



Linha Aérea a 400 kV

Subestação dos Arrochais (Sun Arrochais) – Subestação de Alqueva (REN)

Projeto Prévio

Memória Descritiva

Janeiro 2021

INDICE

1.	CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	4
1.1.	OBJECTO.....	4
1.2.	CRITÉRIOS GERAIS DE PROJECTO.....	5
2.	EQUIPAMENTO	6
2.1.	APOIOS.....	6
2.1.1.	Estruturas Reticuladas	6
2.2.	FUNDAÇÕES	7
2.3.	CABOS	8
2.3.1.	Aspetos Gerais do Dimensionamento.....	8
2.3.1.1.	Aspetos Mecânicos	8
2.3.1.2.	Aspetos Eléctricos.....	9
2.3.2.	Distâncias de Segurança Associadas aos Cabos.....	10
2.4.	ACESSÓRIOS DOS CABOS CONDUTORES E DE GUARDA.....	10
2.4.1.	Cabos condutores.....	11
2.4.2.	Cabos de guarda	11
2.5.	AMORTECEDORES DE VIBRAÇÕES	11
2.6.	CADEIAS DE ISOLADORES	12
2.6.1.	Aspetos de Dimensionamento Eléctrico	12
2.6.2.	Acessórios de Cadeia.....	13
2.6.3.	Fixação à Estrutura	13
2.7.	COORDENAÇÃO DE ISOLAMENTO	14
2.8.	CIRCUITO DE TERRA DOS APOIOS	14
2.8.1.	Normalização Adaptada	14
2.8.2.	Constituição e Características dos Circuitos de Terra	15
2.9.	CONJUNTOS SINALÉTICOS	17
3.	CÁLCULOS.....	18
3.1.	CÁLCULOS ELÉCTRICOS	18
3.1.1.	Resistência Eléctrica Linear dos Condutores	18
3.1.2.	Capacidade Térmica	18
3.1.2.1.	Regime Estabilizado.....	18
3.1.2.2.	Regime de Curto-Circuito.....	19
3.1.3.	Efeito Coroa. Campo Eléctrico Crítico. Perdas por Efeito Coroa.....	20
3.1.4.	Ruído Acústico.....	21
3.1.5.	Interferências Radioeléctricas	22
3.1.6.	Constantes Eléctricas Características da Linha.....	23
4.	DIRECTRIZ DA LINHA	23

5.	TRAVESSIAS DE VIAS DE COMUNICAÇÃO	24
5.1.	VIAS-FÉRRIAS.....	24
5.2.	ESTRADAS	24
5.3.	CURSOS DE ÁGUA.....	24
6.	CRUZAMENTOS E PARALELISMOS COM LINHAS DE TELECOMUNICAÇÃO	24
7.	CRUZAMENTOS E PARALELISMOS COM GASODUTOS	25
8.	CRUZAMENTOS E PARALELISMOS COM ADUTORES	25
9.	OUTROS CRUZAMENTOS, TRAVESSIAS E PARALELISMOS	25
10.	BALIZAGEM AÉREA	25
10.1.	SINALIZAÇÃO PARA AERONAVES	25
10.2.	SINALIZAÇÃO PARA AVES	26
11.	ANÁLISE DE RISCOS ORIGINADOS PELA PRESENÇA E FUNCIONAMENTO DA LINHA	26
11.1.	Incêndios	26
11.2.	Queda de Apoios ou de Cabos	27
11.3.	Contactos Acidentais com Peças em Tensão.....	28
11.4.	Tensões Induzidas	28
11.5.	Obstáculos a ligar à Terra e Dimensionamento do Circuito de Terra	29
11.6.	EFEITOS DOS CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS	30
11.6.1.	Valores Limites	30
11.6.2.	Cálculo do Campo Elétrico	30
11.6.3.	Cálculo do Campo Magnético	32
12.	ANEXOS À MEMÓRIA DESCRITIVA.....	33

1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

1.1. OBJECTO

A presente Memória Descritiva refere-se ao Projeto Prévio, da ligação das Centrais Fotovoltaicas Sun Arrochais, na freguesia da Amareleja, concelho de Moura e a Subestação de Alqueva da REN.

A ligação será efetuada através de uma linha aérea simples, a 400 kV entre a Subestação dos Arrochais e a Subestação de Alqueva da REN.

O traçado entre a Subestação dos Arrochais e a Subestação de Alqueva da REN, seguirá numa primeira parte, com cerca de 5 km, um traçado aproximadamente linear até a interseção com o canal da linha existente, SE Alqueva – SE Balboa, a partir deste ponto seguirá paralelamente a esta, distanciada cerca de 45 m para sul, até aproximadamente ao km 21,5, altura em que passa por debaixo da linha da existente e mantém-se paralela a esta, agora a norte, durante cerca 4,6 km até à Subestação de Alqueva.

Em alternativa, de forma a contornar totalmente a Área de Aptidão Turística, o traçado poderá sofrer um desvio de cerca de 2600 m, fazendo cruzamento com a linha existente aproximadamente ao km 20, voltando a encontrar-se com ao Km 22 do traçado original.

Esta ligação permitirá a potenciação e viabilização do cluster fotovoltaico do concelho de Moura e a sua contribuição para a sustentabilidade energética e neutralidade carbónica nacional.

As empresas Sun Arrochais (1, 2, 3 e 4) pertencem a um grupo económico que detém a posse total de um conjunto contíguo de prédios rústicos com a área total de 2.214 hectares, situados no concelho de Moura, freguesia de Amareleja.

Para efeitos de construção e exploração de centrais fotovoltaicas neste conjunto de prédios rústicos, as 4 empresas Sun Arrochais dispõem de uma área total de 600 hectares.

A potência do conjunto de centrais fotovoltaicas a estabelecer pelas empresas Sun Arrochais, de acordo com os objetivos dos promotores, será de aproximadamente 300 a 350 MW.

Os estudos de execução e licenciamento ambiental destas centrais fotovoltaicas, que se iniciaram em janeiro de 2018, estão concluídos por forma a obter uma DIA – Declaração de Impacte Ambiental - favorável junto da entidade responsável, neste caso a Agência Portuguesa do Ambiente, fundamentada por um Estudo de Avaliação de Impacte Ambiental realizado pelo promotor.

Foi já obtido o apoio da Câmara Municipal de Moura para a realização deste investimento o qual, para além da produção fotovoltaica, inclui adicionalmente uma área de investigação e desenvolvimento a estabelecer em parceria com o Departamento de Física da Universidade Nova de Lisboa, nos domínios da produção de novos materiais com recurso à aplicação de técnicas de conversão solar laser.

A expansão da área de produção fotovoltaica e a instalação de unidades de investigação e desenvolvimento correlacionadas inserem-se na estratégia de desenvolvimento e especialização territorial da Câmara Municipal de Moura.

A existência de uma nova linha de transporte de energia a 400 kV é essencial para o reforço da capacidade de injeção na rede de energia com origem no cluster fotovoltaico de Moura.

1.2. CRITÉRIOS GERAIS DE PROJECTO

Do ponto de vista técnico, o projeto a que se refere a presente Memória, é constituído pelos elementos estruturais a seguir indicados. Todos estes elementos são normalmente utilizados pela REN, S.A. nas linhas da Rede Nacional de Transporte do escalão de tensão de 400kV.

- Dois cabos condutores por fase do tipo ACSR 595 (Zambeze);
- Dois Cabos de guarda, um convencional, em alumínio-aço, do tipo ACSR 153 (Dorking) e outro, do tipo OPGW, possuindo características mecânicas e elétricas idênticas ao primeiro;
- Apoios reticulados em aço galvanizado da família “Q”.
- Cadeias de isoladores e acessórios adequados aos escalões de corrente de defeito máxima de 40 kA;
- Isoladores de vidro temperado do tipo U160BS ⁽¹⁾;
- Fundações dos apoios constituídas por quatro maciços independentes, formados por uma sapata em degraus e uma chaminé prismática;
- Circuitos de terra dos apoios, definidos de acordo com as características dos locais de implantação dos apoios.

Nos aspetos técnicos, regulamentares e/ou normativos, entre outros, observaram-se os seguintes no âmbito nacional:

- Especificações da REN – Rede Eléctrica Nacional, SA para linhas Aéreas de Muito Alta Tensão;
- EN 50341-1 – Overhead electrical lines exceeding AC 45 kV. Part 1. General requirements. Common specifications;
- EN 50341-3-17 – National Normative Aspects (NNA) for Portugal;
- RSLEAT – Regulamento de Segurança de Linhas Eléctricas de Alta tensão (DR 1/92);
- Circulares dos Serviços de Aviação Civil;
- Circulares dos Serviços de Hidráulica;
- Regulamento de Protecção às Espécies Florestais e Agrícolas;

⁽¹⁾ Vd. Norma CEI-60305.

- Servidões Administrativas;
- Normas Nacionais e Internacionais Sobre os Temas:
 - Efeitos dos Campos Eletromagnéticos;
 - Tensões Induzidas;
 - Perturbações Radioelétricas,
 - Ruído Acústico.

2. EQUIPAMENTO

2.1. APOIOS

Os apoios a utilizar são pertencentes à família “Q”, para o escalão de tensão de 400 kV, utilizados em linhas de circuito simples, com feixe duplo e dois cabos de guarda.

Os apoios reticulados, acima referidos, foram já objeto de processo de licenciamento como elementos tipo das linhas da RNT pelo que se referem seguidamente apenas as respetivas características gerais.

2.1.1. Estruturas Reticuladas

Os apoios da família de postes tipo “Q” a utilizar, dos tipos QS, QRS, QRA, QA e QT, foram dimensionados para linhas equipadas com dois condutores/fase do tipo ACSR 595 (Zambeze) e dois cabos de guarda do tipo ACSR 153 (Dorking).

As condições de utilização que serviram de base ao licenciamento dos apoios foram:

Tipo de Apoio	Vão de Vento (m)	Vão de Gravítico (m)	Ângulo (grados)
QS	400	600	0
QRS	560	1000	0
QRA	400	580	12,6
QA	400	580	33
QT (*)	400/200	580/400	50/20

(*) Cabos a tração reduzida do lado do pórtico (1500 daN/condutor; 600 daN/c.guarda)

Os apoios a utilizar são constituídos por estruturas metálicas treliçadas, em aço, formadas por cantoneiras de abas iguais e chapas, ligadas por aparafusamento, sendo todos os elementos constituintes zincados a quente, por imersão.

