico criado é radial e as linhas de campo equipotenciais são circunferências centradas no condutor, tal como é representado no lado esquerdo da figura seguinte.

A intensidade do campo eléctrico no interior do condutor pode ser considerada nula. Como se considera que o condutor é perfeito, os electrões no interior do condutor tendem a repelir-se até à superfície do condutor, onde encontram um meio isolante.

No exterior do condutor, a uma certa distância r , a intensidade do campo eléctrico pode ser calculada utilizando a lei de Gauss, onde S é a superfície gaussiana e Q a carga total contida em S .

$$\oint_S E \cdot dS = \frac{Q}{\epsilon_0}$$

Para a solução da equação anterior imagina-se uma superfície gaussiana, cilíndrica, concêntrica ao condutor e de raio igual a r , como a esquematizada na figura seguinte.

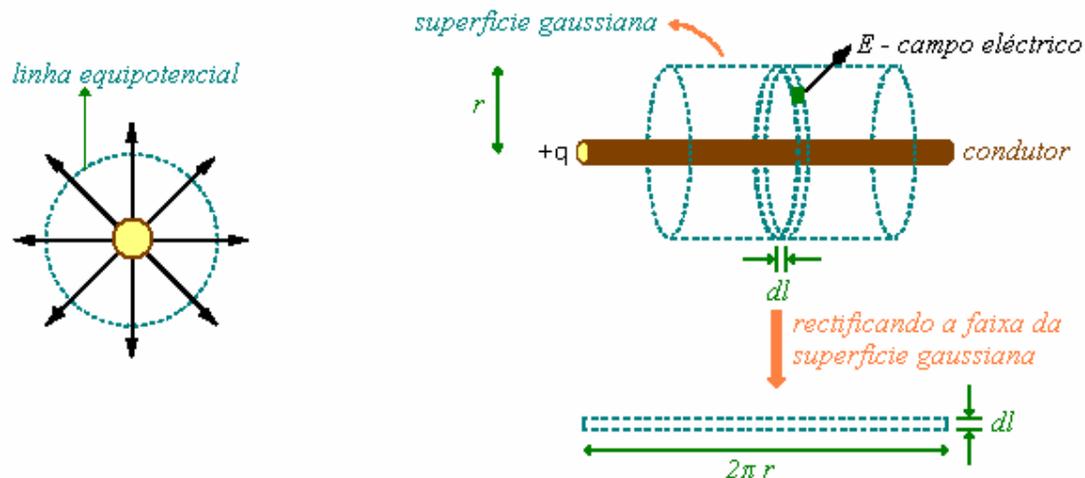


FIGURA 17 – SUPERFÍCIE GAUSSIANA A CONSIDERAR PARA UM CONDUTOR CILÍNDRICO

Considerando uma faixa da superfície gaussiana de comprimento dl a última equação transforma-se na equação seguinte, pois a faixa tem área $2\pi \cdot r \cdot dl$.

$$\int_l E \cdot 2\pi \cdot r \cdot dl = \frac{Q}{\epsilon_0} \Rightarrow E = \frac{Q}{2\pi \cdot r \cdot \epsilon_0 \cdot l} \quad (V/m)$$

Utilizando a carga por unidade de comprimento: $q = Q/l$ o campo elétrico vem igual a:

$$E = \frac{q}{2\pi \cdot r \cdot \epsilon_0} \quad (V/m)$$

A equação anterior calcula a intensidade do campo elétrico, sendo para tal necessário conhecer a carga do condutor. No caso de linhas de energia não é usual conhecer a carga das linhas, conhece-se no entanto a diferença de potencial entre os condutores das linhas.

4.6.5 DIFERENÇA DE POTENCIAL ENTRE DOIS PONTOS

Analisando a situação apresentada na figura seguinte pode retirar-se a diferença de potencial entre dois pontos.

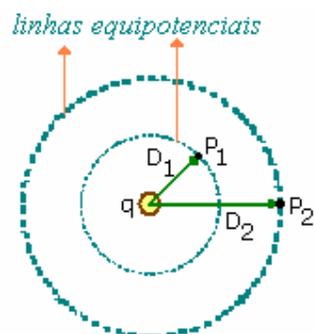


FIGURA 18 – LINHAS EQUIPOTENCIAIS EM TORNO DE UMA CARGA

A diferença de potencial V_{12} entre os pontos P_1 e P_2 é dada por:

$$V_{12} = V_1 - V_2 = \int_{D_1}^{D_2} E \cdot dx = \int_{D_1}^{D_2} \frac{q}{2\pi \cdot x \cdot \epsilon_0} dx = \frac{q}{2\pi \cdot \epsilon_0} \ln \frac{D_2}{D_1} \quad (V)$$

Com a expressão anterior pode-se calcular o valor da carga em função da diferença de potencial entre os dois pontos. Num caso particular em que o ponto P_1 é considerado na superfície do condutor e o ponto P_2 a uma distância D maior que o raio r do condutor, a diferença de potencial entre os pontos é o resultado da equação seguinte.

$$V_{12} = \frac{q}{2\pi \cdot \epsilon_0} \ln \frac{D}{r} \quad (V)$$

Se forem considerados dois condutores, a diferença de potencial entre os dois pode ser obtida utilizando o resultado anterior e aplicando o princípio da sobreposição. Considerando a situação apresentada na figura seguinte, se $D \gg r_1$ e $D \gg r_2$ e o campo eléctrico interno ao condutor puder ser desprezado, a diferença de potencial total deve-se às contribuições de q_1 e q_2 .

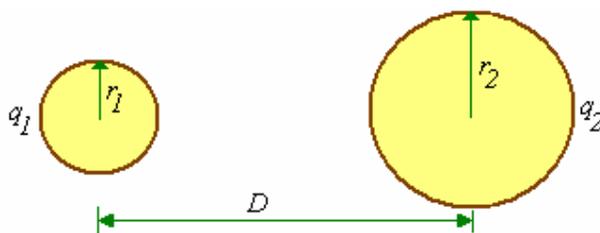


FIGURA 19 – DOIS CONDUTORES COM DIFERENTES RAIOS E CARGAS

$$V_{12} = V_{12}^{\text{devido a } q_1} + V_{12}^{\text{devido a } q_2} = \frac{q_1}{2\pi \cdot \epsilon_0} \ln \frac{D}{r_1} + \frac{q_2}{2\pi \cdot \epsilon_0} \ln \frac{r_2}{D}$$

$$V_{12} = \frac{1}{2\pi \cdot \epsilon_0} \left(q_1 \ln \left(\frac{D}{r_1} \right) + q_2 \ln \left(\frac{r_2}{D} \right) \right) \quad (V)$$

4.6.6 INFLUÊNCIA DO SOLO

No caso dos condutores estarem suficientemente perto do solo, como este é uma superfície equipotencial, as linhas do campo eléctrico são alteradas, sofrendo uma distorção e apresentando-se normais ao solo. Esta situação é esquematizada na figura seguinte.

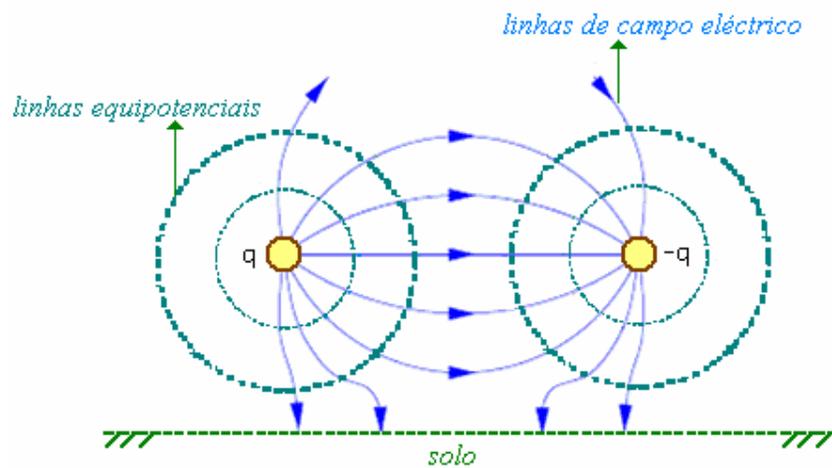


FIGURA 20 – INFLUÊNCIA DO SOLO NAS LINHAS DO CAMPO ELÉCTRICO

A influência do solo pode ser tida em conta imaginando uma continuação das linhas do campo eléctrico abaixo do solo e simétrica ao plano do solo, tal como na figura seguinte. As cargas sob o solo são denominadas cargas imagem. Se a linha do solo for removida pode-se calcular a diferença de potencial aplicando o mesmo raciocínio da última equação.

