

# UTILIZAÇÃO DE CABOS DE ALTA TEMPERATURA EM LINHAS AÉREAS EM MÉDIA TENSÃO



Tiago André Noverça da Silva



Departamento de Engenharia Eletrotécnica

Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia

**2015**



Relatório elaborado para satisfação parcial dos requisitos da Unidade Curricular de DSEE -  
Dissertação do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia

Candidato: Tiago André Noverça da Silva, Nº 1000909, 1000909@isep.ipp.pt

Orientação científica: Professora Doutora Maria Judite Ferreira, mju@isep.ipp.pt

Empresa: EDP Distribuição SA

Supervisão: Engº Diogo Tavares, DiogoFilipe.MoreiraTavares@edp.pt



Departamento de Engenharia Eletrotécnica

Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia

**2015**





## *Agradecimentos*

Em primeiro lugar quero agradecer à minha família pela paciência que tiveram comigo.

Agradeço aos orientadores, professora Doutora Maria Judite Ferreira e ao Eng<sup>o</sup>. Diogo Tavares pelo apoio que me deram ao longo deste estágio.

Agradeço também o apoio, a disponibilidade de todas as pessoas que trabalham no Departamento de Estudos de Rede da EDP Distribuição que me cruzei diariamente e me deram uma palavra de incentivo.



## *Resumo*

A presente dissertação teve como objetivo fazer uma análise da viabilidade técnica da utilização dos condutores de alta temperatura nas linhas aéreas de MT, identificar vantagens, analisar inconvenientes, e estabelecer um comparativo a custos médios com as soluções convencionais.

Foi efetuado o estudo de um caso real da EDP Distribuição que consistia na necessidade do aumento da capacidade de transporte de energia da linha aérea a 15 kV Espinho-Sanguedo. Neste foi ponderada a solução onde se poderia efetuar passagem de linha simples para linha dupla em alumínio-aço (AA) 160 mm<sup>2</sup> ou a solução alternativa e inovadora de substituição dos condutores existentes por condutores de alta temperatura ACCC 182 mm<sup>2</sup>. Para isso foram efetuados cálculos e também criada uma ferramenta de apoio à decisão, para validação dos mesmos, com o intuito de mais tarde poder ser aplicada nas linhas aéreas em Média Tensão em todo o país e, sempre que necessário, se possa fazer um estudo de ponderação técnica de forma sistemática e estruturada. Neste trabalho estão identificadas as vantagens, foram relatados os inconvenientes, e estabeleceu-se um comparativo a custos médios da utilização de condutores de alta temperatura com as soluções convencionais.

Antes de poder ser realizado um estudo do caso concreto da Linha aérea Espinho-Sanguedo foi necessário um aprofundamento do estado da arte no que diz respeito à comparação entre o cabo de alta temperatura ACCC e o cabo convencional ACSR, sendo este o mais utilizado nas linhas aéreas em MT. Os cabos de alta temperatura trouxeram inovações neste tema de transporte de energia, e como tal surgiu a necessidade de um estudo mais aprofundado da sua constituição, destacando o seu núcleo formado pelo compósito de fibra de carbono e fibra de vidro. Foi também analisado vantagens e desvantagens do cabo de alta temperatura e até mesmo situações onde a sua aplicação poderá ser vantajosa, de modo a tirar proveito das suas características em que se destacam altas temperaturas de funcionamento e flechas reduzidas.

Para elaborar um projeto de uma linha aérea em média tensão é necessário considerar a legislação em vigor, os aspetos ambientais e económicos, respeitando e garantindo as premissas do cálculo eléctrico e mecânico.

Economicamente este tipo de cabo (ACCC) é mais dispendioso do que os convencionais, no entanto o estudo realizado permitiu perceber que a sua implementação técnica é vantajosa em linhas aéreas de elevada capacidade de transporte de energia, sobretudo nos casos onde serão necessárias instalar linhas duplas ou linhas simples de seções elevadas. Devido às suas características mecânicas, estes cabos permitem melhorar as linhas na sua dimensão, podendo diminuir o número de apoios a instalar, podendo diminuir a robustez dos apoios e permitir maior facilidade na montagem. Estas vantagens traduzem-se em menores impactos ambientais e permitem sobretudo reduzir os constrangimentos com os proprietários dos terrenos onde os apoios são implantados.

### ***Palavras-Chave***

Cabo ACCC, alumínio, cabo ACSR, temperatura, flechas

## *Abstract*

This work aimed to analyze the technical feasibility of the use of high temperature conductors in overhead lines MT, identify advantages, disadvantages analyze, and establish a comparison to average costs with conventional solutions.

Was made a study of a real case of EDP Distribution has verified the need for increased airline power transmission capacity of 15 kV Espinho-Sanguedo. In this study was considered a solution where we could make simple line ticket for double line of aluminum-steel (AA) 160 mm<sup>2</sup> or alternative and innovative solution to replace the existing drivers for high temperature ACCC 182 mm<sup>2</sup> conductors. For that they were made calculations and also create a decision support tool for validation thereof, in order to later be able to be applied to airlines in Medium Voltage across the country and where appropriate can do a weighting of study technique in a systematic and structured way. In this work we are identified the advantages, the drawbacks have been reported and established a comparative cost of using the medium of high temperature conductive to conventional solutions.

Before you can be a study of the case of Thorn-Sanguedo Airlines a deepening state of the art it was necessary with regard to the comparison between the high temperature cable ACCC and the conventional ACSR cable which is the most used on airlines in MT. High temperature cables brought innovations in the energy transport issue, and as such it became necessary to further study its constitution, highlighting its core formed by the carbon fiber composite and fiberglass. It was also analyzed advantages and high-temperature cable disadvantages and even situations where the implementation may be advantageous in order to take advantage of its characteristics on which stand high operating temperatures and reduced arrows.

To develop a project of an airline in medium voltage is necessary to consider the legislation, environmental and economic aspects, respecting and ensuring the premises of electrical and mechanical calculation.

Economically this type of cable (ACCC) is more expensive than conventional, however the study allowed us to perceive that their technical implementation is advantageous for airlines of high power transmission capacity, especially in cases where it will be necessary to install dual lines or simple lines of elevated sections. Because of its mechanical characteristics, these cables provide improved lines in size, which may reduce the number of supports to be installed, which may reduce the robustness of the support and allow for greater ease in assembly. These advantages translate into lower environmental impact and enable particularly reduce the constraints with the owners of the land where the supports are deployed.

## **Keywords**

ACCC cable, aluminum, ACSR cable, temperature, arrows



# Índice

<b>AGRADECIMENTOS.....</b>	<b>I</b>
<b>RESUMO .....</b>	<b>III</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>V</b>
<b>ÍNDICE .....</b>	<b>VIII</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>XI</b>
<b>ÍNDICE DE TABELAS .....</b>	<b>XIII</b>
<b>ACRÓNIMOS E SÍMBOLOS .....</b>	<b>XV</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO .....	1
1.2. OBJETIVOS.....	2
1.3. ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO .....	3
<b>2. CABOS CONVENCIONAIS VS CABOS ALTA TEMPERATURA.....</b>	<b>5</b>
2.1. CABOS DE FASE CONVENCIONAIS (ACSR).....	5
2.2. CABOS DE ALTA TEMPERATURA (HTLS).....	6
2.3. ASPETOS CONSTRUTIVOS .....	8
2.4. PRÓS E CONTRAS .....	11
2.5. ESPECIFICIDADES DO CABO ACCC .....	11
<b>3. CÁLCULO ELÉTRICO.....</b>	<b>13</b>
3.1. OBJETIVO.....	13
3.2. TENSÃO DE TRANSPORTE.....	13
3.3. SECÇÃO DOS CONDUTORES .....	14
3.4. GEOMETRIA DOS CONDUTORES.....	15
3.5. CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS .....	16
3.6. CONSTANTES ELÉTRICAS CARACTERÍSTICAS POR QUILOMETRO DE LINHA .....	26
3.7. IMPEDÂNCIA CARACTERÍSTICA DA LINHA .....	26
3.8. PERDAS DE ENERGIA.....	26
3.9. QUEDAS DE TENSÃO .....	27
<b>4. CÁLCULO MECÂNICO .....</b>	<b>31</b>
4.1. TRAÇADO DA LINHA .....	32

4.2.	INFLUÊNCIA SOBRE OS CONDUTORES E COEFICIENTE DE SOBRECARGA .....	33
4.3.	VÃO CRÍTICO .....	38
4.4.	ESTADO ATMOSFÉRICO MAIS DESFAVORÁVEL .....	39
4.5.	TENSÕES MÁXIMAS APLICADAS AOS CABOS .....	39
4.6.	EQUAÇÃO DE ESTADOS PARA EQUILÍBRIO MECÂNICO.....	40
4.7.	DETERMINAÇÃO DAS FLECHAS.....	41
4.8.	APOIOS E OS ESFORÇOS EXERCIDOS SOBRE ELES .....	42
4.9.	DISTÂNCIAS REGULAMENTARES .....	46
<b>5.</b>	<b>CASO DE ESTUDO.....</b>	<b>49</b>
5.1.	OBJETIVO.....	49
5.2.	CARATERÍSTICAS DA LINHA.....	50
5.3.	CÁLCULO ELÉTRICO.....	51
5.4.	CÁLCULO MECÂNICO .....	57
5.5.	ASPETOS ECONÓMICOS.....	79
5.6.	CONCLUSÃO DO CAPÍTULO.....	80
<b>6.</b>	<b>FERRAMENTA DE APOIO À DECISÃO .....</b>	<b>82</b>
6.1.	INTERFACE DO TRABALHO .....	83
6.2.	FUNCIONAMENTO DA APLICAÇÃO.....	84
<b>7.</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>93</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>97</b>
	<b>ANEXO A. CARATERÍSTICAS DO CABO DE ALUMÍNIO-AÇO (ACSR) .....</b>	<b>99</b>
	<b>ANEXO B. CARATERÍSTICAS ELÉTRICAS DO CABO DE ALTA TEMPERATURA (ACCC).....</b>	<b>100</b>
	<b>ANEXO C. ESFORÇOS APLICADOS A APOIOS DE ÂNGULO.....</b>	<b>101</b>
	<b>ANEXO D. ESFORÇOS APLICADOS A APOIOS DE ALINHAMENTO .....</b>	<b>102</b>
	<b>ANEXO E. ESFORÇOS APLICADOS A APOIOS DE FIM DE LINHA .....</b>	<b>103</b>
	<b>ANEXO F. ESFORÇOS APLICADOS A APOIOS DE DERIVAÇÃO (CASO GERAL) .....</b>	<b>104</b>
	<b>ANEXO G. CARATERÍSTICAS DOS APOIOS.....</b>	<b>105</b>
	<b>ANEXO H. CARATERÍSTICA DOS VÃOS. ....</b>	<b>108</b>
	<b>ANEXO I. PERFIL DA LINHA DE ESTUDO. ....</b>	<b>112</b>



## *Índice de Figuras*

<b>Figura 1-</b> Cabo convencional ACSR. [1]	6
<b>Figura 2-</b> Cabo de alta temperatura ACCC. [2]	6
<b>Figura 3-</b> Evolução da flecha num cabo HTLS. [4]	7
<b>Figura 4-</b> Diferenças construtivas entre o cabo ACSR e ACCC [6]	8
<b>Figura 5 -</b> Aspeto do alumínio quando retirado da crosta terrestre. [8]	10
<b>Figura 6-</b> Exemplos de silhueta simples com 3 condutores. [12]	15
<b>Figura 7 -</b> Raio da circunferência que passa pelos subcondutores que formam a fase [12]22	
<b>Figura 8 -</b> Representação da forma equivalente a um quadripolo. [12]	28
<b>Figura 9 -</b> Ação do vento sobre um cabo [12]	34
<b>Figura 10 -</b> Forças aplicadas no condutor. [12]	36
<b>Figura 11-</b> Diagrama de verificação do estado mais desfavorável. [12]	39
<b>Figura 12 -</b> Geometria de dois vãos em patamar. [12]	41
<b>Figura 13 -</b> Geometria de dois vãos em declive. [12]	42
<b>Figura 14 -</b> Função dos apoios [16]	43
<b>Figura 15 -</b> Esforços aplicados sobre um apoio [17]	44
<b>Figura 16 -</b> Hipóteses de cálculo consoante a direção do vento [12]	45
<b>Figura 17-</b> Montagem dos cabos em esteira vertical dupla. (adaptada [12])	51
<b>Figura 18 -</b> Montagem dos cabos em galhardete (adaptada [12])	54



## *Índice de Tabelas*

<b>Tabela 1-</b> Caraterísticas dos núcleos dos cabos ACSR e do ACCC [7]	9
<b>Tabela 2-</b> Propriedades do alumínio para os cabos ACSR e ACCC. [7]	10
<b>Tabela 3-</b> Valores de força do vento para diferentes alturas. [12]	35
<b>Tabela 4-</b> Valores do coeficiente de redução para diferentes elementos. [12]	35
<b>Tabela 5-</b> Valores do coeficiente de forma para diferentes diâmetros. [12]	36
<b>Tabela 6 –</b> Valores calculados para terno duplo ACSR	52
<b>Tabela 7 -</b> Continuação dos valores calculados para terno duplo ACSR	53
<b>Tabela 8 -</b> Valores calculados para linha simples com cabo ACCC	55
<b>Tabela 9 -</b> Continuação dos valores calculados para linha simples com cabo ACCC	55
<b>Tabela 10 –</b> Comparação de resultados do cálculo elétrico para ambas as soluções	56
<b>Tabela 11 –</b> Valores dos coeficientes de sobrecarga para os cabos ACSR e ACCC	58
<b>Tabela 12 -</b> Tabela das trações máximas, flechas e distância entre condutores (caso de estudo).	61
<b>Tabela 13-</b> Esforços exercidos nos apoios pelo cabo ACSR (caso de estudo).	64
<b>Tabela 14-</b> Esforços exercidos nos apoios pelo cabo ACCC (caso de estudo).	66



## *Acrónimos e Símbolos*

ACCC	<i>Aluminum Conductor Composite Core</i>	
ACSR	<i>Aluminum Conductor Steel Reinforced</i>	
DEE	Departamento de Engenharia Eletrotécnica	
EDP	Energias de Portugal	
ISEP	Instituto Superior de Engenharia do Porto	
HTLS	<i>High Temperature, Low-Sag</i>	
IACS	<i>International Annealed Copper Standard</i>	
SEN	Sistema Elétrico Nacional	
RSLEAT	Regulamento de Segurança de Linhas Elétricas de Alta Tensão	
RLIE	Regulamento de Licenças de Instalações Elétricas	
AA	Alumínio-aço	
SIT	Sistema de Informação Técnica	
DM	<i>Design Manager</i>	
DGE	Direção Geral de Energia	
c	(-)	Coeficiente de forma
d	(m)	Diâmetro do condutor
e	(m)	Espessura do gelo

E	(daN/mm <sup>2</sup> )	Módulo de elasticidade
m	(-)	Coefficiente de sobrecarga
F <sub>v</sub>	(daN/m)	Força proveniente da ação do vento
L	(m)	Comprimento do vão
q	(Pa)	Pressão dinâmica do vento
s	(m <sup>2</sup> )	Área da superfície batida pelo vento
t <sub>i,k</sub>	(daN/mm <sup>2</sup> )	Tensão (mecânica) ou tração
T <sub>R</sub>	(daN)	Tensão (mecânica) de ruptura
T <sub>seg</sub>	(daN)	Tensão (mecânica) máxima a que o cabo pode ser sujeito
t <sub>m ax</sub>	(daN/mm <sup>2</sup> )	Tensão (mecânica) de segurança máxima
α	(-)	Coefficiente de redução
α <sub>d</sub>	(oC <sup>-1</sup> )	Coefficiente de dilatação térmica
θ <sub>i</sub>	(oC)	Temperatura para o estado mais desfavorável
θ <sub>k</sub>	(oC)	Temperatura para o estado desconhecido
ρ <sub>gelo</sub>	(kg/m <sup>3</sup> )	Peso volumétrico do gelo
σ	(mm <sup>2</sup> )	Secção do condutor
ω	(daN/m)	Peso próprio do condutor



# 1. INTRODUÇÃO

O primeiro capítulo serve como uma pequena abordagem ao tema em estudo, e também define os objetivos principais do tema bem como a organização do relatório.

## 1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO

A presente dissertação foi elaborada no âmbito da dissertação de fim de curso do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica-Sistemas Elétricos de Energia, que se desenvolveu na EDP Distribuição Energia, SA, nomeadamente no departamento de Estudo de Redes, da Direção de Rede e Clientes Porto. Aqui o estudo efetuado consistia na análise da possibilidade da utilização de condutores de alta temperatura nas linhas aéreas em Média Tensão, estudando em concreto a Linha aérea a 15 kV Espinho-Sanguedo.

A direção de Planeamento da EDP Distribuição, responsável pela execução e controlo dos planos de planeamento e gestão de toda a rede de distribuição de energia elétrica, efetuou estudos que conduziram à necessidade de aumentar a capacidade de transporte da linha referida no parágrafo anterior.

O aumento da capacidade de transporte de energia pode ser obtido com a construção de novas linhas, ou pelo aumento da capacidade de transporte das linhas já existentes. No caso de uma linha já existente, a solução mais utilizada para o aumento da capacidade de transporte trata-se do aumento da secção dos condutores, o que pressupõe maiores esforços mecânicos sobre os apoios entre outras questões. Outra solução passa pela alteração de linhas simples para linhas duplas, o que obriga a intervenções demoradas, a eventual substituição de grande parte dos apoios tornando-se difíceis de realizar, especialmente em zonas densamente povoadas ou de difícil acesso, como é o caso da linha em estudo. Tendo em conta que a linha estudo é uma linha em alumínio-aço (AA) de 160 mm<sup>2</sup>, é necessário estudar quais as alternativas a ponderar para aumento de capacidade da mesma.

Desde há muitas décadas que os cabos em AA têm sido amplamente utilizados na construção de linhas elétricas aéreas. Em casos específicos em que se pretende aumentar a energia a transportar, tem que se ter em conta que os cabos em AA apresentam restrições importantes em termos de temperatura máxima a que podem ser sujeitos e que, por definição, apresentam flechas elevadas, quando explorados a temperaturas mais elevadas. Quando os condutores convencionais são incapazes de satisfazer as necessidades surge a necessidade de estudar a possível utilização dos cabos de alta temperatura. Comparando as mesmas gamas de secções nominais, estes cabos são capazes de transportar mais energia, já que podem atingir temperaturas de funcionamento mais elevadas que os cabos tradicionais.

Existem vários cabos de alta temperatura no mercado, tais como o ACCR (*Aluminum Conductor Composite Reinforced*) ou o ACSS (*Aluminum Conductor Steel Supported*), mas com base em estudos efetuados, continuam a ter comportamento algo similares aos tradicionais. Recentemente surgiu o cabo ACCC (*Aluminum Conductor Composite Core*) que trouxe inovações ao nível do material usado no núcleo do cabo. O núcleo do cabo é constituído por um compósito de fibra de carbono e de vidro, e não por aço ou qualquer outro metal. O cabo ACCC destaca-se dos anteriores, apresentando vantagens a nível de comportamento, quando sujeito a diferenças de temperatura, relativamente aos restantes cabos. Sendo que as suas propriedades mecânicas também são alteradas. No capítulo 2 apresenta-se todo o estado da arte analisado, no que diz respeito aos tipos de condutores nus para linhas aéreas

## **1.2. OBJETIVOS**

Esta dissertação tem como objetivo fazer uma análise da viabilidade técnica da utilização dos condutores de alta temperatura nas linhas aéreas de MT, identificar vantagens, analisar inconvenientes, e estabelecer um comparativo a custos médios com as soluções convencionais.

Após se acompanhar o dia a dia de um projetista de linhas aéreas em MT na EDP Distribuição, identificou-se uma oportunidade na construção de uma ferramenta de apoio à decisão. Assim surge o objetivo de construir uma ferramenta de comparação de soluções

técnicas que permita obter um relatório que confronte diretamente dois cenários e proporcione ao projetista uma análise rápida e sistemática que facilite o processo de decisão.

### **1.3. ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO**

O trabalho está dividido em sete capítulos. No segundo capítulo é feita a descrição do cabo de alta temperatura ACCC, apresentando as suas características materiais, vantagens e desvantagens bem como a comparação com o condutor convencional ACSR, que é o mais utilizado nas linhas aéreas em MT da EDP Distribuição..

No terceiro e quarto capítulos pretende-se representar o estado da arte ao nível do cálculo elétrico e mecânico das linhas aéreas de MT, respetivamente

No capítulo 5, são efetuados os cálculos elétricos e mecânicos de um cenário real da EDP Distribuição.

No sexto capítulo é explicado sucintamente o desenvolvimento de uma ferramenta em Microsoft Excel de apoio à decisão para a escolher a melhor solução para uma determinada alteração de um projeto.

No capítulo 7 são reunidas as principais conclusões e perspectivados futuros desenvolvimentos.  
investimento.



## 2. CABOS CONVENCIONAIS *VS* CABOS ALTA TEMPERATURA

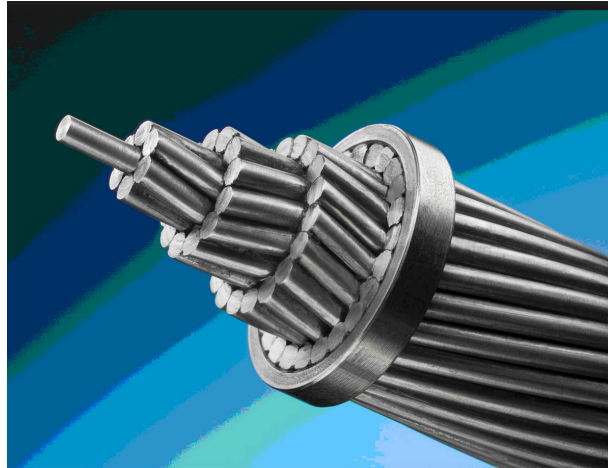
Neste capítulo será feita uma apresentação do estado da arte no que diz respeito à comparação entre o cabo de alta temperatura ACCC e o cabo convencional ACSR, que é o mais utilizado nas linhas aéreas em MT. Os cabos utilizados nas linhas aéreas têm na sua maioria como material condutor o alumínio.

Os cabos de alta temperatura trouxeram inovações neste tema de transporte de energia e, como tal, vão ser abordados aspectos como a sua constituição, vantagens e desvantagens, e até mesmo situações onde a sua aplicação poderá ser vantajosa de modo a tirar proveito das suas características, em que se destacam altas temperaturas de funcionamento e flechas reduzidas.

O interesse na utilização destes condutores de alta temperatura pode ser justificado pela necessidade de transportar mais energia, de forma mais eficiente sem necessidade de reforçar estruturas.

### 2.1. CABOS DE FASE CONVENCIONAIS (ACSR)

Os cabos das linhas aéreas são nus (sem isolamento) e normalmente constituídos por alumínio-aço, o alumínio por ser um bom condutor e barato, o aço para dar uma maior resistência mecânica ao cabo.



**Figura 1** - Cabo convencional ACSR [1]

Os cabos são constituídos por fios metálicos entrelaçados em torno de si e podem variar entre um a cinco camadas. Como se pode ver na figura 1, o cabo é constituído pela alma e pela parte condutora. A alma, também conhecido por núcleo, como já foi dito, é normalmente em aço e serve para dar maior resistência mecânica ao cabo, enquanto que a parte condutora situa-se na periferia do cabo.

## **2.2. CABOS DE ALTA TEMPERATURA (HTLS)**

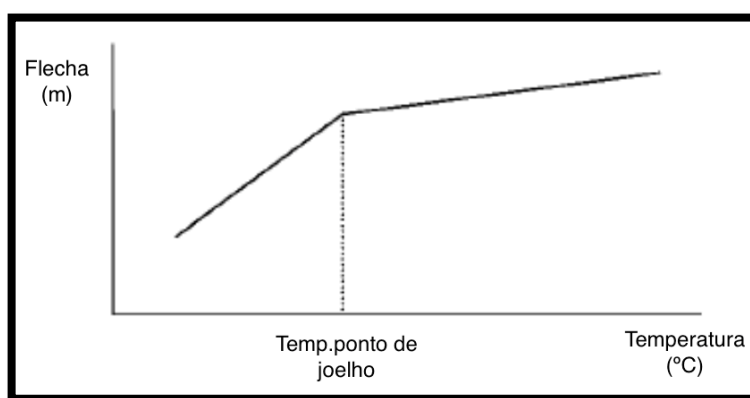
Estes cabos de alta temperatura aguentam temperaturas mais elevadas que os convencionais devido ao seu aspecto construtivo, transportando mais energia com a mesma espessura de cabo. A temperaturas elevadas os cabos tem tendência a aumentar as suas flechas e também têm mais probabilidade de ceder e partir nalgum ponto mais frágil.



**Figura 2** - Cabo de alta temperatura ACCC [2]

Os cabos de alta temperatura aguentam temperaturas de funcionamento na ordem dos 230°C, por norma até aos 180°C são utilizados a funcionar em regime permanente. Por outro lado, os cabos convencionais funcionam em regime permanente numa gama de temperaturas entre os 50°C e os 90°C. Contudo, a estas temperaturas o tamanho das flechas aumenta bastante, derivado aos efeitos do recozimento do alumínio, embora seja atenuado pela alma de aço. As altas temperaturas provocam o amolecimento do metal, tornando-o mais dúctil e perdendo a resistência à tração. [3]

Para este tipo de cabos existe a denominada “temperatura de joelho”, que é definida como um ponto em que o aumento da flecha em função da temperatura verifica-se de uma forma mais lenta, como se pode verificar na figura seguinte:



**Figura 3** - Evolução da flecha num cabo HTLS [4]

Nos cabos ACCC consegue-se obter flechas reduzidas através do comportamento do condutor acima da temperatura do ponto de joelho, em que o alumínio deixa de estar a contribuir para suportar o peso do cabo e apenas o núcleo está sob tensão. Acima da temperatura do ponto de joelho, o aumento da flecha com a temperatura, é inferior como se pode confirmar ao analisar a figura 3. [5]

Este tipo de cabos são utilizados em “*uprating*” de linhas, em que é necessário um aumento da capacidade de transporte de energia, sem aumentar a tensão de exploração e sem provocar grandes alterações a nível de estrutura da rede (apoios e armações), diminuindo os custos para a operação.