No anexo A.1 apresentam-se as silhuetas destes apoios, de que se destacam as geométricas com incidência direta nos aspetos ambientais, a saber, altura mínima ao solo de 20,60 m (QA1), altura máxima ao mesmo nível de 65,60 m (QR10) e máxima total de 70,60 m. A distância na vertical, entre os condutores e os cabos e guarda, de 5 m (QT) e na horizontal, as distâncias entre fases entre 10 m (QS) e 12,05 m (QT).

Os apoios estão calculados para o aço de designação S275JR ($\sigma_c = 275 \text{ N/mm}^2$) para perfilados até 75x8 (inclusive) e S355JO ($\sigma_c = 355 \text{ N/mm}^2$) para perfilados iguais ou superiores a 80x8, conforme EURONORM EN 10025 de 1994, a que corresponde a designação de 1,0044 e 1,0553, respetivamente, segundo a EURONORM EN 10027-2. Os parafusos serão fabricados a frio, de rosca métrica, da classe 5.6 da norma DIN 7990.

A galvanização será efetuada por imersão a quente, após fabricação, com uma espessura mínima seguintes:

- cantoneiras e chapas:
 - espessura < 6 mm 70 μm (505 g/m²)
 - espessura \geq 6 mm 85 μm (595 g/m²)
- parafusaria:
 - diâmetro < 20 mm 45 μm (325 g/m²)
 - diâmetro \geq 20 mm 55 μm (395 g/m²)

2.2. FUNDAÇÕES

São constituídas por quatro maciços de betão independentes, com sapata em degraus, chaminé prismática e armação.

Conforme estipula a regulamentação as fundações associadas aos apoios são dimensionadas para os mais elevados esforços que lhe são comunicados pela estrutura metálica, considerando todas as combinações regulamentares de ações. O dimensionamento destas fundações é, por sua vez, dependente das condições geotécnicas do terreno onde são implantadas.

Assim, à priori, as fundações são definidas para condições “médias” de terreno correspondentes a uma caracterização – tipo de “areia fina e média até 1 mm de diâmetro de grão” a que correspondem as características:

- Massa Volúmica = 1600 daN/ m³;
- Ângulo de Talude Natural = 30° a 32°;
- Pressão Admissível = 200 a 300 kPa.

Quanto às características do betão, em condições normais, são as correspondentes ao do betão do tipo C20/25, caracterizado pela sua resistência à compressão aos 28 dias de 20 MPa (provete cilíndrico).

As fundações são dimensionadas ao arrancamento, na generalidade dos casos abrangidos pelas condições “médias” de terreno, pelo método do peso de terreno estabilizante e desprezando a contribuição da força de atrito do terreno. Este facto traduz-se, na prática, por um efetivo aumento do coeficiente de segurança relativamente àquele tipo de solicitações.

Os maciços correspondentes aos diversos tipos de postes a utilizar encontram-se referidos no quadro seguinte e estão representadas no anexo A.2.

Tipo do poste	Altura total (m)	Altura útil (m)	Tipo do maciço	Dimensões dos caboucos (m)			Volume de caboucos (m³)	Volume de betão (m³)	Peso de ferro (kgf)
				a	b	c			
QS1 ...	24,55 ...	20,60 ...	DRE040	1,50	1,50	2,40	22,352	7,56	360
QS5	44,55	40,60							
QRS1 ...	25,60 ...	20,60 ...	DRE066	1,80	1,80	2,85	37,981	11,749	640
QRS10	70,60	65,60							
QRA1 ...	25,60 ...	20,60 ...	DRE066	1,80	1,80	2,85	37,981	11,749	640
QRA10	70,60	65,60							
QA1 ...	25,60 ...	20,60 ...	DRE101	2,10	2,10	3,30	59,599	19,675	1064
QA5	45,60	40,60							
QT1 ...	25,60 ...	20,60 ...	DRE135	2,5	2,5	3,5	89,245	27,387	1184
QT5	45,60	40,60							

Na fase de piquetagem serão identificadas as situações a serem objeto de dimensionamento específico, tanto no que se refere à adaptação do apoio ao terreno (regularização do terreno, utilização de pernas desniveladas ou maciços de configuração especial), como ao redimensionamento dos maciços face aos valores que as grandezas relevantes para a estabilidade das fundações apresentem nos locais de implantação dos apoios.

2.3. CABOS

2.3.1. Aspetos Gerais do Dimensionamento

Os cabos a instalar são os seguintes:

- Cabos Condutores: ACSR 595 (Zambeze)
- Cabos de Guarda: ACSR 153 (Dorking) + OPGW

As características mecânicas e elétricas dos cabos utilizados constam do Anexo A.4. O cabo de guarda tipo OPGW (*Optical Ground Wire*) possui no seu interior fibras óticas destinadas às funções de telemedida e telecontrolo bem como de telecomunicações em geral.

2.3.1.1. Aspetos Mecânicos

No cálculo mecânico dos cabos, a efetuar utilizando o método hiperbólico, deverá ser tida em conta a compatibilização dos seguintes valores especificados:

- a) Coeficiente de segurança mínimo de 2,5 relativamente à carga de rotura dos cabos, nas condições regulamentares de tração máxima;
- b) Tração inferior a 22,0% da carga de rotura dos cabos condutores, podendo chegar a 25%, no estado termomecânico mais frequente (EDS : 15°C s/vento);

- c) Tração inferior a 22,0% da carga de rotura dos cabos de guarda, no estado termomecânico mais frequente (EDS : 15°C s/vento);
- d) Flechas dos cabos de guarda da ordem de 85% da dos cabos condutores na situação de EDS.
- e) A capacidade mecânica de cada apoio não pode ser excedida, particularmente pela ocorrência de diferenças de trações longitudinais;
- f) O ângulo de mergulho deverá ser compatível com as distâncias de segurança à massa e com os acessórios de fixação do cabo;
- g) A inclinação das cadeias deverá ser compatível com as distâncias de segurança à massa (considerando-se metade da pressão dinâmica do vento máximo habitual).

A definição das condições de instalação dos cabos, assim como das condições regulamentares de verificação de flechas máximas e mínimas (para efeito de verificação das distâncias mínimas aos obstáculos existentes no traçado), bem como dos estados termomecânicos regulamentares de tração máxima, (para efeito de cálculo dos apoios), será efetuada iterativamente tendo em atenção os pressupostos atrás referidos.

2.3.1.2. Aspetos Elétricos

Do ponto de vista elétrico, o cálculo efetuado para os postes Q, com os cabos condutores ACSR 595 (Zambeze) dispostos segundo a sequência de fases adotada e para a tensão máxima de serviço da linha (400 kV) conduz a campos elétricos máximos à superfície dos condutores de 14,92 kV/cm.

Do ponto de vista das perdas por efeito de coroa, assim como do ruído acústico e interferências radioelétricas estes valores são aceitáveis. Por outro lado, a utilização de cabos ACSR 595 (Zambeze) associada às alturas ao solo impostas a este projeto conduz a valores de campo elétrico ao nível do solo inferiores aos limites normalizados por organismos internacionais (ICNIRP) e adotados na União Europeia (ver 11.6 e o Anexo A.11).

No que diz respeito ao comportamento dos cabos em situações de defeito, o cabo ACSR 595 (Zambeze) está bem adaptado para o escalão de corrente de curto-circuito trifásico de 40,0 kA. O mesmo se passa com os cabos de guarda ACSR 153 (Dorking), os quais são elementos importantes na segurança de pessoas, transportando a maior parte da corrente de defeito reduzindo, portanto a que é escoada para o solo via poste.

Em relação à ação protetora ou de blindagem dos condutores, que se reflete na qualidade de serviço da Rede de Transporte, o cabo de guarda ACSR 153 (Dorking) encontra-se bem dimensionado para uma corrente de descarga atmosférica de 40,0 kA. O cabo OPGW apresentará características similares mantendo-se uma solução equilibrada.

Para efeitos de dimensionamento foram admitidos, nos extremos da derivação, valores máximos das correntes de curto-circuito, trifásico e monofásico, iguais a 40,0 kA.

2.3.2. Distâncias de Segurança Associadas aos Cabos

Sobre este tema observa-se o disposto no RSLEAT (DR 1/92), onde se definem distâncias mínimas várias como:

- Ao solo;
- Às árvores;
- Aos edifícios;
- Às auto-estradas e Estradas Nacionais;
- Entre cabos de guarda e condutores;
- Entre condutores, etc.

Em relação às distâncias de segurança, particularmente aos obstáculos a sobrepassar (solo, árvores, edifícios, estradas, etc.) deve dizer-se que estas são verificadas para a situação regulamentar de flecha máxima, ou seja, temperatura dos condutores de 85 °C na ausência de vento.

No entanto, neste projeto, adotaram-se os critérios utilizados pela REN, S.A., os quais estão acima dos mínimos regulamentares, criando-se assim uma servidão menos condicionada e aumentando-se o nível de segurança em geral. No quadro seguinte mostram-se os valores adotados:

Tipo de obstáculos	REN, S.A. [m]	Mínimos RSLEAT [m]
Solo	14,0	8,0
Árvores	8,0	5,0
Edifícios	8,0	6,0
Estradas	16,0	10,3
Vias Férreas Eletrificadas ⁽¹⁾	16,0	16,0
Outras linhas aéreas ⁽²⁾	7,0	7,0

2.4. ACESSÓRIOS DOS CABOS CONDUTORES E DE GUARDA

Os acessórios de fixação (pinças de amarração e de suspensão) e os de reparação (uniões e mangas de reparação) estão dimensionados para as ações mecânicas transmitidas pelos cabos e para os efeitos térmicos resultantes do escalão de corrente de defeito máxima de 40 kA; os valores de dimensionamento conduzem assim a uma carga última de rotura destes acessórios não inferior a 150 kN e temperatura final do material abaixo do limite térmico para correntes de 40 kA durante 1s.