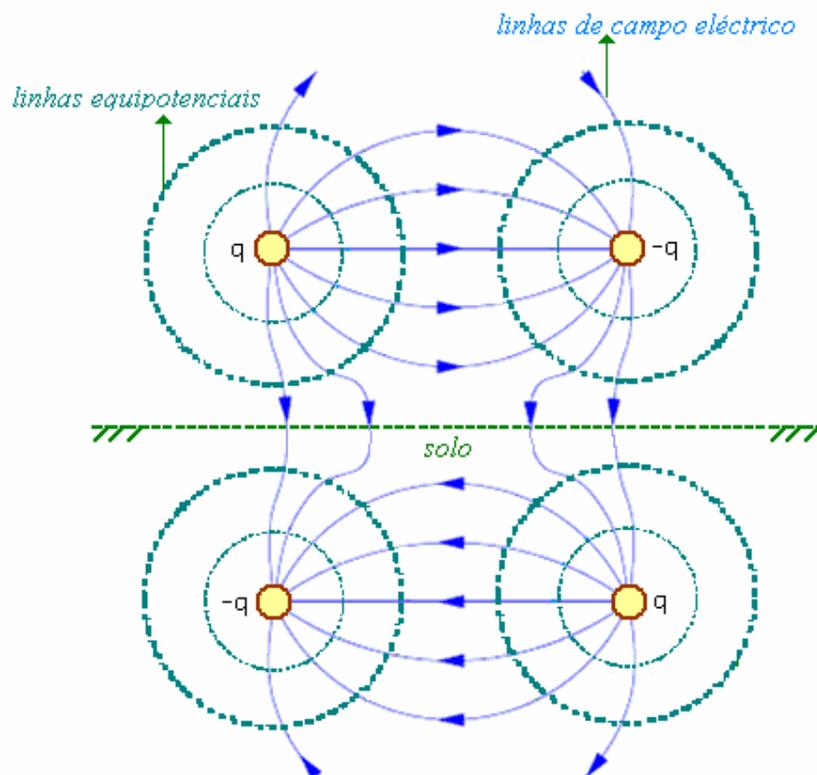


FIGURA 21 – CARGAS IMAGEM

4.7 CÁLCULO DO CAMPO ELÉCTRICO PRODUZIDO POR LINHAS AÉREAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA

4.7.1 MODELO DE CÁLCULO

Neste modelo de cálculo, do campo eléctrico das linhas aéreas de transmissão de energia, considera-se que os condutores são paralelos entre si e ao solo e que são de extensão infinita. Na generalidade dos casos das linhas aéreas de transporte e distribuição de energia, dado o comprimento dos vãos, as considerações efectuadas não introduzem erros de cálculo significativos. São desprezados os apoios e outras peças metálicas, e portanto condutoras, na proximidade da linha, uma vez que estes elementos distorcem as linhas do campo eléctrico. No entanto, a presença destes elementos é favorável à diminuição da intensidade do campo eléctrico, sendo por isso uma aproximação por excesso, o que no caso da verificação do valor máximo permitido permite uma maior segurança. Por outro lado o modelo de cálculo torna-se mais simples.

Este modelo utiliza um modelo bidimensional, onde a geometria é definida num plano vertical transversal à linha, tal como foi definido para o campo magnético.

Do que foi apresentado anteriormente sabe-se que o campo eléctrico produzido por um condutor num determinado ponto é dado pela expressão seguinte, e que a carga do condutor pode ser calculada pela diferença de potencial entre dois pontos. Assim sendo, o primeiro passo deste modelo consiste em determinar a carga de cada condutor da linha, através da diferença de potencial entre os condutores.

$$E = \frac{q}{2\pi \cdot r \cdot \epsilon_0} \quad (V/m)$$

Para o caso de uma linha de alta tensão simples, com três condutores e um cabo de guarda, e considerando o efeito do solo, tal como é apresentado na figura seguinte, começa-se por determinar as cargas em cada condutor e cabo de guarda.

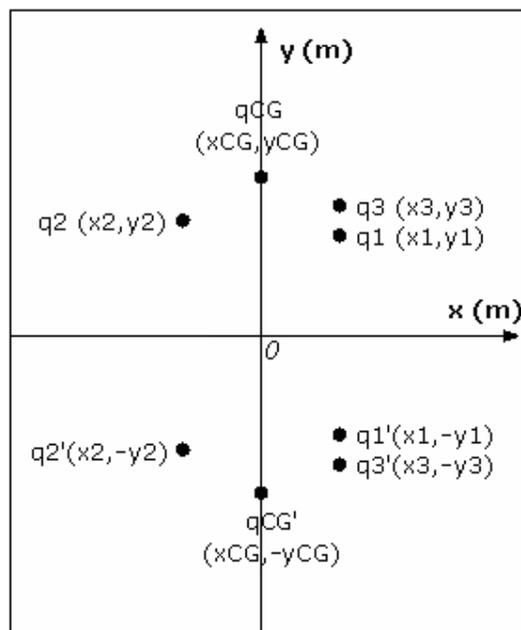


FIGURA 22 – DISPOSIÇÃO DOS CONDUTORES E CABO DE GUARDA E RESPECTIVAS CARGAS IMAGEM

Para a tensão no cabo de guarda V_{CG} contribuem todas as cargas representadas na figura anterior, ou seja todas as cargas e respectivas cargas imagem na proximidade do cabo de guarda.

O cabo de guarda origina as seguintes contribuições para a sua própria tensão:

A contribuição de q_{CG}

$$V_{CG}^{\text{devido a } q_{CG}} = \frac{q_{CG}}{2\pi \cdot \epsilon_0} \ln\left(\frac{1}{r_{CG}}\right)$$

E a contribuição de q_{CG}'

$$V_{CG}^{\text{devido a } q_{CG}'} = \frac{q_{CG}'}{2\pi \cdot \epsilon_0} \ln\left(\frac{1}{\sqrt{(x_{CG} - x_{CG})^2 + (-y_{CG} - y_{CG})^2}}\right) = \frac{q_{CG}'}{2\pi \cdot \epsilon_0} \ln\left(\frac{1}{2y_{CG}}\right)$$

Uma vez que $q_{CG}' = -q_{CG}$, vem que:

$$V_{CG}^{\text{devido a } q_{CG}'} = \frac{-q_{CG}}{2\pi \cdot \epsilon_0} \ln\left(\frac{1}{2y_{CG}}\right)$$

E da soma das duas últimas equações resulta:

$$V_{CG}^{\text{devido a } q_{CG} \text{ e a } q_{CG}'} = \frac{q_{CG}}{2\pi \cdot \epsilon_0} \ln\left(\frac{1}{r_{CG}}\right) + \frac{-q_{CG}}{2\pi \cdot \epsilon_0} \ln\left(\frac{1}{2y_{CG}}\right) = \frac{q_{CG}}{2\pi \cdot \epsilon_0} \ln\left(\frac{2y_{CG}}{r_{CG}}\right)$$

O condutor 1 origina as seguintes contribuições para a tensão no cabo de guarda:

A contribuição de q_1

$$V_{CG}^{\text{devido a } q_1} = \frac{q_1}{2\pi \cdot \epsilon_0} \ln\left(\frac{1}{\sqrt{(x_1 - x_{CG})^2 + (y_1 - y_{CG})^2}}\right) = \frac{q_1}{2\pi \cdot \epsilon_0} \ln\left(\frac{1}{D_{1-CG}}\right)$$

E a contribuição de q_1'

$$V_{CG}^{\text{devido a } q_1'} = \frac{q_1'}{2\pi \cdot \epsilon_0} \ln\left(\frac{1}{\sqrt{(x_1 - x_{CG})^2 + (-y_1 - y_{CG})^2}}\right) = \frac{q_1'}{2\pi \cdot \epsilon_0} \ln\left(\frac{1}{D_{1'-CG}}\right)$$

Uma vez que $q_1' = -q_1$, vem que:

$$V_{CG}^{\text{devido a } q_1'} = \frac{-q_1}{2\pi \cdot \epsilon_0} \ln\left(\frac{1}{D_{1'-CG}}\right)$$

E da soma das duas últimas equações resulta:

$$V_{CG}^{\text{devido a } q_1 \text{ e a } q_1'} = \frac{q_1}{2\pi \cdot \epsilon_0} \ln\left(\frac{1}{D_{1-CG}}\right) + \frac{-q_1}{2\pi \cdot \epsilon_0} \ln\left(\frac{1}{D_{1'-CG}}\right) = \frac{q_1}{2\pi \cdot \epsilon_0} \ln\left(\frac{D_{1'-CG}}{D_{1-CG}}\right)$$

O condutor 2 origina as seguintes contribuições para a tensão no cabo de guarda:

A contribuição de q_2

$$V_{CG}^{\text{devido a } q_2} = \frac{q_2}{2\pi \cdot \epsilon_0} \ln \left(\frac{1}{\sqrt{(x_2 - x_{CG})^2 + (y_2 - y_{CG})^2}} \right) = \frac{q_2}{2\pi \cdot \epsilon_0} \ln \left(\frac{1}{D_{2-CG}} \right)$$

E a contribuição de q_2'

$$V_{CG}^{\text{devido a } q_2'} = \frac{q_2'}{2\pi \cdot \epsilon_0} \ln \left(\frac{1}{\sqrt{(x_2 - x_{CG})^2 + (-y_2 - y_{CG})^2}} \right) = \frac{q_2'}{2\pi \cdot \epsilon_0} \ln \left(\frac{1}{D_{2'-CG}} \right)$$

Uma vez que $q_2' = -q_2$, vem que:

$$V_{CG}^{\text{devido a } q_2'} = \frac{-q_2}{2\pi \cdot \epsilon_0} \ln \left(\frac{1}{D_{2'-CG}} \right)$$