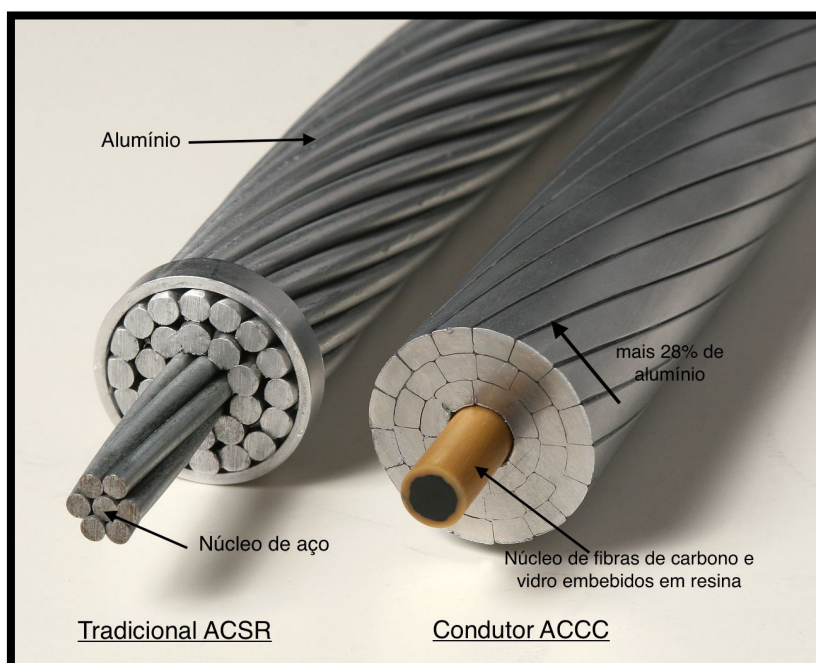
Outra das aplicações deste tipo de cabos surge na necessidade de passagem por cima de prédios, por zona de vegetação alta, ou mesmo em travessias de rios de grande

comprimento. Esta necessidade surge pois as flechas em comparação aos cabos convencionais são bastante reduzidas, diminuindo assim o risco de provocar danos maiores ou mesmo não cumprir as distâncias estipuladas pelo Regulamento de Segurança de Linhas Elétricas de Alta Tensão (RSLEAT).

Como já foi referido, para aumentar a capacidade de transporte das linhas sem esta tecnologia de cabos iria ser necessário aumentar a secção dos cabos, o que implicaria a alteração das infraestruturas de apoio às linhas.

### 2.3. ASPETOS CONSTRUTIVOS

Nos cabos convencionais o núcleo é formado essencialmente por filamentos de aço enrolados em si próprios, enquanto que no ACCC é formado por um compósito de fibras de carbono e de vidro embebidas numa resina de polímero endurecido.



**Figura 4** - Diferenças construtivas entre o cabo ACSR e ACCC [6]

O núcleo de fibras de carbono central está rodeado por fibras de vidro de espessura suficiente para melhorar a flexibilidade e criar uma barreira que impede a corrosão galvânica e prolonga a vida útil do condutor.

O núcleo compósito é enrolado em formato trapezoidal com 2 a 5 camadas de fios de alumínio. A proporção e tipo de fibras de carbono e de vidro utilizados no núcleo do cabo ACCC oferece uma boa resistência à tração.

Na tabela seguinte é demonstrada a diferença das propriedades do núcleo entre ambos os cabos.

**Tabela 1** - Características dos núcleos dos cabos ACSR e do ACCC [7]

<b>Cabo</b>	<b>Núcleo</b>	<b>Peso (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Módulo Elasticidade (GPa)</b>	<b>Tração máx. admissível (MPa)</b>	<b>Coef. Dilat. térmica (x10<sup>-6</sup>/°C)</b>
<b>ACSR</b>	Aço	7,78	199	1516	11,5
<b>ACCC</b>	Compósito de fibra vidro/carbono	1,94	110-144	2275-2585	1,6

Analisando a tabela 1, verifica-se que o núcleo de aço é cerca de quatro vezes mais pesado que o de carbono. O núcleo de carbono aguenta trações superiores ao de aço, o que demonstra a sua maior robustez. Analisando os valores do coeficiente de dilatação térmica pode-se afirmar que é possível operar em regimes superiores de temperatura para o caso do núcleo do cabo ACCC sem provocar flechas demasiado grandes. A única desvantagem relaciona-se com o módulo de elasticidade do cabo ACSR seja superior ao do ACCC, no entanto o compósito é puramente elástico e a carga que suporta não irá deforma-lo tão facilmente como no aço [7]

O alumínio é o elemento metálico mais abundante na Terra, é um metal muito leve, resistente à corrosão e tem um baixo ponto de fusão, aproximadamente 660 °C, tendo uma panóplia de aplicações em várias áreas [3]

O alumínio tem elevada condutividade elétrica e térmica, embora ainda seja inferior à do cobre, e é mais usado devido ao seu menor custo, bastante inferior ao cobre.

O metal, aquando da presença de oxigénio reveste-se por uma pequena e invisível camada de óxido, que é impermeável e tem características protetoras. Assim sendo, o alumínio

apresenta um tempo de vida útil muito elevado em relação a outros materiais condutores.



**Figura 5** - Aspeto do alumínio quando retirado da crosta terrestre. [8]

O tipo de alumínio usado nos cabos convencionais é diferente do que é usado nos cabos de alta temperatura. Nos cabos ACSR o tipo de alumínio usado é o 1350-H19 e nos cabos ACCC 1350-O. Este último é um alumínio recozido, que favorece a condutividade e a resistência à fadiga, mas por outro lado prejudica a sua resistência à tração, mas este ponto não tem muita influência, pois como se evidenciou uns parágrafos atrás, a consistência do núcleo em carbono proporciona grande resistência ao cabo e desvaloriza essa influência negativa do recozimento no alumínio. Várias ligas de alumínio fazem melhorar a resistência do cabo, mas por outro lado prejudicam a sua condutividade. [7]

Na tabela 2 estão indicados os valores da condutividade e da temperatura máxima de funcionamento utilizados nos cabos convencionais e nos de alta temperatura, para o respetivo tipo de alumínio.

**Tabela 2** - Propriedades do alumínio para os cabos ACSR e ACCC. [7]

Cabo	Alumínio	Condutividade (%IACS)	Temp. Máx. (°C)
ACSR	1350-H19	61,2	90
ACCC	1350-O	63	230

Analisando os valores da condutividade, no caso do cabo ACCC são ligeiramente superiores devido ao pré-recozimento como já foi explicado. Estes valores são apresentados em percentagem em comparação com cobre recozido, pela *International Annealed Copper Standard* (IACS). O padrão IACS refere-se ao valor da resistividade do

cobre recozido a 20°C, considerando um valor de 100% corresponde a uma resistividade de 17,141  $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{km}$ . [3]

O alumínio 1350-O suporta temperaturas de funcionamento até 230°C, enquanto que no alumínio 1350-H19 apenas suporta temperaturas até 90°C.

## **2.4. PRÓS E CONTRAS**

No cabo ACCC o revestimento do alumínio é feito em forma trapezoidal, enquanto que no cabo ACSR o revestimento é feito de forma circular. Esta diferença parece um pormenor insignificante, mas na realidade com este formato trapezoidal a área de alumínio existente torna-se maior e a corrente elétrica pode circular mais abundantemente, diminuindo a resistência e as perdas. [9] Existe um maior aproveitamento de espaço em que tomemos como exemplo, em que para diâmetros de condutor iguais, de 16mm, a secção do cabo ACSR é de 160mm<sup>2</sup> enquanto que no cabo ACCC a secção do cabo é de 180mm<sup>2</sup>. Este pormenor está evidenciado no caso de estudo presente nesta dissertação.

Para aumentar a capacidade das linhas existentes, em linhas com tempo de vida útil elevado, tornou-se economicamente mais atrativo, trocar somente os cabos da linha existente, em vez de adicionar um nova linha em paralelo. No entanto, o povoamento e densidade de casas, bem como as características naturais numa dada área pode tornar difícil a construção de novas linhas, e projetos como trocar os condutores são muitas vezes considerados.

O fator económico é a maior desvantagem deste tipo de cabos, esta tecnologia ainda não está muito explorada e o custo deste tipo de condutores está num valor muito alto relativamente aos convencionais, razão pela qual os técnicos que instalam este tipo de cabos devem de ter cuidados especiais no seu manuseamento e também ter alguma formação, pois desde a forma de desenrolamento até à instalação destes requer um manuseamento mais cuidadoso e especial.

## **2.5. ESPECIFICIDADES DO CABO ACCC**

Mais Valias na sua Utilização:

- Capacidade de transporte de energia entre 50% a 100% superior aos cabos de alumínio-aço de secção semelhante.
- ***Upgrade da capacidade de transporte de linhas existentes, com menor probabilidade da necessidade de substituição de apoios.***
- Exploração eficiente das linhas a temperaturas mais elevadas: Aumento da Fiabilidade da Rede.
- Possibilidade de estabelecer vãos de maior comprimento: Travessias de rios, montanhas e zonas onde é necessário vencer vãos de longa distância.
- **Redução do número e/ou altura dos apoios nos novos projetos de corredores de energia.**
- Utilização de métodos e ferramentas de instalação semelhantes às dos cabos ACSR.
- Benefícios técnicos: Permite obter uma redução de 15% de perdas na linha.
- Benefícios ambientais: Redução do número de traçados de linhas aéreas.

## 3. CÁLCULO ELÉTRICO

### 3.1. OBJETIVO

O presente capítulo pretende relatar a análise efetuada ao cálculo elétrico, com base na validação de parâmetros, conforme são analisados da EDP Distribuição.

O cálculo elétrico de uma linha aérea tem como objetivo determinar as características elétricas da linha, tais como, a resistência elétrica, reatância indutiva, intensidade de corrente máxima admissível, perdas de energia e quedas de tensão.

Utilizou-se como referência para ajuda da compreensão deste capítulo o manual de “Noções básicas de elaboração de Projetos” da “Universidade EDP” [10]

### 3.2. TENSÃO DE TRANSPORTE

Genericamente, sabe-se que quanto maior for o nível de tensão, para uma dada potência a transportar, menor será a secção mínima dos condutores, bem como as perdas na linha. A diminuição da secção dos condutores conduz a uma redução dos custos da linha, não só pelo facto de condutores de menor secção serem mais baratos, mas também porque desta maneira se diminui o peso da linha e também os esforços sobre os apoios, permitindo utilizar apoios mais económicos. O aumento do nível de tensão implica um aumento significativo do custo dos isoladores e uma maior distância entre condutores, que se traduz num aumento do custo dos apoios. [11]

As linhas aéreas de MT são aquelas cuja tensão nominal é inferior a 60 kV. As tensões

mais comuns são 10, 15 e 30 kV. Estas linhas ligam as subestações aos Postos de Transformação ou ligam diferentes Postos de Seccionamento/Transformação entre si.

A escolha do nível de tensão da linha deve recair sobre um dos níveis de tensão normalizados e na que minimize o custo total da linha e custos de exploração

No caso em que uma linha se destine a ampliar uma rede já existente, a solução mais corrente é adotar o mesmo nível de tensão, pois são evitados custos de instalação e exploração de postos de transformação associados à mudança para um nível de tensão diferente. [12]

Uma maneira rápida para calcular o nível de tensão mais económico é a utilização da expressão de Still, representada a seguir.

$$U_{eco} = 5,5 * \sqrt{\frac{P}{100} + \frac{l}{1,069}} \quad [kV] \quad (3.1)$$

Onde:

$P$  – Potência [kW]

$l$  – Comprimento da linha [km]

### 3.3. SECÇÃO DOS CONDUTORES

Para a escolha da secção dos condutores, são vários os critérios a considerar. A primeira escolha prende-se com o material condutor a utilizar, pois a secção depende do material condutor escolhido. Atualmente usam-se dois materiais condutores nas linhas elétricas: o cobre e o alumínio. O alumínio é mais leve e mais barato do que o cobre, mas para as mesmas condições elétricas requer uma secção superior à do cobre. Mesmo assim, os condutores mais utilizados nas linhas aéreas de MT são os de alumínio com alma de aço para dar mais resistência mecânica. A secção escolhida deve satisfazer o especificado nas normas relativas ao aquecimento, à resistência mecânica dos condutores e à queda de tensão que não deve exceder determinados valores. [11]

Outro critério está relacionado com a limitação das perdas a um determinado valor que

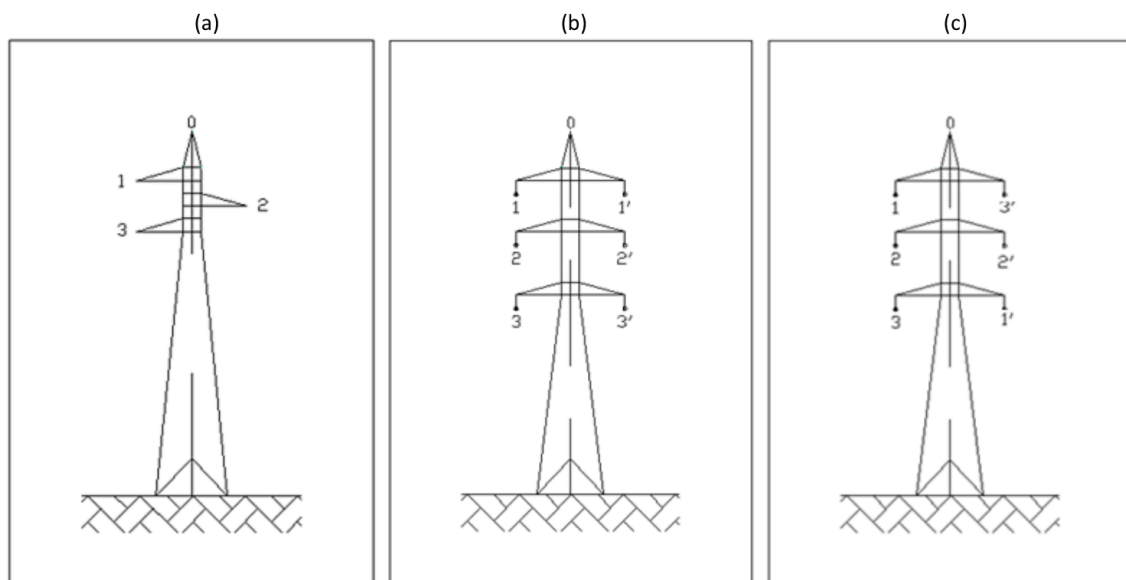
minimize o custo total da linha: investimento inicial mais custo das perdas durante o período de vida útil. A secção resultante da aplicação deste critério é designada secção económica.

Em última análise, a escolha da secção está limitada à gama de secções normalizadas pelos fabricantes. Assim, depois da análise dos diversos critérios deve ser escolhida a secção normalizada imediatamente acima à obtida. [11]

As empresas de transporte e distribuição de energia utilizam apenas algumas das secções apresentadas pelos fabricantes com o objetivo de reduzir os custos e uniformizar as soluções escolhidas.

### 3.4. GEOMETRIA DOS CONDUTORES

A **Figura 6** representa a geometria dos condutores de uma linha simples com 3 condutores (a), dupla com disposição simétrica das fases (b), dupla com disposição anti-simétrica das fases (c), no caso da linha dupla ou seja, formada por dois ternos ligados em paralelo:



**Figura 6** - Exemplos de silhueta simples com 3 condutores [13]

A disposição anti-simétricas das fases, corresponde à configuração de impedância mínima para linhas duplas, dado que o valor da indutância é mais reduzido comparativamente com

o da disposição simétrica.

A distância equivalente entre condutores D é calculada por:

$$D = \sqrt[3]{D_1 * D_2 * D_3} \quad [m] \quad (3.2)$$

onde:

$$D_1 = \frac{\sqrt{D_{12} * D_{12}' * D_{13} * D_{13}'}}{D_{11}'} \quad [m] \quad (3.3)$$

$$D_2 = \frac{\sqrt{D_{21} * D_{21}' * D_{23} * D_{23}'}}{D_{22}'} \quad [m] \quad (3.4)$$

$$D_3 = \frac{\sqrt{D_{12} * D_{12}' * D_{13} * D_{13}'}}{D_{33}'} \quad [m] \quad (3.5)$$

O cálculo da distância D é um dado necessário para o cálculo da indutância e da reatância indutiva.

### 3.5. CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS

A seleção dos condutores a utilizar numa linha aérea depende da energia a transportar à carga. Nesta secção pretende-se demonstrar o cálculo das características elétricas de uma linha de transmissão, com vista à sua exploração a longo prazo.

- **Intensidade de corrente nominal**

A intensidade da corrente nominal a transitar numa linha depende da tensão nominal da linha e da potência instalada na carga, sendo a sua determinação obtida através da seguinte expressão:

$$I = \frac{P_n}{\sqrt{3} * U_c * \cos \varphi} \quad [A] \quad (3.6)$$

Onde:

$I$  – Intensidade da corrente [A]

$P_n$  – Potência total de transporte [W]

$U_c$  – Tensão nominal da linha [V]

$\cos \varphi$  – Fator de potência (geralmente 0,9)

Conhecida a intensidade de corrente, a densidade de corrente, por fase, pode ser calculada a partir da equação:

$$d = \frac{I}{\sigma} \quad [A/mm^2] \quad (3.7)$$

Onde:

$I$  – Intensidade da corrente [A]

$\sigma$  – Secção do condutor [ $mm^2$ ]

Em função desta corrente de carga, será determinado qual o tipo de condutor adequado, para assegurar a transmissão de energia.

- **Cálculo Térmico**

- a) A múltipla dependência térmica**

A linha elétrica pode ser considerada como um sistema onde as condições de funcionamento dependem do sistema envolvente, e que, a linha, através dos seus cabos, funcionará a uma determinada temperatura diferente da temperatura do sistema envolvente.

A transmissão de calor poder ser definida como a transmissão de energia de uma região para outra como resultado da diferença de temperaturas entre elas.

Os cabos elétricos das linhas aéreas estão ainda sujeitos a um aquecimento adicional causado pela radiação solar, que se sobrepõe ao efeito térmico da corrente que os atravessa.

A equação de equilíbrio mais comum, utilizada em projetos de linhas aéreas foi estabilizada segundo o modelo por Kuipers-Brown. Esta equação enquadra e permite a quantificação dos diversos mecanismos de transmissão de calor intervenientes no processo onde a linha se insere.

## b) Equação de Equilíbrio segundo o Modelo de Kuipers-Brown

O modelo de Kuipers-Brown propõe uma equação de equilíbrio, baseada e desenvolvida a partir dos princípios de transmissão de calor, fazendo depender a sua resolução das condições ambientais de cada local, das características dos cabos utilizados e da corrente que os atravessa.

Transformou-se a equação de equilíbrio de forma a apresentar resultados independente do comprimento de uma linha, digamos que, mais simples de calcular para qualquer ponto da mesma, em função do diâmetro de qualquer cabo. Assim a equação foi reduzida através de métodos empíricos, conforme se apresenta de seguida

$$-C^{dT} - E \cdot \sigma \cdot \pi \cdot d \cdot (T^4 - T_A^4) + \sigma_{solar} \cdot G_i \cdot d - 8,55 \cdot (v \cdot d)^{0,448} \cdot (T - T_A) + R \cdot I^2 = 0 \quad dt \quad (3.8)$$

Onde:

$C$  – Capacidade calorífica [ $J \cdot m^{-1} \cdot ^\circ K^{-1}$ ];

$T$  – Temperatura do cabo [ $^\circ K$ ];

$T_A$  – Temperatura ambiente [ $^\circ K$ ];

$dT$  – Mudança de temperatura durante  $dt$ ;

$\sigma$  – Constante de Stefan – Boltzmann com o valor de  $5,7 \cdot 10^{-8} W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ K^{-4}$ ;

$d$  – diâmetro do cabo [ $m$ ];

$E$  – Emissividade em relação ao corpo negro (normalmente 0,6);

$\sigma_{solar}$  – Coeficiente de absorção solar (normalmente 0,5);

$G_i$  – Energia radiante incidente sobre uma superfície (normalmente usa – se  $1000 W \cdot m^{-2}$ );

$v$  – Velocidade do vento (normalmente considera – se 0,6 ou 1,0  $m/s$ );

$R$  – Resistência elétrica do cabo , à temperatura  $T$  [ $\Omega/m$ ];

$I$  – Intensidade da corrente elétrica [ $A$ ];

A resistência elétrica do cabo, para qualquer temperatura é dada por:

$$R = R_{ref} * [1 + \alpha_T * (T - T_{ref})] \quad (3.9)$$

Onde:

$R$  – Resistência linear do cabo à temperatura  $T$  [ $\Omega/m$ ];

$R_{ref}$  – Resistência linear do cabo à temperatura de referência [ $\Omega/m$ ];

$\alpha_T$  – Coeficiente de temperatura do cabo;

$T$  – Temperatura do cabo [ $^{\circ}C$ ];

$T_{ref}$  – Temperatura de referência (normalmente  $+ 20^{\circ}C$ ).

### c) Intensidade de Corrente em Regime Permanente

A equação de equilíbrio segundo o modelo Kuipers-Brown é a mais utilizada em linhas aéreas, para calcular a intensidade de corrente máxima admissível em condutores, em regime permanente.

Nestas condições, considera-se desprezável a transmissão de calor por condução, ou seja,

$$-C^{dT} = 0dt$$

- **Constantes físicas características por quilómetro de linha**

Em todas as linhas de transporte e distribuição de energia há grandezas típicas, que são as constantes físicas elétricas por quilómetro de comprimento das mesmas.

Admitindo que a linha constitui um sistema equilibrado e simétrico, estas constantes têm valores idênticos nas três fases.

As constantes físicas por quilómetro de linha são quatro, conforme se indica:

- Resistência Elétrica,  $R$  [ $\Omega / km$ ];
- Indutância,  $L$  [ $H / km$ ];
- Capacidade,  $C$  [ $F / km$ ];

- Condutância, G [S / km].

### a) Resistência

A resistência elétrica é um dos fatores que mais influenciam o projeto de uma linha, dado que as perdas de energia são em função direta da resistência por fase, sendo a sua determinação muito importante. Resistência é a propriedade de um circuito elétrico, que quantifica a energia elétrica que é convertida em calor em função da passagem de corrente elétrica.

Os condutores apresentam resistências diferentes à passagem de corrente contínua e à passagem de corrente alternada. Essa diferença será tanto maior quanto maior for a frequência da corrente alternada.

A resistência em corrente contínua depende essencialmente da natureza do material condutor, caracterizada pela sua resistividade e das suas dimensões, sendo diretamente proporcional ao seu comprimento e inversamente proporcional à área da sua secção transversal. Esta é obtida pela fórmula seguinte:

$$R_{cc} = \frac{\rho \cdot l}{\sigma} \quad [\Omega] \quad (3.10)$$

Onde:

$\rho$  – Resistividade do material condutor [ $\Omega \cdot mm^2 \cdot km^{-1}$ ]

$l$  – Comprimento do condutor [km]

$\sigma$  – Secção do condutor [ $mm^2$ ]

A resistividade do material condutor depende da pureza do material, para além da temperatura, pois cresce com o aumento desta de uma forma linear, segundo a relação:

$$\rho_2 = \rho_1 [1 + \alpha_T \cdot (T_2 - T_1)] \quad (3.11)$$

$$\rho_{20^\circ C}(\text{aluminio}) = 0,00403 / ^\circ C \quad (3.12)$$

Sendo  $\rho_2$  a resistividade do material à temperatura  $T_2$  e  $\rho_1$  a resistividade do mesmo à temperatura  $T_1$ . Da mesma forma pode escrever-se:

$$R_2 = R_2[1 + \alpha_T * (T_2 - T_1)] \quad (3.13)$$

A resistência em corrente contínua, normalmente especificada em documentação técnica, indica o seu valor determinado para uma temperatura de referência, que usualmente é 20°C, o que permite reescrever a equação acima, de forma a seguir apresentada:

$$R_{cc} = R_{20^\circ\text{C}}[1 + \alpha_T * (T - T_{20^\circ\text{C}})] \quad (3.14)$$

Os cabos de alumínio-aço comportam-se, aquando da passagem de corrente alternada, como condutores tubulares uniformes, tendo um diâmetro interno igual ao diâmetro de um círculo tangente aos fios de alumínio na sua parte interna e um diâmetro externo circunscrito aos fios externos do cabo, também em alumínio. Em parte, este comportamento é devido à resistividade do aço que compõe a alma do cabo que é significativamente maior que a do alumínio. Este comportamento é conhecido como efeito peculiar.

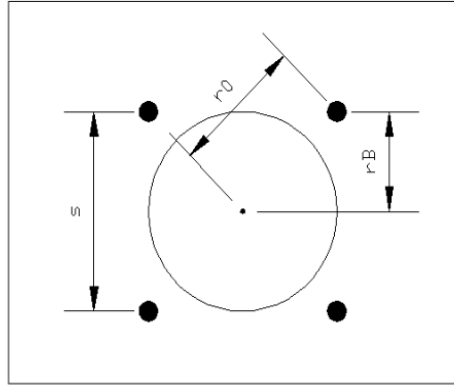
O efeito pelicular pode traduzir-se por um coeficiente que afeta o valor da resistência em corrente contínua, cujo valor deve ser fornecido pelo fabricante dos cabos.

Não se conhecendo o valor deste coeficiente deve-se considera-lo unitário, para efeitos de cálculo. Assim, poderá se calcular a resistência de um condutor em corrente alternada da seguinte forma:

$$R_{ca} = k \cdot R_{20^\circ\text{C}}[1 + \alpha_T \cdot (T - T_{20^\circ\text{C}})] \quad (3.15)$$

Sendo k o coeficiente de efeito pelicular. Para uma linha equipada com condutores de feixe múltiplo com n subcondutores, o valor da resistência por fase será de  $R_{ca}/n$ .