⁽¹⁾ Para distâncias entre o ponto de cruzamento e o apoio de 400 kV mais próximo igual a 200 metros

⁽²⁾ Para distâncias entre o ponto de cruzamento e o apoio de 400 kV mais próximo igual a 300 metros

2.4.1. Cabos condutores

As pinças de suspensão para fixação dos condutores e cabos de guarda nos apoios de suspensão são do tipo AGS - *Armour Grip Suspension*. Este tipo de pinças, normalizadas nas linhas da REN, S.A., fixam o cabo através de um sistema de varetas helicoidais pré-formadas e de uma manga de neoprene, apresentando características particularmente favoráveis no que diz respeito à redução ou eliminação de danos causados aos fios que formam o cabo na zona de fixação, em resultado de fadiga causada por vibrações eólicas.

As uniões e pinças de amarração dos cabos condutores serão do tipo de compressão, constituídas por uma peça em aço a comprimir sobre a alma de aço do cabo e uma peça de alumínio a comprimir sobre a superfície do cabo. Qualquer desses acessórios tem uma carga de rotura não inferior à dos cabos; no que se refere às uniões, estas garantem a carga de rotura do condutor e apresentam uma resistência elétrica inferior a um troço de cabo de igual comprimento.

As mangas de reparação serão do tipo PRS, constituídas por varetas helicoidais pré-formadas em aço, e destinam-se à reparação de danos nos fios da camada exterior dos cabos.

2.4.2. Cabos de guarda

A suspensão dos cabos de guarda será realizada através de pinças do tipo “*armour-grip*”, tal como ocorre para os cabos condutores.

As pinças de amarração, uniões e mangas de reparação do cabo de guarda convencional (Dorking) têm características equivalentes às correspondentes aos cabos condutores, acima referidas; no que se refere ao cabo OPGW, no qual não são utilizadas uniões, a amarração dos cabos realiza-se, sem corte do mesmo, por meio de conjuntos de varetas helicoidais pré-formadas que fornecem o necessário aperto.

Os acessórios que constituem os conjuntos de fixação dos cabos de guarda serão conformes ao especificado pela REN, adequados ao tipo de linha em causa, encontrando-se referenciados nos seguintes desenhos (ver anexo A.6):

PL 10180 - Conjunto de suspensão do cabo de guarda

PL 10181 - Conjunto de amarração do cabo de guarda

2.5. AMORTECEDORES DE VIBRAÇÕES

Consideram-se aqui os problemas de fadiga causada por vibrações eólicas sobre os fios dos cabos, uma vez que este problema não se coloca em relação aos apoios (estes têm uma frequência própria de vibração muito baixa).

Apesar das conhecidas características redutoras de danos de fadiga nos cabos condutores associadas ao uso de pinças de suspensão AGS, tanto estes como os cabos de guarda estão sujeitos a regimes de vibrações eólicas, que exigem a adoção de sistemas especiais de amortecimento das mesmas.

Alguns fatores determinam o comportamento dos cabos nestas circunstâncias:

- Características de inércia (massa) e de elasticidade;
- Características dos acessórios de fixação dos cabos;
- Tensão mecânica de esticamento (normalmente referenciada ao EDS);
- Geometria dos vãos;
- Regime dos ventos (geralmente os regimes de rajada que condicionam as trações máximas sobre cabos e estruturas, não produzem fadiga nos cabos; são neste caso os regimes lamelares de velocidade baixa-média que produzem as vibrações de mais alta frequência que conduzem a problemas de fadiga mecânica; os terrenos de baixa rugosidade oferecem em geral as condições topográficas para a ocorrência deste tipo de ventos).

A modelização matemática deste fenómeno, com a intenção de produzir resultados generalizáveis a todas as circunstâncias de projeto é bastante complexa e uma perspectiva de cálculo caso a caso não é prática. De um modo geral, em função da parametrização das grandezas acima referidas, são projetados amortecedores, cujas características de inércia e elásticas permitem o amortecimento num espectro relativamente largo de frequências na gama das expectáveis. A geometria de colocação no vão é geralmente definida através de regras empíricas e de uma análise estatística baseada numa amostragem significativa de ensaios, medidas laboratoriais e experiência de utilização. Situações excecionais têm, por vezes, de ser objeto de análise e tratamento específico, mas serão, para além de raras, situações de tratamento a posteriori, isto é, por medição e análise do espectro de vibrações num vão concreto já existente.

O critério de colocação de amortecedores será determinado pelo fornecedor dos dispositivos anti-vibração que efetuará um estudo específico de colocação dos separadores-amortecedores ou eventualmente dos amortecedores, tendo em conta as trações dos cabos e a orografia do terreno.

2.6. CADEIAS DE ISOLADORES

2.6.1. Aspetos de Dimensionamento Elétrico

Neste projeto serão utilizados isoladores de calote e haste em vidro 160BS ⁽¹⁾, em todos os apoios e na ligação ao pórtico da subestação. As características destes isoladores encontram-se no Anexo A.5.

Estes isoladores que classificaremos de “normais” estão bem adaptados às zonas de poluição ligeira/média, que caracterizam em geral todo o traçado da linha em causa. Por outro lado, do ponto de vista do diâmetro do espigão é muito mais do que suficiente para as correntes de defeito previstas para o escalão de corrente de curto-circuito de 40 kA (1s). A linha de fuga específica a considerar para zonas de poluição ligeira/média é de 20 mm/kV (tensão composta) ⁽²⁾.

⁽¹⁾ Vd. Norma CEI-60305.

⁽²⁾ Vd. Norma CEI-60815.

De acordo com estes valores define-se a composição adequada para os diferentes tipos de cadeias, a saber:

Linha a 400 kV em zona de poluição ligeira/média	
Cadeias de amarração aos pórticos (PL 10132A)	2 x 23 isoladores U160BS
Cadeias de amarração dupla (PL 10159A)	2 x 23 isoladores U160BS
Cadeias de suspensão dupla (PL 10161A)	2 x 23 isoladores U160BS

A distância entre hastes de guarda ou entre hastes e anéis de guarda a respeitar na linha, de modo a permitir a garantia de uma adequada coordenação de isolamento na mesma, de acordo com o procedimento da REN S.A. é de 2828 mm.

Estas distâncias estão devidamente coordenadas com as distâncias mínimas entre peças em tensão e as partes metálicas das estruturas (massa) – que o RSLEAT preconiza para situação em repouso e desviada pelo vento, respetivamente, 2,70 e 2,60 m – valores inferiores aos mínimos preconizados pela REN, S.A.⁽¹⁾ que são respetivamente 3,11 e 2,60 m para uma distância entre hastes de guarda de 2828 mm. Esta distância real entre hastes para as cadeias previstas para a linha é superior à das hastes na amarração ao pórtico que é de 1700 mm, para adequada proteção do equipamento (disjuntores abertos ou em fase de abertura).

2.6.2. Acessórios de Cadeia

Os acessórios estão adaptados ao escalão de corrente de defeito de 40,0 kA, durante 1 s, sendo a densidade máxima de corrente limitada a 75 A/mm².

As hastes de guarda nas cadeias de amarração e suspensão são em varão de aço de \varnothing 25 mm, e os anéis de descarga são em tubo de aço com secção mínima de 500 mm² (\varnothing de 60 mm apróx.) e abertura de 50 mm.

Os dispositivos de proteção são dispostos de modo a proteger os isoladores do arco obrigando-o a manter-se afastado destes.

2.6.3. Fixação à Estrutura

Os conjuntos de cadeia, quer dos condutores quer dos cabos de guarda, são fixados à estrutura através de um sistema de caixa e charneira, o qual oferece uma resistência de contacto favorável em comparação com os sistemas de fixação com acessórios de perfil redondo.

⁽¹⁾ O critério determinante deste dimensionamento é o de considerar que a distância entre peças em tensão e a estrutura, quando a cadeia de isoladores equipada é desviada pelo vento, deve garantir uma tensão suportável (50 Hz) 10% acima da tensão suportável da cadeia de isoladores equipada e sob chuva, enquanto que na situação de repouso o critério aponta para a garantia de uma tensão suportável ao choque atmosférico 10% acima da cadeia de isoladores devidamente equipada.

A adoção deste sistema resultou da experiência de exploração e de ensaios específicos para o efeito. No caso dos cabos OPGW os apoios com derivação dos circuitos óticos (e, portanto, têm uma amarração do OPGW) terão um sistema de “shunt” a assegurar a ligação à estrutura de forma franca, de modo a evitar quaisquer sobreaquecimentos na zona de derivação em resultado de correntes de defeito.

2.7. COORDENAÇÃO DE ISOLAMENTO

No sentido de estabelecer a coordenação de isolamento, as várias distâncias mínimas a considerar são organizadas de acordo com uma hierarquia. Por ordem crescente teremos:

- Distância entre hastes de guarda (explosores) de cadeias de amarração da linha aos pórticos das subestações. Proteção prioritária do equipamento das subestações (disjuntores em fase de abertura ou abertos em definitivo) contra sobretensões de tipo atmosférico;
- Distância entre hastes de guarda nas cadeias de isoladores. Aqui a linha terá um nível de isolamento semelhante ao dos equipamentos que constituem os painéis de linha, ou seja:
 - Tensão suportável ao choque atmosférico, escalão de 400 kV 1425 kV
 - Tensão suportável ao choque de manobra, escalão de 400 kV 1050 kV
- Distância no ar entre peças em tensão (condutores e/ou acessórios) e a estrutura, na situação de repouso (sem vento) e com uma inclinação introduzida pelo vento, que se manifesta através do movimento das cadeias de isoladores. Estas distâncias garantem tensões suportáveis superiores às mencionadas atrás, com o objetivo de evitar o contornamento nas estruturas.

2.8. CIRCUITO DE TERRA DOS APOIOS

2.8.1. Normalização Adaptada

Todos os apoios são ligados à terra por meio de “circuito de terra” adequados, de forma a conseguirem-se valores convenientes para as respetivas resistências de terra.

A normalização adotada pela REN,SA neste âmbito, toma em consideração o seguinte:

* **Zonas públicas e frequentadas** ⁽¹⁾, as recomendações estipuladas na publicação ANSI/IEEE std 80 -1986.