E da soma das equações 40 e 42 resulta:

$$V_{CG}^{\text{devido a } q_2 \text{ e a } q_2'} = \frac{q_2}{2\pi \cdot \epsilon_0} \ln \left(\frac{1}{D_{2-CG}} \right) + \frac{-q_2}{2\pi \cdot \epsilon_0} \ln \left(\frac{1}{D_{2'-CG}} \right) = \frac{q_2}{2\pi \cdot \epsilon_0} \ln \left(\frac{D_{2'-CG}}{D_{2-CG}} \right)$$

E por fim, o condutor 3 origina as seguintes contribuições para a tensão no cabo de guarda:

A contribuição de q_3

$$V_{CG}^{\text{devido a } q_3} = \frac{q_3}{2\pi \cdot \epsilon_0} \ln \left(\frac{1}{\sqrt{(x_3 - x_{CG})^2 + (y_3 - y_{CG})^2}} \right) = \frac{q_3}{2\pi \cdot \epsilon_0} \ln \left(\frac{1}{D_{3-CG}} \right)$$

E a contribuição de q_3'

$$V_{CG}^{\text{devido a } q_3'} = \frac{q_3'}{2\pi \cdot \epsilon_0} \ln \left(\frac{1}{\sqrt{(x_3 - x_{CG})^2 + (-y_3 - y_{CG})^2}} \right) = \frac{q_3'}{2\pi \cdot \epsilon_0} \ln \left(\frac{1}{D_{3'-CG}} \right)$$

Uma vez que $q_3' = -q_3$, vem que:

$$V_{CG}^{\text{devido a } q_3'} = \frac{-q_3}{2\pi \cdot \epsilon_0} \ln \left(\frac{1}{D_{3'-CG}} \right)$$

E da soma das duas últimas equações resulta:

$$V_{CG}^{\text{devido a } q_3 \text{ e a } q_3'} = \frac{q_3}{2\pi \cdot \epsilon_0} \ln \left(\frac{1}{D_{3-CG}} \right) + \frac{-q_3}{2\pi \cdot \epsilon_0} \ln \left(\frac{1}{D_{3'-CG}} \right) = \frac{q_3}{2\pi \cdot \epsilon_0} \ln \left(\frac{D_{3'-CG}}{D_{3-CG}} \right)$$

A tensão no cabo de guarda é então dada por:

$$\begin{aligned}
V_{CG} &= V_{CG}^{\text{devido a } q_{CG} \text{ e a } q_{CG}'} + V_{CG}^{\text{devido a } q_1 \text{ e a } q_1'} + V_{CG}^{\text{devido a } q_2 \text{ e a } q_2'} + V_{CG}^{\text{devido a } q_3 \text{ e a } q_3'} \\
&= \frac{q_{CG}}{2\pi \cdot \epsilon_0} \ln\left(\frac{2y_{CG}}{r_{CG}}\right) + \frac{q_1}{2\pi \cdot \epsilon_0} \ln\left(\frac{D_{1'-CG}}{D_{1-CG}}\right) + \frac{q_2}{2\pi \cdot \epsilon_0} \ln\left(\frac{D_{2'-CG}}{D_{2-CG}}\right) + \frac{q_3}{2\pi \cdot \epsilon_0} \ln\left(\frac{D_{3'-CG}}{D_{3-CG}}\right) \\
&= \frac{1}{2\pi \cdot \epsilon_0} \left[q_{CG} \times \ln\left(\frac{2y_{CG}}{r_{CG}}\right) + q_1 \times \ln\left(\frac{D_{1'-CG}}{D_{1-CG}}\right) + q_2 \times \ln\left(\frac{D_{2'-CG}}{D_{2-CG}}\right) + q_3 \times \ln\left(\frac{D_{3'-CG}}{D_{3-CG}}\right) \right]
\end{aligned}$$

Utilizando o mesmo raciocínio para determinar a tensão nos restantes condutores chega-se ao seguinte sistema de equações.

$$\begin{cases}
V_{CG} = \frac{1}{2\pi \cdot \epsilon_0} \left[q_{CG} \times \ln\left(\frac{2y_{CG}}{r_{CG}}\right) + q_1 \times \ln\left(\frac{D_{1'-CG}}{D_{1-CG}}\right) + q_2 \times \ln\left(\frac{D_{2'-CG}}{D_{2-CG}}\right) + q_3 \times \ln\left(\frac{D_{3'-CG}}{D_{3-CG}}\right) \right] \\
V_1 = \frac{1}{2\pi \cdot \epsilon_0} \left[q_{CG} \times \ln\left(\frac{D_{CG-1}}{D_{CG-1}}\right) + q_1 \times \ln\left(\frac{2y_1}{r_1}\right) + q_2 \times \ln\left(\frac{D_{2'-1}}{D_{2-1}}\right) + q_3 \times \ln\left(\frac{D_{3'-1}}{D_{3-1}}\right) \right] \\
V_2 = \frac{1}{2\pi \cdot \epsilon_0} \left[q_{CG} \times \ln\left(\frac{D_{CG-2}}{D_{CG-2}}\right) + q_1 \times \ln\left(\frac{D_{1'-2}}{D_{1-2}}\right) + q_2 \times \ln\left(\frac{2y_2}{r_2}\right) + q_3 \times \ln\left(\frac{D_{3'-2}}{D_{3-2}}\right) \right] \\
V_3 = \frac{1}{2\pi \cdot \epsilon_0} \left[q_{CG} \times \ln\left(\frac{D_{CG-3}}{D_{CG-3}}\right) + q_1 \times \ln\left(\frac{D_{1'-3}}{D_{1-3}}\right) + q_2 \times \ln\left(\frac{D_{2'-3}}{D_{2-3}}\right) + q_3 \times \ln\left(\frac{2y_3}{r_3}\right) \right]
\end{cases}$$

Alternativamente ao sistema de equações pode-se apresentar os resultados anteriores na forma matricial e generalizar para um sistema com N condutores e cabos de guarda. Sendo [V] o vector de tensões, [Q] o vector das cargas, e [K] a matriz com os coeficientes, obtém-se a seguinte equação matricial.

$$[V] = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} [K] \cdot [Q]$$

A matriz [K] é simétrica e os seus elementos são definidos pelas expressões seguintes, onde r_i é o raio do condutor i e (x_i, y_i) são as coordenadas do condutor i no plano xy considerado.

$$K_{ii} = \ln\left(\frac{2y_i}{r_i}\right)$$

e para $i \neq j$

$$K_{ij} = \ln\left(\frac{D_{i'-j}}{D_{i-j}}\right) = \ln\left(\frac{\sqrt{(xi-xj)^2 + (-yi-yj)^2}}{\sqrt{(xi-xj)^2 + (yi-yj)^2}}\right)$$

Reescrevendo a última equação matricial determina-se as cargas de cada condutor a partir do conhecimento das tensões em cada condutor.

$$[Q] = 2\pi\epsilon_0 \cdot [K]^{-1} \cdot [V]$$

Depois de conhecidas as cargas em cada condutor é possível calcular o campo eléctrico num determinado ponto aplicando o princípio da sobreposição.

Tal como para o campo magnético, para o cálculo do campo eléctrico numa linha aérea utiliza-se um modelo bidimensional, onde a geometria é definida num plano vertical transversal à linha. O valor do campo eléctrico $\vec{E}_{p,i}$ num ponto p de coordenadas (x_p, y_p) em resultado da carga q_i do condutor i, centrado no ponto de coordenadas (x_i, y_i) , e da respectiva carga imagem q_i' centrada no ponto de coordenadas $(x_i, -y_i)$ é dado por:

$$\vec{E}_{p,i} = \frac{q_i}{2\pi \cdot \epsilon_0 \cdot r_{ip}} \vec{r}_{ip} + \frac{q_i'}{2\pi \cdot \epsilon_0 \cdot r_{i'p}} \vec{r}_{i'p} \quad (V/m)$$

Na equação anterior r_{ip} é a distância entre o ponto p e o condutor i, e \vec{r}_{ip} é o vector unitário que indica a direcção do campo magnético produzido pela carga q_i no ponto p.

$$r_{ip} = \sqrt{(x_i - x_p)^2 + (y_i - y_p)^2}$$

e

$$\vec{r}_{ip} = \frac{x_p - x_i}{r_{ip}} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} + \frac{y_p - y_i}{r_{ip}} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

E $r_{i'p}$ é a distância entre o ponto p e a carga imagem do condutor i, e $\vec{r}_{i'p}$ é o vector que indica a direcção do campo magnético produzido no ponto p pela carga imagem de q_i .

$$r_{i'p} = \sqrt{(x_i - x_p)^2 + (-y_i - y_p)^2}$$

e

$$\vec{r}_{i'p} = \frac{x_p - x_i}{r_{i'p}} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} + \frac{y_p + y_i}{r_{i'p}} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

O campo eléctrico total é dado pela soma das contribuições devidas às cargas em todos os n condutores e cabos de guarda da linha.

$$\vec{E}_p = \sum_{i=1}^n \left(\frac{q_i}{2\pi \cdot \epsilon_0 \cdot r_{ip}} \vec{r}_{ip} + \frac{q_i'}{2\pi \cdot \epsilon_0 \cdot r_{i'p}} \vec{r}_{i'p} \right)$$

E como se sabe $q_i' = -q_i$, logo:

$$\vec{E}_p = \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{2\pi \cdot \epsilon_0} \left(\frac{\vec{r}_{ip}}{r_{ip}} - \frac{\vec{r}_{i'p}}{r_{i'p}} \right)$$

Tal como o campo magnético, o campo eléctrico produzido por uma linha aérea é um vector de fasores à frequência de 50 Hz, da forma da equação seguinte, e cujo valor máximo é determinado da forma apresentada para a indução magnética (ver anexo G).

$$\vec{E} = \left(\tilde{E}_x, \tilde{E}_y \right) = \left(E_{x,real} + jE_{x,imag.}, E_{y,real} + jE_{y,imag.} \right)$$

4.7.2 Exemplo de Cálculo

O cálculo do campo eléctrico induzido por uma linha aérea de alta tensão com três condutores e um cabo de guarda, com uma tensão nominal de 63V, funcionando à frequência de 50 Hz e com os condutores dispostos em galhardete, é apresentado a seguir.