## **b) Indutância**



**Figura 7** - Raio da circunferência que passa pelos subcondutores que formam a fase [13]

Para determinar o valor da indutância é necessário saber qual o tipo de armação que está a ser utilizado em cada um dos apoios extremos da linha, pois os condutores apresentam diferentes afastamentos entre si, de acordo com a armação em causa. O valor da indutância é calculado a partir da seguinte expressão, para o caso de uma linha simples

$$L = 2 * \left( \frac{1}{4 * n} + \ln \frac{D_M}{r_B} \right) * 10^{-4} \quad [H/km] \quad (3.16)$$

Onde:

$$D_M = \sqrt[3]{d_{12} * d_{13} * d_{23}} \quad (3.17)$$

$d_{xy}$  – distância entre os condutores  $x$  e  $y$  [m]

$n$  – Número de condutores por fase

$D_M$  – Distância equivalente entre condutores [m]

$r_B$  – Metade do diâmetro do cabo [m]

No caso de uma linha dupla, ou linha com dois ternos, a indutância por fase será:

$$L = \left( \frac{1}{4 * n} + \ln \frac{D_M * D_{M2}}{r_B * D_{M1}} \right) * 10^{-4} \quad [H/km] \quad (3.18)$$

$$D_{M1} = \sqrt[3]{d_{11}' * d_{22}' * d_{33}'} \quad (3.19)$$

$$D_{M2} = \sqrt[3]{d_{12}' * d_{13}' * d_{23}'} \quad (\text{para simetria de fases}) \quad (3.20)$$

### c) Capacidade

Os condutores das linhas aéreas de energia elétrica energizadas apresentam diferenças de potencial entre si e também em relação ao cabo de guarda e ao solo. Estas diferenças de potencial indicam a presença de cargas elétricas distribuídas ao longo desses mesmos condutores.

Uma linha comporta-se, portanto como um condensador de várias armaduras, tendo como armaduras os próprios cabos condutores e de guarda e o solo. Assim sendo, uma linha ao ser energizada absorve da fonte cargas elétricas necessárias ao seu carregamento, da mesma forma que um condensador.

Aplicando-se uma tensão alternada a uma linha, a carga elétrica dos condutores num ponto qualquer varia de acordo com valores instantâneos de diferença de potencial aí existentes entre os condutores, entre os condutores e o cabo de guarda e entre os condutores e o solo. O fluxo das cargas elétricas constitui uma corrente, que por ser devida à carga e descarga cíclica das linhas, quando estas se encontram sob tensão, é denominada corrente de carga da linha.

A corrente de carga das linhas é quase insignificante em linhas aéreas curtas e poderá atingir valores elevados em linhas de grande comprimento.

Sendo a linha simétrica, todos os condutores têm a mesma capacidade linear de serviço e esse valor comum é também por definição a capacidade linear de serviço da linha.

Em linhas aéreas trifásicas, a capacidade por fase para uma linha simples é obtida pela seguinte equação.

$$C = \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0}{\ln \left( \frac{D_M}{r_B \cdot \sqrt{1 + \left( \frac{D_M}{2 \cdot h_M} \right)^2}} \right)} \cong \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0}{\ln \left( \frac{D_M}{r_B} \right)} \quad [F/km] \quad (3.21)$$

Onde:

$r_B$  – raio do condutor

$D_M$  – distância média geométrica entre todos os condutores

$h_M$  – distância média geométrica entre todos os condutores e o solo.

$$(h_M = \sqrt[3]{h_1 \cdot h_2 \cdot h_3}) \quad (3.22)$$

$\epsilon_0$  – constante dielétrica ( $8,85 \cdot 10^{-12} F/m$ )

Para casos de linha dupla a capacidade por fase será:

$$C = \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0}{\ln\left(\frac{D_M \cdot D_{M2}}{r_B \cdot D_{M1}}\right)} [F/km] \quad (3.23)$$

#### d) Condutância

Se o isolamento das linhas fosse perfeito, não haveria nenhuma corrente entre os condutores e os apoios, nem superficialmente nem através do isolamento, pelo que a condutância seria nula. Mas na realidade, existe uma corrente, ainda que muito pequena, porque a resistência do isolamento não é infinita.

Numa linha bem isolada e com tempo seco é praticamente nula. O seu cálculo é obtido em função das perdas por quilómetro de linha. A condutância assim calculada linear,  $G_L$ , dada por:

$$G_L = \frac{p}{U^2} * 10^{-3} [S/km] \quad (3.24)$$

em que:

$p$  – perdas por condutância [ $kW/km$ ]

$U$  – tensão eficaz simples [ $kV$ ];

As perdas por condutância resultam do fenómeno de efeito coroa. Depende da tensão crítica disruptiva, cujo valor em linhas aéreas é da ordem de:

$$U_c = 151 kV \rightarrow \text{Tempo seco}$$

$$U_c = 121 kV \rightarrow \text{Tempo chuvoso}$$

Pode, então, concluir-se que as perdas por efeito de coroa não são apreciáveis para os níveis de tensão das linhas MT e AT.

- **Efeito coroa**

Se os condutores de uma linha aérea atingirem um potencial suficientemente grande que seja superior à rigidez dielétrica do ar, produzem-se perdas de energia devido à corrente que se forma no meio.

Tudo se passa como se o ar fosse condutor, dando lugar a uma corrente de fuga idêntica à produzida pela condutância dos isoladores.

Nos condutores aéreos este efeito é visível na escuridão da noite, podendo-se ver envolvidos num arco luminoso azulado, de secção transversal circular em forma de coroa, pelo que o fenómeno se designa de “efeito coroa”.

O efeito coroa aparece na superfície dos condutores de uma linha aérea quando o valor do gradiente de potencial aí existente excede o valor do gradiente crítico disruptivo do ar.

Toda a energia libertada ou irradiada deve provir do campo elétrico da linha, e portanto, do sistema de alimentação, para o qual representa perda de energia e em última instância prejuízos.

As perdas e as suas consequências económicas têm sido alvo de diversos estudos, com o objetivo de determinar as melhores condições de instalação para reduzir essas perdas. De um modo geral, as perdas relacionam-se com a geometria dos condutores, tensões de operação, gradientes de potencial na superfície dos condutores e, principalmente, com as condições meteorológicas locais. As perdas por efeito de coroa são desprezáveis para os níveis de tensão das linhas MT.

A instalação de condutores com diâmetros maiores, ou aumentar o espaçamento entre as fases, são algumas formas de reduzir os gradientes de potencial à superfície dos condutores.

As perdas por efeito de coroa começam a produzir-se a partir do momento em que a tensão crítica disruptiva seja menor que a tensão na própria linha.

### 3.6. CONSTANTES ELÉTRICAS CARATERÍSTICAS POR QUILOMETRO DE LINHA

As linhas de transmissão de energia são caracterizadas pelos seus parâmetros lineares, isto é, constantes físicas eléctricas por quilómetro de comprimento de linha. Os seus valores dependem das características físicas da linha como a secção dos condutores, disposição geométrica dos mesmos, existência ou não de condutores múltiplo e tipo de isolamento.

As constantes físicas caraterísticas de uma linha são quatro:

- Reatância Indutiva  $X = \omega \cdot l$  [ $\Omega$ ]
- Susceptância  $B = \omega \cdot C$  [ $S$ ]
- Impedância  $Z = R + jX$  [ $\Omega$ ]
- Admitância  $Y = G + jB$  [ $S$ ]

Sendo  $\omega$  a frequência angular ( $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ ) e  $f$  a frequência em Hz.

### 3.7. IMPEDÂNCIA CARATERÍSTICA DA LINHA

A impedância caraterística é definida pela relação entre a tensão e a intensidade de corrente em todos os pontos de uma linha de comprimento infinito, apresentando um valor constante ao longo da transmissão. [14] Esta relação é independente do comprimento da linha e é calculada a partir da seguinte expressão.

$$Z_c = \sqrt{\frac{Z}{Y}} \quad [\Omega] \quad (3.25)$$

Onde:

$Z$  – Impedância [ $\Omega$ ]

$Y$  – Admitância [ $S$ ]

### 3.8. PERDAS DE ENERGIA

As perdas de energia por efeito Joule são calculadas recorrendo à seguinte expressão.

$$P_{perdas} = n \cdot R \cdot I^2 \quad [W] \quad (3.26)$$

Onde:

$n$  – número de condutores da linha;

$R$  – resistência ôhmica do condutor  $[\Omega]$ ;

$I$  – intensidade da corrente da linha  $[A]$ .

A resistência ôhmica de um condutor é calculada a partir da seguinte expressão.

$$R = l \cdot R_{20^{\circ}C} \quad [\Omega] \quad (3.27)$$

Onde:

$l$  – Comprimento da linha  $[km]$ ;

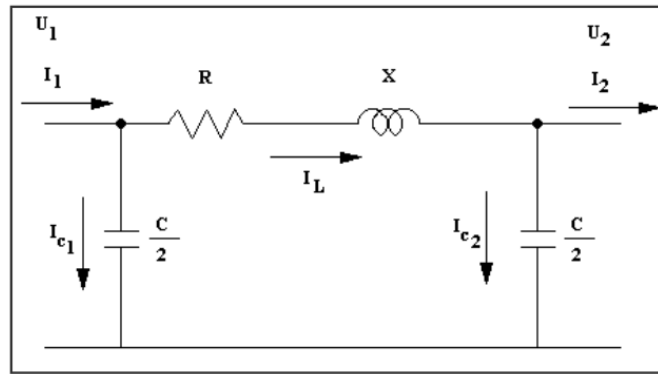
$R_{20^{\circ}C}$  – resistência linear a  $20^{\circ}C$ .

Também é usual apresentar as perdas de energia em percentagem da potência transmitida pela linha. Este valor é obtido a partir da seguinte expressão, onde as variáveis apresentadas têm o significado explicado anteriormente.

$$P_{perdas}(\%) = \frac{P_{perdas}}{P} \cdot 100 \quad (3.28)$$

### 3.9. QUEDAS DE TENSÃO

Admite-se que uma linha aérea se pode representar através de forma equivalente tomando-a como um quadripolo em  $\pi$ .



**Figura 8** - Representação da forma equivalente a um quadripolo. [13]

Para este esquema pode-se retirar que [10]:

$$\frac{U_1}{\sqrt{3}} = (R + jX) \cdot I = Z \cdot I + \frac{U_2}{\sqrt{3}} \quad (3.29)$$

Para linhas aéreas até 30 kV (consideradas curtas e a funcionar sob tensões moderadas), usam-se premissas para o cálculo das quedas de tensão, que são as seguintes :

- Considera-se nula a admitância da linha;
- Admite-se que a queda de tensão na linha resulta, apenas, da soma da queda de tensão provocada na resistência da linha pela componente ativa da corrente com a queda de tensão provocada na reactância indutiva da linha pela componente reativa da corrente;
- Considera-se que a tensão no início da linha é igual à sua tensão nominal;

Logo, a queda de tensão na linha é obtida através de:

$$\Delta U = \sqrt{3} \cdot I \cdot (R \cdot \cos \varphi + X \cdot \sin \varphi) \quad [V] \quad (3.30)$$

Onde:

$$\cos \varphi = 0,9$$

$$\sin \varphi = \sin (\arccos(0,9))$$

A queda de tensão também pode ser apresentada em forma de percentagem da tensão nominal da linha.

$$\Delta U(\%) = \frac{\Delta U}{U_n} \cdot 100 \quad (3.31)$$

A queda de tensão não deverá ser superior a 5% da tensão nominal da linha.



## 4. CÁLCULO MECÂNICO

O presente capítulo pretende relatar os princípios que são utilizados para o cálculo mecânico de linhas aérea em Média Tensão.

Utilizou-se como referência para ajuda da compreensão deste capítulo o manual de “Noções básicas de elaboração de Projetos” da “Universidade EDP” [10]

Em Portugal o diploma em vigor é o Regulamento de Segurança de Linhas Elétricas de Alta Tensão, RSLEAT, que foi aprovado através do Decreto Regulamentar N.º 1/92 de 18 de Fevereiro, fixando as condições de segurança a que devem obedecer o estabelecimento e a exploração das linhas elétricas de alta tensão, aéreas ou subterrâneas. Neste regulamento entende-se por alta tensão todas as linhas elétricas de tensão superior a 1000 V. Este documento é considerado como o principal elemento orientador do projeto de linhas aéreas, contendo todas as definições necessárias à sua elaboração, definindo as condições de dimensionamento dos seus componentes e as regras de convivência das instalações no meio ambiente em que serão estabelecidas. O conhecimento do conteúdo deste documento e o conhecimento de como utilizá-lo é um dever de todos os projetistas de linhas aéreas.

A DGE - Direção Geral de Energia publicou em 1986 as “Recomendações para Linhas Aéreas de Alta Tensão, até 30 kV” que remodelam, atualizam e ampliam as recomendações Projeto-Tipo de 1977. Conforme explicitado pela DGE, na elaboração destas recomendações, continuaram a merecer a maior atenção os objetivos que, sem subalternização da segurança das linhas, mais importância têm conferido a este género de documentação técnica. Desses objetivos, que pesam não apenas no projeto mas também na

execução e na exploração, sobressaem a normalização, a otimização das soluções e a sua uniformização, tanto no que respeita aos materiais empregados nas linhas como à concepção destas. [10]

Nas linhas aéreas de transmissão de energia elétrica, as condições de segurança e estabilidade da linha são preponderantes, e é nesse sentido que o cálculo mecânico é fundamental e tem como objetivos:

- Determinar as tensões mecânicas de montagem que os condutores ficam a exercer nos apoios, para assegurar que não existirá a sua ruptura, quaisquer que sejam as condições atmosféricas que se verificarem. Os condutores nunca deverão ser solicitados por tensões mecânicas superiores à sua tensão de segurança;
- Escolher os apoios corretos, tendo como base a verificação da sua estabilidade, baseado nas hipóteses de cálculo de cada apoio, através do cálculo da sua resistência mecânica, conforme descrito nas recomendações para Linhas Aéreas de Alta Tensão até 30 kV da Direção Geral da Energia, bem como confirmar a estabilidade dos maciços de fundação;
- Escolher de forma correta a alturas dos apoios, de modo a ser cumprido o Regulamento de Segurança de Linhas Elétricas de Alta Tensão (RSLEAT), aprovado através do Decreto Regulamentar N.º 1/92 de 18 de Fevereiro, no que respeita às imposições das distâncias mínimas de obstáculos próximos da linha;
- Verificar o afastamento entre condutores, de modo a evitar arcos elétricos aquando da passagem de uma eventual descarga, garantindo um devido isolamento entre condutores

#### **4.1. TRAÇADO DA LINHA**

Na escolha do traçado da linha é importante obter a planta topográfica do local onde vai ser instalada a linha. A planta topográfica revela informação importante sobre o relevo, as vias existentes, cursos de água, florestas ou mesmo aglomerados habitacionais. O ideal era a linha ser um segmento recto, mas pelas razões acima descritas obriga a desistir dessa hipótese.

Existe ainda determinada informação a ter em conta, que usualmente não é visível nas

plantas topográficas, tais como: linhas de telecomunicações, as linhas de energia elétrica já existentes, e mesmo construções recentes que ainda não estejam registradas nas plantas topográficas.

O RSLEAT indica que deverão existir precauções acrescidas quando existe travessias sobre edifícios habitacionais e históricos, estradas e linhas férreas, de forma a garantir e acautelar a segurança de bens, de pessoas bem como a sua livre circulação nas vias públicas.

#### **4.2. INFLUÊNCIA SOBRE OS CONDUTORES E COEFICIENTE DE SOBRECARGA**

De acordo com as estações do ano e a região em causa, existem fatores que influenciam o comportamento dos elementos que constituem uma linha aérea. Os condutores sofrem oscilações provocadas pelo vento, bem como o peso extra caso se forme uma manga de gelo sobre os mesmos. Sofrem também com a variação de temperatura. Todos estes fatores contribuem para solicitações de esforço extra nos postes de apoio às linhas.

São considerados três estados atmosféricos tipo, para considerar as circunstâncias mais desfavoráveis, que são: [15]

- ✓ **Estado de Inverno (vento reduzido)**- caracteriza-se por ter vento reduzido e por temperatura mínima de  $-5^{\circ}\text{C}$ . Neste estado também existe a possibilidade de formação de manga de gelo, sendo nesse caso a temperatura mínima de  $-10^{\circ}\text{C}$ .
- ✓ **Estado de Primavera (vento máximo)**- caracteriza-se por ter vento forte e temperatura moderada, de  $15^{\circ}\text{C}$ , e ausência de gelo.
- ✓ **Estado de Verão (flecha máxima)**- caracteriza-se pela ausência de vento e pela temperatura máxima que se faz sentir, sendo de  $75^{\circ}\text{C}$ , e pela ausência de gelo.

De acordo com o artigo 10º do RSLEAT, no cálculo das linhas aéreas, o vento deverá considerar-se atuando numa direção horizontal e a força proveniente da sua ação considerar-se-á paralela àquela direção e será determinada pela expressão:

$$F_v = \alpha \cdot c \cdot q \cdot s \quad [N] \quad (4.1)$$

em que:

$F_v$  – força proveniente da ação do vento [N];

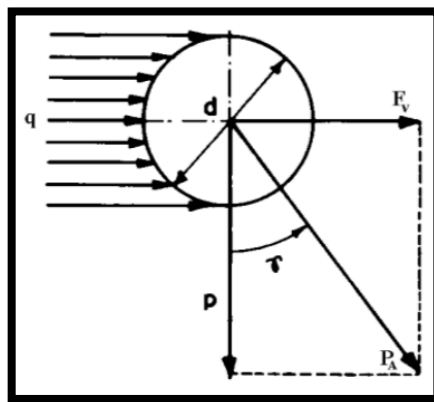
$\alpha$  – coeficiente de redução;

$c$  – coeficiente de forma;

$q$  – pressão dinâmica do vento [Pa];

$s$  – área da superfície batida pelo vento [m<sup>2</sup>]

A ação do vento sobre um cabo, distribui-se segundo uma direção horizontal, em sentido transversal ao eixo longitudinal do cabo. Há que considerar também o peso próprio do cabo, que atua verticalmente. Isto traduz-se num peso aparente resultante das duas ações, conforme se mostra na Figura seguinte:



**Figura 9** - Ação do vento sobre um cabo [13]

Pela análise da figura acima, conclui-se que o peso do cabo pode ser obtido pela expressão seguinte:

$$P_A = \sqrt{p^2 + F_v^2} \quad [daN/m] \quad (4.2)$$

em que:

$F_v$  – força proveniente da ação do vento sobre o cabo [daN/m];

$p$  – peso linear do cabo [daN/m].

Os valores da pressão dinâmica do vento, em função da altura acima do solo a que se encontra o elemento da linha sobre o qual se pretende calcular a ação do vento será de acordo com a tabela seguinte:

**Tabela 3-** Valores de força do vento para diferentes alturas. [13]

Altura acima do solo [m]	Pressão dinâmica q [Pa]	
	Vento máximo habitual	Vento reduzido
até 30	750	300
de 30 a 50	900	360
acima de 50	1050	420

O coeficiente de redução para efeito de cálculo terá valores de acordo com a seguinte tabela:

**Tabela 4-** Valores do coeficiente de redução para diferentes elementos. [13]

Elemento	coeficiente de redução
Condutores	0,6
Cabos de guarda	
Apoios	1
Travessas	
Isoladores	

Para condutores nus os valores do coeficiente de forma serão de acordo com a tabela seguinte:

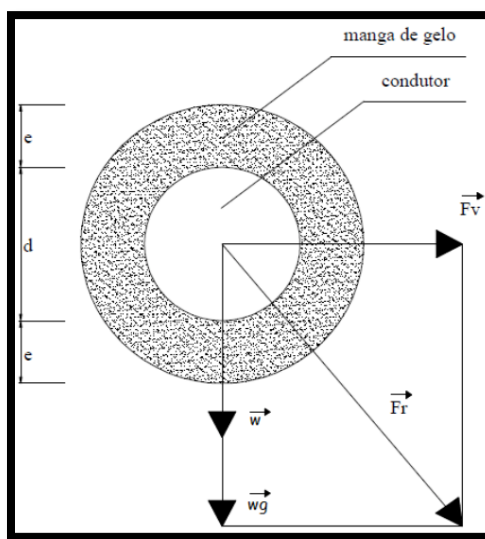
**Tabela 5-** Valores do coeficiente de forma para diferentes diâmetros. [13]

Diâmetro (mm)	Coeficiente de forma c
até 12,5	1,2
de 12,5 a 15,8	1,1
acima de 15,8	1,0

De acordo com o artigo 16º do RSLEAT, no caso de se considerar uma zona em que exista a formação de manga de gelo nos condutores, para efeito de cálculos deverá se considerar uma espessura de 10 mm e uma densidade de 0,9 que equivale a um peso específico de 900 kg/dm<sup>3</sup>.

Para determinar qual o estado atmosférico mais desfavorável é necessário calcular o coeficiente de sobrecarga, associado a cada um dos estado atmosféricos apresentados anteriormente. Este coeficiente pretende refletir as solicitações mecânicas nos condutores, provocadas pela influência do vento, temperatura e peso da possível manga de gelo.

A ação do vento sobre um cabo distribui-se segundo uma direção horizontal, em sentido transversal ao eixo longitudinal do cabo. Isto traduz-se numa força resultante no condutor, conforme se mostra na figura seguinte:



**Figura 10 -** Forças aplicadas no condutor. [13]

Pela análise da figura 10, conclui-se que a força resultante do cabo pode ser obtido pela expressão seguinte:

$$F_r = \sqrt{(w + w_g)^2 + F_v^2} \quad [daN/m] \quad (4.3)$$

em que:

$F_v$  – Força proveniente da ação do vento sobre o cabo [daN/m]

$w$  e  $w_g$  – Peso próprio do condutor e da manga de gelo, respectivamente [daN/m]

$F_r$  – Força res. do peso do condutor e do gelo, com a força do vento [daN/m]

O valor do peso próprio do condutor encontra-se normalmente indicado nos catálogos de características do condutor . O peso da manga de gelo é dado por:

$$W_g = \frac{\rho_{gelo} \cdot \pi}{4} \cdot [(d + 2e)^2 - d^2] \quad \left[ \frac{daN}{m} \right] \quad (4.4)$$

Onde:

$\rho_{gelo}$  – peso específico volumétrico do gelo, igual a 900 [daN/m<sup>3</sup>];

$d$  – diâmetro do condutor ou cabo de guarda [m];

$e$  – espessura da manga do gelo, igual a 0,014 [m]

Substituindo as equações 4.1 e 4.4 na equação da força resultante sobre o cabo, obtém-se:

$$F_r = \sqrt{\left\{ w + \frac{\rho_{gelo} \cdot \pi}{4} \cdot [(d + 2 \cdot e)^2 - d^2] \right\}^2 + [\alpha \cdot c \cdot q \cdot (d + 2 \cdot e)]^2} \quad (4.5)$$

Sendo o coeficiente de sobrecarga  $m$ , relativo a um dado estado atmosférico, a relação entre a intensidade da solicitação resultante, e o peso próprio do condutor, vem:

$$m = \frac{F_r}{w} = \frac{\sqrt{\left\{ w + \frac{\rho_{gelo} \cdot \pi}{4} \cdot [(d + 2 \cdot e)^2 - d^2] \right\}^2 + [\alpha \cdot c \cdot q \cdot (d + 2 \cdot e)]^2}}{w} \quad (4.6)$$

É, assim, possível calcular os coeficientes de sobrecarga associados a cada estado atmosférico tendo em conta as condições climáticas que caracterizam cada estado

1. Estado de Inverno (sem gelo) ou Primavera:

$$m = \frac{\sqrt{w^2 + (\alpha \cdot c \cdot q \cdot d)^2}}{w} \quad (4.7)$$

2. Estado de Verão:

$$m = \frac{\sqrt{w^2}}{w} = 1 \quad (4.8)$$

### 4.3. VÃO CRÍTICO

Designa-se por vão crítico, o comprimento do vão para o qual os condutores, adquirem o mesmo valor de tensão máxima, quer para o estado de Inverno, quer para o estado de Primavera. O cálculo do vão crítico é obtido a partir da seguinte expressão:

$$L_{cr} = \frac{\sigma \cdot t_{m\acute{a}x}}{w} \cdot \sqrt{\frac{24 \cdot \alpha_d \cdot (\theta_2 - \theta_1)}{m_2^2 - m_1^2}} \quad [m] \quad (4.9)$$

onde:

$\sigma$  – secção do cabo;

$t_{m\acute{a}x}$  – tensão mecânica máxima aplicada ao cabo [ $daN/mm^2$ ];

$w$  – peso linear do cabo;

$\alpha$  – coeficiente de dilatação linear;

$\theta_2$  – temperatura no estado de vento máximo;

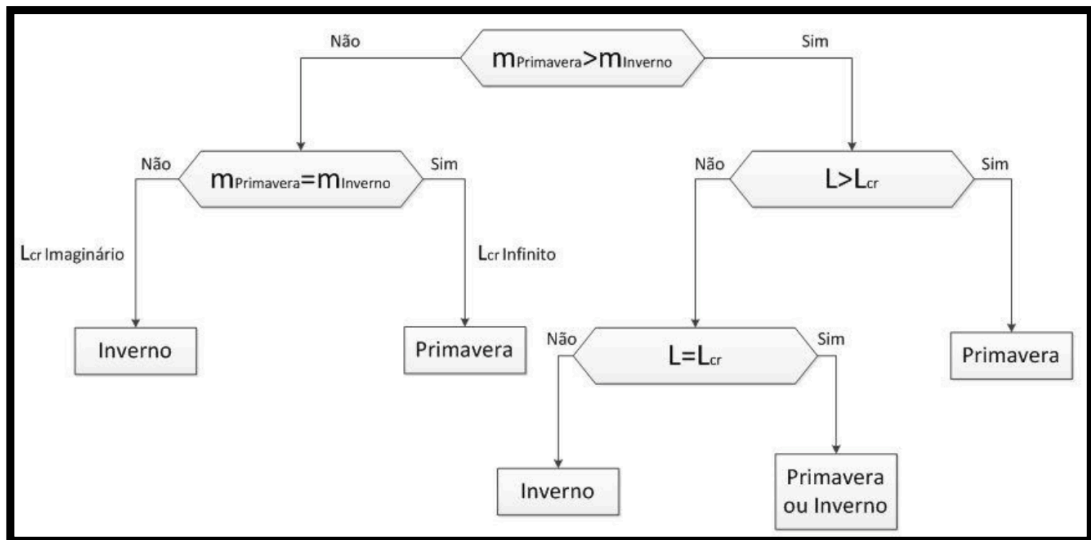
$\theta_1$  – temperatura no estado de vento reduzido;

$m_2$  – coeficiente de sobrecarga no estado de vento máximo;

$m_1$  – coeficiente de sobrecarga no estado de vento reduzido.