⁽¹⁾ A fim de se tornar mais claras estas definições diga-se que se entende por **zonas públicas** aquelas onde se verifique uma densidade populacional grande ainda que só em determinadas ocasiões (parques urbanos), áreas destinadas a convívio cultural, recreativo ou desportivo, recintos destinados a feiras, mercados, atos públicos e religiosos, lugares de romaria, zonas de equipamento social coletivo como hipermercados, hospitais e lugares de ensino, etc. Por sua vez uma **zona frequentada** será aquela que não sendo da categoria anterior se pode caracterizar pela presença humana amiúde como caminhos de serviço, áreas junto a fontes ou poços de utilização habitual, zonas agrícolas de catividade frequente do tipo hortas, instalações agro-pecuárias e de apoio agrícola, etc. Uma zona será entendida como **pouco frequentada** se corresponder a uma zona submetida a exploração agrícola em que a intervenção humana é reduzida, a uma exploração ganadeira, etc. Finalmente é entendida como **zona não frequentada** se a presença humana é esporádica, sendo normalmente associada à inaptidão agrícola como por exemplo zona florestal, zona de acentuado declive, etc.

Os limites especificados para a tensão de contacto e de passo, admitindo uma resistividade do solo de 100 Ω .m e um tempo de eliminação de defeito 0,5 s, são respetivamente:

Zona Pública	Zona frequentada
$U_c = 189 \text{ V}$	$U_c = 255 \text{ V}$
$U_p = 262 \text{ V}$	$U_p = 355 \text{ V}$

* **Zonas pouco frequentadas**, o prescrito nas especificações VDE 0141/7.76;

* **Zonas não frequentadas**, as recomendações estipuladas na norma Suíça, referência ASE 3569 - 1.1985.

Nestas duas últimas zonas, e considerando tempos de eliminação de defeito < 0,5s, as recomendações enunciadas não especificam qualquer valor limite para a tensão de contacto e de passo.

Recorre-se aqui às equações de *Dalziel* para a corrente tolerável pelo corpo humano, e faz-se intervir a resistência elétrica média de um indivíduo (1000 Ω) e a resistência média pé/solo, proporcional à resistividade do solo. Os valores limites referidos aparecem, portanto, parametrizados pela resistividade do solo e o tempo de eliminação de defeito. Enquanto este segundo, conforme características dos equipamentos de proteção e estatística da exploração da RNT está garantido com um nível alto de probabilidade, já o valor da resistividade é bastante variável quer em valor médio de local para local quer localmente nas diferentes direções em torno do poste e ainda ao longo do tempo em função do grau de humidade do solo. Por outro lado, note-se que estes valores limites crescem com o valor da resistividade do solo (com incidência na resistência pé/solo), o que justifica por vezes a utilização de gravilha ou asfalto/materiais de alta resistividade) numa camada superficial sobre o solo como medida para subir aqueles limites. Em qualquer caso o tratamento de zonas públicas deve ser sempre feito caso a caso e com uma metodologia que passa por medições e análise *in situ* que confirmem as estimativas obtidas pelo modelo de cálculo.

2.8.2. Constituição e Características dos Circuitos de Terra

A constituição e características dos circuitos de terra, que se encontram indicadas no Anexo A.3, têm em consideração o que a seguir se refere:

A) Zonas pouco frequentadas e/ou não frequentadas

A configuração tipo de elétrodos de terra que se preconiza utilizar nestas zonas, é em todos os apoios, de quatro estacas e respetivos cabos de cobre de ligação à estrutura.

Os elétrodos de terra são estacas de "*Copperweld*" de 16 mm de diâmetro e 2,1 m de comprimento, enterradas na vertical uma em cada um dos cantos exteriores do conjunto de caboucos devendo os seus topos estar a uma profundidade mínima de 0,8 metros.

Os cabos que interligam os eléctrodos de terra às cantoneiras das bases são de cobre nu de 50 mm². O cabo é ligado à cantoneira e às estacas por intermédio de ligadores apropriados, procurando-se sempre um permanente bom contacto e de baixa resistência.

Para a configuração em análise, o valor da resistência de terra varia ligeiramente com o tipo de apoio, pelo facto de a geometria da malha estar associada à base do apoio; o valor da resistência de terra para a solução “standard” é de cerca de 10 Ω, admitindo-se uma resistividade do solo de 100 Ω.m ⁽¹⁾.

No quadro abaixo, apresentam-se a título apenas indicativo as características deste tipo de circuito de terra, no que se refere à tensão de contacto e de passo, e ainda ao potencial máximo no solo em % do potencial do circuito de terra, segundo a direcção da diagonal do apoio ou do maciço de fundação:

Tipo de Circuito De Terra	Resistência de Terra para $\rho=100 \Omega.m$ [Ω]	Potencial máx. no solo em % do potencial do circuito de Terra	Tensão de Contacto em % do potencial do circuito de Terra [d = 1,0 m]	Tensão de Passo em % do potencial do circuito de Terra
4 estacas Ø=16mm l = 2,1 m	10,87	40,45	64,95	8,24

Salienta-se que nestas condições, está garantido o valor de resistência de terra menor que 15 Ω, recomendado para o 1º km junto das subestações, procurando-se deste modo diminuir a probabilidade de contornamentos por arco de retorno.

Caso o valor da resistência de terra seja superior aos 15 Ω, torna-se necessário melhorar o circuito de terra, podendo-se instalar um anel a unir as 4 estacas, como se refere no desenho Anexo 3; esta opção será válida para uma resistividade do solo no domínio 100 a 300 Ω.m, indicando-se no quadro abaixo os valores obtidos para o tipo de configuração do circuito de terra em análise, na direcção da diagonal do apoio:

Tipo de Circuito De Terra	Resistência de Terra para $\rho=300 \Omega.m$ [Ω]	Potencial máx. no solo em % do potencial do circuito de Terra	Tensão de Contacto em % do potencial do circuito de Terra [d = 1,0 m]	Tensão de Passo em % do potencial do circuito de Terra
4 estacas Ø=16mm l=2,1m, anel	18,47	72,46	41,72	14,48

⁽¹⁾ No cálculo das características de resistência, dos perfis de potencial ao nível do solo, das tensões de contacto e de passo para cada configuração de malha de terra utiliza-se um modelo tridimensional de cálculo de campos eléctricos baseado na simulação de fontes de correntes retilíneas que podem ser subdivididas até ao caso limite de fontes de corrente pontuais (método de elementos finitos). Definida a geometria da malha de terra, calculados os coeficientes de resistência entre troços condutores e por sua vez os coeficientes de condutância, é possível conhecer a corrente escoada ou captada por cada troço condutor. Para este efeito fixa-se o potencial da malha (suposta esta equipotencial a um valor unitário (100%). Conhecidas as correntes determina-se a resistência de terra desta. Dado o carácter indicativo dos valores admitiu-se por razões práticas a homogeneidade do solo relativamente à sua resistividade.

B) Zonas públicas e frequentadas

Nestas zonas assume particular interesse, o valor da resistência de terra (depende da resistividade do solo e da geometria da configuração do circuito de terra), o uso de dois cabos de guarda, com incidência na distribuição da corrente de defeito, transportando a maior parte daquela e reduzindo-se, portanto, a corrente que é escoada para o solo via poste.

Desempenham, pois os cabos de guarda um papel importante de proteção, sob o ponto de vista de segurança de pessoas e de blindagem de condutores às descargas atmosféricas.

Em locais frequentados por pessoas ou animais e sempre que seja considerado necessário obter resistências de terra inferiores (ou para se obter menores valores de resistências de terra) proceder-se-á ao reforço do “circuito de terra” base acima referido, por ligação dos elétrodos entre si por meio de cabo de cobre idêntico ao acima referido, instalado horizontalmente (“circuito de terra de estacas e anel de ligação”), ou através da ligação ao mesmo de contrapeso em cabo de cobre (“circuito de terra de estacas, anel e contrapesos”).

A corrente de defeito tomada em consideração no dimensionamento do circuito de terra é a monofásica, admitindo-se um valor máximo de 40,0 kA nas subestações interligadas pelas linhas em fase de projeto.

2.9. CONJUNTOS SINALÉTICOS

Em cada apoio existirá sinalização claramente visível do solo, na qual constará:

- Chapa de sinalização ou de advertência com o texto “PERIGO DE MORTE” e o nº de ordem do apoio na linha;
- Chapa de identificação com o nome (sigla) da linha e o nº de telefone do departamento responsável.

Adicionalmente todos os apoios localizados junto de vias de comunicação e zonas urbanas deverão ser ainda equipados com placas sinaléticas, onde figura o logótipo da REN, S.A., e cujas dimensões e características são as seguintes:

- Chapa de aço de 3 mm de espessura com as dimensões de 2000x1000mm;
- Autocolante em vinil refletor branco aplicado numa das faces do painel;
- Logótipo REN, S.A., em autocolante vinil brilhante.

Nos apoios cuja numeração seja múltipla de dez serão instalados Sinal Identificador de Apoio para visualização aérea (desenho LD30390).

No anexo A.17 estão apresentados todos os desenhos dos conjuntos sinaléticos acima referidos.

3. CÁLCULOS

3.1. CÁLCULOS ELÉTRICOS

3.1.1. Resistência Elétrica Linear dos Condutores

Os feixes condutores destas linhas são constituídos por dois cabos geminados do tipo ACSR 595 (Zambeze). Estes, por sua vez, são constituídos por um núcleo central em fios de aço e por três camadas de fios em liga de alumínio. A ficha deste cabo está incluída no Anexo A.4.

A resistência elétrica quilométrica do cabo ACSR 595 (Zambeze), em corrente contínua à temperatura de 20°C, é de 0,0511 Ω/km. A resistência elétrica em corrente alternada (f=50 Hz) tendo em conta o efeito pelicular é de 0,0522 Ω/km. A variação da resistência elétrica com a temperatura é dada por:

$$R(\theta) = R(20) \cdot (1 + \alpha \cdot (\theta - 20))$$

onde o coeficiente de temperatura α tem o valor 0,00403 °K⁻¹.