Para o plano xy vertical e perpendicular ao perfil longitudinal da linha considerado, apresentam-se as coordenadas e o raio dos condutores na tabela seguinte.

TABELA 16 – COORDENADAS DOS CONDUTORES NO PERFIL TRANSVERSAL DA LINHA

	Condutor 1	Condutor 2	Condutor 3	Cabo de guarda
Coordenada x (m)	2,2	-2,2	2,2	0
Coordenada y (m)	14	15,25	16,5	18,7
Raio (m)	0,0117	0,0117	0,0117	0,0095

Em primeiro lugar calcula-se para um período, a distribuição temporal das tensões em cada um dos condutores. Como a linha é um sistema trifásico simétrico, as tensões na linha são dadas pelas equações seguintes. No cabo de guarda a tensão V_0 é nula.

$$V_1(t) = Un \times (\cos(\omega t) - j \sin(\omega t))$$

$$V_2(t) = Un \times (\cos(\omega t - 2\pi/3) - j \sin(\omega t - 2\pi/3))$$

$$V_3(t) = Un \times (\cos(\omega t - 4\pi/3) - j \sin(\omega t - 4\pi/3))$$

Como a frequência da linha é 50 Hz, um período vale $T = 1/50 = 0,02$ s, e a frequência angular vale $\omega = 2\pi f = 2\pi \times 50 = 314,16$ rad/s. Conhecidos estes parâmetros e sabendo que a tensão nominal da linha vale 63V, pode-se calcular a distribuição temporal das tensões ao longo de um período. A tabela seguinte apresenta os valores da tensão para 20 instantes de tempo de um período.

TABELA 17 – TENSÕES NA LINHA AO LONGO DE UM PERÍODO

t (s)	V_0 (kV)	V_1 (kV)	V_2 (kV)	V_3 (kV)
0,001	0	34,59 - j 11,24	-7,56 + j35,58	-27,03 - j24,34
0,002	0	29,43 - j 21,38	3,80 + j36,17	-33,23 - j14,79
0,003	0	21,38 - j 29,43	14,79 + j33,23	-36,17 - j3,80
0,004	0	11,24 - j 34,59	24,34 + j27,03	-35,58 + j7,56
0,005	0	0,00 - j 36,37	31,50 + j18,19	-31,50 + j18,19
0,006	0	-11,24 - j 34,59	35,58 + j7,56	-24,34 + j27,03
0,007	0	-21,38 - j 29,43	36,17 - j3,80	-14,79 + j33,23
0,008	0	-29,43 - j 21,38	33,23 - j14,79	-3,80 + j36,17
0,009	0	-34,59 - j 11,24	27,03 - j24,34	7,56 + j35,58
0,01	0	-36,37 + j0,00	18,19 - j31,50	18,19 + j31,50
0,011	0	-34,59 + j11,24	7,56 - j35,58	27,03 + j24,34

0,012	0	-29,43 + j21,38	-3,80 - j36,17	33,23 + j14,79
0,013	0	-21,38 + j29,43	-14,79 - j33,23	36,17 + j3,80
0,014	0	-11,24 + j34,59	-24,34 - j 27,03	35,58 - j 7,56
0,015	0	0,00 + j36,37	-31,50 - j 18,19	31,50 - j 18,19
0,016	0	11,24 + j34,59	-35,58 - j 7,56	24,34 - j 27,03
0,017	0	21,38 + j29,43	-36,17 + j3,80	14,79 - j33,23
0,018	0	29,43 + j21,38	-33,23 + j14,79	3,80 - j36,17
0,019	0	34,59 + j11,24	-27,03 + j24,34	-7,56 - j35,58
0,02	0	36,37 + j0,00	-18,19 + j31,50	-18,19 - j31,50

O passo seguinte consiste em determinar os coeficientes da matriz [K] para de seguida calcular a carga em cada condutor e cabo de guarda.

$$K_{00} = \ln\left(\frac{2 \times 18,7}{0,0095}\right) = 8,278$$

$$K_{01} = K_{10} = \ln\left(\sqrt{\frac{2,2^2 + 35,2^2}{2,2^2 + 2,2^2}}\right) = 2,428$$

$$K_{02} = K_{20} = \ln\left(\sqrt{\frac{2,2^2 + 33,95^2}{2,2^2 + 3,45^2}}\right) = 2,118$$

$$K_{03} = K_{30} = \ln\left(\sqrt{\frac{2,2^2 + 32,7^2}{2,2^2 + 4,7^2}}\right) = 1,843$$

$$K_{11} = \ln\left(\frac{2 \times 16,5}{0,0117}\right) = 7,942$$

$$K_{12} = K_{21} = \ln\left(\sqrt{\frac{4,4^2 + 31,75^2}{4,4^2 + 1,25^2}}\right) = 1,947$$

$$K_{13} = K_{31} = \ln\left(\sqrt{\frac{0^2 + 30,5^2}{0^2 + 2,5^2}}\right) = 2,501$$

$$K_{22} = \ln\left(\frac{2 \times 15,25}{0,0117}\right) = 7,866$$

$$K_{23} = K_{32} = \ln\left(\sqrt{\frac{4,4^2 + 29,25^2}{4,4^2 + 1,25^2}}\right) = 1,866$$

$$K_{33} = \ln\left(\frac{2 \times 14}{0,0117}\right) = 7,780$$

Para cada instante de tempo t dum período, as cargas do condutor e cabo de guarda são obtidas pela resolução do seguinte sistema matricial.

$$\begin{bmatrix} q_0(t) \\ q_1(t) \\ q_2(t) \\ q_3(t) \end{bmatrix} = 2\pi\epsilon_0 \cdot \begin{bmatrix} 8,278 & 2,428 & 2,118 & 1,843 \\ 2,428 & 7,942 & 1,947 & 2,501 \\ 2,118 & 1,947 & 7,866 & 1,866 \\ 1,843 & 2,501 & 1,866 & 7,780 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} V_0(t) \\ V_1(t) \\ V_2(t) \\ V_3(t) \end{bmatrix}$$

Para $t = 0,001$ s as cargas em cada condutor são calculadas a seguir.

$$\begin{bmatrix} q_0(t=0,001) \\ q_1(t=0,001) \\ q_2(t=0,001) \\ q_3(t=0,001) \end{bmatrix} = 2\pi\epsilon_0 \cdot \begin{bmatrix} 8,278 & 2,428 & 2,118 & 1,843 \\ 2,428 & 7,942 & 1,947 & 2,501 \\ 2,118 & 1,947 & 7,866 & 1,866 \\ 1,843 & 2,501 & 1,866 & 7,780 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} 0,00 \\ 34,59 - j11,24 \\ -7,56 + j35,58 \\ -27,03 - j24,34 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} q_0(t=0,001) \\ q_1(t=0,001) \\ q_2(t=0,001) \\ q_3(t=0,001) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2,35 \times 10^{-11} - j9,07 \times 10^{-12} \\ 3,56 \times 10^{-10} - j8,62 \times 10^{-11} \\ -6,74 \times 10^{-11} + j3,28 \times 10^{-10} \\ -2,86 \times 10^{-10} - j2,23 \times 10^{-10} \end{bmatrix} \quad (F \cdot kV/m)$$

Sabendo o valor das cargas para $t = 0,001$ s, pode-se calcular o campo eléctrico num dado ponto, nesse instante. Para um ponto localizado a 1,8 m de altura e no eixo da linha ($x = 0; y = 1,8$) o campo eléctrico produzido é dado nas equações seguintes.