#### 4.4. ESTADO ATMOSFÉRICO MAIS DESFAVORÁVEL

Conhecidos o vão equivalente, o vão crítico e os coeficientes de sobrecarga, encontramos em condições de saber qual o estado atmosférico mais desfavorável. Para isso, basta interpretar a árvore de decisão apresentada na figura 11.



**Figura 11-** Diagrama de verificação do estado mais desfavorável. [13]

#### 4.5. TENSÕES MÁXIMAS APLICADAS AOS CABOS

A tensão máxima aplicada num determinado cabo numa linha está associada ao valor da flecha mínima da linha nas condições atmosféricas mais desfavoráveis.

Tendo em conta o artigo 24<sup>a</sup> do RSLEAT, a equação de cálculo da tensão máxima que pode ser considerada será:

$$T_{seg} = \frac{T_R}{2,5} \quad [daN] \quad (4.10)$$

Onde:

$T_R$  – Tensão de ruptura;

$T_{seg}$  – Tensão máxima a que o cabo pode ser sujeito.

#### 4.6. EQUAÇÃO DE ESTADOS PARA EQUILÍBRIO MECÂNICO

A equação de estados relaciona a tração mecânica a que os condutores de uma linha aérea estão submetidos, num determinado estado atmosférico. Sabendo a tração a que os cabos estão submetidos num determinado estado atmosférico conhecido, tendo a consciência do comprimento do vão e das características mecânicas do cabo, será possível determinar a tração a que o cabo ficará sujeito noutra determinada condição de temperatura. Esta equação é muito utilizada para os casos de estudo de flechas, em que para o estado de Verão é usada a temperatura de 75°C, neste caso poderemos saber o valor da tração a que o cabo estará sujeito para à *posteriori*, poder fazer um cálculo da flecha máxima a que esse vão estará sujeita.

Mais precisamente, esta equação de estados traduz a variação da tensão mecânica, em função da temperatura.

A equação é expressa da seguinte forma:

$$\theta_i + \frac{t_{\theta i}}{\alpha_d * E} - \frac{\omega^2 \cdot L_{med}^2}{24 \cdot \alpha_d \cdot \sigma^2 \cdot t_{\theta i}^2} = \theta_k + \frac{t_{\theta k}}{\alpha_d \cdot E} - \frac{m_k^2 \cdot \omega^2 \cdot L_{med}^2}{24 \cdot \alpha_d \cdot \sigma^2 \cdot t_{\theta k}^2} \quad (4.11)$$

em que:

$\theta_i$  e  $\theta_k$  – Temperatura (°C);

$t_{\theta i}$  e  $t_{\theta k}$  – Tração mecânica do cabo às temperaturas  $\theta_i$  e  $\theta_k$  [daN/mm<sup>2</sup>];

$\alpha_d$  – Coeficiente de dilatação Linear [°C<sup>-1</sup>];

$E$  – Módulo de elasticidade [daN/mm<sup>2</sup>];

$\alpha$  – Coeficiente de dilatação linear [1/°C];

$\omega$  – Peso do condutor [daN/m];

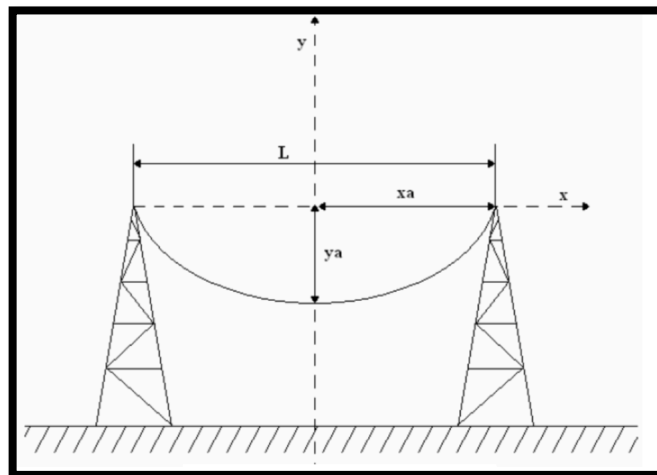
$m_k$  – Coeficiente de sobrecarga do estado mais desfavorável

Ao resolver a equação 4.11 é possível determinar a tração mecânica  $t_{\theta_i}$ , à temperatura  $\theta_i$ , conhecendo para o estado mais desfavorável à temperatura  $\theta_k$  e a tensão mecânica  $t_{\theta_k}$ .

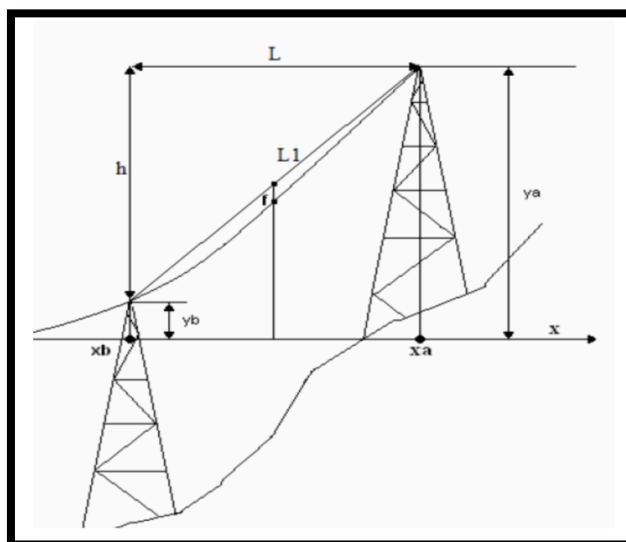
#### 4.7. DETERMINAÇÃO DAS FLECHAS

O cálculo das flechas dos condutores é diferente caso estejamos a falar de vãos em patamares ou vãos em declive. A flecha dos condutores é determinada a meio para uma temperatura ambiente igual a 50°C.

A catenária é a curva que os condutores fazem entre dois apoios subjacentes. É possível fazer uma aproximação da catenária através de uma aproximação parabólica.



**Figura 12** - Geometria de dois vãos em patamar. [13]



**Figura 13** - Geometria de dois vãos em declive. [13]

Na figura 12 e 13 estão representadas, respetivamente, a geometria de dois vãos em patamar e em declive. O cálculo das flechas para cada caso em particular é determinada a partir das expressões [10]:

$$Flecha(vãos\ em\ patamar) = \frac{L^2 \cdot W_v}{8 \cdot t_{max}} \quad [m] \quad (4.4)$$

$$Flecha(vãos\ em\ declive) = \frac{L \cdot L_1 \cdot W_v}{8 \cdot t_{max}} \quad [m] \quad (4.5)$$

Em que:

$L$  – Comprimento do vão representado na figura correspondente [m];

$W_v$  – Peso específico volumétrico [ $kg/mm^2$ ];

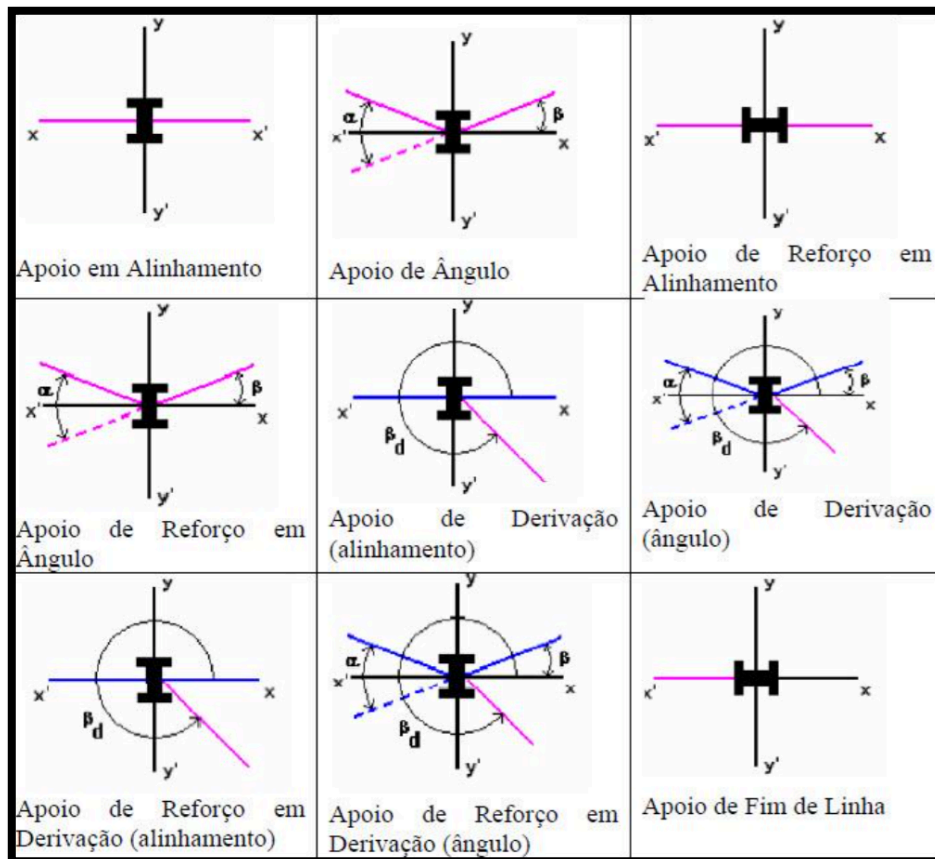
$t_{max}$  – Tensão mecânica no estado de flecha máxima [daN].

#### **4.8. APOIOS E OS ESFORÇOS EXERCIDOS SOBRE ELES**

De acordo com artigo 4º do RSLEAT os apoios de uma linha aérea podem ser classificados da seguinte forma (**Figura 14**): [16]

- Apoio de Alinhamento, se o apoio estiver situado num traçado retilíneo da linha;

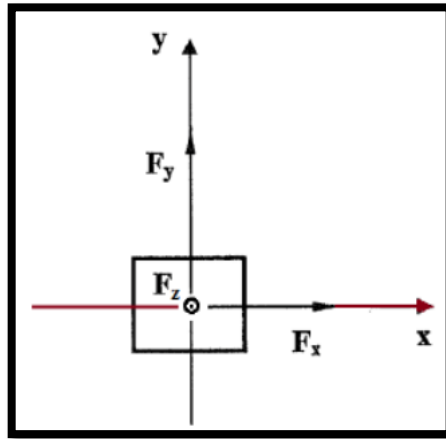
- Apoio de Ângulo, se o apoio estiver num ângulo da linha;
- Apoio de Derivação, se desse apoio derivarem uma ou mais linhas;
- Apoio Fim de Linha, se o apoio for capaz de suportar a totalidade dos esforços que os condutores lhe transmitem de um só lado da linha;
- Apoio de Reforço, se o apoio estiver destinado a suportar esforços longitudinais para reduzir as consequências resultantes da rutura de condutores.



**Figura 14 - Função dos apoios [17]**

Cada apoio vai estar sujeito a esforços aplicados pelos condutores, sendo que estes podem ser classificados da seguinte forma:

- Esforços Verticais ( $F_z$ ) – esforço resultante do peso dos condutores, armações e isoladores, estas últimas quase desprezáveis em relação ao peso dos condutores;
- Esforços Transversais ( $F_y$ ) – esforço resultante da tração dos condutores quando estes fazem ângulos e/ou da ação do vento;
- Esforços longitudinais ( $F_x$ ) – esforço resultante da tensão exercida pelos condutores dos vãos adjacentes, ou quando o esforço é aplicado apenas de um dos lados.



**Figura 15** - Esforços aplicados sobre um apoio [18]

A verificação da estabilidade dos apoios de uma linha aérea consiste em calcular as solicitações mecânicas que lhe são impostas, para depois escolher o tipo de apoio que melhor se adequa. As solicitações que são aplicadas podem ser de diversos tipos:

- Força exercida pelo vento sobre o apoio e condutores;
- Trações mecânicas exercidas pelos condutores das linhas principais e derivadas;
- Peso do próprio apoio e dos condutores das linhas principais e derivadas.

O R.S.L.E.A.T. e as Recomendações para Linhas Aéreas de Alta Tensão Até 30kV estabelecem, para cada tipo de apoio e consoante as características dos vãos adjacentes, um conjunto de hipóteses de cálculo que permitem determinar os esforços transversais, longitudinais e verticais aplicados aos apoios de uma linha eléctrica.

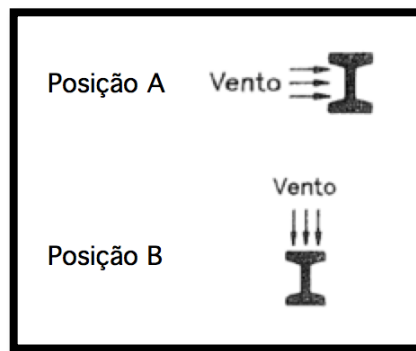
Nessas hipóteses de cálculo estão definidas as fórmulas a utilizar para a determinação dos esforços, bem como condições de cálculo e observações particulares a cada cálculo. Para essas hipóteses de cálculo consideram-se, segundo o regulamento, os seguintes pressupostos:

- Linhas com três condutores e sem cabos de guarda;
- Esforços considerados a 25 cm do topo;
- Esforços do vento sobre isoladores e armações desprezáveis;
- Pesos de isoladores e armações.

Conforme o R.S.L.E.A.T., nomeadamente nos artigos 56º à 62º, são consideradas, de

acordo com a função do apoio, duas hipóteses de cálculo que diferem conforme a direção do vento à incidir na linha. Nas Recomendações para Linhas Aéreas de Alta Tensão até 30kV, nomeadamente no quadro 9.1. ao quadro 9.13. estão indicadas as fórmulas a empregar em cada tipo de apoio. [16]

As hipóteses de cálculo e as fórmulas associadas a alguns tipos de apoio para a determinação dos esforços neles exercidos são duas, a primeira em que o vento está na direção do eixo principal (Posição A-eixo dos yy), e a segunda em que o vento está na direção do eixo secundário (Posição B-eixo dos xx). Na realidade estas hipóteses são colocadas, pois pode-se rodar o poste para verificar, consoante o caso, se o apoio suporta os mesmos esforços com mais eficácia.



**Figura 16** - Hipóteses de cálculo consoante a direção do vento [13]

Para validar se os apoios suportam as forças neles exercidas são utilizadas duas condições, e as equações que permitem efetuar o cálculo para as duas hipóteses são as seguintes:

$$\text{Posição A (vento no eixo principal)} \rightarrow \frac{F_{pvp}}{y} + \frac{F_{svp}}{x} < 1$$

$$\text{Posição B (vento no eixo secundário)} \rightarrow \frac{F_{pvs}}{y} + \frac{F_{svs}}{x} < 1$$

onde:

$F_{pvp}$  – Força no eixo princ. do apoio quando o vento está na direção do eixo princ.;

$F_{pvs}$  – Força no eixo princip. do apoio quando o vento está na direção do eixo sec.;

$F_{svp}$  – Força no eixo sec. do apoio quando o vento está na direção do eixo princ.;

$F_{svs}$  – Força no eixo sec. do apoio quando o vento está na direção do eixo sec.;

Do anexo C ao anexo F, encontram-se os esforços aplicados sobre os apoios consoante a função para a qual são definidos. [19]

#### 4.9. DISTÂNCIAS REGULAMENTARES

Como é de conhecimento geral, é muito importante os cabos das linhas aéreas não entrarem em contacto com nenhum obstáculo. E para isso existem distâncias mínimas impostas pelo RSLEAT, que têm de ser cumpridas em relação a certos obstáculos ( solo, árvores, edifícios, estradas, etc), que são avaliadas para o estado em que a flecha atinge o valor mais alto, ou seja quando o condutor atinge a temperatura máxima (varia consoante a temperatura média da zona onde está instalada a linha). Em condições normais a flecha máxima é quando os condutores atingem a temperatura de 50°C.

Existem várias distâncias mínimas impostas no RSLEAT a serem cumpridas, e como exemplo serão apresentados vários cálculos para as mesmas para uma tensão de 30kV.

Essas distâncias são as seguintes:

- **Distância entre condutores**

O artigo 31º do regulamento estabelece as condições de cálculo da distância entre condutores. Esta distância é muito importante garantir, pois devido às oscilações provocadas pelo vento, a probabilidade de um contacto entre os condutores é muito grande. Os condutores nus deverão ter uma distância  $D$  entre si, inferior à dada pela expressão:

$$D = 0,75 \cdot k \cdot \sqrt{f + d} + \frac{U}{200} \quad [m] \quad (4.6)$$

onde:

$f$  – flecha máxima dos condutores [m]

$d$  – comprimento das cadeias de isoladores susceptíveis de oscilarem

*transversalmente em relação à linha [m]*

*Nota: toma valores de zero para cadeias em amarração.*

*U – tensão nominal da linha [kV]*

*k – coeficiente que depende da natureza dos condutores cujo valor é:*

*– 0,6 para condutores de cobre, bronze, aço e alumínio – aço*

*– 0,7 para condutores de alumínio e de ligas de alumínio*

- **Distância do desvio transversal devido à ação do vento**

A ação do vento transversal à linha faz com que as cadeias de isoladores em suspensão se desviem, o que pode levar os condutores a aproximarem-se demasiado dos apoios.

O R.S.L.E.A.T no seu artigo 33º impõe que a distância mínima D entre os condutores nus e os apoios não deve ser inferior à dada pela seguinte expressão:

$$D = 0,0065 \cdot U \quad [m] \quad (4.7)$$

onde:

*U – tensão nominal da linha [kV]*

$$\rightarrow D = 0,0065 \cdot 30 = 0,195 \text{ metros para tensão de } 30kV$$

- **Distância dos condutores ao solo**

O artigo 27º do RSLEAT define que na condição da flecha máxima, desviados ou não pelo vento, a distância D não deverá ser inferior à dada pela expressão:

$$D = 6,0 + 0,005 \cdot U \quad [m] \quad (4.8)$$

onde:

*U – tensão nominal da linha [kV]*

$$\rightarrow D = 6,0 + 0,005 \cdot 30 = 6,15 \text{ metros para tensão de } 30kV$$

- **Distância dos condutores às árvores**

O artigo 28º do RSLEAT refere que, na condição da flecha máxima, desviados ou não pelo vento, a distância D dos condutores nus e as árvores não deverá ser inferior à obtida através da expressão seguinte:

$$D = 2,0 + 0,0075 \cdot U \quad [m] \quad (4.9)$$

Onde:

*U* – tensão nominal da linha [kV]

O valor de D não deverá ser inferior a 2,5 metros.

$$\rightarrow D = 2,0 + 0,0075 \cdot 30 = 2,225 \text{ metros para tensão de } 30kV$$

- **Distância dos condutores a edifícios**

Segundo o artigo 29º do RSLEAT, na proximidade de edifícios, com exceção dos exclusivamente adstritos ao serviço de exploração de instalações elétricas, as linhas serão estabelecidas por forma a observar-se, nas condições de flecha máxima, o seguinte:

- a) Em relação às coberturas, chaminés e todas as partes salientes susceptíveis de ser normalmente escaladas por pessoas, os condutores nus deverão ficar, desviados ou não pelo vento, a uma distância D, em metros, arredondada ao centímetro, não inferior à dada pela expressão:

$$D = 3,0 + 0,0075 \cdot U \quad [m] \quad (4.10)$$

O valor de D não deverá ser inferior a 4 metros.

$$\rightarrow D = 3,0 + 0,0075 \cdot 30 = 3,225 \text{ metros para tensão de } 30kV$$

Como a distância calculada é inferior à distância mínima imposta pelo regulamento, deverá ser imposta a medida de 4 metros.

## 5. CASO DE ESTUDO

### 5.1. OBJETIVO

Pretende-se aumentar a capacidade de transporte de uma linha que passa por Sanguedo-Espinho, linha esta de 8500 metros composta por 43 apoios, que estão caracterizados em anexo.

Depois de um estudo efetuado na direção do planeamento de redes da EDP Distribuição, verificou-se que existia a necessidade de duplicar a capacidade de fornecimento de energia elétrica não sobrecarregando a atual instalada.

Com base nos cenários de previsões de carga de curto/médio prazo esta linha teria de funcionar à plena carga, transportando 9 MVA e o objetivo seria passar a transportar a mesma quantidade de energia, mas funcionando a 50% de carga.

A linha a projetar neste estudo tem um nível de tensão de 15 kV e um comprimento de 8500 metros.

A linha atual é uma linha simples, com condutores alumínio-aço (ACSR) de 160 mm<sup>2</sup> em amarração.

A remodelação e o aumento da capacidade de transporte, pressupõe alteração de linha simples (um terno) para linha dupla (dois ternos) na sua totalidade.

Para o estudo em causa, existem duas soluções. A solução inicial, era a implementação de uma nova linha em paralelo com a existente em alumínio-aço ACSR 160mm<sup>2</sup>, mas desse

modo é certo que iriam surgir inconvenientes relacionados com as alterações nas infraestruturas de apoio às linhas, pois os esforços nelas exercidos iriam ser maiores e também devido a ser uma zona densamente povoada, que em caso de mudança de estruturas, iria provocar muitos inconvenientes relacionados com os acessos para efetuar essa mudança.

Foi neste sentido que surgiu a necessidade de realizar um estudo da viabilidade técnico-económica da substituição dos condutores de AA (ACSR) por outros de alta temperatura ACCC, ambos com 16 mm de diâmetro, podendo transportar mais energia devido às suas características intrínsecas, mantendo as infraestruturas, e também no sentido de reduzir as flechas por eles efetuadas derivado a ser um cabo com menor peso unitário.

Será nesta linha de pensamento que serão realizados os cálculos elétricos e mecânicos para ambas as soluções comparando-as entre si, tendo em conta as suas vantagens e desvantagens, bem como elaborado um estudo económico acerca da viabilidade da inclusão do cabo de alta temperatura, pois ainda é um cabo extremamente caro por ser pouco utilizado e ser uma inovação.

Para efeitos de cálculo, como os condutores nus na linha em estudo têm diâmetro superior a 15,8 mm, o coeficiente de forma será 1. Já o valor do coeficiente de redução a considerar será de 0,6.

A tração máxima a considerar será de  $7 \text{ daN/mm}^2$  para ambos os cabos, de modo a obter uma melhor comparação de resultados finais.

Uma das premissas utilizadas foi que por aproximação 1 quilograma é igual a 1 daN

## **5.2. CARATERÍSTICAS DA LINHA**

O troço da linha em estudo tem um comprimento total de 8500 m, é uma linha simples trifásica com um fator de potência de 0,9, constituída por 3 cabos de AA (ACSR) com secção de  $160\text{mm}^2$  presos por amarração. O troço da linha é constituído por 25 apoios de betão e 18 metálicos. Considera-se que a linha situa-se numa zona sem formação de gelo em que as temperaturas serão de  $15^\circ\text{C}$  no caso da Primavera e  $-5^\circ\text{C}$  no Inverno.

As características elétricas dos cabos ACSR  $160 \text{ mm}^2$  e do ACCC  $182 \text{ mm}^2$  encontram-se

nos anexos A e B.

### 5.3. CÁLCULO ELÉTRICO

#### a) Terno duplo com cabo alumínio-aço ACSR 160 mm<sup>2</sup>

Na figura 17 encontra-se representado a geometria simétrica em que os condutores nesta solução vão estar apoiados (esteira vertical dupla).

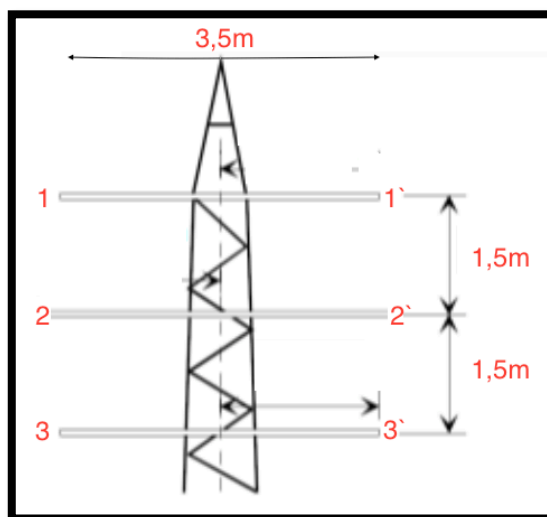


Figura 17 - Montagem dos cabos em esteira vertical dupla (adaptada [13])

Os dados seguintes foram retirados da tabela das características elétricas do cabo de alumínio com alma de aço com referência “*Partridge 160*” presente no anexo A.

#### Dados cabo ACSR:

Secção real: 157,9 mm<sup>2</sup>

Diâmetro: 16,32 mm

Peso unitário: 0,548 daN/m

Tensão de ruptura: 4775 daN

Coefficiente de dilatação: 0,000019 /°C

Temp. Ambiente: 293,15 °K ou 20°C

Resistência à temp. ambiente: 0,0002124  $\Omega$ /m

Temp. funcionamento: 323,15°K ou 50°C

O valor para a corrente a transportar na linha foi calculado através do modelo de kuipers Brown explicado anteriormente no terceiro capítulo, ponto cinco, alínea a), em que variando a temperatura de funcionamento do cabo era possível determinar a corrente a transportar para dada temperatura ou vice-versa. O valor obtido para a corrente foi de 356,64 A. Considera-se este valor para regime permanente.

I (linha): 356,64 A

I (total): 713,27 A

De acordo com a disposição simétrica das fases para esta 1ª solução representadas na Figura 12 pode-se obter os valores seguintes:

**Tabela 6** – Valores calculados para terno duplo ACSR

Disposição Simétrica	
L (H/m)	0,001168853
rb (m)	0,00815
DM (m)	1,8898
DM1 (m)	3,5
DM2 (m)	4,0583
d12' (m)	3,8078
d13' (m)	4,6097
d23' (m)	3,8078

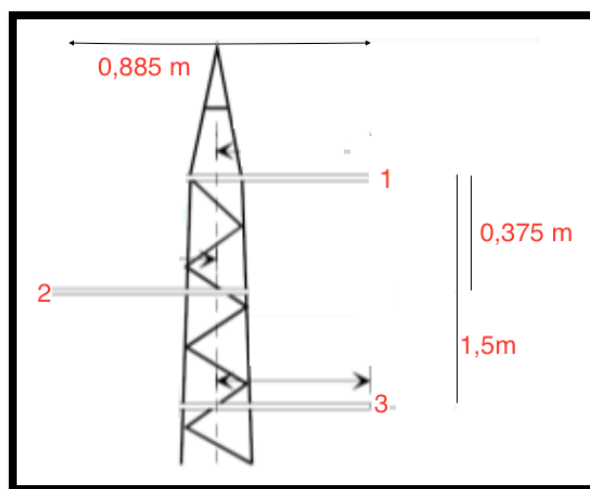
Para finalizar o cálculo elétrico nesta 1ª solução, utilizando as equações 3.30 pode-se determinar a queda de tensão e as equações 3.26 e 3.28 as perdas na linha como se pode ver na tabela seguinte:

**Tabela 7** - Continuação dos valores calculados para terno duplo ACSR

	Z=R + jX
R ( $\Omega$ )	2,0236
X ( $\Omega$ )	3,1213
U1 (kV)	15
$\Delta U$ (kV)	3,93
U2(kV)	11,07
Perdas por efeito de Joule (kW)	1029,55
Perdas por efeito de Joule (%)	5,56%
I total (2 ternos) A	713,27

**b) Terno simples com cabo de alta temperatura (HTLS) ACCC 182 mm<sup>2</sup>**

Na **Figura 18** encontra-se representado a geometria simétrica em que os condutores nesta solução vão estar apoiados (Galhardete).