3.1.2. Capacidade Térmica

3.1.2.1. Regime Estabilizado

Este regime é definido para uma temperatura máxima do condutor, definida para o compromisso económico máximo na relação (transporte anual de energia)/(perdas energéticas). Esta temperatura está definida para a 85°C. O modelo de cálculo tem em conta a dissipação térmica da energia elétrica nos condutores (efeito Joule) em resultado da passagem de corrente e a interação dos condutores com o meio envolvente em termos de energia radiante. O modelo utilizado é conhecido por modelo de *Kuipers-Brown* que se pode escrever:

$$C \cdot S \cdot dT = P_j \cdot dt + P_s \cdot dt - P_c \cdot dt - P_i \cdot dt$$

ou

$$C \cdot S \cdot \frac{dT}{dt} = I^2 \cdot R_T + \alpha \cdot R \cdot d - 8.55 \cdot (T - T_A) \cdot (v \cdot d)^{0.448} - E \cdot \sigma \cdot \pi \cdot d \cdot (T^4 - T_A^4)$$

Onde $C.S.dT$ é a energia térmica armazenada no condutor durante o tempo dt , $P_j.dt$ é a energia Joule, $P_s.dt$ a energia absorvida a partir da radiação solar, $P_c.dt$ a energia perdida por convecção (para velocidades do vento superiores a 0,2 m/s, ou seja, convecção forçada) e $P_i.dt$ a energia perdida por irradiação. Por sua vez os restantes parâmetros têm o significado seguinte:

- C - Capacidade calorífica (W.s/m³);
- S - Secção transversal (m²);
- T - Temperatura absoluta do condutor (°K);
- t - Tempo (s);
- R_T - resistência eléctrica à temperatura absoluta T (W);
- a - Coeficiente de absorção solar (0,5);

- R - Radiação solar (1000 W/ m²);
- d - Diâmetro do condutor (m);
- TA - Temperatura ambiente absoluta (°K);
- v - Velocidade do vento (0,6 m/s para o regime de calma);
- E - Poder emissivo em relação ao corpo negro (0,6);
- σ - Constante de *Steffan* (5,7 x 10⁻⁸ W/m²K⁴).

No modelo acima, o regime permanente traduz-se por ser: $\frac{dT}{dt} = 0$

A corrente admissível é, no fundamental, função do aquecimento dos condutores (diferença da temperatura do condutor e da temperatura ambiente) traduzindo-se a ação daquele aquecimento em:

- Perdas por efeito Joule;
- Flechas máximas, com incidência das distâncias mínimas ao solo e outros obstáculos;
- Comportamento dos acessórios (pontos quentes);
- Envelhecimento dos condutores.

No anexo A.10, apresenta-se a evolução da temperatura dos condutores para diversos valores eficazes de corrente e diferentes temperaturas ambientes (i.e., temperatura do ar à altura dos condutores). Os valores adotados para os parâmetros acima referidos são globalmente aqueles que melhor se adaptam às características do território nacional.

Pode ali observar-se, por exemplo, que para a velocidade do vento de 0,6 m/s e temperatura ambiente de 32°C (“Verão”) a corrente máxima admissível que o condutor ACSR 595 (Zambeze) pode suportar é aproximadamente de 1153 A a que corresponde uma capacidade de transporte da linha de 1598,3 MVA por circuito. Por sua vez, para uma temperatura ambiente de 15°C (“Inverno”) a corrente máxima admissível é aproximadamente de 1341 A, a que corresponde a capacidade de transporte de 1857,6 MVA.

3.1.2.2. Regime de Curto-Circuito

A solução técnica global de linha a 400 kV, cabo geminado, aqui adotada é adequada para correntes de defeito até 40 kA, quer no que diz respeito a condutores como a cabos de guarda. Um só condutor ACSR 595 (Zambeze) pode suportar 30,0 kA, durante 1s para uma temperatura máxima do cabo de 125°C, supondo que está à temperatura de 85°C ao ocorrer o curto-circuito.

Considerando o modelo de cálculo acima apresentado para uma corrente de defeito de 40 kA e um tempo de atuação das proteções de 0,35 segundos, a temperatura final do cabo ACSR 595 (Zambeze) não excede os 125°C, o que não introduz quaisquer limitações em termos de segurança uma vez que a linha está projetada para distâncias de segurança que compensam os aumentos de flecha nesta eventualidade.

O quadro seguinte evidencia, para variação da temperatura do cabo de 85°C para 125°C, as variações de flecha do cabo ACSR595 (Zambeze) para vãos de 400 e 1000 metros.

ACSR 595 (Zambeze)						
Vãos	Parâmetros [m]			Flechas [m]		Varição de flecha
	40°C	85°C	125°C	85°C	125°C	85°C-125°C [m]
400 m	1500	1319	1201	15,19	16,69	1,50
1000 m	1500	1463	1433	86,26	88,14	1,88

Um só cabo de guarda ACSR 153 (Dorking) pode suportar correntes de defeito até 19,5 kA - 0,5 s (para uma temperatura máxima do cabo de 200°C). A linha possui em toda a extensão dois cabos de guarda. Considerando uma corrente de curto-circuito de 40,0 kA e admitindo o defeito num dos extremos da linha, ter-se-ia em cada cabo de guarda uma corrente igual a $0,75 \cdot 40 / 2 \cdot 0,95 = 14,25$ kA (supondo o escoamento de 75% da corrente de defeito pelos cabos de guarda, 95% para a subestação mais próxima e 5% para a mais afastada). A este valor corresponde uma temperatura final do cabo de 121°C (tempo de atuação das proteções igual a 0,5 s), considerando o cabo à temperatura de 30°C antes do defeito.

3.1.3. Efeito Coroa. Campo Elétrico Crítico. Perdas por Efeito Coroa

O cálculo do campo elétrico crítico e perdas por efeito coroa foi feito com base nas características geométricas dos apoios Q e considerada a distância mínima dos cabos ao solo do critério REN, S.A. (14 metros) como a altura média.

No anexo A.13 apresentam-se os valores dos campos máximos à superfície dos condutores com relevância para este capítulo.

Os campos máximos à superfície dos condutores foram calculados através de:

$$[E] = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon} \cdot [D] \cdot [A]^{-1} \cdot [U]$$

onde $[E]$ é o vetor dos fasores de campo elétrico (no modelo de cálculo o problema é de dimensão 8, para ter em conta os seis condutores geminados e os dois cabos de guarda), $\varepsilon = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0$ (com $\varepsilon_r = 1$ e $\varepsilon_0 = 8,859 \cdot 10^{-12}$ A.s/V.m), $[D]$ é um vetor dos inversos dos raios dos cabos:

$$[D] = \left[\frac{1}{r_i} \right]_{i=1 \dots 8}$$

$[A]^{-1}$ é a inversa da matriz dos coeficientes de potencial (A.s/V.m) e $[U]$ é o vetor dos fasores de tensão fase-terra (V). O modelo acima inclui os cabos de guarda, os quais estão considerados ao potencial do solo. O campo elétrico máximo à superfície dos condutores para a tensão nominal da linha (400 kV) e considerando a sequência de fases adotada é de 14,92 kV/cm.

O campo elétrico crítico é definido como o limiar do valor de campo elétrico a partir do qual o efeito coroa surge. O valor deste limiar depende da geometria dos condutores e de parâmetros atmosféricos que afetam as condições de ionização do ar.

No presente projeto recorreu-se à expressão de PEEK para o cálculo do campo elétrico crítico:

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

onde r é o raio do cabo (1,43 cm para os condutores ($i=1\dots6$) e 0,73 cm para os cabos de guarda ($i=7,8$), m é o fator de forma dos cabos (que origina zonas de maior densidade de linhas de força; tomou-se o valor 0,6), δ é a pressão atmosférica relativa definida por:

$$\delta = \left[0,386 \cdot \frac{760 - 0,086 \cdot h}{273 + \theta} \right]$$

onde h é a altitude média da linha e θ a temperatura média anual (15°C).

Os valores de altitude média foram estimados a partir das cotas no terreno de 100 m. A altitude influência com algum significado o valor do campo elétrico crítico, baixando-o. Na prática isto significa um aumento de perdas por efeito coroa.

As perdas por efeito coroa com bom tempo foram calculadas pela expressão de PETERSON

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

onde U é a tensão eficaz entre fase e neutro em kV, r o raio do condutor em cm, D_m a distância média geométrica entre condutores, f a frequência do sistema (50 Hz) e ϕ um fator experimental dependente da relação E/E_0 , sendo E o campo elétrico à superfície do condutor e E_0 o campo elétrico crítico, ambos em kV/cm.

As perdas por efeito coroa dependem particularmente das condições climatéricas. Sob chuva elas podem crescer várias dezenas de vezes acima do valor calculado para bom tempo. Para determinar o valor médio anual das perdas é usual utilizar um fator multiplicativo entre 3 e 9 (no Anexo A.13 usou-se 5).

3.1.4. Ruído Acústico

No anexo A.13 apresentam-se os valores do nível do ruído acústico entre 0 e 35 m do eixo da linha para a distância ao solo do critério REN, S.A. (14 metros) e para a tensão nominal.

O cálculo e a análise da conformidade dos níveis de ruído que tenham origem na linha, com o RGR (Dec. Lei 09/07 alterado pelo Dec. Lei 278/2007) tem por base um $L_{Aeq,LT}$ de acordo com a NP 1730, substituída pela NP ISO 1996-1:2011; NP ISO 1996-2:2011, e o procedimento de cálculo utilizado, foi segundo um modelo previsional que tem por base o modelo *Bonneville Power Association* (BPA), o qual foi desenvolvido com base na avaliação paramétrica dos modelos existentes na literatura bem como no cruzamento com valores resultantes das várias campanhas de medições nas linhas, em condições favoráveis (com precipitação), para validação.

Este modelo previsional e de monitorização encontra-se aceite pela Agência Portuguesa do Ambiente.