Segundo a direcção do eixo dos xx :

O campo eléctrico produzido pelo cabo de guarda é

$$E_{p,CG}^{\vec{x}} = \frac{-2,35 \times 10^{-11} - j9,07 \times 10^{-12}}{2\pi \times 8,85 \times 10^{-12}} \left(\frac{0-0}{\sqrt{(0-0)^2 + (18,7-1,8)^2}} - \frac{0-0}{\sqrt{(0-0)^2 + (-18,7-1,8)^2}} \right)$$

$$E_{p,CG}^{\vec{x}} = 0 \text{ kV/m}$$

O campo eléctrico produzido pelo condutor 1 é

$$\vec{E}_{p,1} = \frac{3,56 \times 10^{-10} - j8,62 \times 10^{-11}}{2\pi \times 8,85 \times 10^{-12}} \left(\frac{0-2,2}{\sqrt{(2,2-0)^2 + (14-1,8)^2}} - \frac{0-2,2}{\sqrt{(2,2-0)^2 + (-14-1,8)^2}} \right)$$

$$\vec{E}_{p,1} = (-36,30 + j8,79) \times 10^{-3} \text{ kV/m}$$

O campo eléctrico produzido pelo condutor 2 é

$$\vec{E}_{p,2} = \frac{-6,74 \times 10^{-11} + j3,28 \times 10^{-10}}{2\pi \times 8,85 \times 10^{-12}} \left(\frac{0+2,2}{\sqrt{(-2,2-0)^2 + (15,25-1,8)^2}} - \frac{0+2,2}{\sqrt{(-2,2-0)^2 + (-15,25-1,8)^2}} \right)$$

$$\vec{E}_{p,2} = (-5,33 + j25,96) \times 10^{-3} \text{ kV/m}$$

O campo eléctrico produzido pelo condutor 3 é

$$\vec{E}_{p,3} = \frac{-2,86 \times 10^{-10} - j2,23 \times 10^{-10}}{2\pi \times 8,85 \times 10^{-12}} \left(\frac{0-2,2}{\sqrt{(2,2-0)^2 + (16,5-1,8)^2}} - \frac{0-2,2}{\sqrt{(2,2-0)^2 + (-16,5-1,8)^2}} \right)$$

$$\vec{E}_{p,3} = (17,91 + j13,96) \times 10^{-3} \text{ kV/m}$$

No total o campo eléctrico no ponto e no instante considerado, segundo a direcção do eixo dos xx é

$$\vec{E}_p = (0 + (-36,30 + j8,79) + (-5,33 + j25,96) + (17,91 + j13,96)) \times 10^{-3}$$

$$\vec{E}_p = (-23,72 + j48,71) \times 10^{-3} \text{ kV/m}$$

Segundo a direcção do eixo dos yy:

O campo eléctrico produzido pelo cabo de guarda é

$$\vec{E}_{p,CG}^y = \frac{-2,35 \times 10^{-11} - j9,07 \times 10^{-12}}{2\pi \times 8,85 \times 10^{-12}} \left(\frac{1,8 - 18,7}{\sqrt{(0-0)^2 + (18,7-1,8)^2}} - \frac{1,8 + 18,7}{\sqrt{(0-0)^2 + (-18,7-1,8)^2}} \right)$$

$$\vec{E}_{p,CG}^y = (0,04 + j0,02) \text{ kV/m}$$

O campo eléctrico produzido pelo condutor 1 é

$$\vec{E}_{p,1}^y = \frac{3,56 \times 10^{-10} - j8,62 \times 10^{-11}}{2\pi \times 8,85 \times 10^{-12}} \left(\frac{1,8 - 14}{\sqrt{(2,2-0)^2 + (14-1,8)^2}} - \frac{1,8 + 14}{\sqrt{(2,2-0)^2 + (-14-1,8)^2}} \right)$$

$$\vec{E}_{p,1}^y = (-0,91 + j0,22) \text{ kV/m}$$

O campo eléctrico produzido pelo condutor 2 é

$$\vec{E}_{p,2}^y = \frac{-6,74 \times 10^{-11} + j3,28 \times 10^{-10}}{2\pi \times 8,85 \times 10^{-12}} \left(\frac{1,8 - 15,25}{\sqrt{(-2,2-0)^2 + (15,25-1,8)^2}} - \frac{1,8 + 15,25}{\sqrt{(-2,2-0)^2 + (-15,25-1,8)^2}} \right)$$

$$\vec{E}_{p,2}^y = (0,16 - j0,77) \text{ kV/m}$$

O campo eléctrico produzido pelo condutor 3 é

$$\vec{E}_{p,3}^y = \frac{-2,86 \times 10^{-10} - j2,23 \times 10^{-10}}{2\pi \times 8,85 \times 10^{-12}} \left(\frac{1,8 - 16,5}{\sqrt{(2,2-0)^2 + (16,5-1,8)^2}} - \frac{1,8 + 16,5}{\sqrt{(2,2-0)^2 + (-16,5-1,8)^2}} \right)$$

$$\vec{E}_{p,3}^y = (0,62 + j0,48) \text{ kV/m}$$

No total o campo eléctrico no ponto e no instante considerado, segundo a direcção do eixo dos yy é

$$\vec{E}_p = (0,04 + j0,02) + (-0,91 + j0,22) + (0,16 - j0,77) + (0,62 + j0,48)$$

$$\vec{E}_p = (-0,09 - j0,05) \text{ kV/m}$$

O campo eléctrico no ponto considerado, para o instante $t = 0,001 \text{ s}$, é

$$\vec{E}_p = \begin{bmatrix} (-23,72 + j48,71) \times 10^{-3} \hat{x} \\ (-0,09 - j0,05) \hat{y} \end{bmatrix} \text{ kV/m}$$

Para os restantes instantes de tempo, do período, os resultados obtidos para o campo eléctrico são apresentados na tabela seguinte.

TABELA 18– VALORES DO CAMPO ELÉCTRICO AO LONGO DE UM PERÍODO

t (s)	E_x (kV/m)	E_y (kV/m)
0,001	-0,02+j0,05	-0,15+j0,06
0,002	-0,01+j0,05	-0,16+j0,01
0,003	0,01+j0,05	-0,16+j0,04
0,004	0,03+j0,05	-0,14+j0,08
0,005	0,04+j0,04	-0,10+j0,12
0,006	0,05+j0,02	-0,06+j0,15
0,007	0,05+j0,01	-0,01+j0,16
0,008	0,05-j0,01	0,04+j0,16
0,009	0,05-j0,03	0,08+j0,14
0,01	0,04-j0,04	0,12+j0,10
0,011	0,02-j0,05	0,15+j0,06
0,012	0,01-j0,05	0,16+j0,01
0,013	-0,01-j0,05	0,16-j0,04
0,014	-0,03-j0,05	0,14-j0,08
0,015	-0,04-j0,04	0,10-j0,12
0,016	-0,05-j0,02	0,06-j0,15
0,017	-0,05-j0,01	0,01-j0,16
0,018	-0,05+j0,01	-0,04-j0,16
0,019	-0,05+j0,03	-0,08-j0,14
0,02	-0,04+j0,04	-0,12-j0,10

Estes valores representam a trajectória elíptica pulsante que o campo eléctrico apresenta em cada período da tensão. Essa trajectória é visível na figura seguinte.

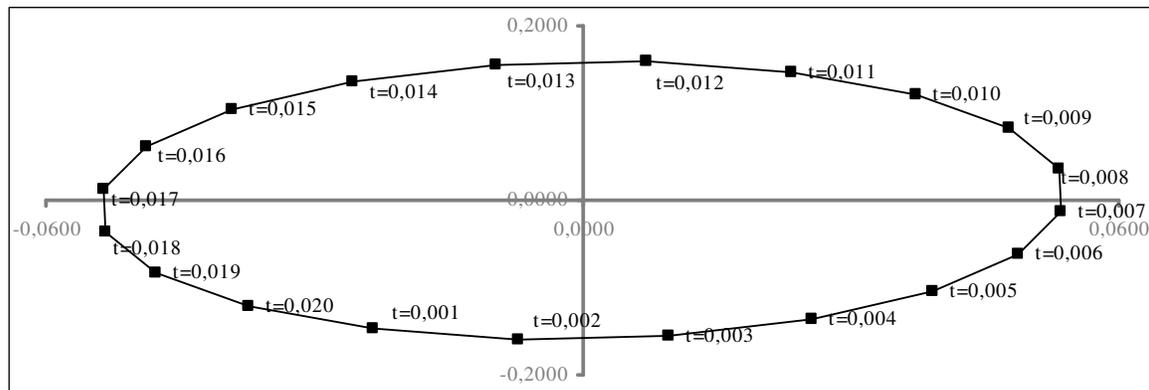


FIGURA 23 – TRAJECTÓRIA ELÍPTICA PULSANTE DO CAMPO ELÉCTRICO EM CADA PERÍODO NO PONTO P

O valor máximo do campo eléctrico no ponto considerado ($x = 0; y = 1,8$), E_p^{\max} , corresponde ao semi-eixo maior da elipse representada na figura anterior. Esse valor corresponde ao valor obtido pela equação seguinte.

$$B_p^{\max} = \sqrt{0,01^2 + 0,16^2} = 0,16 \text{ kV/m}$$

Como o campo eléctrico, num dado ponto, varia com a distância à fonte, é interessante analisar a evolução do seu valor máximo no ponto p, quando este se desloca ao longo do perfil transversal da linha. Na figura seguinte é apresentada essa evolução.