**Figura 18** - Montagem dos cabos em galhardete (adaptada [13])

Os dados seguintes foram fornecidos pela tabela das características elétricas do cabo ACCC, de alta temperatura, com alma de carbono com referência em anexo B. Os valores das grandezas calculadas foram utilizados valores para regime de carga permanente.

**Dados cabo ACCC:**

Secção real: 182,1 mm<sup>2</sup>

Diâmetro: 15,65 mm

Peso unitário: 0,478 daN/m

Tensão de ruptura: 6890 daN

Coefficiente de dilatação: 0,00000172 /°C

Temp. Ambiente: 298,15 °K ou 25°C

Resistência à temp. ambiente: 0,0001829 Ω/m

Temp. funcionamento: 423,15°K ou 150°C

Analogamente, como no caso anterior, através do modelo de kuipers-brown, fixa-se o valor da corrente a transportar que pretendíamos, que neste caso seria a mesma que se transportaria com dois ternos de cabo ACSR (I=713,2A), de modo a facilitar o estudo

comparativo de ambos os casos. A temperatura de funcionamento do cabo ACCC seria de aproximadamente 130°C.

$$I (T=130^{\circ}\text{C})= 713,27 \text{ A}$$

De acordo com a disposição simétrica das fases (galhardete) para esta 2ª solução representadas na Figura 18 pode-se obter os valores seguintes:

**Tabela 8** - Valores calculados para linha simples com cabo ACCC

Disposição Simétrica	
L (H/km)	0,00113425
rb (m)	0,007825
DM (m)	1,7697
d12 (m)	1,9223
d13 (m)	1,5
d23 (m)	1,9223

Para finalizar o cálculo elétrico nesta 2ª solução, analogamente como se procedeu para o terno duplo, utilizando as mesmas equações pode-se determinar a queda de tensão e as perdas na linha como se pode ver na tabela seguinte:

**Tabela 9** - Continuação dos valores calculados para linha simples com cabo ACCC

	Z=R + jX
R (Ω)	2,2024

X ( $\Omega$ )	3,0288
U1 (kV)	15
$\Delta U$ (kV)	4,08
U2(kV)	10,92
Perdas por efeito de Joule (kW)	1120,27
Perdas por efeito de Joule (%)	6,05%
I total (A)	713,2

### 5.3.1. Comparações de resultados do Cálculo Elétrico

**Tabela 10** – Comparação de resultados do cálculo elétrico para ambas as soluções

	<b>ACSR</b>	<b>ACCC</b>
I em regime permanente (A)	713,27	713,27
R ( $\Omega$ )	2,0236	2,2024
X ( $\Omega$ )	3,1212	3,0288
U1 (kV)	15	15
$\Delta U$ (kV)	3,93	4,08
U2(kV)	11,07	10,92
Perdas por efeito de Joule (kW)	1029,55	1120,27
Perdas por efeito de Joule (%)	5,56%	6,05%

S (MVA)	18,53	18,53
---------	-------	-------

Analisando os valores da **Tabela 10**, a que se referem a valores de parâmetros elétricos para cada uma das soluções em estudo, pode-se verificar que para a linha dupla com cabo ACSR 160mm<sup>2</sup>, os valores da queda de tensão e das perdas em relação à linha são ligeiramente inferiores em relação à linha simples utilizado com cabo ACCC 182 mm<sup>2</sup>.

Pode-se concluir que a nível de grandezas elétricas não se verifica grandes alterações utilizando o cabo ACCC de alta temperatura, razão pela qual pode ser validada a 2ª solução para o problema em causa, pois desta forma não será preciso fazer alterações a nível dos apoios de linhas. Contudo, de seguida confirmar-se-á com os cálculos mecânicos se esta hipótese se mantém.

#### 5.4. CÁLCULO MECÂNICO

Para efeitos de cálculo, como já foi referido no início do presente capítulo, a tração máxima a considerar será de 7 daN/mm<sup>2</sup> na linha principal para ambos os cabos, e nas derivadas manter-se-á a tração as correspondentes a cada situação, de modo a obter uma melhor comparação de resultados finais.

Esta linha é composta por 43 postes, 26 dos quais em betão e os restantes metálicos. De realçar que os metálicos tem base quadrada e é independente as hipóteses de cálculo, pois ambos os lados suportam os mesmos esforços, enquanto que os de betão como já foi referido anteriormente no 4º capítulo, ponto 5, têm um lado que suporta mais esforços do que outro.

As características dos apoios e dos vãos encontram-se nos anexos G e H respetivamente.

##### 5.4.1. Tração máxima (Tseg)

Usando a equação 4.10 obtém-se a tração máxima que os cabos em estudo podem suportar.

$$T_{seg}(ACSR) = \frac{4775/157,9}{2,5} = 12,09 \text{ daN/mm}^2$$

$$T_{seg}(ACCC) = \frac{6890/182,1}{2,5} = 15,13 \text{ daN/mm}^2$$

Como se pode confirmar pelos valores acima obtidos, o valor adoptado de 7 daN/mm<sup>2</sup> para a tração máxima, não levanta problemas ao nível de segurança.

#### 5.4.2. Força do vento (Fv) e coeficientes de sobrecarga (m)

Usando a equação 4.1, a força do vento que afeta ambos os cabos pode ser calculada nos estados de Primavera e Inverno.

O valor da pressão dinâmica do vento utilizada para o estado de Primavera e o estado de Inverno, será respetivamente, 750 e 300 Pa.

O valor do coeficiente de forma será 1, pois os condutores em estudo são condutores nus com diâmetro superior a 15,8 mm e o valor do coeficiente de redução usado para condutores e cabos de guarda será 0,6.

Para os mesmo estados usando a equação 4.7 pode-se calcular os coeficientes de sobrecarga. Não existindo a ação do gelo, este cálculo torna-se mais simples, e as temperaturas de Primavera e Inverno serão respetivamente 15 e -5°C.

Deste modo obtiveram-se os seguintes valores:

**Tabela 11** – Valores dos coeficientes de sobrecarga para os cabos ACSR e ACCC

	Inverno		Primavera	
	Fvento	m	Fvento	m
ACSR	0,294	1,135	0,734	1,672
ACCC	0,282	1,161	0,704	1,781

Os valores obtidos para os diferentes cabos são relativamente idênticos em ambos os estados de Primavera e Inverno.

Pode-se afirmar que os valores são ligeiramente superiores no caso do cabo ACCC devido à sua secção ser superior à do cabo ACSR, neste sentido a área que sofre uma maior influência devido à força exercida pelo vento será no cabo ACCC.

### **5.4.3. Vão Crítico**

Para calcular o vão crítico será necessário usar a equação 4.9 demonstrada anteriormente.

$$L_{cr} \text{ (ACSR)} = 156,4 \text{ m}$$

$$L_{cr} \text{ (ACCC)} = 205,1\text{m}$$

### **5.4.4. Estado atmosférico mais desfavorável**

Através do diagrama da **Figura 11** e tendo em conta os valores obtidos para os coeficientes de sobrecarga e para o vão crítico, será possível determinar o estado mais desfavorável.

O coeficiente de sobrecarga de Primavera em ambos os cabos é superior, à partida elimina-se logo metade da árvore através desta condição.

Em seguida verifica-se a condição se o vão em estudo, que neste caso coincide com o vão equivalente, será maior que o vão crítico. Nos casos em que o vão é maior que o vão crítico será considerado o estado de Primavera mais desfavorável, caso contrário será o estado de Inverno.

Analisando o anexo H, em que constam os vãos em estudo, para o cabo ACSR apenas cinco vãos têm distância inferior ao vão crítico, sendo eles designados por : 16; 17; 20; 22; 28.

Para o cabo ACCC já são vinte e um, os casos em que os vãos têm distância inferior ao vão crítico, que são: 1; 2; 4; 6; 11; 16; 17; 18; 20; 21; 22; 26; 28; 29; 33; 34; 36; 37; 38; 39 e 40.

#### 5.4.5. Trações máximas e flechas máximas para o estado de Verão

A partir da equação de estados mencionada na equação 4.11 foi efetuado o cálculo da tração mecânica para cada vão, no estado de flecha máxima, que corresponde ao estado atmosférico de Verão, com uma temperatura de 75°C e coeficiente de sobrecarga unitário.

Em seguida efetuou-se o cálculo das flechas máximas a que cada cabo estava sujeito para comparar valores.

Obtiveram-se os valores em anexo na tabela 9.

Como forma de exemplo será calculada a tração e a flecha para cada cabo para o primeiro vão. Como o primeiro vão tem um comprimento de 170,61 metros será utilizado o estado de Primavera como referência no caso do cabo ACSR, pois tem um comprimento maior do que o vão crítico que é de 156,4 metros. Já no caso do cabo ACCC será utilizado os parâmetros do estado de Inverno, pois o vão crítico no caso deste cabo é 205,1 metros. Para temperatura de funcionamento do cabo ACCC foi arredondado para os 130°C, enquanto que no cabo ACSR usou-se 50°C.

#### ACSR

$$\begin{aligned}
 \text{Tração} \rightarrow \theta_i + \frac{t_{\theta i}}{\alpha_d \cdot E} - \frac{m_i^2 \cdot \omega^2 \cdot L_{med}^2}{24 \cdot \alpha_d \cdot \sigma^2 \cdot t_{\theta i}^2} &= \theta_k + \frac{t_{\theta k}}{\alpha_d \cdot E} - \frac{m_k^2 \cdot \omega^2 \cdot L_{med}^2}{24 \cdot \alpha_d \cdot \sigma^2 \cdot t_{\theta k}^2} \Leftrightarrow \\
 \Leftrightarrow 15 + \frac{7}{1,89 \cdot 10^{-5} \cdot 7300} - \frac{1,672^2 \cdot 0,548^2 \cdot 170,61^2}{24 \cdot 1,89 \cdot 10^{-5} \cdot 157,9^2 \cdot 7^2} &= \\
 50 + \frac{t_{\theta k}}{1,89 \cdot 10^{-5} \cdot 7300} - \frac{1^2 \cdot 0,548^2 \cdot 170,61^2}{24 \cdot 1,89 \cdot 10^{-5} \cdot 157,9^2 \cdot t_{\theta k}^2} &\Leftrightarrow \\
 t_{\theta k} = 3,734 \text{ daN/mm}^2 &
 \end{aligned}$$

$$flecha \rightarrow \frac{L^2 \cdot \omega}{8 \cdot t_{max}} = \frac{170,61^2 \cdot 0,548}{8 \cdot 3,734 \cdot 157,9} = 3,38 \text{ m}$$

### ACCC

$$\begin{aligned} \text{Tração} \rightarrow (-5) + \frac{7}{1,72 \cdot 10^{-5} \cdot 6310} - \frac{1,161^2 \cdot 0,478^2 \cdot 170,61^2}{24 \cdot 1,72 \cdot 10^{-5} \cdot 182,4^2 \cdot 7^2} = \\ 130 + \frac{t_{\theta k}}{1,72 \cdot 10^{-5} \cdot 6310} - \frac{1^2 \cdot 0,478^2 \cdot 170,61^2}{24 \cdot 1,72 \cdot 10^{-5} \cdot 182,4^2 \cdot t_{\theta k}^2} \Leftrightarrow \\ t_{\theta k} = 2,290 \text{ daN/mm}^2 \end{aligned}$$

$$flecha \rightarrow \frac{L^2 \cdot \omega}{8 \cdot t_{max}} = \frac{170,61^2 \cdot 0,478}{8 \cdot 2,290 \cdot 182,4} = 4,17 \text{ m}$$

**Tabela 12** - Tabela das trações máximas, flechas e distância entre condutores (caso de estudo).

Vão (L em m)		ACSR 160			ACCC 182			Diferença entre flechas
		Tração (daN/mm <sup>2</sup> )	flecha (m)	dist. entre condutores	Tração (daN/mm <sup>2</sup> )	flecha (m)	dist. entre condutores	
1	170,61	3,734	3,38	0,94	2,290	4,17	0,87	0,79
2	173,56	3,745	3,49	0,95	2,322	4,26	0,87	0,77
3	228,95	3,892	5,84	0,96	2,813	6,11	0,96	0,27
4	232,52	3,899	6,02	0,96	2,837	6,25	0,96	0,24
5	175,52	3,751	3,56	0,95	2,343	4,31	0,88	0,75
6	199,88	3,825	4,53	0,96	2,593	5,06	0,92	0,52

7	205,32	3,839	4,76	0,96	2,646	5,23	0,93	0,46
8	239,85	3,913	6,38	0,97	2,884	6,54	0,97	0,17
9	218,86	3,871	5,37	0,96	2,744	5,73	0,94	0,36
10	210,51	3,852	4,99	0,96	2,684	5,42	0,94	0,43
11	197,22	3,818	4,42	0,95	2,566	4,97	0,92	0,55
12	255,93	3,940	7,21	0,97	2,982	7,21	0,98	-0,01
13	307,99	4,005	10,27	0,98	3,252	9,57	1,02	-0,70
14	288,68	3,984	9,07	0,97	3,160	8,65	1,01	-0,42
15	209,3	3,849	4,94	0,96	2,675	5,37	0,93	0,43
16	108,21	2,728	1,86	0,82	1,565	2,46	0,73	0,59
17	143,27	3,075	2,90	0,86	1,987	3,39	0,81	0,49
18	196,38	3,815	4,39	0,95	2,558	4,95	0,91	0,56
19	219,86	3,873	5,41	0,96	2,751	5,77	0,95	0,35
20	125,43	2,913	2,34	0,84	1,777	2,91	0,77	0,56
21	176,95	3,756	3,62	0,95	2,358	4,36	0,88	0,74
22	141,25	3,058	2,83	0,86	1,963	3,33	0,81	0,50
23	272,52	3,964	8,13	0,97	3,076	7,92	1,00	-0,21
24	282,64	3,977	8,71	0,97	3,129	8,38	1,00	-0,34
25	283	3,977	8,74	0,97	3,131	8,39	1,00	-0,34
26	172,98	3,743	3,47	0,95	2,316	4,24	0,87	0,77
27	247,64	3,926	6,78	0,97	2,933	6,86	0,97	0,09
28	83,2	2,393	1,25	0,77	1,240	1,83	0,66	0,58

29	155,34	3,169	3,30	0,88	2,123	3,73	0,84	0,43
30	312,41	4,010	10,56	0,98	3,272	9,79	1,02	-0,77
31	301,24	3,998	9,85	0,97	3,221	9,24	1,02	-0,60
32	273,4	3,965	8,18	0,97	3,080	7,96	1,00	-0,22
33	128,85	2,947	2,44	0,85	1,818	3,00	0,78	0,55
34	110,33	2,753	1,92	0,82	1,591	2,51	0,74	0,59
35	249,82	3,930	6,89	0,97	2,946	6,95	0,98	0,06
36	129,87	2,956	2,48	0,85	1,830	3,02	0,79	0,55
37	152,09	3,145	3,19	0,87	2,087	3,64	0,83	0,45
38	190,97	3,800	4,16	0,95	2,503	4,78	0,91	0,62
39	126,94	2,928	2,39	0,85	1,795	2,95	0,78	0,56
40	112,36	2,776	1,97	0,82	1,617	2,56	0,74	0,59
41	207,28	3,844	4,85	0,96	2,660	5,30	0,93	0,45
42	269,45	3,960	7,95	0,97	3,059	7,79	0,99	-0,17

Ao comparar valores das trações, podemos concluir pela tabela 12 que para o cabo ACCC obtém-se menores trações para os vãos correspondentes, esta situação deve-se porque o cabo de alta temperatura transporta a mesma corrente com temperaturas de funcionamento do cabo inferiores ao do cabo ACSR, e como foi visto na equação de estados, a temperatura de funcionamento do cabo em questão ( $\theta_k$ ) está intimamente relacionada com a variação da tração.

Em relação às flechas associadas a cada vão em particular, podemos confirmar que os valores das flechas não variam de modo acentuado, tomam quase valores iguais. De realçar, que para vãos maiores, é que se obtém flechas menores no cabo ACCC (células

pintadas a verde), daqui pode-se inferir que para vão acentuados pode-se tirar partido deste tipo de cabo de alta temperatura.

Assim sendo, neste sentido, para já está validada a hipótese da inclusão do cabo ACCC180, até porque para o estado de Verão, em que as flechas são máximas, as trações exercidas nos cabos de alta temperatura, são inferiores às exercidas para as mesmas condições no cabo de alumino-aço, neste cenário poderia se aumentar a tração exercida pelo cabo ACCC para  $8 \text{ daN/mm}^2$ , o que provocaria flechas menores e com trações aproximadamente iguais às do cabo ACSR. Neste momento o mais importante será validar as forças transversais e longitudinais exercidas nos apoios de modo a corroborar a hipótese da utilização do cabo de alta temperatura neste cenário de estudo, não esquecendo verificar a distância entre condutores.

#### 5.4.6. Distância entre condutores

Ao utilizar a equação 4.6 pode-se verificar se a distância mínima regulamentar entre os condutores é respeitada. A EDP-Distribuição, por regra geral, estipula a distância mínima de 0,45 metros. Pode-se confirmar os valores na mesma tabela das trações e das flechas no anexo I, e confirmar a validação para ambos os cabos, pois as distâncias entre condutores está compreendida entre o intervalo de 0,45 e 1,5 metros. Como neste cenário os condutores estão fixos por amarração em toda a linha, o valor do comprimento das cadeias de isoladores (d) considera-se nulo. Para o cabo de alumino-aço o valor do coeficiente k a utilizar será 0,6 e para o cabo de alta temperatura será 0,7.

#### 5.4.7. Esforços Mecânicos

**Tabela 13-** Esforços exercidos nos apoios pelo cabo ACSR (caso de estudo).

Verificação da Estabilidade dos Apoios para cabo ACSR						
Apoio	Esforços Horizontais				Esforço vertical	Validação Postes
Nº	Hipotese 1		Hipotese 2			
	Transv.	Long.	Transv.	Long.		

	Fy [daN]	Fx [daN]	Fy [daN]	Fx [daN]	Fz [daN]	Posição A	Posição B
1	368,7	6631,8	0,0	0,0	280,5	Não Válido	Não Válido
2	1170,1	0,0	0,0	148,6	565,8	Válido	Não Válido
7	1248,0	0,0	0,0	175,0	666,1	Válido	Não Válido
9	1508,6	0,0	0,0	198,0	754,1	Válido	
10	4511,0	0,0	0,0	171,5	705,9	Não Válido	Não Válido
16	1011,9	0,0	0,0	137,2	522,0	Válido	Não Válido
21	4009,0	0,0	0,0	122,1	497,1	Válido	Não Válido
22	2289,3	0,0	0,0	135,5	523,1	Válido	Não Válido
25	2229,0	0,0	0,0	243,1	929,9	Válido	Não Válido
28	3072,9	0,0	0,0	138,4	543,9	Válido	Não Válido
29	1109,2	0,0	0,0	102,9	392,2	Válido	Não Válido
34	756,4	0,0	0,0	103,4	393,2	Não Válido	Não Válido
4	997,4	0,0	0,0	199,5	758,7	Não Válido	Não Válido
17	543,5	0,0	0,0	108,7	413,4	Válido	Não Válido
31	1326,3	0,0	0,0	265,3	1008,8	Não Válido	
32	1242,0	0,0	0,0	248,4	944,7	Não Válido	
33	869,4	0,0	0,0	173,9	661,3	Válido	Não Válido
35	778,4	0,0	0,0	155,7	592,1	Válido	Válido
37	609,4	0,0	0,0	121,9	463,5	Não Válido	Não Válido
40	517,2	0,0	0,0	103,4	393,4	Válido	Não Válido
3	1301,4	800,8	390,7	810,4	679,9	Não Válido	
5	2201,4	218,9	1316,7	321,2	726,8	Não Válido	
6	1709,4	346,3	891,2	452,1	677,2	Válido	
8	1216,5	118,3	253,6	385,7	860,5	Válido	
11	3114,4	724,6	2222,6	776,4	692,8	Não Válido	Não Válido
12	2780,1	669,1	1779,1	821,1	807,6	Não Válido	Não Válido
13	2683,5	660,1	1437,5	696,3	970,5	Não Válido	Não Válido
14	4186,5	199,7	2909,4	356,8	1033,1	Não Válido	Não Válido
15	2884,9	505,1	1790,6	551,3	862,6	Não Válido	Não Válido
18	2690,5	1462,7	1872,4	1600,4	638,4	Não Válido	Não Válido
19	1613,4	1009,7	626,0	1043,5	728,2	Não Válido	Não Válido
20	1163,1	1020,7	375,8	1086,7	624,7	Não Válido	Não Válido
23	1858,6	2161,9	859,4	2300,8	818,3	Não Válido	
24	1324,2	88,4	133,4	267,3	1003,2	Válido	
26	3681,8	5860,5	2507,2	6443,0	1336,6	Não Válido	
27	1277,0	905,4	298,6	913,0	732,4	Não Válido	
30	3272,2	1837,7	2140,5	1914,2	840,1	Não Válido	
36	2315,0	1984,2	1307,0	2065,5	721,1	Não Válido	
38	812,5	388,3	57,4	858,4	738,5	Não Válido	Não Válido
39	1025,2	1510,6	253,1	1802,0	658,4	Não Válido	
41	5501,8	4356,3	4714,9	4486,5	646,1	Não Válido	
42	1989,4	597,5	805,8	649,4	857,7	Não Válido	
43	2271,6	5670,1	163,8	6385,5	2296,0	Não Válido	

**Tabela 14-** Esforços exercidos nos apoios pelo cabo ACCC (caso de estudo).

Verificação da Estabilidade dos Apoios para cabo ACCC							
Apoio	Esforços Horizontais				Esforço vertical	Validação Postes	
Nº	Hipótese 1		Hipótese 2		Fz [daN]	Posição A	Posição B
	Transv. Fy [daN]	Long. Fx [daN]	Transv. Fy [daN]	Long. Fx [daN]			
1	176,8	3824,1	0,0	0,0	122,3	Não Válido	Válido
2	602,5	0,0	0,0	71,3	246,8	Válido	Válido
7	634,6	0,0	0,0	83,9	290,5	Válido	Válido
9	773,7	0,0	0,0	94,9	328,9	Válido	
10	2517,9	0,0	0,0	82,2	307,9	Válido	Válido
16	516,8	0,0	0,0	65,8	227,7	Válido	Válido
21	2252,4	0,0	0,0	58,6	216,8	Válido	Não Válido
22	1254,2	0,0	0,0	65,0	228,1	Válido	Válido
25	1167,3	0,0	0,0	116,6	405,6	Válido	Não Válido
28	1704,7	0,0	0,0	66,4	237,2	Válido	Não Válido
29	589,6	0,0	0,0	49,3	171,0	Válido	Válido
34	385,9	0,0	0,0	49,6	171,5	Válido	Não Válido
4	478,2	0,0	0,0	95,6	330,9	Válido	
17	260,6	0,0	0,0	52,1	180,3	Válido	Válido
31	635,9	0,0	0,0	127,2	440,0	Válido	
32	595,5	0,0	0,0	119,1	412,0	Válido	
33	416,9	0,0	0,0	83,4	288,4	Válido	Válido
35	373,2	0,0	0,0	74,6	258,2	Válido	Válido
37	292,2	0,0	0,0	58,4	202,2	Válido	Não Válido
40	248,0	0,0	0,0	49,6	171,6	Válido	Não Válido
3	632,8	400,4	195,4	405,2	297,7	Válido	
5	1082,6	109,5	658,3	160,6	320,6	Válido	
6	807,6	173,2	415,1	226,1	299,2	Válido	
8	608,6	59,1	146,9	192,8	383,5	Válido	
11	1610,2	362,3	1182,3	388,1	303,6	Válido	Não Válido
12	1369,9	334,5	889,6	410,5	356,2	Válido	Não Válido
13	1375,6	330,0	777,6	348,1	426,0	Válido	Não Válido
14	2177,3	99,8	1564,9	178,1	453,9	Válido	Não Válido
15	1511,8	252,6	986,6	275,5	379,0	Válido	Não Válido
18	1330,2	731,4	936,2	800,2	283,5	Válido	Válido
19	788,2	504,9	313,0	521,7	320,4	Válido	Não Válido
20	614,0	510,4	235,6	543,3	276,1	Válido	Não Válido
23	930,7	1080,9	449,5	1150,4	365,7	Válido	
24	596,1	44,2	25,1	133,5	443,3	Válido	
26	1820,7	2930,2	1253,6	3221,5	620,4	Válido	
27	619,8	452,7	149,3	456,5	322,1	Válido	
30	1615,4	918,9	1070,3	957,1	370,9	Válido	
36	1140,7	992,1	653,5	1032,8	320,7	Válido	
38	391,1	194,2	28,7	429,2	333,2	Válido	Válido

39	498,5	755,3	126,6	901,0	295,8	Válido
41	3132,9	2178,2	2751,5	2241,1	289,5	Válido
42	973,5	298,8	402,9	324,7	378,8	Válido
43	1617,6	2677,0	564,9	3023,9	1119,7	Válido

Nas Tabelas 13 e 14 encontram-se as tabelas relativas aos cálculos efetuados que determinaram os esforços transversais, longitudinais e verticais aplicados aos apoios existentes nas linhas.

Para a primeira solução, que consistia em passar uma linha em paralelo com a existente com a mesma secção do cabo de alumínio-aço (ACSR), pode-se verificar que, na coluna de validação dos postes existentes na linha, mais de metade desses postes não foram validados, mais precisamente vinte e sete postes, o que deita por terra a hipótese dessa solução.