O modelo de emissão tem duas componentes: uma que calcula, em condição favorável, o nível L_{Aeq} da linha, L_F , para um determinado ponto recetor e de acordo com os valores do campo elétrico E à superfície de cada condutor ou fase, o diâmetro deste e a geometria da linha:

$$L_F = L_{Aeq,i} = -109,6 + 120 \cdot \log_{10}(E_i) + 55 \cdot \log_{10}(d_i) - 11,4 \cdot \log_{10}(r_i) - 5,8 + \frac{q}{300}$$

Onde:

- E_i [kV/cm]: campo elétrico à superfície dos condutores, na fase i ;
- d_i [cm]: diâmetro dos condutores, na fase i ;
- r_i [m]: distância radial dos condutores ao recetor, para a fase i ;
- q [m]: cota do terreno de implantação da linha.

e uma outra componente que calcula, agora em condição desfavorável, o valor do nível L_{Aeq} da linha, L_H , para um determinado ponto recetor e de acordo com os valores do campo elétrico E à superfície de cada condutor ou fase, o diâmetro deste e a geometria da linha:

$$L_H = L_{Aeq,i} = -120,93 + 120 \cdot \log_{10}(E_i) + 55 \cdot \log_{10}(d_i) - 11,4 \cdot \log_{10}(r_i) - 5,8 + \frac{q}{300}$$

Os valores de $L_{Aeq,i}$ de cada fase i são de seguida adicionados energeticamente, obtendo-se o valor total:

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

O nível sonoro contínuo equivalente de longo termo, $L_{Aeq,LT}$, para o período de um ano, é obtido pesando as contribuições dos níveis calculados em situação favorável (L_F) com os níveis calculados em situação desfavorável ou “homogénea” (L_H). O peso das contribuições será dado pela probabilidade da ocorrência da situação favorável, ou seja, de precipitação. Como se prevê que esta probabilidade seja diminuta, o nível sonoro contínuo equivalente de longo termo será principalmente determinado pelos níveis calculados em situação desfavorável ou “homogénea” (L_H).

$$L_{Aeq,LT} = 10 \cdot \log_{10} \left[p \cdot 10^{\frac{L_F}{10}} + (1 - p) \cdot 10^{\frac{L_H}{10}} \right]$$

O valor de p é obtido a partir de informação climatológica adequada à localização geográfica da linha, que no presente projeto, foi considerado o *valor de $p=0,04$* .

3.1.5. Interferências Radioelétricas

No anexo A.13 apresentam-se também os valores do nível de ruído de radio interferência. Estes valores foram calculados, de acordo com a norma ANSI, através da expressão:

$$E = (53,75 \pm 5) + k \cdot (g_m - 16,95) + 40 \cdot \log \left(\frac{d}{3,93} \right) + E_n + 20 \cdot k_D \cdot \log \left(\frac{20}{D} \right) + E_{FW}$$

Onde:

- E o nível de ruído (RI) em dB [dB/1 μ V/m];
- k uma constante igual a 3,5;
- g_m o campo elétrico máximo em kV_{ef}/cm;
- d o diâmetro do condutor em cm;
- E_n tem o valor de - 4 dB para condutores simples;
- k_D é o fator de atenuação para a faixa de frequências de 0,5 mHz a 1,6 Mhz e tem o valor 1,6;
- D é a distância radial do condutor à antena de medição a 2 m do solo;
- E_{FW} é uma parcela de correção devida às condições atmosféricas, sendo $E_{FW}=0$ para bom tempo e $E_{FW}=17$ dB para chuva.

De acordo com o CISPR o nível de ruído interferente, a 15 m do condutor exterior, para as linhas de 400 kV deve ser inferior a 53 dB/ μ V/m com bom tempo. O valor calculado de 24,3 dB/ μ V/m é bastante inferior.

3.1.6. Constantes Elétricas Características da Linha

Grandezas diretas:

- Resistência linear : 0,035 Ω /km
- Reactância longitudinal : 0,3332 Ω /km
- Susceptância transversal : 3,47*10⁻⁶ S/km
- Condutância transversal : 0,000 S/km

Grandezas homopolares:

- Resistência linear : 0,200 Ω /km
- Reactância longitudinal : 0,67 Ω /km
- Susceptância transversal : 2,55*10⁻⁶ S/km
- Condutância transversal : 0,000 S/km

4. DIRECTRIZ DA LINHA

O traçado da linha será definido no interior do corredor selecionado no âmbito do “Estudo de Grandes Condicionantes” e de “Seleção de Corredores”.

Na seleção do traçado da linha serão tidas em consideração os elementos e conclusões dos estudos ambientais acima referidos, evitando-se tanto quanto possível as “situações de conflito” detetadas; serão igualmente tidas em consideração as medidas minimizadoras propostas.

O traçado entre a Subestação dos Arrochais e a Subestação de Alqueva da REN, seguirá numa primeira parte, com cerca de 5 km, um traçado aproximadamente linear até a interseção com o canal da linha existente, SE Alqueva – SE Balboa, a partir deste ponto seguirá paralelamente a esta, distanciado cerca

de 45 m para sul, até aproximadamente ao km 21,5, altura em que passa por debaixo da linha da existente e mantem-se paralela a esta, agora a norte, durante cerca 4,6 km até à Subestação de Alqueva.

Em alternativa, de forma a contornar totalmente a Área de Aptidão Turística, o traçado poderá sofrer um desvio de cerca de 2600 m, fazendo cruzamento com a linha existente aproximadamente ao km 20, voltando a encontrar-se com ao Km 22 do traçado original.

5. TRAVESSIAS DE VIAS DE COMUNICAÇÃO

5.1. VIAS-FÉRRIAS

No traçado da linha não se prevê travessias de vias-férreas.

5.2. ESTRADAS

No traçado da linha prevê-se a travessia de algumas estradas nacionais, que serão objeto de análise específica, tendo em vista o cumprimento das disposições regulamentares aplicáveis, em particular no que se refere às distâncias livres mínimas.

5.3. CURSOS DE ÁGUA

No traçado da linha prevê-se a travessia cursos de água, nomeadamente, do rio Guadiana, próximo da saída da barragem de Alqueva, que será objeto de análise específica, tendo em vista o cumprimento das disposições regulamentares aplicáveis.

6. CRUZAMENTOS E PARALELISMOS COM LINHAS DE TELECOMUNICAÇÃO

Nos pontos em que a linha efetue cruzamentos com linhas de Telecomunicações, deverão ser respeitados os ângulos mínimos de cruzamento e distâncias de segurança impostos pela Legislação em vigor. A linha terá o neutro ligado à terra e possuirá em toda a sua extensão dois cabos de guarda também ligados à terra. As f.e.m. induzidas nas linhas de telecomunicações nas secções de cruzamento com esta linha serão estimadas através de: $e = I \cdot M \cdot L \cdot k \cdot 10^{-3}$ (V), onde I , em A, é o valor eficaz da corrente de defeito indutora (corrente de curto circuito monofásico à terra) no vão de cruzamento, M o valor médio do módulo da impedância mútua linear das duas linhas para a secção considerada em $m\Omega/km$, L é o comprimento (valor algébrico) da projeção da secção sobre a linha de energia em km e k é um coeficiente redutor que tem em conta o retorno duma parte da corrente de defeito pelos cabos de guarda e o efeito de écran dos condutores ligados à terra e paralelos à linha de energia e aos circuitos de telecomunicações.

O valor da corrente de defeito utilizado nos cálculos foi de 40 kA. O valor médio da impedância mútua linear será parametrizado pela resistividade do solo de 100 $\Omega.m$, valor adequado para esta zona.

Para o efeito écran e para os cabos de guarda em causa o fator a adotar será de 0,7.

Estes valores deverão ser inferiores às ITU-T (anterior CCITT) e UNIPED de não exceder 650 V para linhas aéreas de telecomunicações em fios nus.

7. CRUZAMENTOS E PARALELISMOS COM GASODUTOS

No traçado da linha não se prevê travessias com gasodutos.

8. CRUZAMENTOS E PARALELISMOS COM ADUTORES

Aquando do projeto, na definição do traçado da linha, mais concretamente da localização dos apoios, deverá se averiguar a existência de adutores, sendo que de acordo com a legislação em vigor designadamente o decreto – Lei nº 230/91 de 21 de Junho e a Lei nº 13/95 de 6 de Julho, não será permitido efetuar, sem licença específica da Concessionária, quaisquer obras nas faixas de respeito dos aquedutos e adutores que correspondem às faixas de terreno que se estendem até 10 m para cada lado das linhas que delimitam a zona de respeito do aqueduto. A zona do aqueduto inclui regra geral uma faixa de 5 m para cada lado quando este passa à superfície ou pode ser inferior se o mesmo é enterrado.

9. OUTROS CRUZAMENTOS, TRAVESSIAS E PARALELISMOS

No traçado da linha não se prevê outros cruzamentos, travessias ou paralelismos.

10. BALIZAGEM AÉREA

Sempre que se justificar, o “Projeto de Execução” considerará a balizagem aérea diurna e noturna dos cabos e dos apoios. Os dispositivos e processos de balizagem a utilizar estarão de acordo com as especificações em vigor na REN, SA.

10.1. SINALIZAÇÃO PARA AERONAVES

A balizagem será efetuada de acordo com as disposições contidas na Circular de Informação Aeronáutica 10/03 de 6 de maio, através de bolas alternadamente de cor branca e laranja internacional, com o diâmetro mínimo de 600 mm, espaçadas de 60 m e dispostas em ziguezague sensivelmente segundo a horizontal.

Deste modo, as projeções ortogonais das bolas nos dois cabos sobre um plano vertical paralelo à linha ficarão a 30 m umas das outras.

Quando se justificar serão igualmente balizados os apoios por pintura parcial e nas cores branco e laranja internacional.

Para a balizagem noturna dos apoios poderão utilizar-se “balisores” ou sinalizadores com leds aprovados pelo INAC ou pela ANA.

No presente caso prevê-se necessidade de balizagem pelo menos no vão de atravessamento do rio Guadiana, uma vez que este apresenta uma largura superior a 80m.

10.2. SINALIZAÇÃO PARA AVES

Sempre que necessário serão colocados dispositivos de sinalização para aves do tipo BFD (ou salva-pássaros) a serem instalados nos cabos de guarda. Tratam-se de dispositivos de forma helicoidal em plástico com um comprimento da ordem de 1 m e que na parte central têm um anel de maior diâmetro de cor branca ou vermelha que se ajustam ao cabo de guarda por enrolamento.

Este anel combinado com a cor do dispositivo aumenta significativamente a visibilidade dos cabos pelas aves, sem lhe conferir um aspeto volumoso e não introduz nenhum aumento significativo em relação à área exposta ao vento.

Os dispositivos serão colocados espaçados de acordo com critérios definidos no protocolo REN/ICNF. Nos vãos em que já existam bolas de balizagem e que seja necessário colocar BFD (ou salva-pássaros) estes serão cumulativamente colocados de acordo com os espaçamentos definidos entre as bolas de balizagem.

11. ANÁLISE DE RISCOS ORIGINADOS PELA PRESENÇA E FUNCIONAMENTO DA LINHA

Os riscos associados à presença e funcionamento das linhas, incluindo os que decorrem de circunstâncias adversas e externas à própria linha, podem considerar-se completamente abrangidos pelas situações que a seguir se referem:

- Incêndios;
- Queda dos apoios ou dos cabos condutores ou de guarda;
- Contactos acidentais com elementos em tensão;
- Tensões induzidas;
- Obstáculos a ligar à terra e dimensionamento do circuito de terra associado;
- Efeito dos campos eletromagnéticos.