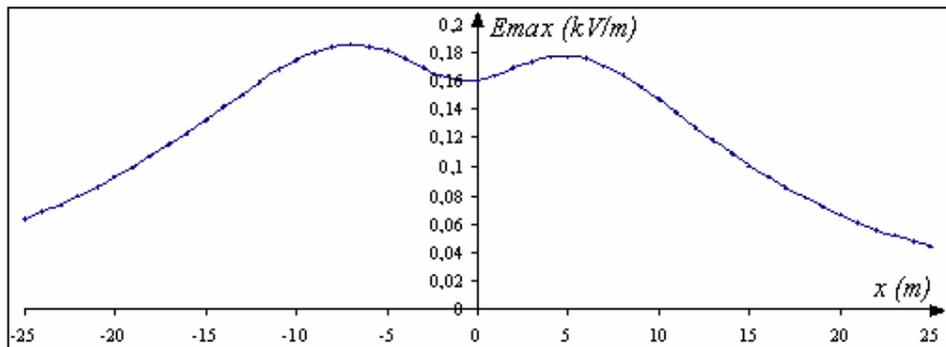


FIGURA 24 – EVOLUÇÃO DO VALOR MÁXIMO DO CAMPO ELÉCTRICO NUM PONTO A 1,8 M DO SOLO, AO LONGO DO PERFIL TRANSVERSAL DA LINHA

Constata-se na figura anterior que o valor máximo do campo eléctrico varia ao longo do perfil transversal da linha. A variação do campo eléctrico é esperada, uma vez que este depende da distância às fontes, neste caso os três condutores e o cabo de guarda. A curva apresentada, no entanto, não apresenta uma forma intuitiva, pois esperava-se que o máximo valor do campo eléctrico ao longo do perfil transversal ocorresse mais próximo dos condutores.

O campo eléctrico é máximo para $x = -6,5 \text{ m}$, e o condutor 2 situa-se em $x = -2,2 \text{ m}$, os condutores 1 e 3 situam-se em $x = 2,2 \text{ m}$, e o cabo de guarda em $x = 0 \text{ m}$. A justificação para a ocorrência máxima do campo eléctrico ser do lado contrário à existência do maior número de condutores é simples. Na zona do aglomerado de condutores, as linhas do campo eléctrico produzidas por cada condutor são distorcidas pela presença dos outros condutores. Se as cargas tiverem sinal contrário as linhas de campo atraem-se e o campo eléctrico resultante é mais elevado no espaço que une as cargas. Mas se as cargas tiverem

o mesmo sinal as linhas de campo repelem-se e o módulo do campo eléctrico resultante no espaço entre as cargas é mais baixo. Este facto pode explicar porque no eixo do gráfico apresentado na figura anterior o campo eléctrico é mais baixo.

As cargas resultam de um sistema trifásico equilibrado, mas dependem também das distâncias entre as cargas e entre estas e o solo, e por isso para cada localização diferente do condutor a carga resultante varia em módulo e sinal. Deste modo a variação do campo eléctrico resultante ao longo do perfil transversal assume diversas formas, que dependem da disposição dos condutores.

4.8 CAMPO ELECTROMAGNÉTICO PRODUZIDO PELA LINHA AÉREA A 60 kV SERZEDO – ESPINHO

Para o cálculo do campo electromagnético produzido pela linha foi elaborada uma folha de cálculo em Excel e com macros, que permite o cálculo automático do módulo da indução magnética e do campo eléctrico, em cada ponto no solo, ou a uma determinada altura acima deste, ao longo do perfil transversal e longitudinal de uma linha simples de alta tensão.

O programa elaborado implementa os modelos de cálculo da indução magnética e do campo eléctrico apresentados anteriormente.

ANÁLISE DO ANEXO D

O anexo D apresenta para a linha aérea a 60 kV Serzedo – Espinho os valores máximos, a 1,8 m (altura média à cabeça de um homem) acima do solo e habitações, da indução magnética e do campo eléctrico ao longo do perfil longitudinal e do perfil transversal. Estes valores correspondem ao valor máximo encontrado no perfil transversal e ao longo do perfil longitudinal da linha. A faixa transversal considerada é plana, centrada no eixo da linha e com 10 metros para cada lado. Tudo o que possa existir nessa faixa que não exista no eixo da linha é desprezado.

Da análise deste anexo retira-se que o máximo valor da indução magnética encontrado ao longo do perfil longitudinal da linha e 1,8 metros acima do solo e habitações é inferior a 10 μT . Este valor corresponde a 10% do valor limite da regulamentação em vigor. No caso do campo eléctrico o máximo valor encontrado em todo o perfil longitudinal a 1,8 metros acima do solo e habitações ultrapassa apenas ligeiramente os 12% do limite máximo recomendado na união europeia para a exposição permanente do público em geral.

É de referir que os quase 10 μT da indução magnética e os 0,6 kV/m do campo eléctrico só são encontrados nos locais onde se simula pessoas de pé em cima dos telhados das habitações. No entanto não é de prever pessoas em permanência nestes locais, pelo que os valores que se verificam nos locais onde é de prever público em permanência são ainda mais baixos que os 10 μT e 0,6 kV/m referidos.

O valor médio da indução magnética produzida pela linha num ponto 1,8 metros superior ao solo é de 1,70 μT . No caso do campo eléctrico esse valor médio é de 0,12 kV/m.

A análise do anexo D permite concluir desta forma que os valores que os campos eléctrico e magnético atingem nos locais onde é susceptível de existirem pessoas em permanência são muito inferiores aos valores passíveis de causarem efeitos nefastos na saúde das pessoas.

ANÁLISE DO ANEXO E

O limite regulamentado para a exposição do público em geral a campos magnéticos de 50 Hz é de $100 \mu T$. É portanto interessante verificar ao longo do perfil longitudinal da linha onde este valor limite é atingido.

No anexo E é apresentado o perfil longitudinal dos pontos abaixo dos condutores onde o valor limite da indução magnética é atingido. Também é apresentado o perfil longitudinal dos pontos onde a indução magnética vale 50%, 25%, 10% e 5% do valor limite.

A análise deste anexo permite verificar que apenas as curvas de 5% e 10% são passíveis de ser atingidas ou ultrapassadas por pessoas em situações normais.

As curvas de 100%, 50% e até mesmo de 25% são muito próximas dos cabos e por isso muito afastadas do solo. Comprova-se assim que o valor da indução magnética decresce rapidamente com o aumento da distância aos condutores.

Sabendo-se que existem distâncias mínimas regulamentares, entre os condutores e o solo, árvores, edifícios e outros objectos, que é necessário respeitar aquando da elaboração de um projecto de uma linha aérea, conclui-se que embora no Regulamento de Segurança de Linhas Aéreas de Alta Tensão não haja limites ordenados por considerações de natureza electromagnética, as distâncias mínimas já regulamentadas permitem, neste caso, o cumprimento dos limites de exposição permanente a campos eléctricos e magnéticos.

ANÁLISE DO ANEXO F

O limite regulamentado para a exposição do público em geral a campos magnéticos de 50 Hz é de $5 kV/m$. É portanto interessante verificar ao longo do perfil longitudinal da linha onde este valor limite é atingido.

No anexo F, à semelhança do anexo E, é apresentado o perfil longitudinal dos pontos abaixo dos condutores onde o valor limite do campo eléctrico é atingido. Também é apresentado o perfil longitudinal dos pontos onde o campo eléctrico vale 50%, 25%, 10% e 5% do valor limite.

Verifica-se também neste anexo que apenas as curvas de 5% e 10% são passíveis de ser atingidas ou ultrapassadas por pessoas em situações normais. As curvas de 100%, 50% e até mesmo de 25% são muito próximas dos cabos e por isso muito afastadas do solo.

Também para o caso do campo eléctrico as distâncias mínimas regulamentares, entre os condutores e o solo ou objectos neste, impostas pelo Regulamento de Segurança de Linhas Aéreas de Alta Tensão, permitem o cumprimento dos limites de exposição permanente a campos eléctricos e magnéticos.

CONCLUSÃO

O trabalho de estágio aconteceu tal como planeado inicialmente, tendo sido atingidos os objectivos propostos. A nível pessoal considero que este estágio foi bastante enriquecedor e importante porque me permitiu consolidar diversos conhecimentos teóricos e práticos que adquiri ao longo do curso.

O projecto da linha aérea de alta tensão a 60 kV Serzedo – Espinho permitiu-me a percepção da realidade prática de um projecto.

O estudo dos campos electromagnéticos produzidos pela linha transformou este trabalho num trabalho mais abrangente e inovador, e tornou para mim este trabalho ainda mais atraente e promotor.

O projecto de uma linha aérea de alta tensão é um processo de várias etapas condicionadas por factores de diversas naturezas: eléctrica, mecânica, ambiental e económica. A linha projectada deve apresentar uma fiabilidade elevada e um custo inicial e de operação o mais reduzido possível. Para além destes factores, a linha deve ser estabelecida de modo a garantir segurança e o menor impacto ambiental possível.

A segurança mecânica de uma linha aérea de alta tensão não depende somente de bons apoios e maciços, mas também dos isoladores e dos acessórios das cadeias de isoladores.

Em modo de conclusão pode dizer-se que o projecto e a construção de uma linha aérea de alta tensão exigem ao projectista e a todos os intervenientes do projecto uma posição de rigor e empenhamento. A construção da linha deve ter em conta três grandes factores: a segurança das pessoas que intervêm nos trabalhos de construção, a necessária e elevada fiabilidade da linha, e a segurança das pessoas e bens que envolvem a linha.