Em relação à segunda solução para o estudo do problema, que consistia na inclusão de um terno simples com cabo de alta temperatura (ACCC) foram validados todos os postes, ou seja, com a implementação desta solução, as infra-estruturas existentes de apoio às linhas aguentavam os esforços provocados pelo condutor e influência do vento.

Como exemplo, será demonstrado com cálculos, recorrendo às fórmulas nos anexos C, D, E e F, quatro tipos de função de apoios diferentes para os dois tipos de cabo em estudo, sendo desnecessário o cálculo do esforço vertical em apoios de betão. As hipóteses de cálculo estão explicadas no capítulo 4 ponto 8.

- **Apoio 1 - K10-75/34-26 - função fim de linha**

Este apoio é de betão, tem função de fim de linha, por ser o primeiro da linha está sujeito a uma força longitudinal somente de um lado, e a posição B é privilegiada, como se irá confirmar de seguida. Este vão que está compreendido entre o apoio 1 e 2, tem um comprimento de 170,6 metros e o condutor aplicado, como já foi referido, é de AA de secção  $160\text{mm}^2$ . Para efeitos de cálculo, no caso da implementação do terno duplo de cabo

ACSR relembrar que são considerados 6 cabos a exercer esforços, enquanto que no caso do terno simples com cabo ACCC são considerados somente 3.

De considerar também que para calcular as forças associadas ao esforço aplicado a este poste só é considerado meio vão, pois a outra metade já é suportada pelo apoio seguinte. Deste modo, por método de cálculo, utilizou-se na expressão da força do vento a divisão por 2, que é como se estivesse a fazer o cálculo somente para meio vão.

Outra condição que tem de se ter em conta para os postes de fim de linha é o momento do poste, isto é, confirmar que em caso de ruptura de algum cabo, o poste não irá rodar.

Esta condição é a seguinte [13]:  $\frac{F_x}{3} \cdot 0,9 < 2390$

#### a) CABO ACSR

$$L = 170,6 \text{ m}$$

$$F_v = \left( \frac{0,6 \cdot 1 \cdot 75 \cdot 0,01632}{2} \right) \cdot 0,981 = 0,360 \text{ daN/m}$$

$$T = 7 \cdot 157,9 = 1105,3 \text{ daN}$$

Cálculos:

$$H1 \rightarrow \begin{cases} F_x = 6 \cdot T = 6631,8 \text{ daN} \\ F_y = 6 \cdot F_v \cdot L = 368,7 \text{ daN} \end{cases}$$

H2 → não aplicável

Este apoio tem as seguintes equações das linhas vetoriais: [19]

$$\text{Posição A (vento no eixo princ. poste)} \rightarrow \frac{F_{ppv}}{7500} + \frac{F_{svp}}{3400} \leq 1$$

$$\text{Posição B (vento no eixo sec. do poste)} \rightarrow \frac{F_{pvs}}{6589} + \frac{F_{svs}}{2987} \leq 1$$

Sendo assim, para validar se o poste aguentava os esforços nele exercidos confirmaram-se os seguintes cálculos:

$$\text{Posição A} \rightarrow \left( \frac{368,7}{7500} + \frac{6631,8}{3400} \wedge \frac{F_x}{3} \cdot 0,9 < 2390 \right) > 1 \Rightarrow \text{Não válido}$$

$$\text{Posição B} \rightarrow \left( \frac{6631,8}{6589} + \frac{368,7}{2987} \wedge \frac{F_x}{3} \cdot 0,9 < 2390 \right) > 1 \Rightarrow \text{Não válido}$$

## b) Cabo ACCC

$$F_v = \left( \frac{0,6 \cdot 1 \cdot 75 \cdot 0,01565}{2} \right) \cdot 0,981 = 0,345 \text{ daN/m}$$

$$T = 7 \cdot 182,1 = 1274,7 \text{ daN}$$

$$H1 \rightarrow \begin{cases} F_x = 6 \cdot T = 3824,1 \text{ daN} \\ F_y = 6 \cdot F_v \cdot L = 176,8 \text{ daN} \end{cases}$$

H2  $\rightarrow$  não aplicável

$$\text{Posição A} \rightarrow \left( \frac{176,8}{7500} + \frac{3824,1}{3400} \wedge \frac{F_x}{3} \cdot 0,9 < 2390 \right) > 1 \Rightarrow \text{Não válido}$$

$$\text{Posição B} \rightarrow \left( \frac{3824,1}{6589} + \frac{176,8}{2987} \wedge \frac{F_x}{3} \cdot 0,9 < 2390 \right) < 1 \Rightarrow \text{Válido}$$

$$\text{Condição do momento do poste} \rightarrow \frac{3824,1}{3} \cdot 0,9 = 1147,2 < 2390 \Rightarrow \text{Válido}$$

Posição B validada.

- **Apoio 34 - 20M600 - função de ângulo**

Estes apoios por regra geral costumam ser de betão derivado aos esforços que tem de suportar. No caso da linha em estudo existe somente um apoio metálico com esta função, mas, foi escolhido o apoio 34 para demonstração de resultados por ser de betão.

São considerados apoios de ângulo, aqueles cuja linha no seu alinhamento fazem um ângulo com a horizontal superior a 2 graus.

Neste caso, o ângulo é de 2,3 graus, e tem como distâncias de vão anterior e posterior respetivamente, 128,9 e 110,3 metros.

De realçar que como no vão anterior e no vão posterior os cabos são iguais, para a hipótese 1 o valor de  $F_x$  e para a hipótese 2 o valor de  $F_y$ , são nulos. Isto porque para efeitos de cálculo considera-se o eixo de referência em que é traçada a bissetriz do ângulo, e sendo cabos com as mesmas características, essas forças anulam-se.

De referir também que para validação dos postes, as duas equações vetoriais têm de ser confirmadas em simultâneo, para a posição A tem de se garantir primeiro a hipótese 1 e depois a hipótese 2. No caso da validação da posição B, como os eixos mudam, o método é inverso como será demonstrado a seguir.

**a) CABO ACSR**

$$L_1 = 128,9 \text{ m} ; L_2 = 110,3 \text{ m}$$

$$\beta_1 = 200 - \frac{2,3}{2} = 198,85 \text{ grad}; \beta_2 = \frac{2,3}{2} = 1,15 \text{ grad}$$

$$F_v = 0,360 \text{ daN/m}$$

$$T = 1105,3 \text{ daN}$$

Hipótese 1:

$$F_y = 6 \cdot F_v \cdot \cos(\beta_2)^2 \cdot (L_1 + L_2) = 756,4 \text{ daN}$$

$$F_x = 0 \text{ daN}$$

Hipótese 2:

$$F_x = 6 \cdot \frac{1}{5} \cdot F_v \cdot \cos(\beta_2)^2 \cdot (L_1 + L_2) = 103,4 \text{ daN}$$

$$F_y = 0 \text{ daN}$$

Verificação da condição:

Este apoio, para uma altura de 20 metros e a condição mais desfavorável é a de Primavera, logo o vento toma valor de 750 Pa, tem as seguintes equações das linhas vetoriais: [19]

$$\text{Hipótese 1 (vento no eixo princ. poste)} \rightarrow \frac{F_{pvp}}{600} + \frac{F_{svp}}{320} \leq 1$$

$$\text{Hipótese 2 (vento no eixo sec. do poste)} \rightarrow \frac{F_{pvs}}{212} + \frac{F_{svs}}{113} \leq 1$$

$$\text{Posição A} \rightarrow H1 \wedge H2 \leq 1 \Leftrightarrow \frac{756,4}{600} + \frac{0}{320} \wedge \frac{0}{212} + \frac{103,4}{113} > 1 \Rightarrow \text{Não válido}$$

$$\text{Posição B} \rightarrow H2 \wedge H1 \leq 1 \Leftrightarrow \frac{0}{212} + \frac{756,4}{113} \wedge \frac{103,4}{600} + \frac{0}{320} > 1 \Rightarrow \text{Não válido}$$

## b) CABO ACCC

$$L_1 = 128,9 \text{ m} ; L_2 = 110,3 \text{ m}$$

$$\beta_1 = 200 - \frac{2,3}{2} = 198,85 \text{ grad}; \beta_2 = \frac{2,3}{2} = 1,15 \text{ grad}$$

$$F_v = \left( \frac{0,6 \cdot 1 \cdot 75 \cdot 0,01565}{2} \right) \cdot 0,981 = 0,345 \text{ daN/m}$$

$$T = 7 \cdot 182,1 = 1274,7 \text{ daN}$$

Hipótese 1:

$$F_y = 3 \cdot F_v \cdot \cos(\beta_2)^2 \cdot (L_1 + L_2) = 385,9 \text{ daN}$$

$$F_x = 0 \text{ daN}$$

Hipótese 2:

$$F_x = 3 \cdot \frac{1}{5} \cdot F_v \cdot \cos(\beta_2)^2 \cdot (L_1 + L_2) = 51,7 \text{ daN}$$

$$F_y = 0 \text{ daN}$$

$$\text{Posição A} \rightarrow H1 \wedge H2 \leq 1 \Leftrightarrow \frac{385,9}{600} + \frac{0}{320} \wedge \frac{0}{212} + \frac{51,7}{113} < 1 \Rightarrow \text{Válido}$$

$$\text{Posição B} \rightarrow H2 \wedge H1 \leq 1 \Leftrightarrow \frac{0}{212} + \frac{385,9}{113} \wedge \frac{51,7}{600} + \frac{0}{320} > 1 \Rightarrow \text{Não válido}$$

- **Apoio 31- P1000/28 –função de alinhamento**

Os apoios de alinhamento, por regra geral, não suportam grandes esforços, pois o ângulo longitudinal da linha é sempre inferior a dois grados, o valor do ângulo é desprezado, facilitando os cálculos. Deste modo, para a hipótese 1 o valor de  $F_x$ , como para a hipótese 2 o valor de  $F_y$  são nulos.

Este apoio é metálico, tem base quadrada, e ao contrário dos postes de betão, a posição A e B suportam os mesmos esforços, logo os cálculos efetuados são somente para uma posição, pois são simétricos. O cabo no vão anterior e posterior é o ACSR 160mm<sup>2</sup>, e a medida dos vãos anterior e posterior são respetivamente 312,4 e 301,2 metros.

**a) CABO ACSR**

$$L_1 = 312,4 \text{ m} ; L_2 = 301,2 \text{ m}$$

$$\beta_1 = 200 \text{ grad}; \quad \beta_2 = 0 \text{ grad}$$

$$F_v = 0,360 \text{ daN/m}$$

$$T = 1105,3 \text{ daN}$$

$$W' = \frac{\text{Peso unitario}}{2} = \frac{0,548}{2} = 0,274 \text{ daN/m}$$

Cálculos:

Hipótese 1:

$$F_y = 6 \cdot F_v \cdot (L_1 + L_2) = 1326,3 \text{ daN}$$

$$F_x = 0 \text{ daN}$$

$$F_z = 6 \cdot W' \cdot (L_1 + L_2) = 1008,8 \text{ daN}$$

Hipótese 2:

$$F_x = \frac{1}{5} \cdot F_{y(H1)} = 265,3 \text{ daN}$$

$$F_y = 0 \text{ daN}$$

$$F_z = 1008,8 \text{ daN}$$

Verificação da condição:

Este apoio, para uma altura de 28 metros e vento de 750 Pa tem a seguintes equações das linhas vetoriais: [19]

$$\text{Hipótese 1 (vento no eixo princ. poste)} \rightarrow F_{ppv} + F_{svp} < 1000$$

$$\text{Hipótese 2 (vento no eixo sec. do poste)} \rightarrow F_{pvs} + F_{svs} < 1000$$

$$\text{Posição A e B} \rightarrow H1 \wedge H2 \leq 1000 \Leftrightarrow 1326,3 \wedge 265 > 1000 \Rightarrow \text{Não válido}$$

## **b) CABO ACCC**

$$F_v = 0,345 \text{ daN/m}$$

$$T = 1274,7 \text{ daN}$$

$$W' = \frac{\text{Peso unitario}}{2} = \frac{0,478}{2} = 0,239 \text{ daN/m}$$

$$T = 1274,7 \text{ daN}$$

Cálculos:

Hipótese 1:

$$F_y = 3 \cdot F_v \cdot (L_1 + L_2) = 635,9 \text{ daN}$$

$$F_x = 0 \text{ daN}$$

$$F_z = 3 \cdot W' \cdot (L_1 + L_2) = 440 \text{ daN}$$

Hipótese 2:

$$F_y = 0 \text{ daN}$$

$$F_x = \frac{1}{5} \cdot F_{y(H1)} = 127,2 \text{ daN}$$

$$F_z = 440 \text{ daN}$$

Verificação da condição:

$$\text{Posição A e B} \rightarrow H1 \wedge H2 < 1000 \Leftrightarrow 635,9 \wedge 127,2 < 1000 \Rightarrow \text{Válido}$$

- **Apoio 23- RS22-30,5 – função de derivação em ângulo**

Este tipo de apoio de derivação é considerado em ângulo. Considera-se derivação em ângulo, pois como já foi explicado anteriormente, a linha longitudinal posterior forma um ângulo superior a dois graus. Para efeitos de cálculo em alinhamento torna-se mais fácil, pois o valor dos ângulos fazem com que certas parcelas se anulem pois a nível de fórmulas para calcular são utilizadas as mesmas.

Este apoio suporta esforços da linha principal em cabo alumino-aço 160mm<sup>2</sup> e também esforços de duas linhas derivadas em cabo alumino-aço 50mm e outro em cobre 25 mm.

As distâncias dos vãos da linha principal anterior e posterior, são respetivamente, 141,3 e 272,5 metros. As distâncias das derivadas são de 119,8 e 102,5 metros para o cabo de cobre e alumino-aço respetivamente.

Em relação ao ângulo do vão posterior da linha principal será de 2,48 grados e o anterior será 200 grados. Para a derivada em alumino-aço o ângulo será negativo de valor -36,02 e o de cobre 94,71 grados.

#### **a) CABO ACSR**

$$L_1 = 141,3 \text{ m} ; L_2 = 272,5 \text{ m}; L_{d1} = 119,8 \text{ m}; L_{d2} = 102,5 \text{ m}$$

$$\beta_1 = 200 - \frac{2,48}{2} = 198,76 \text{ grad}; \quad \beta_2 = \frac{2,48}{2} = 1,24 \text{ grad}; \quad \beta_{d1} = 94,71 \text{ grad};$$

$$\beta_{d2} = 94,71 \text{ grad}$$

$$F_v = 0,360 \frac{\text{daN}}{\text{m}}; F_{vd1} = 0,135 \frac{\text{daN}}{\text{m}}; F_{vd2} = 0,238 \frac{\text{daN}}{\text{m}}$$

$$T = 1105,3 \text{ daN}; T_{d1} = 313,56 \text{ daN}; T_{d2} = 396 \text{ daN}$$

$$W' = \frac{daN}{m}; W'_{d1} = 0,1185 \frac{daN}{m}; W'_{d2} = 0,086 \frac{daN}{m}$$

Hipótese 1:

$$F_y = 6 \cdot (F_v \cdot \cos(\beta_2))^2 \cdot (L_1 + L_2) + F_{vd1} \cdot \cos(\beta_{d1})^2 \cdot (L_{d1}) + F_{vd2} \cdot \cos(\beta_{d2})^2 \cdot (L_{d2}) \\ + |2 \cdot T \cdot \sin \beta_2 + T_{d1} \cdot \sin \beta_{d1} + T_{d2} \cdot \sin \beta_{d2}| = 1858,6 \text{ daN}$$

$$F_x = 6 \cdot |T_{d1} \cdot \cos \beta_{d1} + T_{d2} \cdot \cos \beta_{d2}| = 2161,9 \text{ daN}$$

Hipótese 2:

$$F_y = 6 \cdot |2 \cdot T \cdot \sin \beta_2 + T_{d1} \cdot \sin \beta_{d1} + T_{d2} \cdot \sin \beta_{d2}| = 859,4 \text{ daN}$$

$$F_x = 6 \cdot (F_v \cdot \sin(\beta_2))^2 \cdot (L_1 + L_2) + F_{vd1} \cdot \sin(\beta_{d1})^2 \cdot (L_{d1}) + F_{vd2} \cdot \sin(\beta_{d2})^2 \cdot (L_{d2}) \\ + |2 \cdot T \cdot \cos \beta_2 + T_{d1} \cdot \cos \beta_{d1} + T_{d2} \cdot \cos \beta_{d2}| = 2300,8 \text{ daN}$$

Verificação da condição:

Este apoio, para uma altura de 28 metros e vento de 750 Pa tem a seguintes equações das linhas vetoriais: [19]

$$\text{Hipótese 1 (vento no eixo princ. poste)} \rightarrow F_{pvp} + F_{svp} < 2200$$

Hipótese 2 (vento no eixo sec. do poste)  $\rightarrow F_{pvs} + F_{svs} < 2200$

Posição A e B  $\rightarrow H1 \wedge H2 < 2200 \Leftrightarrow 4020,5 \wedge 3160,2 > 2200 \Rightarrow$  Não válido

## b) CABO ACCC

Os dados são os mesmos da alínea a), excepto os seguintes:

$$F_v = 0,345 \text{ daN/m}$$

$$T = 1274,7 \text{ daN}$$

Hipótese 1:

$$F_y = 3 \cdot (F_v \cdot \cos(\beta_2)^2 \cdot (L_1 + L_2) + F_{vd1} \cdot \cos(\beta_{d1})^2 \cdot (L_{d1}) + F_{vd2} \cdot \cos(\beta_{d2})^2 \cdot (L_{d2})) \\ + |2 \cdot T \cdot \sin \beta_2 + T_{d1} \cdot \sin \beta_{d1} + T_{d2} \cdot \sin \beta_{d2}| = 930,7 \text{ daN}$$

$$F_x = 3 \cdot |T_{d1} \cdot \cos \beta_{d1} + T_{d2} \cdot \cos \beta_{d2}| = 1080,9 \text{ daN}$$

$$F_z = 3 \cdot (W' \cdot (L_1 + L_2) + W'_{d1} \cdot L_{d1} + W'_{d2} \cdot L_{d2}) = 365,7 \text{ daN}$$

Hipótese 2:

$$F_y = 6 \cdot |2 \cdot T \cdot \sin \beta_2 + T_{d1} \cdot \sin \beta_{d1} + T_{d2} \cdot \sin \beta_{d2}| = 449,5 \text{ daN}$$

$$F_x = 6 \cdot (F_v \cdot \sin(\beta_2)^2 \cdot (L_1 + L_2) + F_{vd1} \cdot \sin(\beta_{d1})^2 \cdot (L_{d1}) + F_{vd2} \cdot \sin(\beta_{d2})^2 \cdot (L_{d2})) \\ + |2 \cdot T \cdot \cos \beta_2 + T_{d1} \cdot \cos \beta_{d1} + T_{d2} \cdot \cos \beta_{d2}| = 1150,4 \text{ daN}$$

$$F_z = 365,7 \text{ daN}$$

### Verificação da condição:

$$\text{Posição A e B} \rightarrow H1 \wedge H2 < 2200 \Leftrightarrow 2011,6 \wedge 1599,9 < 2200 \Rightarrow \text{Válido}$$

## **5.5. ASPETOS ECONÓMICOS**

Analisando este caso de estudo numa vertente mais financeira, pode-se ter em conta os custos médios associados a ambas as soluções.

De acordo com as estimativas utilizadas pela EDP Distribuição, o valor já com instalação incluída para o caso de linha dupla com o cabo convencional AA 160 mm<sup>2</sup> com diâmetro de 16mm é de 45€ por metro, enquanto que no caso de linha simples com cabo ACCC com diâmetro semelhante é de 40€ por metro. De realçar que o preço elevado de instalação do cabo de alta temperatura se deve sobretudo ao facto de o fabrico do cabo ser bastante mais caro e também devido ao facto de serem necessárias pinças especiais, que suportem as altas temperaturas que custam cerca de 4 vezes mais que as pinças convencionais.

Para o presente estudo da linha MT Espinho-Sanguedo verifica-se que, após a elaboração dos cálculos mecânicos dos apoios apresentados anteriormente, no caso da solução da linha dupla em AA 160 mm<sup>2</sup>, vinte e sete apoios teriam que ser substituídos por apoios mais fortes. Para o caso da linha simples com cabo ACCC não iriam ser preciso alterar os postes.

Como se pode verificar pelos cálculos seguintes, a custos médios, o custo associado à implementação da solução da linha simples em cabo ACCC será menos dispendiosa.

### Solução 1 (linha dupla em ACSR):

$$\text{Postes} \rightarrow 2500 \cdot 27 = 67500 \text{ €}$$

$$\text{Instalação efetiva do cabo (3*2*160mm}^2) \rightarrow 8500 \cdot 45 = 382500\text{€}$$

$$\text{Pinças} \rightarrow 252 \cdot 100 = 25200\text{€}$$

$$\text{Total} \rightarrow 475 \text{ mil €}$$

### Solução 2 (linha simples em ACCC):

Postes → 0 €

Cabo ( $3 \cdot 180 \text{mm}^2$ ) →  $8500 \cdot 40 = 340000 \text{€}$

Pinças →  $129 \cdot 450 = 58050 \text{€}$

Total → 398 mil €

Para além da a solução da utilização do cabo de alta temperatura ACCC ser mais atrativa em custos médios, convém sublinhar que associado à substituição de cada apoio existem custos variáveis associados às indemnizações aos proprietários e outros constrangimentos que frequentemente aparecem no acto da obra. Assim conclui-se que para duplicação da capacidade da linha aérea MT Espinho-Sanguedo a solução tecnicamente e economicamente mais vantajosa é a substituição do condutor para o cabo de alta temperatura tipo ACCC  $182 \text{mm}^2$ .

## **5.6. CONCLUSÃO DO CAPÍTULO**

Em relação ao cálculo elétrico não existem alterações significativas comparando as duas soluções para o problema imposto. De realçar que para a solução, da instalação de um terno simples com cabo ACCC, a queda de tensão e as perdas na linha são ligeiramente superiores à solução da instalação de terno duplo com cabo ACSR.

Em relação ao cálculo mecânico, ao analisarmos as tabelas onde se encontram os esforços nos apoios e as validações dos mesmos perante os respetivos esforços, pode-se concluir que para a solução com cabo ACCC foram validadas todas as infraestruturas existentes, enquanto que para a instalação com cabo ACSR vinte e sete dos apoios não foram validados. Este problema da não validação dos postes irá trazer inconvenientes associados à dificuldade ou mesmo impossibilidade da realização de alterações nas estruturas, pois trata-se de uma zona habitacional muito densa.

Perante isto, pode-se considerar que a solução da instalação de terno simples com condutor de alta temperatura ACCC foi validada em termos técnicos.

Em termos económicos também se confirma ser mais vantajoso a implementação da solução em cabo ACCC.

## 6. FERRAMENTA DE APOIO À DECISÃO

Esta aplicação informática foi desenvolvida para prestar apoio ao processo de decisão do projetista, proporcionando uma ajuda simples eficaz no processo de comparação entre soluções técnicas.

Foi desenvolvida para facilitar o apoio à decisão em detrimento de soluções diferentes para a mesma linha em estudo. O objetivo desta ferramenta é ir de encontro à solução mais viável em menos tempo do que é costume, pois os projetistas não conseguem ter uma informação tão precisa como a que esta ferramenta proporciona.

O programa utilizado para elaborar a aplicação é o Microsoft Excel e a linguagem de programação é o *Microsoft Visual Basic for Applications*. Foi escolhida o *Microsoft Excel*, pois na área de projetos da EDP Distribuição é a ferramenta mais utilizada, e em termos de linguagem e programação de macros era a que mais se adequava.