11.1. Incêndios

No âmbito da análise deste tipo de riscos, há a considerar a situação em que a linha está na origem do incêndio e, por outro lado, o caso em que a mesma é afetada por incêndios de outra origem.

A probabilidade de funcionamento de linha estar na origem de incêndios é muito reduzida, uma vez que na fase de construção serão garantidas distâncias de segurança aos obstáculos situados dentro de uma faixa de proteção adequada.

Durante a exploração, procede-se a rondas periódicas, a fim de detetar atempadamente construções de edifícios ou crescimento exagerado de árvores que possam aproximar-se da linha a distâncias inferiores aos valores de segurança.

A probabilidade de a linha ser afetada por incêndios de outra origem é mais elevada, com incidência na qualidade de exploração e na continuidade de serviço (interrupção do transporte de energia). Associadas a estas situações haverá que considerar o risco de danos ou inutilização dos equipamentos (postes, cabos e cadeias de isoladores), com eventual risco de indução de outro tipo de acidentes, nomeadamente queda de apoios, ou dos cabos condutores ou de guarda.

As opções de conceção adotadas (distâncias aos obstáculos na vizinhança da linha largamente superiores aos valores de segurança) permitem concluir que estão minimizados os riscos de a linha originar ou vir a ser afetada por incêndios.

11.2. Queda de Apoios ou de Cabos

Em face das características dos cabos condutores e de guarda e dos coeficientes de segurança adotados na sua instalação pode afirmar-se ser praticamente nula a probabilidade de ocorrência de rotura de qualquer destes elementos da linha.

A queda de cabos condutores surge, normalmente, por rotura de cadeias de isoladores.

Assim, para diminuição da probabilidade deste tipo de risco, são utilizadas, com carácter sistemático, cadeias duplas de amarração em todas as situações.

O risco deste tipo de ocorrências é muito reduzido e pode traduzir-se, tal como no caso dos incêndios, numa incidência na continuidade de serviço da linha, embora se possa associar o risco sobre pessoas e bens na sequência da queda daqueles elementos.

A queda de apoios apresenta um risco mínimo em face das suas características e dos coeficientes de segurança adotados no dimensionamento dos mesmos e das respetivas fundações.

Por outro lado, a intensidade das ações consideradas, resultantes dos agentes naturais, como por exemplo o vento, correspondem a valores muito elevados, ou seja, as ocorrências cuja probabilidade de ser ultrapassada é muitíssimo baixa. Estes critérios não são arbitrários, mas fazem parte da Legislação Nacional aplicável (RSLEAT) e internacional (EN 50341), após estudos muito aprofundados e experiência real de quase um século de história da Indústria de Transporte e Distribuição de Energia Elétrica. Estes critérios são técnica e legalmente considerados pelos projetistas como suficientes no que se refere à segurança das populações.

Em relação aos apoios pode dizer-se adicionalmente que todos os apoios, quer de amarração quer de suspensão, estão dimensionados para poder manter a sua estabilidade em caso de rotura de qualquer um dos cabos ou cadeias, simultaneamente com a ocorrência da tração máxima expectável.

De um modo geral, no dimensionamento global dos diversos componentes estruturais da linha, procura-se estabelecer uma coordenação de resistências onde, no caso do componente principal apoio, os subcomponentes crescentemente mais fortes serão apoio, fundações, acessórios e no caso do

componente principal cabos, os subcomponentes crescentemente mais fortes serão cabos, isoladores, acessórios.

11.3. Contactos Acidentais com Peças em Tensão

A ocorrência desta situação é improvável e pode resumir-se à utilização de guias ou outros equipamentos na proximidade da linha.

A altura mínima ao solo das linhas na zona em apreço é muito superior ao mínimo regulamentar (como medida de segurança) e torna improvável a hipótese daquela ocorrência, reduzindo-se o risco de acidente.

Refira-se ainda que todos os apoios, tal como está regulamentado, possuem uma chapa sinalética em local visível, indicando “PERIGO DE MORTE”.

11.4. Tensões Induzidas

A existência de objetos metálicos (vedações e aramados para suporte de vinhas), isolados ou ligados à terra, na vizinhança de Linhas Aéreas e acompanhando estas em grandes extensões, são afetados por campos elétricos, magnéticos ou ainda por elevação de potencial no solo, tornando possível o aparecimento de tensões induzidas, com incidência na segurança de pessoas (contactos ocasionais). Não foram detetadas situações deste tipo. Porém, se detetadas em fase posterior serão tratadas de acordo com a metodologia a seguir proposta.

Todas as situações serão analisadas pontualmente de modo a garantir-se o estipulado pelo NESC (*National Electrical Safety Code, USA*): “a corrente induzida que fluirá no corpo de uma pessoa em contacto com o aramado ou vedação será inferior a 5 mA”.

A metodologia de cálculo seguinte permite avaliar situações como as descritas.

No sentido de dar uma medida dos riscos corridos apresenta-se um exemplo hipotético.

A tensão induzida numa vedação pode ser calculada através de: $V = E \cdot h$ [V]

onde, E é o campo elétrico ao nível do solo em V/m e h a altura da vedação ao solo em metros.

A capacidade da vedação é dada por: $C = \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon}{\ln\left(\frac{2 \cdot h}{r_c}\right)} \cdot L$ [F]

sendo h a altura em m da vedação, r_c o raio do arame da vedação e L o comprimento da cerca na zona de influência (aquela onde o valor de E se mantém aproximadamente constante) em m. Esta expressão é suficientemente correta para $h > 2 \cdot r_c$ (desprezam-se os efeitos de extremidade).

A corrente que flui na vedação, supondo esta ligada numa extremidade ao solo e supondo também que se dispõe numa direção aproximadamente paralela à linha de energia pode ser dada aproximadamente por: $I = j \cdot \omega \cdot V \cdot C$ [A].

No anexo A.10, apresentam-se valores e perfis do campo elétrico para diversas situações, sendo a situação mais desfavorável, em termos de campo elétrico, para a disposição de fases adotada nesta linha, aparece-nos no referido Anexo variando entre 3,93 e 4,03 kV/m entre o nível do solo e 1,8 m de altura, aproximadamente sob os condutores.

Tomando um aramado de $\varnothing = 4$ mm disposto paralelo à linha, a 1,5 m de altura e numa extensão de 40 m de comprimento, obteríamos $C=304$ pF e $I \leq 0,577$ mA, valor muito inferior ao limite acima referido de 5 mA.

Na prática, a corrente nem seria esta porque as correntes de fuga em cada poste de fixação do aramado, ou através de vegetação em contacto com o aramado seriam da mesma ordem de grandeza, pelo que a hipótese de uma vedação ligada apenas na extremidade, ou, o que é o mesmo, com a extensão indicada, é, geralmente, irrealista e a corrente que atravessaria uma pessoa em contacto com o arame seria ainda uma fração daquele valor, atendendo à resistência elétrica da pessoa.

No entanto, naqueles casos de vedações metálicas que se avalie que possam originar, por contacto, correntes induzidas superiores a 5 mA, será efetuada a ligação sistemática à terra (critério BPA - de 60 m em 60 m com uma estaca de "copperweld") a fim de prevenir qualquer risco.

Relativamente à elevação de potencial do solo, na sequência de um defeito monofásico, seguiu-se o preconizado nas várias normas já referidas em 2.7, devendo ainda tomar em consideração:

- a existência de 2 cabos de guarda que transportam a maior parte da corrente de defeito, funcionando como elemento protetor em termos de segurança de pessoas;
- tempo de eliminação do defeito ser $\leq 0,5$ s (proteções rápidas);
- ser muito baixa a probabilidade de coincidência de um contacto ocasional com a ocorrência do defeito no mesmo instante;
- a improvável combinação negativa de todas as ocorrências referidas, leva que a atual normalização aponte métodos probabilísticos para estes aspetos.

Deste modo, pode inferir-se que os riscos ligados às correntes que provêm das tensões induzidas são extremamente baixos e muito abaixo dos critérios técnicos e ambientais mais restritivos que se conhecem.

11.5. Obstáculos a ligar à Terra e Dimensionamento do Circuito de Terra

Não estão previstas, à priori, ligações particulares de obstáculos à terra. Quaisquer situações deste tipo que se tornem aparentes, em fase de projeto, construção ou exploração, serão resolvidas através de uma adequada ligação à terra, conforme indicado no ponto anterior.

Para redução dos referidos efeitos proceder-se-á ao seccionamento e ligação à terra dos elementos metálicos extensos (caso das vedações e aramados) ou à redução das resistências de terra dos apoios que enquadram a respetiva travessia (coberturas metálicas de edifícios).

Neste particular será respeitado o referido no ponto 2.8 (Circuitos de terra dos apoios).

11.6. EFEITOS DOS CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS

11.6.1. Valores Limites

A Portaria nº1421/2004, de 23 de novembro, define as restrições básicas e fixa os níveis de referência relativos à exposição da população a campos eletromagnéticos (0 Hz-300 GHz). Esta Portaria adota a recomendação do Conselho Europeu de 99/07/12 sobre os limites de exposição do público em geral aos campos eletromagnéticos, [“RECOMENDAÇÃO DO CONSELHO de 12 de julho de 1999 relativa à limitação da exposição da população aos campos eletromagnéticos (0 Hz — 300 GHz)”, Doc. Ref.^a 1999/519/CE, *Jornal Oficial das Comunidades Europeias*, L199/59, de 1999/07/30].

No anexo III da Portaria, “Níveis de Referência”, apresentam-se os valores limites de exposição do público, para os campos elétrico e magnético a 50 Hz e que são os seguintes:

Limites de Exposição a Campos Elétricos e Magnéticos a 50 Hz		
Características de Exposição	Campo Elétrico [kV/m] (RMS)	Indução Magnética [μT] (RMS)
Público Permanente	5	100

Nas linhas da REN, S.A., em qualquer escalão de tensão, não ocorrem valores superiores aos referidos atrás. Esta conclusão está bem fundamentada por análise comparativa com cálculos teóricos e medições efetuadas em linhas similares em Portugal e em todo o mundo. O cálculo concreto dos valores do campo elétrico e magnético para os troços de linha em Projeto apresenta-se no Anexo A.11 e A.12.