Os campos electromagnéticos produzidos por linhas aéreas de alta tensão têm merecido uma maior atenção por parte das empresas do sector eléctrico europeu. Apesar de haver quem pense que a exposição permanente às radiações não ionizantes originadas pelos campos electromagnéticos está associada a um risco acrescido de contracção de doenças cancerígenas, até hoje tal ainda não foi cientificamente confirmado.

Reconhece-se no entanto que até hoje também não foi demonstrado o contrário, ou seja o seu carácter benigno, pelo que a controvérsia está instalada. Actualmente nos processos de licenciamento de linhas aéreas de alta tensão a EDP já apresenta na memória descritiva o valor máximo do campo eléctrico e do campo magnético a 1,8 metros acima do solo (altura ao nível médio da cabeça de um homem) no local em que os condutores da linha atingem a menor distância ao solo.

A comunidade científica é unânime em afirmar que não existe risco para a saúde pública se forem cumpridos os valores de referência indicados pela OMS – Organização Mundial de Saúde e pela União Europeia, de 5 kV/m para o campo eléctrico e 100 μ T para a indução magnética, mesmo para uma exposição permanente. É de referir que estes valores de referência possuem já um coeficiente de segurança de 50 vezes relativamente aos valores considerados como passíveis de serem prejudiciais para a saúde.

Os campos eléctrico e magnético associados à presença de linhas de distribuição e transporte de energia são campos de frequência muito baixa (50 Hz), e são essencialmente determinados pelo nível de tensão das linhas e pelas cargas que as mesmas alimentam, respectivamente. Assim pode concluir-se que num determinado ponto junto de uma linha aérea o campo eléctrico associado é sensivelmente constante, mas o campo magnético é variável ao longo do dia consoante o diagrama de cargas que a linha satisfaz.

Num determinado ponto no traçado da linha o campo eléctrico por ela produzido será tanto maior quanto mais elevada for a tensão de transporte ou distribuição da mesma, e será tanto menor quanto mais afastado da linha se encontrar o ponto. Naturalmente sendo constante a tensão de uma linha aérea (desprezando-se a queda de tensão existente que

implica uma variação na tensão desprezável para este efeito), o valor do campo eléctrico por ela produzido varia apenas em função da distância aos condutores.

O campo eléctrico é fortemente influenciado pela geometria da zona envolvente e pela presença de obstáculos mais ou menos condutores. As árvores e muitos dos elementos de construção da linha, como os apoios, são responsáveis por uma significativa atenuação do campo eléctrico.

A intensidade do campo magnético produzido por uma linha aérea num determinado ponto do seu traçado varia em função das variações de corrente na linha e diminui com o aumento da distância do ponto referido aos condutores.

Ao contrário do que acontece com o campo eléctrico, o campo magnético não é influenciado pela geografia do terreno e pela existência de objectos condutores.

Os valores obtidos para os campos eléctrico e magnético produzidos pela linha aérea de alta tensão a 60 kV Serzedo – Espinho resultaram de considerações que os tornaram máximos. Acredito que estes valores calculados nunca conseguirão ser obtidos em medições aquando do funcionamento normal da linha porque o cálculo do campo eléctrico desprezou a existência de árvores, dos apoios da linha e de outros elementos condutores que atenuam a intensidade do campo eléctrico, pelo que os resultados obtidos são aproximados por excesso. E também porque o cálculo do campo magnético desprezou a variação da corrente que circula na linha, tendo sido realizado considerando o máximo valor da corrente que circula na linha em regime normal de funcionamento.

Apesar dos valores calculados para os campos eléctrico e magnético induzidos pela linha resultarem de aproximações por excesso, verificou-se que uma pessoa deslocando-se de pé (1,8 metros) no solo e por cima das habitações (embora esta última situação não seja de ocorrência normal) ao longo do perfil longitudinal da linha fica no máximo apenas sujeita a um valor inferior a 10% do valor limite recomendado pela união Europeia para a exposição permanente a campos magnéticos. No caso do campo eléctrico o valor máximo a que a pessoa pode ficar sujeita é inferior a 12% do valor limite recomendado pela União Europeia.

Pode concluir-se deste modo que, em função dos estudos científicos sobre os efeitos dos campos electromagnéticos de frequência industrial na saúde das pessoas em exposição permanente e actualmente cientificamente comprovados, a linha projectada não apresenta nenhum risco para a saúde das populações na vizinhança da mesma.

Nos anexos E e F constata-se que os valores limite recomendados pela União Europeia são apenas atingidos na exagerada proximidade aos condutores, e a alturas acima do solo e dos obstáculos nele encontrados de difícil acesso.

As alturas dos apoios das linhas aéreas de alta tensão são definidas tendo em conta a tensão da linha e as distâncias a verificar entre os condutores e o solo ou entre os condutores e os obstáculos específicos localizados ao longo do traçado. O Regulamento de Segurança de Linhas Aéreas de Alta Tensão estabelece valores mínimos para estas distâncias. Estas distâncias mínimas ou de segurança foram estabelecidas tendo presente a necessidade de impedir o contacto acidental da linha com pessoas, animais e objectos estranhos.

Não existindo no RSLEAT quaisquer referências a limites ordenados por considerações de natureza electromagnética, verifica-se que por si só as distâncias mínimas já incluídas no regulamento permitem o cumprimento dos limites de exposição permanente a campos eléctricos e magnéticos.

ANEXO A – BIBLIOGRAFIA

Almeida do Vale, A.; "Linhas Aéreas de Transmissão de Energia"

David.K.Cheng; "Field and Wave Electromagnetics"; Addison-Wesley

Direcção dos Serviços de Energia Eléctrica; Edição DGE do Regulamento de Segurança de Linhas Eléctricas de Alta Tensão; Direcção Geral de Energia; 1993

H. Moysés Nussenzveig; "Curso de Física Básica: 3 – Electromagnetismo"; Editora Edgard Blücher

Laurrain, Paul et al; Campos e Ondas Electromagnéticas; terceira edição; Fundação Calouste Gulbenkian; 2000

J.B. Stoffel, E.D. Pentecost, R.D.Roman, P.A. Traczyk; "Electric Power High-Voltage transmission Lines: Desing Options, Cost, and Electric and Magnetic Field Levels"; Environmental Assessment Division, Argonne National Laboratory; 1994

M. Checa, Luís; Linhas de Transporte de Energia; segunda edição; Edições Cetop; 1979

Zoppetti Júdez, Gaudencio; Redes Eléctricas de Alta y Baja Tension; sexta edição; Editorial Gustavo Gili; 1978

<http://www.mcghealth.org/greystonedata/CONTENT.ASP?PAGEID=P00485>

<http://www.niehs.nih.gov/emfrapid/booklet/home.htm>

<http://www.who.int/peh-emf/en/>

ANEXO B – PLANTA TOPOGRÁFICA

ANEXO C – PERFIL LONGITUDINAL E PLANTA PARCELAR

ANEXO D – INTENSIDADE DOS CAMPOS ELÉTRICO E MAGNÉTICO A 1,8 M DO SOLO

ANEXO E – PERFIL LONGITUDINAL DOS PONTOS COM IGUAL INTENSIDADE DE INDUÇÃO MAGNÉTICA

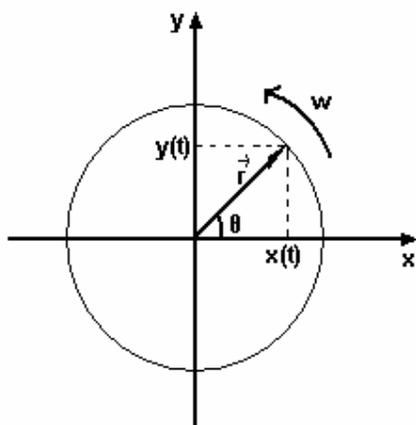
ANEXO F – PERFIL LONGITUDINAL DOS PONTOS COM IGUAL INTENSIDADE DE CAMPO ELÉCTRICO

ANEXO G – MOVIMENTO HARMÓNICO SIMPLES

Um oscilador harmónico simples é uma partícula cuja lei de movimento é da forma da equação seguinte.

$$x(t) = A \cos(\omega t + \varphi)$$

Uma partícula com movimento harmónico simples pode ser descrita por um vector posicional $\vec{r}(t)$ com origem no centro da circunferência que a partícula descreve ao longo da sua trajectória. O vector $\vec{r}(t)$ roda com velocidade angular ω . Designando por θ o ângulo que o vector faz com uma direcção de referência, por exemplo o eixo dos xx (sentido positivo), a trajectória da partícula é a apresentada na figura seguinte.