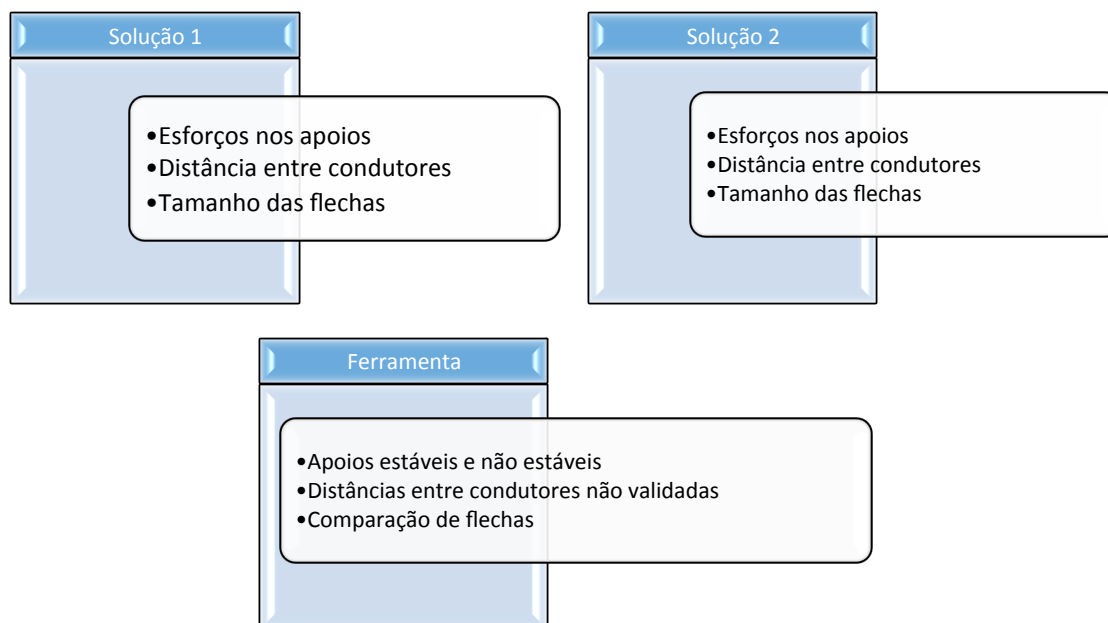


Figura 19 - Diagrama de blocos da ferramenta de apoio à decisão

## 6.1. INTERFACE DO TRABALHO

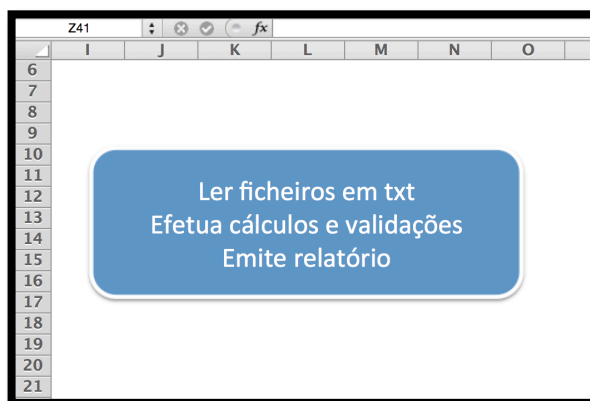
Esta aplicação inicialmente tem três folhas distintas :

- A primeira contém os dados dos apoios das linhas existentes para MT

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Designação	Alt. Total	Bet./Met.	Fz	Fxa	Fya	Fxb	Fyb	Peso	Preço €
2	14M2250	14,0	B	4000	1000	2250	1775	789	3010	1100
3	16M2250	16,0	B	4000	1000	2250	1674	744	3760	1200
4	18M2250	18,0	B	4000	1000	2250	1565	695	4620	1300
5	20M2250	20,0	B	4000	1000	2250	1449	644	5560	1400
6	22M2250	22,0	B	4000	1000	2250	1327	590	6590	1800
7	24M2250	24,0	B	4000	1000	2250	1198	532	7700	2100
8	26M2250	26,0	B	4000	1000	2250	1062	472	8890	2600
9	28M2250	28,0	B	4000	1000	2250	919	408	10180	2900
10	30M2250	30,0	B	4000	1000	2250	930	463	1430	3100
11	32M2250	32,0	B	4000	1000	2250	941	518	1510	3300
12	34M2250	34,0	B	4000	1000	2250	952	573	1590	3600
13	36M2250	36,0	B	4000	1000	2250	963	628	1670	4000
14	14M2750	14,0	B	4000	1300	2750	2256	1066	3540	1200
15	16M2750	16,0	B	4000	1300	2750	2153	1018	4400	1350
16	18M2750	18,0	B	4000	1300	2750	2043	966	5350	1500
17	20M2750	20,0	B	4000	1300	2750	1928	911	6390	1800
18	22M2750	22,0	B	4000	1300	2750	1806	854	7510	1990
19	24M2750	24,0	B	4000	1300	2750	1678	793	8700	2300
20	26M2750	26,0	B	4000	1300	2750	1543	729	9990	2900
21	28M2750	28,0	B	4000	1300	2750	1402	663	11430	3500
22	14M3500	14,0	B	4000	1600	3500	2922	1336	4170	1500
23	16M3500	16,0	B	4000	1600	3500	2804	1282	5120	1800
24	18M3500	18,0	B	4000	1600	3500	2680	1225	6170	2100
25	20M3500	20,0	B	4000	1600	3500	2549	1165	7300	2350
26	22M3500	22,0	B	4000	1600	3500	2411	1102	8500	2700
27	24M3500	24,0	B	4000	1600	3500	2267	1036	9800	3000
28	26M3500	26,0	B	4000	1600	3500	2116	968	11240	3500
29	28M3500	28,0	B	4000	1600	3500	1959	896	12780	4000

**Figura 20** - Folha que contém os dados dos apoios

- A segunda contém simplesmente um “botão” em que executa a programação na ferramenta. Lê os ficheiros em formato “.txt” da solução 1 e da solução 2 e carrega-os em folhas distintas como se vai explicar mais à frente. Depois de carregar os ficheiros, efetua cálculos e validações com os dados carregados e por fim coloca os valores numa página de relatório.



**Figura 21** - Botão que inicia a execução da ferramenta

- A terceira contém uma folha de relatório que permite ver quantos apoios suportam e não suportam as forças exercidas, bem como as distâncias não validadas, em detrimento das soluções a fim de comparar a que mais se adequa.

RELATÓRIO													
SOLUÇÃO 1							SOLUÇÃO 2						
16	Apoios Estáveis						43	Apoios Estáveis					
27	Apoios NÃO Estáveis						0	Apoios NÃO Estáveis					
0	Dist. NÃO Validadas						0	Dist. NÃO Validadas					

**Figura 22** - Folha de relatório

## 6.2. FUNCIONAMENTO DA APLICAÇÃO

Normalmente, os projetistas da EDP Distribuição utilizam um *software* de projeto designado por *Design Manager* (DM). A partir deste é possível extrair um ficheiro com todos os cálculos de um determinado projeto, divididos por dois ficheiros. Um deles contém informações relacionadas com a estabilidade dos apoios, contendo os esforços exercidos nos apoios. O outro contém informações relacionadas com as flechas e com a distância entre condutores.

EDP - Distribuicao Energia SA 7- 5-2015

estabilidade

VERIFICACAO DA ESTABILIDADE DOS APOIOS

-----

Conforme RSLEAT

PAG: 1

LINHA: C:\Users\305839\AppData\Local\Temp\sit

APOIOS			C A R G A S						
N.	F+I+R	TIPO	FXmax	FYmax	FZmax	FX	FY	FZ	Ve
1	A B F	K10-75/34-26	6589	2987	4000	6632	369	281	0
2	A A N	26M4000	2625	1181	4000	0	1171	666	0
3	A A N	RS15-25,0	1500	1500	500	175	0	666	0
4	u A N	RS9-20	1	1	1	801	1302	680	0
5	A A N	RS15-21,0	1500	1500	500	811	391	680	0
6	u A N	RS22-21,9	2200	2200	1150	0	998	759	0
7	A B R	26M4000	2625	1181	4000	200	0	759	0
8	A A N	RS22-24,9	2200	2200	1150	219	2202	727	0
9	A A N	RS22-26,5	2200	2200	1150	179	0	727	0
10	A A N	24M2750	1300	2750	4000	347	1709	678	1
11	A A N	28M4000	1000	2250	4000	452	891	678	0
12	A A N	20M2750	1300	2750	4000	175	0	661	0
13	A A N	28M4000	1300	2750	4000	119	1217	861	1
14	A A N	28M4000	1800	4000	4000	386	253	861	0
15	A A N	28M4000	1800	4000	4000	0	1509	755	1
16	A A N	18M2250	1000	2250	4000	198	0	755	0
17	A A N	C-2-2500/770-20	1	1	1	0	4511	706	0
						172	0	706	0
						725	3115	693	1
						777	2223	693	0
						670	2780	808	1
						821	1780	808	0
						660	2684	970	1
						696	1437	970	0
						200	4187	1034	1
						357	2910	1034	0
						505	2885	863	1
						551	1791	863	0
						0	1012	522	1
						138	0	522	0
						0	544	414	0
						109	0	414	0

Figura 23 - Visualização do formato do ficheiro da estabilidade

-----  
 CALCULO DE FLECHAS DE MONTAGEM  
 -----

LINHA: C:\Users\305839\AppData\Local\Temp\sit

Cantao de regulacao: do apoio n.º 1 ao apoio n.º 2

Condutor: ALAC0160

```

|| Tensao Maxima : 7.00 daN/mm2
|| Vento Maximo  : 750.00 N/m2
|| Manga Gelo    : 0.00 mm
    
```

Cabo Guarda: Nao aplicado.

Vao de regulacao: 170.6 m do apoio n.º 1 ao apoio n.º 2

Vao de verificacao: 170.6 m do apoio n.º 1 ao apoio n.º 2

Vao maximo: 170.6 m do apoio n.º 1 ao apoio n.º 2

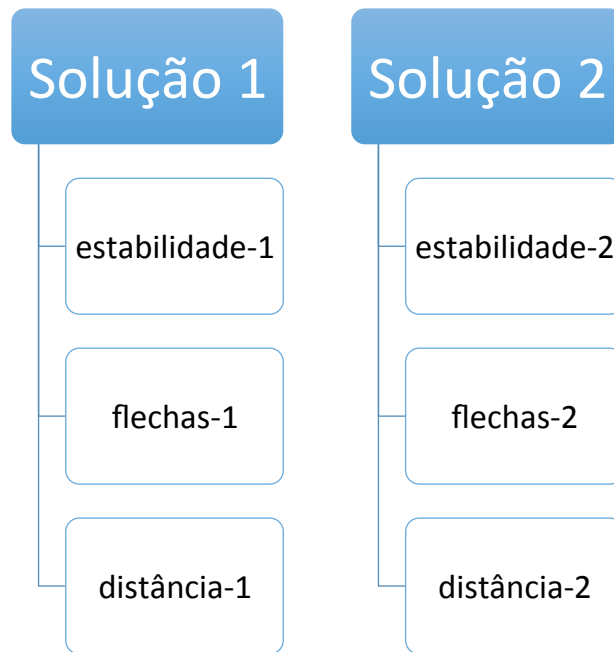
Vao equivalente: 170.6111 m

TEMP (BC)	TRACCAO		F L E C H A S						PARAMETRO	
	MONTAGEM		CONDUTOR			CABO DE GUARDA			CD	CG
	COND.	C_GUA	V_MAX	V_REGU	V_VERI	V_MAX	V_REGU	V_VERI		
-10	1056	0	1.89	1.89	1.89				1937	
-5	992	0	2.01	2.01	2.01				1820	
0	934	0	2.13	2.13	2.13				1713	
5	881	0	2.26	2.26	2.26				1616	
10	832	0	2.39	2.39	2.39				1527	
15	789	0	2.53	2.53	2.53				1447	
20	749	0	2.66	2.66	2.66				1375	
25	714	0	2.79	2.79	2.79				1309	
30	681	0	2.92	2.92	2.92				1250	
35	652	0	3.05	3.05	3.05				1197	
40	626	0	3.18	3.18	3.18				1148	
45	602	0	3.31	3.31	3.31				1104	
50	580	0	3.38	3.38	3.38				1063	
55	559	0	3.56	3.56	3.56				1026	
60	541	0	3.68	3.68	3.68				993	
65	524	0	3.80	3.80	3.80				961	
70	508	0	3.92	3.92	3.92				933	
75	494	0	4.03	4.03	4.03				906	
80	480	0	4.15	4.15	4.15				881	

**Figura 24** - Visualização do formato do ficheiro das flechas e distância entre condutores

A aplicação elaborada na presente dissertação está preparada para comparar diferentes cenários, apresentados aqui como “solução 1” e “solução 2”.

Inicialmente para cada cenário extrai-se dos ficheiros a informação necessária para poder efetuar cálculos e validações. Essa informação é colocada em folhas distintas no ficheiro *excel* da aplicação. As folhas estão representadas na figura seguinte.



**Figura 25** - Diagrama de blocos relativo às diferentes soluções

Para cada solução, são criadas três folhas distintas de valores para auxiliar os cálculos.

- Nas folhas estabilidade-1 ou estabilidade-2, tem como inputs associados a cada apoio, as forças exercidas pelo cabo. Para a posição A e B, respetivamente  $F_{xa}$ ,  $F_{ya}$ ,  $F_{xb}$ ,  $F_{yb}$  e  $F_z$ . Na figura seguinte poderá ver-se o aspeto da folha.

B91		43									
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
2											
3		VERIFICACAO DA ESTABILIDADE DOS APOIOS									
4		APOIOS			CARGAS						
5		N.	F+H+R	TIPO	FXmax	FYmax	FZmax	FX	FY	FZ	Verif
6		1	A B F	K10-75/34-26	6589	2987	4000	6632	369	281	0
7								0	0	281	
8		2	A A N	26M4000	2625	1181	4000	0	1171	666	0
9								175	0	666	
10		3	A A N	RS15-25,0	1500	1500	500	801	1302	680	0
11								811	391	680	
12		4	u A N	RS9-20	1	1	1	0	998	759	0
13								200	0	759	
14		5	A A N	RS15-21,0	1500	1500	500	219	2202	727	0
15								179	0	727	
16		6	u A N	RS22-21,9	2200	2200	1150	347	1709	678	1
17								452	891	678	
18		7	A B R	26M4000	2625	1181	4000	0	1248	661	0
19								175	0	661	
20		8	A A N	RS22-24,9	2200	2200	1150	119	1217	861	1
21								386	253	861	
22		9	A A N	RS22-26,5	2200	2200	1150	0	1509	755	1
23								198	0	755	
24		10	A A N	24M2750	1300	2750	4000	0	4511	706	0
25								172	0	706	
26		11	A A N	28M4000	1000	2250	4000	725	3115	693	1
27								777	2223	693	
28		12	A A N	20M2750	1300	2750	4000	670	2780	808	1
29								821	1780	808	
30		13	A A N	28M4000	1300	2750	4000	660	2684	970	1
31								696	1437	970	
32		14	A A N	28M4000	1800	4000	4000	200	4187	1034	1
33								357	2910	1034	
34		15	A A N	28M4000	1800	4000	4000	505	2885	863	1
35								551	1791	863	
36		16	A A N	18M2250	1000	2250	4000	0	1012	522	1
37								138	0	522	
38		17	A A N	C-2-2500/770-20	1	1	1	0	544	414	0
39								109	0	414	
40											

Figura 26 - Exemplo da folha onde ficam inseridos os esforços associados a cada apoio

- Nas folhas flechas-1 ou flechas-2 , estão as flechas associada a cada cantão de onde se retirará o valor da flecha associado à temperatura de funcionamento do cabo em questão.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1												
2		CALCULO DE FLECHAS DE MONTAGEM										
3												
4		Cantao de regulacao: do apoio n.º 1 ao apoio n.º 2										
5												
6		Condutor:	ALACO160									
7					Tensao Maxima:	7.00 daN/mm2						
8					Vento Maximo :	750.00 N/m2						
9					Manga Gelo :	0.00 mm						
10												
11		Cabo Guarda:	Nao aplicado.									
12												
13		Vao de regulacao:	170.6 m do apoio n.º 1 ao apoio n.º 2									
14		Vao de verificacao:	170.6 m do apoio n.º 1 ao apoio n.º 2									
15		Vao maximo:	170.6 m do apoio n.º 1 ao apoio n.º 2									
16												
17		Vao equivalente:	170.6111 m									
18												
19												
20												
21												
22												
23												
24												
25												
26												
27												
28												
29												
30												
31												
32												
33												
34												
35												
36												
37												
38												
39												
40												
41												
42												

TEMP (°C)	TRACCAO MONTAGEM		FLECHAS			CABO DE GUARDA			PARAMETRO	
	COND.	C GUA	V_MAX	V_REGU	V_VERI	V_MAX	V_REGU	V_VERI	CD	CG
-10	1056	0	1,89	1,89	1,89				1937	
-5	992	0	2,01	2,01	2,01				1820	
0	934	0	2,13	2,13	2,13				1713	
5	881	0	2,26	2,26	2,26				1616	
10	832	0	2,39	2,39	2,39				1527	
15	789	0	2,53	2,53	2,53				1447	
20	749	0	2,66	2,66	2,66				1375	
25	714	0	2,79	2,79	2,79				1309	
30	681	0	2,92	2,92	2,92				1250	
35	652	0	3,05	3,05	3,05				1197	
40	626	0	3,18	3,18	3,18				1148	
45	602	0	3,31	3,31	3,31				1104	
50	580	0	3,38	3,38	3,38				1063	
55	559	0	3,56	3,56	3,56				1026	
60	541	0	3,68	3,68	3,68				993	
65	524	0	3,8	3,8	3,8				961	
70	508	0	3,92	3,92	3,92				933	
75	494	0	4,03	4,03	4,03				906	
80	480	0	4,15	4,15	4,15				881	

**Figura 27** - Exemplo da folha onde são guardados os dados referentes às flechas em cada cantão

- Na terceira folha de cada solução, é onde será guardado o valor das distâncias entre condutores.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
2									
3									
4		DISTANCIA ENTRE CONDUTORES							
5		APOIOS			DISTANCIAS				
6		N.	F+I+R	TIPO	Max.Esq.	Calc.Esq.	Max.Dir.	Calc.Dir.	Verif
7		1	A B F	K10-75/34-26	0	0,9	0	0,9	0
8		2	A A N	26M4000	0	0,92	0	0,92	0
9		3	A A N	RS15-25,0	1,07	1,16	0	1,16	0
10		4	u A N	RS9-20	0	1,17	0	1,18	0
11		5	A A N	RS15-21,0	1,3	1,25	0	0,92	0
12		6	u A N	RS22-21,9	1,3	0,92	0	1,03	0
13		7	A B R	26M4000	1,3	1,12	1,3	1,06	1
14		8	A A N	RS22-24,9	1,3	1,06	0	1,21	0
15		9	A A N	RS22-26,5	0	1,22	0	1,12	0
16		10	A A N	24M2750	1,3	1,12	1,3	1,08	1
17		11	A A N	28M4000	0,89	1,08	0,89	1,02	0
18		12	A A N	20M2750	1,3	1,03	0,89	1,28	0
19		13	A A N	28M4000	1,5	1,29	0,89	1,52	0
20		14	A A N	28M4000	1,5	1,52	0,89	1,43	0
21		15	A A N	28M4000	1,5	1,43	0,89	1,07	0
22		16	A A N	18M2250	1,5	1,08	1,5	0,69	1
23		17	A A N	C-2-2500/770-20	1,5	0,67	1,5	0,84	1
24		18	A B N	22M5000	0	0,8	0	1,02	0
25		19	A A N	22M2750	0	1,02	0	1,12	0
26		20	A A N	22M2750	1,3	1,13	0	0,76	0
27		21	A B F	24M5000	0	0,73	0	0,93	0
28		22	A B R	18M5000	0	0,94	0	0,83	0
29		23	A A N	RS22-30,5	0	0,79	0	1,36	0
30		24	A A N	RS22-30,5	1,5	1,36	0	1,4	0
31		25	A A N	22M2750	0	1,41	0	1,41	0
32		26	A A N	P6000/22	0	2,19	0	0,91	0
33		27	A B F	RIII-R-31	1,5	1,25	1,5	1,25	1
34		28	A A N	26M5000	0	0,57	0	0,58	0
35		29	A B N	26M2750	0	0,84	0	1,89	0
36		30	A B N	P3000/28	0	1,54	0	1,54	0
37		31	S B N	P1000/28	0	1,49	0	1,49	0
38		32	A B N	P1000/28	0	1,42	0	1,36	0
39		33	S B N	24M2750	1,5	0,76	1,5	0,78	1
40		34	A B N	20M600	0	0,77	0	0,7	0

**Figura 28** - Folha onde são guardados os dados referentes às distâncias entre condutores associadas a cada apoio

Com estes dados já extrapolados dos ficheiros que vêm inicialmente do DM, serão efetuados cálculos e validações e colocados em duas folhas distintas.

- Uma delas com a validação dos apoios como se pode visualizar na figura seguinte.

B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
		SOLUÇÃO 1							SOLUÇÃO 2						
Apoio		H1		H2		FZ	Val. apoios		H1		H2		FZ	Val. apoios	
Nº	tipo	Fxa	Fya	Fxb	Fyb		Posição A	Posição B	Fxa	Fya	Fxb	Fyb		Posição A	Posição B
1	10-75/34-2	6632	369	0	0	281	Não Válido	Não Válido	3824	176	0	0	122	Não Válido	Válido
2	26M4000	0	1171	175	0	666	Válido	Não Válido	0	603	72	0	247	Válido	Válido
3	RS15-25,0	801	1302	811	391	680	Não Válido		401	633	405	196	298	Válido	
4	RS9-20	0	998	200	0	759	Não Válido		0	478	96	0	331	Válido	
5	RS15-21,0	219	2202	179	0	727	Não Válido		110	1083	161	659	321	Válido	
6	RS22-21,9	347	1709	452	891	678	Válido		173	808	226	415	299	Válido	
7	26M4000	0	1248	175	0	661	Válido	Não Válido	0	635	84	0	291	Válido	Válido
8	RS22-24,9	119	1217	386	253	861	Válido		59	609	193	147	384	Válido	
9	RS22-26,5	0	1509	198	0	755	Válido		0	734	95	0	329	Válido	
10	24M2750	0	4511	172	0	706	Não Válido	Não Válido	0	2518	82	0	308	Válido	Não Válido
11	28M4000	725	3115	777	2223	693	Não Válido	Não Válido	362	1610	388	1183	304	Válido	Não Válido
12	20M2750	670	2780	821	1780	808	Não Válido	Não Válido	335	1370	411	890	356	Válido	Não Válido
13	28M4000	660	2684	696	1437	970	Não Válido	Não Válido	330	1376	348	778	426	Válido	Não Válido
14	28M4000	200	4187	357	2910	1034	Não Válido	Não Válido	100	2177	178	1565	454	Válido	Não Válido
15	28M4000	505	2885	551	1791	863	Não Válido	Não Válido	253	1512	276	987	379	Válido	Não Válido
16	18M2250	0	1012	138	0	522	Válido	Não Válido	0	517	66	0	228	Válido	Válido
17	2-2500/770	0	544	109	0	414	Válido	Não Válido	0	260	109	0	181	Válido	Válido
18	22M5000	1463	2691	1601	1873	639	Não Válido	Não Válido	732	1331	800	937	284	Válido	Não Válido
19	22M2750	1010	1613	1044	626	728	Não Válido	Não Válido	505	788	522	313	321	Válido	Não Válido
20	22M2750	1021	1164	1087	376	757	Não Válido	Não Válido	510	614	544	236	276	Válido	Não Válido
21	24M5000	0	4009	122	0	497	Válido	Não Válido	0	2253	58	0	217	Válido	Não Válido
22	18M5000	0	2290	136	0	523	Válido	Não Válido	0	1254	65	0	228	Válido	Válido
23	RS22-30,5	2162	1857	2300	859	869	Não Válido		1089	931	1151	450	366	Válido	
24	RS22-30,5	89	1325	267	133	1004	Válido		44	596	134	25	443	Válido	
25	22M2750	0	2229	243	0	929	Válido	Não Válido	0	1168	117	0	406	Válido	Não Válido
26	P6000/22	5861	3682	6443	2507	1337	Não Válido		2930	1821	3222	1254	620	Válido	
27	RIII-R-31	906	1277	913	299	733	Não Válido		453	620	457	149	322	Válido	
28	26M5000	0	3073	139	0	544	Válido	Não Válido	0	1705	139	0	237	Válido	Não Válido
29	26M2750	0	1110	102	0	393	Válido	Não Válido	0	590	49	0	171	Válido	Válido
30	P3000/28	1838	3273	1915	2141	840	Não Válido		919	1616	958	1071	371	Válido	
31	P1000/28	0	1326	265	0	1009	Não Válido		0	636	128	0	440	Válido	
32	P1000/28	0	1242	249	0	945	Não Válido		0	596	119	0	412	Válido	
33	24M2750	0	870	174	0	663	Válido	Não Válido	0	417	84	0	288	Válido	Válido
34	20M600	0	757	103	0	393	Não Válido	Não Válido	0	386	50	0	172	Válido	Não Válido

Figura 29 - Folha de validação de apoios

- Outra das folhas terá as flechas associadas para cada cantão para a temperatura de funcionamento do cabo, a distância entre condutores calculada bem como a diferença de flechas da solução 2 para a solução 1, como se pode ver de seguida.

		SOLUÇÃO 1				SOLUÇÃO 2			
Cantão (m)	Vão eq. (m)	flecha (m)	dist. entre condutores (m)	Val. Dist. (m)	flecha (m)	dist. entre condutores (m)	Val. Dist. (m)	S2-S1 (m)	
do apoio n.º 1 ao apoio n.º 2	170,6111	3,38	5,952818281	ok	4,17	5,952818281	ok	0,79	
do apoio n.º 2 ao apoio n.º 3	173,5621	3,49	6,003433625	ok	4,26	6,003433625	ok	0,77	
do apoio n.º 3 ao apoio n.º 4	228,9596	5,84	6,884134967	ok	6,11	6,884134967	ok	0,27	
do apoio n.º 4 ao apoio n.º 5	232,5248	6,02	6,936943748	ok	6,25	6,936943748	ok	0,23	
do apoio n.º 5 ao apoio n.º 6	175	3,56	6,02794045	ok	4,31	6,02794045	ok	0,75	
do apoio n.º 6 ao apoio n.º 7	199,8861	4,53	6,437148635	ok	5,06	6,437148635	ok	0,53	
do apoio n.º 7 ao apoio n.º 8	205,3161	4,76	6,522984976	ok	5,23	6,522984976	ok	0,47	
do apoio n.º 8 ao apoio n.º 9	239,852	6,38	7,044220186	ok	6,54	7,044220186	ok	0,16	
do apoio n.º 9 ao apoio n.º 10	218,8625	5,37	6,732300973	ok	5,73	6,732300973	ok	0,36	
do apoio n.º 10 ao apoio n.º 11	210,512	4,99	6,604064251	ok	5,42	6,604064251	ok	0,43	
do apoio n.º 11 ao apoio n.º 12	197,221	4,42	6,394592748	ok	4,97	6,394592748	ok	0,55	
do apoio n.º 12 ao apoio n.º 13	255,9326	7,21	7,274052125	ok	7,21	7,274052125	ok	0	
do apoio n.º 13 ao apoio n.º 14	307,9888	10,27	7,972324357	ok	9,57	7,972324357	ok	-0,7	
do apoio n.º 14 ao apoio n.º 15	288,6797	9,07	7,72075956	ok	8,65	7,72075956	ok	-0,42	
do apoio n.º 15 ao apoio n.º 16	209,3017	4,94	6,58526837	ok	5,37	6,58526837	ok	0,43	
do apoio n.º 16 ao apoio n.º 17	108,2146	1,86	4,756181101	ok	2,46	4,756181101	ok	0,6	
do apoio n.º 17 ao apoio n.º 18	143,273	2,9	5,461351502	ok	3,39	5,461351502	ok	0,49	
do apoio n.º 18 ao apoio n.º 19	196,3794	4,39	6,381094552	ok	4,95	6,381094552	ok	0,56	
do apoio n.º 19 ao apoio n.º 20	219,8569	5,41	6,74740753	ok	5,41	6,74740753	ok	0	
do apoio n.º 20 ao apoio n.º 21	125,4309	2,34	5,114817184	ok	2,91	5,114817184	ok	0,57	
do apoio n.º 21 ao apoio n.º 22	176,9546	3,62	6,061092757	ok	4,36	6,061092757	ok	0,74	
do apoio n.º 22 ao apoio n.º 23	141,2461	2,83	5,423115112	ok	3,33	5,423115112	ok	0,5	
do apoio n.º 23 ao apoio n.º 24	272,5181	8,13	7,503655009	ok	7,92	7,503655009	ok	-0,21	
do apoio n.º 24 ao apoio n.º 25	282,6445	8,71	7,640415471	ok	8,38	7,640415471	ok	-0,33	
do apoio n.º 25 ao apoio n.º 26	283,0005	8,74	7,645178416	ok	8,39	7,645178416	ok	-0,35	
do apoio n.º 26 ao apoio n.º 27	172,9821	3,47	5,993519684	ok	4,24	5,993519684	ok	0,77	
do apoio n.º 27 ao apoio n.º 28	247,6406	6,78	7,156470292	ok	6,86	7,156470292	ok	0,08	
do apoio n.º 28 ao apoio n.º 29	83,1953	1,25	4,179515593	ok	1,83	4,179515593	ok	0,58	
do apoio n.º 29 ao apoio n.º 30	155,3433	3,3	5,683655654	ok	3,73	5,683655654	ok	0,43	
do apoio n.º 30 ao apoio n.º 31	312,4102	10,56	8,028808239	ok	9,79	8,028808239	ok	-0,77	
do apoio n.º 31 ao apoio n.º 32	301,2423	9,85	7,885349912	ok	9,24	7,885349912	ok	-0,61	
do apoio n.º 32 ao apoio n.º 33	273,4423	8,18	7,516240874	ok	7,96	7,516240874	ok	-0,22	
do apoio n.º 33 ao apoio n.º 34	128,8593	2,44	5,183229463	ok	3	5,183229463	ok	0,56	
do apoio n.º 34 ao apoio n.º 35	110,3393	1,92	4,801913184	ok	2,51	4,801913184	ok	0,59	
do apoio n.º 35 ao apoio n.º 36	249,8174	6,89	7,187525817	ok	6,95	7,187525817	ok	0,06	

**Figura 30** - Folha das flechas e cálculo da distância entre condutores e sua validação para ambas as soluções

Por último, será emitido um pequeno relatório numa folha em que conste para ambas as soluções, o número de apoios estáveis e não estáveis, bem como as distâncias não validadas como é exemplificado na figura seguinte.