11.6.2. Cálculo do Campo Elétrico

O cálculo dos campos elétricos efetua-se a partir do conhecimento das cargas elétricas em cada um dos cabos da linha. No presente caso considerou-se a presença de um circuito trifásico e dois cabos de guarda, estes supostos ao potencial do solo. A disposição geométrica dos cabos corresponde à da família de apoios Q considerando uma distância ao solo que corresponde à distância mínima absoluta em todo o Projeto (14 m para uma linha de 400 kV). Os valores que se obtiveram correspondem, portanto a valores máximos absolutos do campo elétrico, nos planos horizontais em que foram calculados e que correspondem, sensivelmente ao nível do solo e ao nível da cabeça de um homem (1,80 m do solo).

Para o cálculo da distribuição de cargas elétricas sobre os condutores da linha considerou-se um modelo de cálculo bidimensional onde a geometria é definida num plano vertical transversal à linha, o solo é suposto plano, horizontal e de extensão infinita. Neste modelo os condutores são também supostos paralelos entre si e ao solo, e os condutores inferiores situam-se a uma distância do solo correspondente

ao mínimo absoluto acima referido. O plano de corte transversal considera-se afastado dos apoios ⁽¹⁾. Nesta conformidade o vector de fasores das cargas $[(qr+j.qi)] j=1,\dots,8$ calculou-se através de:

$$[\tilde{Q}] = [P]^{-1} \cdot [\tilde{V}]$$

onde $[P]$ é a matriz dos coeficientes de potencial de Maxwell e $[(vr+j.vi)] j=1,\dots,8$ o vector de fasores de tensões. A matriz $[P]$ é simétrica e os seus elementos definidos por:

$$P_{ii} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon} \cdot \ln \left(\frac{4 \cdot y_i}{d_i} \right) \quad P_{ij} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon} \cdot \ln \left[\frac{(x_i - x_j)^2 + (y_i + y_j)^2}{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \right]^{1/2}$$

onde y_i e y_j são as alturas dos condutores i e j acima do solo, d_i é o diâmetro do condutor i e x_i e x_j são as coordenadas horizontais dos condutores i e j .

Uma vez calculadas as cargas elétricas em cada condutor, o campo elétrico num determinado ponto N (x_N, y_N) do espaço é calculado através de:

$$\vec{E}_j = \tilde{E}_{x,j} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} + \tilde{E}_{y,j} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

onde as componentes horizontal e vertical do campo referentes à carga j são dadas por (método das imagens):

$$E_{x,j} = \frac{(q_{rj} + j \cdot q_{ij}) \cdot (x_N - x_j)}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot [(x_j - x_N)^2 + (y_j - y_N)^2]} - \frac{(q_{rj} + j \cdot q_{ij}) \cdot (x_N - x_j)}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot [(x_j - x_N)^2 + (y_j + y_N)^2]}$$

$$E_{x,j} = \frac{(q_{rj} + j \cdot q_{ij}) \cdot (x_N - x_j)}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot [(x_j - x_N)^2 + (y_j - y_N)^2]} - \frac{(q_{rj} + j \cdot q_{ij}) \cdot (x_N - x_j)}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot [(x_j - x_N)^2 + (y_j + y_N)^2]}$$

$$E_{y,j} = \frac{(q_{rj} + j \cdot q_{ij}) \cdot (y_N - y_j)}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot [(x_j - x_N)^2 + (y_j - y_N)^2]} - \frac{(q_{rj} + j \cdot q_{ij}) \cdot (y_N + y_j)}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot [(x_j - x_N)^2 + (y_j + y_N)^2]}$$

As componentes horizontal e vertical referentes a todas as cargas obtêm-se fazendo o somatório das contribuições de todas as cargas:

$$\tilde{E}_x = \sum_{j=1}^8 \tilde{E}_{x,j} \quad \tilde{E}_y = \sum_{j=1}^8 \tilde{E}_{y,j}$$

O campo elétrico é assim um vector de fasores à frequência de 50 Hz da forma:

$$\vec{E} = (\tilde{E}_x, \tilde{E}_y) = (E_{x,r} + j \cdot E_{x,i}, E_{y,r} + j \cdot E_{y,i})$$

⁽¹⁾ O campo elétrico é distorcido pela presença dos apoios, sendo estes estruturas metálicas, e, portanto, condutoras, ao potencial do solo. Este efeito - efeito écran - é no sentido favorável, i.e., de diminuição dos valores daqueles campos pelo que o modelo utilizado é simultaneamente mais simples e pelo lado da segurança.

o qual descreve no plano xy uma trajetória pulsante elíptica. A componente máxima do fasor do campo elétrico num determinado ponto do espaço é dada pelo valor do semi-eixo maior daquela elipse.

O valor E_α do módulo do campo ao longo de uma direção definida por um ângulo α , medido em relação à horizontal, é dado por:

$$(E_\alpha)^2 = (E_{ry} \cdot \text{sen}(\alpha) + E_{rx} \cdot \text{cos}(\alpha))^2 + (E_{iy} \cdot \text{sen}(\alpha) + E_{ix} \cdot \text{cos}(\alpha))^2$$

cujos máximos em α deverão satisfazer:

$$\frac{d(E_\alpha)^2}{d\alpha} = 0$$

o que conduz à relação quadrática em $\text{tg}(\alpha)$:

$$\text{tg}^2(\alpha) \cdot (E_{ry} \cdot E_{rx} + E_{iy} \cdot E_{ix}) + \text{tg}(\alpha) \cdot (-E_{iy}^2 + E_{ix}^2 - E_{ry}^2 + E_{rx}^2) - (E_{ry} \cdot E_{rx} + E_{iy} \cdot E_{ix}) = 0$$

válida para $\alpha \neq \pi/2$, valor onde simplesmente $E_{\pi/2} = E_y$. As duas soluções para $\text{tg}(\alpha)$ correspondem aos dois semi-eixos da elipse do campo, calculando-se assim o valor máximo do módulo do campo através da expressão acima para E_α .

No Anexo A.11 apresentam-se os perfis transversais do campo elétrico máximo ao nível do solo e a 1,8 m do solo para uma faixa entre -40 e +40 m em torno do eixo da linha, para a configuração de linha simples, em esteira horizontal, cabos de guarda ao potencial do solo e valor eficaz do módulo da tensão de serviço na linha no seu valor máximo, para uma altura ao solo de 14 metros (mínimo absoluto em toda a linha). Para a tensão nominal o valor máximo do campo ocorre aproximadamente sob os condutores e varia entre 3,93 kV/m ao nível do solo e 4,03 kV/m a 1,8 m do solo. Todos os valores, como se verifica, estão dentro dos limites apresentados em 11.6.1.

11.6.3. Cálculo do Campo Magnético

O campo magnético foi calculado usando um modelo bidimensional geometricamente idêntico ao descrito para o campo elétrico. O valor do campo magnético num ponto de coordenadas (xj , yj) em resultado da corrente li que percorre um condutor centrado no ponto de coordenadas (xi , yi) pode ser dado por:

$$\vec{H}_{j,i} = \frac{\vec{I}_i \times \vec{r}_{j,i}}{2 \cdot \pi \cdot r_{i,j}^2} = \frac{I_i}{2 \cdot \pi \cdot r_{i,j}} \cdot \vec{\phi}_{i,j}$$

onde $\phi_{i,j}$ é o vetor unitário na direção do produto externo do vetor corrente com o vetor $r_{i,j}$.

Teremos, portanto: $\vec{\phi}_{i,j} = -\frac{y_i - y_j}{r_{i,j}} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} + \frac{x_i - x_j}{r_{i,j}} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$ e $r_{i,j} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}$

O campo magnético total é dado pela soma das contribuições devidas às correntes em todos os condutores⁽¹⁾: $\vec{H}_j = \sum_{i=1}^8 \frac{I_i}{2 \cdot \pi \cdot r_{i,j}} \cdot \vec{\varphi}_{i,j}$

A densidade de fluxo magnético é então: $\vec{B} = \mu \cdot \vec{H}$, onde $\mu=4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ tanto no solo como no ar.

No anexo A.12 apresentam-se de uma forma sistemática os valores do módulo do vetor densidade de fluxo magnético em perfis transversais numa faixa de -40 a +40 m em torno do eixo da linha, para uma altura ao solo de 14 metros para a configuração de linha simples, em esteira horizontal (apoios Q).

Nestes cálculos admitiu-se um regime estabilizado e equilibrado de funcionamento para as correntes adotando módulo de corrente “nominal” de 1000 A por circuito (500 A por cabo).

Para efeitos da avaliação dos valores máximos de densidade de fluxo magnético correspondentes a exposições com carácter permanente, esta condição é perfeitamente legítima.

O valor máximo da densidade de fluxo magnético a 1,8 m do solo no eixo da linha é de 28,39 μT e a 10 m do eixo da linha, é de 27,92 μT . Este valor decai rapidamente e a 20 m do eixo da linha já é apenas de 17,26 μT . Todos os valores calculados são muito inferiores aos valores limites apresentados em 11.6.1 mesmo numa perspetiva de exposição pública permanente.

12. ANEXOS À MEMÓRIA DESCRITIVA

Para o presente projeto produziram-se e juntaram-se os seguintes anexos:

- A.1 - Esquema Axial dos Apoios
- A.2 - Esquema das Fundações
- A.3 - Circuitos de Terra dos Apoios
- A.4 - Características dos Cabos
- A.5 - Características dos Isoladores
- A.6 - Planos de Cadeias de Isoladores e Fixação dos CG
- A.10 - Capacidade Térmica dos Cabos
- A.11 - Campo Elétrico
- A.12 - Indução Magnética
- A.13 - Ruído Acústico de Longa Duração, Interferências Radioelétricas e Efeito de Coroa
- A.14 - Dispositivos de Sinalização para Aves
- A.17 - Desenhos dos Conjuntos Sinaléticos
- A.18 - Equipamento Diverso

⁽¹⁾ Aqui desprezam-se 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 muito curta duração, cuja energia, relevante na perspetiva de f.e.m. induzidas em linhas de telecomunicações, não são relevantes na perspetiva dos efeitos sobre pessoas.