O ângulo θ e a frequência angular ω relacionam-se através de $\theta = \omega t + \theta_0$, em que θ_0 é o valor do ângulo θ no instante inicial. Designando o módulo de $\vec{r}(t)$ por A , as duas projecções do vector posicional segundo os eixos coordenados permitem escrever as duas equações seguintes.

$$x(t) = A \cos(\omega t + \theta_0)$$

$$y(t) = A \sin(\omega t + \theta_0) = A \cos\left(\omega t + \theta_0 - \frac{\pi}{2}\right)$$

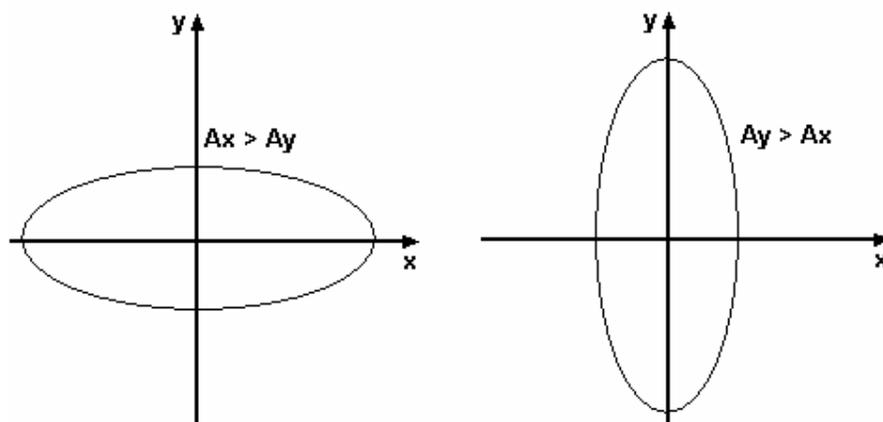
As duas equações anteriores mostram que, segundo x ou segundo y , o movimento é harmónico simples com a mesma frequência. A amplitude dos dois movimentos é também igual, mas existe uma diferença de fase de $\pi/2$ radianos. Podemos portanto concluir que o movimento circular uniforme é a sobreposição de dois movimento harmónicos simples em direcções perpendiculares.

Se as amplitudes forem diferentes, mas mantendo-se as frequências iguais e a mesma diferença de fase entre os dois movimentos, o movimento passa a ser elíptico, como o representado na figura seguinte. Na verdade, dadas as próximas duas equações, elevando ambos os membros ao quadrado obtém-se a terceira equação, que é a equação da elipse.

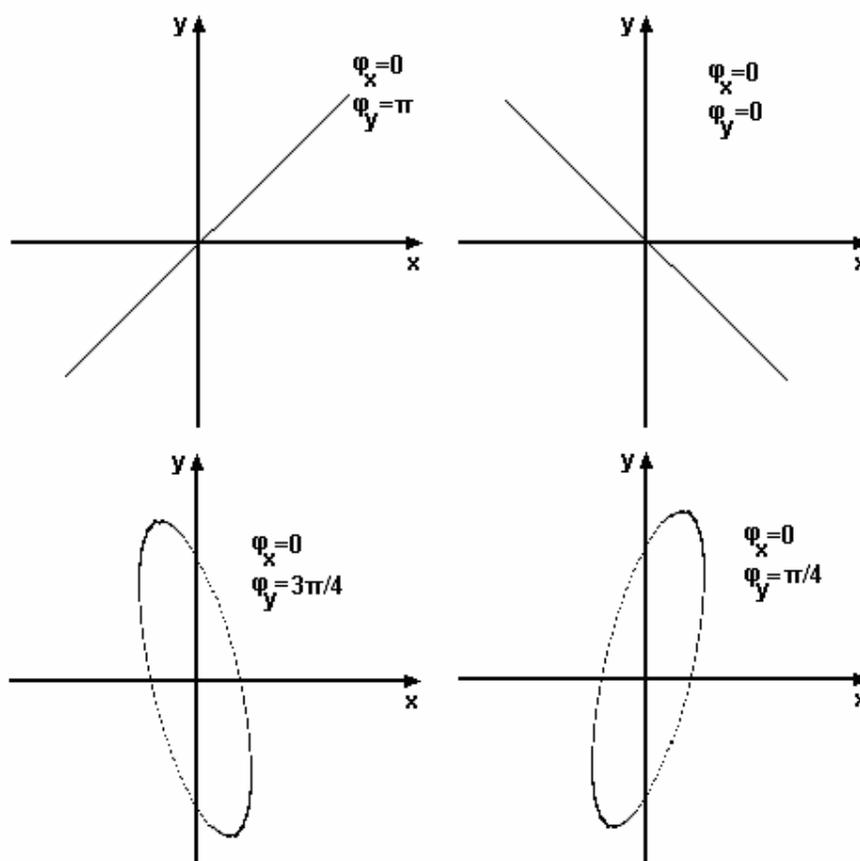
$$x(t) = A_x \cos(\omega t + \varphi)$$

$$y(t) = A_y \sin(\omega t + \varphi)$$

$$\frac{x^2}{A_x^2} + \frac{y^2}{A_y^2} = \cos^2(\omega t + \varphi) + \sin^2(\omega t + \varphi) = 1$$



Se a diferença de fase entre os dois movimentos não for igual a $\pi/2$ radianos, a elipse resultante pode assumir diversas formas, algumas delas são apresentadas a seguir.



TRAJECTÓRIA ELÍPTICA PULSANTE

Uma trajectória elíptica pulsante resulta da sobreposição de dois vectores de fasores com direcções diferentes.

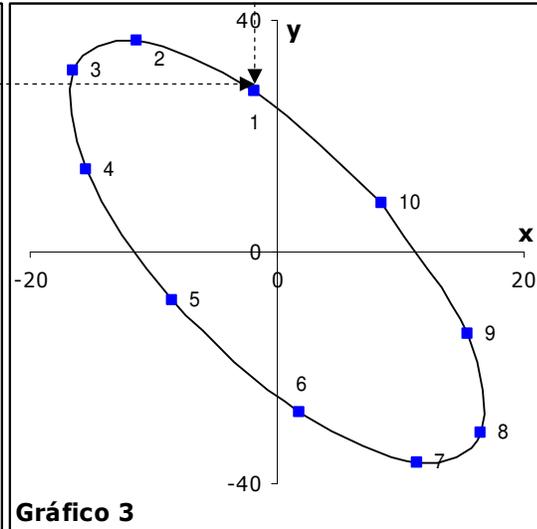
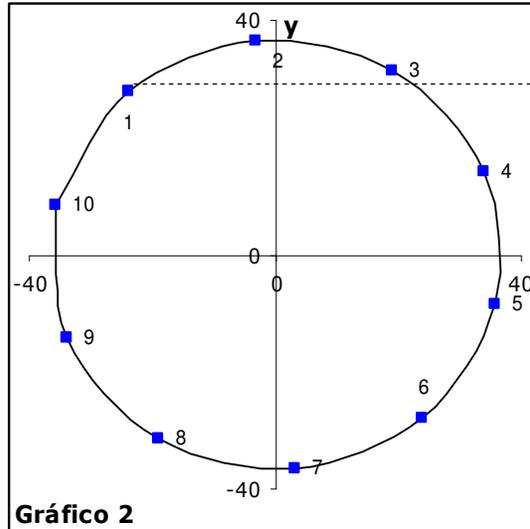
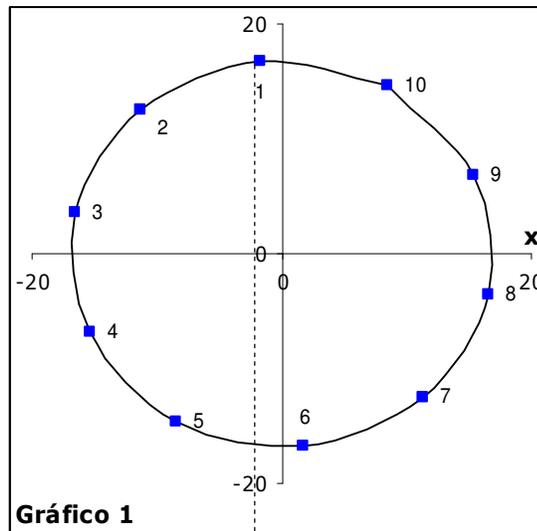
Um caso particular é o dos campos electromagnéticos induzidos por linhas aéreas de transmissão de energia, que em cada ponto, no plano paralelo ao solo, são constituídos por dois vectores de fasores com direcções perpendiculares, amplitudes diferentes, mesma frequência angular, e desfasamento que varia de ponto para ponto.

Para cada ponto do plano xy os campos electromagnéticos apresentam dois vectores que podem ser caracterizados por equações do tipo das equações seguintes.

$$B_x(t) = |B_x| e^{-j(\omega t - \phi_1)}$$

$$B_y(t) = |B_y| e^{-j(\omega t - \phi_2)}$$

A trajectória elíptica pulsante do campo magnético, por exemplo, num ponto do plano xy pode ser construída pela "junção" dos movimentos circulares uniformes de cada direcção: segundo x e segundo y. Essa construção geométrica é representada nos gráficos seguintes.



No gráfico 1 é possível visualizar o movimento circular uniforme que a indução magnética apresenta, num determinado ponto do plano, segundo a direcção do eixo dos xx. São sinalizados dez pontos de um período, igualmente equidistantes no tempo, numerados de acordo com a sua ocorrência temporal. O gráfico 2 é em tudo semelhante ao gráfico 1, difere apenas na direcção do movimento, sendo esta segundo o eixo dos yy. O resultado da indução magnética no ponto considerado resulta da associação dos gráficos 1 e 2 e encontra-se no gráfico 3. Cada ponto do gráfico 3 é obtido pela intersecção dos pontos correspondentes dos gráficos 1 e 2. Por exemplo, o ponto 1 é obtido extraindo a coordenada x do ponto 1 do gráfico 1, e extraindo a coordenada y do gráfico 2.