RELATÓRIO													
SOLUÇÃO 1							SOLUÇÃO 2						
16	Apoios Estáveis						43	Apoios Estáveis					
27	Apoios NÃO Estáveis						0	Apoios NÃO Estáveis					
0	Dist. NÃO Validadas						0	Dist. NÃO Validadas					

**Figura 31** - Folha de relatório

## 7. CONCLUSÕES

Um projeto de uma linha aérea em MT é composto por várias etapas, nas quais se destacam o cálculo elétrico, o cálculo mecânico, não descurando as considerações ambientais e económicas.

Verificou-se que a tecnologia do cabo ACCC é vantajosa em linhas aéreas, nomeadamente para serem aplicados em linhas aéreas de elevada capacidade de transporte de energia, à semelhança da linha em estudo neste trabalho. O aspeto construtivo é inovador em relação aos convencionais. O núcleo composto por fibras de carbono e fibras de vidro, proporciona o funcionamento em larga gama de temperaturas, com baixo coeficiente de dilatação e prolonga o tempo de vida útil do condutor. O seu revestimento é em forma trapezoidal, garantindo uma maior circulação da corrente elétrica, diminuindo a resistência e as perdas.

A instalação dos cabos de alta temperatura nas linhas aéreas são uma opção bastante considerável, na medida em que a sua capacidade de transporte de energia, em relação aos cabos convencionais com o mesmo diâmetro, poderá ser aproximadamente o dobro. Outro fator a ter em conta é que os cabos de alta temperatura provocam flechas reduzidas, o que significa poder aumentar os vãos e assim reduzir o número de apoios nos corredores de energia, bem como reduzir o número de traçados de linhas aéreas. Nesta dissertação conclui-se que, devido às suas características mecânicas, estes cabos permitem construir linhas com apoios de menores dimensões, quer em altura quer em robustez, e assim impactar uma maior facilidade na montagem, menor impacto ambiental, menor impacto paisagístico e sobretudo menores constrangimentos com os proprietários dos terrenos onde os apoios são implantados.

As vantagens na utilização deste cabo de alta temperatura sobrepõem-se às desvantagens. Os cabos ACCC são fabricados com alumínio recozido (1350-O), o que implica um cuidado acrescido na sua manobra, pois é um cabo extremamente maleável, mais leve, e por isso os processos mecânicos fazem-se de uma forma mais cuidadosa. Neste estágio verificou-se que existe ainda algum desconhecimento dos pormenores construtivos que estes cabos exigem, contudo uma utilização generalizada irá permitir otimizar os processos no terreno e reduzir os custos de fabrico e instalação.

No que foi analisado em relação ao estudo elétrico os cabos de alta temperatura, não sofrem grandes alterações em relação aos convencionais. Em relação ao estudo elétrico, para o mesmo regime de carga, na solução da linha ser dupla em cabo convencional obteve-se um valor de 3,93 kV para a queda de tensão, 5,56% para as perdas por efeito de joule, enquanto que na solução do terno simples com cabo de alta temperatura os valores calculados foram de 4,08 kV e 6,05% respetivamente. Analisando os valores calculados para o estudo elétrico, pode-se concluir que existe um ligeiro aumento nos valores da queda de tensão e das perdas para o cenário da utilização do cabo ACCC, no entanto este aumento não é significativo.

Na análise focada no cálculo mecânico conclui-se que, para a primeira solução 27 dos apoios não suportariam os esforços da linha dupla, razão pela qual seria necessária a sua substituição. Na segunda solução, todos os apoios existentes suportariam o esforço realizado pela linha simples em cabo ACCC. Em relação ao valor das flechas, comparando os dois cenários, pode concluir-se que nos vãos de maior distância a extensão da flecha provocada pelo cabo ACCC é inferior à do cabo convencional. Para os restantes vãos não se registam diferenças significativas entre as duas soluções. Como os apoios da linha MT Espinho-Sanguedo, apresentam ainda um tempo de vida elevado, os resultados obtidos permitem concluir que, a melhor solução para duplicar a capacidade da linha consiste na substituição dos condutores existentes para o cabo ACCC – Pasadena 182 mm<sup>2</sup>, substituindo também todos os acessórios necessários.

Para introduzir a opção dos cabos de alta temperatura, considerou-se vantajoso construir uma ferramenta que permita ao projetista fazer análises comparativas de soluções técnicas, utilizando o *software* de projeto da EDP Distribuição (SIT-DM) ou cálculo manual, de forma sistemática e objetiva. Assim, a presente dissertação tinha também como objetivo construir a referida ferramenta, que foi aplicada e testada na análise do caso de estudo, que

consistiu genericamente na comparação entre a solução de reforçar a linha MT Espinho–Sanguedo existente para linha dupla em ACSR 160 mm<sup>2</sup> ou reforçar a linha utilizando o cabo de alta temperatura ACCC 182,1 mm<sup>2</sup>. Tendo em conta os resultados obtidos e demonstrados neste relatório considera-se que este objetivo foi alcançado com sucesso.



## *Referências Bibliográficas*

- [1] "kjalloys," [Online]. Available: <http://www.kjalloys.com/>.
- [2] "beechnut," [Online]. Available: [http://beechnut.en.ec21.com/ACCC\\_Carbon\\_Fiber\\_Composite\\_Wire--4852659\\_4852828.html](http://beechnut.en.ec21.com/ACCC_Carbon_Fiber_Composite_Wire--4852659_4852828.html).
- [3] "Aluminum Electrical Conductor Handbook," Washington, The Aluminum Association, 1989.
- [4] "Aspects to take into account in the application of mechanical calculation to high," 2010. [Online]. Available: <https://addi.ehu.es/bitstream/10810/4704/3/AlbizuIET2010.pdf>.
- [5] D. Bryant, "ACCC conductor update," 2007.
- [6] "Wikimedia," [Online]. Available: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:ACSR\\_and\\_ACCE.JPG](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:ACSR_and_ACCE.JPG).
- [7] CTC Global, *Engineering Transmission Lines with High Capacity Low Sag ACCC Conductors*, 2011.
- [8] "Wikipedia," [Online]. Available: <https://pt.wikipedia.org/?title=Alum%C3%ADnio>.
- [9] . A. Alawar , E. Bosze and S. Nutt, "A composite core conductor for low sag at high temperatures," *IEEE Transactions*, pp. 2193 - 2199, Julho 2005.
- [10] Recomendações Técnicas para projecto de Linhas Aéreas de MT até 30 kV, Vols. %1 de %2I, II e III, 1986.
- [11] I. Ferreira, Projeto de Linha de Alta Tensão e Estudo do Campo Eletromagnético Produzido pela Linha, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2007.
- [12] N. J. F. Sequeira, "Projeto de Linha Aérea de Alta Tensão conforme a norma EN50341,

" Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2009.

[13] EDP, "Projecto de Linhas aéreas de MT e AT," Universidade EDP, Porto, 2007.

[14] L. Checa, Linhas de Transporte de Energia, Lisboa: Edições CETOP, 1986.

[15] A. A. d. Vale, Linhas Aéreas de Transmissão de Energia.

[16] *Regulamento de Segurança de Linhas Eléctricas de Alta Tensão*, Lisboa: Direcção Geral de Energia, 1993.

[17] H. Leite, *Elaboração de Projectos de Linhas Aéreas de Distribuição de Energia*, Feup, 2008.

[18] P. Galvão, "Redes eléctricas de média e baixa tensão – Aspectos de projeto, licenciamento e exploração em contexto operacional," Galvão, Paulo, *Redes eléctricas de média e baixa tensão – Aspectos de projeto, licenciamento* Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2010.


[19] Cavan S.A., *Catálogo de apoios*.

[20] "EDP," [Online]. Available:  
<https://www.edp.pt/pt/aedp/unidadesdenegocio/distribuicaodeelectricidade/Pages/Distribui%C3%A7%C3%A3oPT.aspx>.

## Anexo A. Características do cabo de alumínio-aço (ACSR)

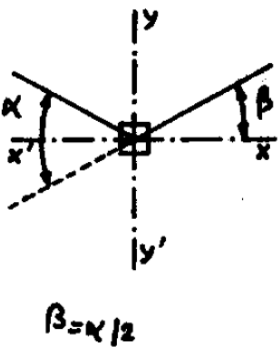
Características Eléctricas e Dimensionais dos Cabos de Alumínio com Alma de Aço - ALI/STIA															
Designação	Area (mm <sup>2</sup> )		Nº de fios		Diâmetro fios (mm)		Diâmetro (mm)		Massa por unidade de comprimento (kg/km)	Carga de Ruptura Nominal (kN)	Resistência Eléctrica máxima a 20 °C	Modulo de Elasticidade Final <sup>(g)</sup> N/mm <sup>2</sup>	Coeficiente linear de expansão I/K	Capacidade Nominal <sup>(t)</sup>	
	Alumínio	Aço	Total	Al	Aço	Alumínio	Aço	alma							cabo
Nova	Antiga														
26-ALI/4-STIA	30	26.2	4.4	30.6	6	1	2.36	2.36	7.08	7.08	7.08	7.08	18.6E-6	150	A
42-ALI/7-STIA	50	42.4	7.1	49.5	6	1	3.00	3.00	9.00	9.00	9.00	9.00	18.6E-6	205	
80-ALI/13-STIA	90	75.4	12.6	88.0	6	1	4.00	4.00	12.0	12.0	12.0	12.0	18.6E-6	300	
80-ALI/47-STIA	Guinea 130	80.4	46.9	127.2	12	7	2.92	2.92	8.76	14.6	14.6	14.6	15.3E-6	325	
96-ALI/56-STIA	Dorking 153	96.5	56.3	152.8	12	7	3.20	3.20	9.60	16.0	16.0	16.0	15.3E-6	365	
94-ALI/22-STIA	Camna 116	94.2	22.0	116.2	30	7	2.00	2.00	6.00	14.0	14.0	14.0	17.9E-6	345	
203-ALI/33-STIA	235	202.6	32.5	235.1	26	7	3.15	2.43	7.29	19.9	19.9	19.9	18.9E-6	565	
136-ALI/22-STIA	Partridge 160	135.9	22.0	157.9	26	7	2.58	2.00	6.00	16.3	16.3	16.3	18.9E-6	435	
212-ALI/49-STIA	Panther 260	212.1	49.5	261.5	30	7	3.00	3.00	9.00	21.0	21.0	21.0	17.9E-6	585	
264-ALI/62-STIA	Bear 325	264.4	61.7	326.1	30	7	3.35	3.35	10.1	23.5	23.5	23.5	17.9E-6	680	
429-ALI/56-STIA	Zebra 485	428.9	55.6	484.5	54	7	3.18	3.18	9.54	28.6	28.6	28.6	19.4E-6	915	
565-ALI/30-STIA	Zambeze 595	565.4	29.6	595.0	42	7	4.14	2.32	6.96	31.8	31.8	31.8	21.2E-6	1085	

## Anexo B. Características elétricas do cabo de alta temperatura (ACCC)

DATA SHEET:	<b>ACCC<sup>®</sup>-Pasadena</b>				
<i>For questions, please contact CTC Application Engineering Department: <a href="mailto:applicationsupport@ctccable.com">applicationsupport@ctccable.com</a></i>					
Governing Units: Imperial					
<b>Mechanical Specifications</b>	<b>Metric</b>		<b>Imperial</b>		
Nominal Aluminum Cross-sectional Area*	154.4	mm <sup>2</sup>	304.7	kcmil	
Nominal Diameter of Composite Core (CTC Part Number 200-003)	5.97	mm	0.235	in.	
Nominal Cross-sectional Area of Core	28.0	mm <sup>2</sup>	0.043	in <sup>2</sup>	
Overall Diameter of Conductor	15.65	mm	0.616	in.	
Nominal Cross-sectional Area of the Conductor	182.1	mm <sup>2</sup>	0.282	in <sup>2</sup>	
Ultimate Tensile Strength of Conductor <sup>1,2</sup>	68.9	kN	15.5	kips	
Rated Strength of Core - 313 ksi (2158 MPa)	60.4	kN	13.6	kips	
Core Nominal Mass per unit length	54	kg/km	36	lb/kft	
Conductor Nominal Mass per unit length	478	kg/km	321.3	lb/kft	
Aluminum Nominal Mass per unit length**	424.5	kg/km	285.3	lb/kft	
Maximum Allowable Operating Temperature at Surface <sup>4</sup>	180	°C	356	°F	
Coefficient of Linear Expansion Above Thermal Kneepoint	1.61E-06	/°C	8.94E-07	/°F	
Coefficient of Linear Expansion Below Thermal Kneepoint	1.72E-05	/°C	9.57E-06	/°F	
Final Modulus of Elasticity Above Thermal Kneepoint	112.3	GPa	16.3	Msi	
Final Modulus of Elasticity Below Thermal Kneepoint	63.1	GPa	9.1	Msi	
<b>Electrical Specifications</b>	<b>Metric</b>		<b>Imperial</b>		
Nominal Resistivity of Aluminum at 20°C, DC 63% IACS	0.1793	ohm/km	0.2885	ohm/mile	
Temperature Coefficient of Resistance	0.00404		0.00404		
Frequency	60	Hz	60	Hz	
AC Nominal Resistance at 25°C	0.1829	ohm/km	0.2944	ohm/mile	
AC Nominal Resistance at 75°C	0.2197	ohm/km	0.3535	ohm/mile	
AC Nominal Resistance at 180°C	0.2968	ohm/km	0.4776	ohm/mile	
AC Current Rating at Given Temperature <sup>3</sup>		528	@ 100C & 60 Hz		
		778	@ 180C & 60 Hz		
GMR (estimated)	0.006	m	0.021	ft	
Inductive Reactance	0.291	ohm/km	0.468	ohm/mile	
Capacitive Reactance	0.175	Mohm-km	0.109	Mohm-mile	

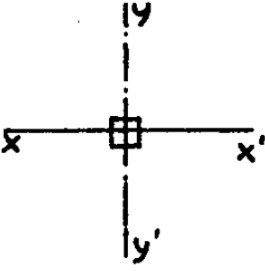
## Anexo C. Esforços aplicados a apoios de ângulo.

### Apoios de ângulo

FUNÇÃO DO APOIO	SOLICITAÇÕES NORMAIS	SOLICITAÇÕES EXCEPCIONAIS
<p>ÂNGULO</p>  <p><math>\beta = \alpha / 2</math></p>	<p>HIPÓTESE 1 (vento paralelo à bissetriz do ângulo):</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- esforço no sentido da bissetriz do ângulo (eixo yy')</li> </ul> $F_y = 3 [ W \cos^2 \beta ( S_1 + S_2 ) + 2 T \sin \beta ]$ <ul style="list-style-type: none"> <li>- esforço vertical (eixo zz')</li> </ul> $F_z = 3 W' ( S_1 + S_2 )$ <p>HIPÓTESE 2 (sem vento):</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- esforço no sentido normal à bissetriz do ângulo (eixo xx')</li> </ul> $F_x = 1/5 \cdot 3 W \cos^2 \beta ( S_1 + S_2 )$ <ul style="list-style-type: none"> <li>- esforço vertical (eixo zz')</li> </ul> $F_z = 3 W' ( S_1 + S_2 )$	<p>não são de considerar</p>

## Anexo D. Esforços aplicados a apoios de alinhamento

### Apoios de alinhamento

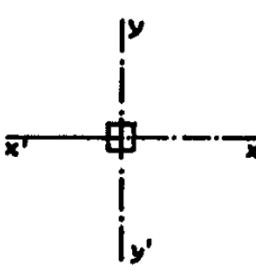
FUNÇÃO DO APOIO	SOLICITAÇÕES NORMAIS	SOLICITAÇÕES EXCEPCIONAIS
<p>ALINHAMENTO</p> 	<p>HIPÓTESE 1 (vento perpendicular à linha):</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- esforço no sentido normal à linha (eixo yy')</li> </ul> $F_y = 3 W \left( S_1 + S_2 \right)$ <ul style="list-style-type: none"> <li>- esforço vertical (eixo zz')</li> </ul> $F_z = 3 W' \left( S_1 + S_2 \right)$ <p>HIPÓTESE 2 (sem vento):</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- esforço no sentido da linha (eixo xx')</li> </ul> $F_x = 1/5 F_y$ <ul style="list-style-type: none"> <li>- esforço vertical (eixo zz')</li> </ul> $F_z = 3 W' \left( S_1 + S_2 \right)$	<p>não são de considerar</p>

#### Observações:

- i . É desnecessário o cálculo do esforço vertical em apoios de betão.
- ii . É desnecessária a verificação da HIPÓTESE 2 em apoios de betão e em apoios metálicos de base quadrada.

## Anexo E. Esforços aplicados a apoios de fim de linha

### Apoios de fim de linha

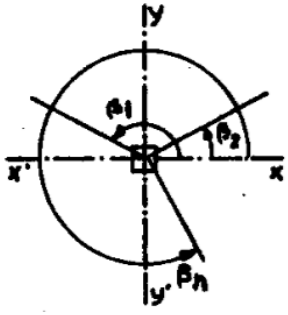
FUNÇÃO DO APOIO	SOLICITAÇÕES NORMAIS	SOLICITAÇÕES EXCEPCIONAIS
<p>FIM DE LINHA</p> 	<p>HIPÓTESE 1 (vento perpendicular à linha):</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- esforço no sentido normal à linha (eixo yy')</li> <li><math>F_y = 3 W S</math></li> <li>- esforço no sentido da linha (eixo xx')</li> <li><math>F_x = 3 T</math></li> <li>- esforço vertical (eixo zz')</li> <li><math>F_z = 3 W' S</math></li> </ul>	<p>HIPÓTESE 3 (sem vento):</p> <p>De acordo com o RSLEAT a verificação desta hipótese é facultativa em apoios de linhas a 15 e 30 kV</p>

#### Observações:

i . é desnecessário o cálculo do esforço vertical em apoios de betão.

## Anexo F. Esforços aplicados a apoios de derivação (caso geral)

### Apoios de derivação ( caso geral )

FUNÇÃO DO APOIO	SOLICITAÇÕES NORMAIS	SOLICITAÇÕES EXCEPCIONAIS
<p>DERIVAÇÃO (CASO GERAL)</p> 	<p>HIPÓTESE 1 (vento perpendicular à linha principal ou paralelo à bissetriz do ângulo da linha principal):</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- esforço no sentido normal à linha principal ou no sentido da bissetriz do ângulo da linha principal (eixo yy')</li> </ul> $F_y = 3 \left[ \sum_{i=1}^n W_i^2 \cos^2 \beta_i S_i + \left  \sum_{i=1}^n T_i \sin \beta_i \right  \right]$ <ul style="list-style-type: none"> <li>- esforço no sentido da linha principal ou no sentido normal à bissetriz do ângulo da linha principal (eixo xx')</li> </ul> $F_x = 3 \left  \sum_{i=1}^n T_i \cos \beta_i \right $ <ul style="list-style-type: none"> <li>- esforço vertical (eixo zz')</li> </ul> $F_z = 3 \sum_{i=1}^n W'_i S_i$ <p>HIPÓTESE 2 (vento paralelo à linha principal ou perpendicular à bissetriz do ângulo da linha principal):</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- esforço no sentido normal à linha principal ou no sentido da bissetriz do ângulo da linha principal (eixo yy')</li> </ul> $F_y = 3 \left  \sum_{i=1}^n T_i \sin \beta_i \right $ <ul style="list-style-type: none"> <li>- esforço no sentido da linha principal ou no sentido normal à bissetriz do ângulo da linha principal (eixo xx')</li> </ul> $F_x = 3 \left[ \sum_{i=1}^n W_i^2 \sin^2 \beta_i S_i + \left  \sum_{i=1}^n T_i \cos \beta_i \right  \right]$ <ul style="list-style-type: none"> <li>- esforço vertical (eixo zz')</li> </ul> $F_z = 3 \sum_{i=1}^n W'_i S_i$	<p>não são de considerar</p>

## Anexo G. Características dos apoios.

Características dos Apoios			
Nº	Altura [m]	Tipo	Função
1	26,0	K10-75/34-26	fim de linha
2	24,0	26M4000	ângulo
7	22,4	26M4000	ângulo
9	24,2	RS22-26,5	ângulo
10	20,4	24M2750	ângulo
16	13,5	18M2250	ângulo
21	21,5	24M5000	ângulo
22	15,5	18M5000	ângulo
25	19,5	22M2750	ângulo
28	21,5	26M5000	ângulo
29	23,5	26M2750	ângulo
34	15,4	20M600	ângulo
4	20,0	RS9-20	alinhamento
17	15,5	C-2-2500/770-20	alinhamento
31	28,7	P1000/28	alinhamento
32	28,0	P1000/28	alinhamento

33	21,5	24M2750	alinhamento
35	21,5	24M2750	alinhamento
37	15,4	20M600	alinhamento
40	16,2	18M600	alinhamento
3	21,2	RS15-25,0	deriv (alinh)
5	17,9	RS15-21,0	deriv (alinh)
6	18,5	RS22-21,9	deriv (ang)
8	21,5	RS22-24,9	deriv (ang)
11	17,3	28A4000	deriv (ang)
12	16,4	20M2750	deriv (alinh)
13	25,5	28A4000	deriv (ang)
14	25,5	30A4000	deriv (ang)
15	23,5	28A4000	deriv (ang)
18	19,5	22M5000	deriv (alinh)
19	19,5	22M2750	deriv (alinh)
20	22,0	22M2750	deriv (ang)
23	28,0	RS22-30,5	deriv (ang)
24	26,0	RS22-30,5	deriv (ang)
26	22,0	P6000/22	deriv (alinh)
27	28,5	RIII-R-31	deriv (alinh)
30	29,2	P3000/28	deriv (alinh)
36	20,7	RS22-22,9	deriv (alinh)
38	19,5	22M2750	deriv (alinh)

39	27,1	P2000/26	deriv (alinh)
41	21,5	P6000/22	deriv (ang)
42	34,6	RS15-36,1	deriv (alinh)
43	22	P6000/22	deriv (ang)

## Anexo H. Característica dos vãos.

Características dos vãos				
Nº	Linha Principal		Linhas Derivadas	
	Vãos [m]	Ângulo [grados]	Vãos [m]	Ângulo [grados]
1	170	0	-	-
2	170,6	197,95	173,6	2,05
7	199,9	198,21	205,3	1,79
9	239,9	197,51	218,9	2,49
10	218,9	182,235	210,5	17,765
16	209,3	198,435	108,2	1,565
21	125,4	183,505	177,0	16,495
22	177,0	192,245	141,3	7,755
25	282,6	195,13	456,0	4,87
28	247,6	188,51	83,2	11,49
29	83,2	197,145	155,3	2,855
34	128,9	198,85	110,3	1,15
4	228,95	200	232,52	0,38
17	108,2	200	143,3	0,94
31	312,41	200	301,24	0,32

32	301,2	200	273,4	0,38
33	273,4	200	128,85	1,26
35	110,3	200	249,8	1,16
37	129,87	200	152,09	0,87
40	126,9	200	112,4	0,41
3	173,6 229,0	200 0	35,2	171,1
5	232,5 175,5	200 0	129,6	-89,5
6	175,5 199,9	198,09 1,91	139,0	-116,71
8	205,3 239,9	198,74 1,26	30,8 109,8	93,8 -103,34
11	210,5 197,2	195,55 4,45	43,6	67,55
12	197,2 255,9	200 0	121,3	-122,9
13	255,9 308,0	203,685 3,685	61,0	149,515
14	308,0 288,7	193,085 6,915	101,1	108,585
15	288,7 209,3	205,725 5,725	61,7	144,575

18	143,3 196,4	200 0	155,0	142,22
19	196,4 219,9	200 0	85,0	-35,33
20	219,9 125,4	197,01 2,99	13,7 118,4	111,25 -146,25
23	141,3 272,5	198,76 1,24	119,8 102,5	94,71 -36,02
24	272,5 282,6	205,76 5,76	209,6	-104,22
26	283,0 173,0	200 0	219,0 138,0	93,82 -42,35
27	173,0 247,6	200 0	94,8	20,28
30	155,3 312,4	200 0	52,2 85,7	101,3 -7,89
36	249,8 129,9	200 0	187,9	162,92
38	152,1 191,0	200 0	165,7 172,6	104,07 -85,4
39	191,0 126,9	200 0	180,7 82,4	63,03 -84,17
41	112,4 207,3	174,655 25,345	165,0 33,8 80,5	-150,05 -161,2 -194,5

42	207,3	200	118,5	35,9
	269,5	0	24,9	-179,76
43	271,0	191,75	52,0	121,75
	289,0	8,25	77,5	129,25
			271,0	191,75
			269,5	-79,87

# Anexo I. Perfil da linha de estudo.

