Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



Condutores aéreos de elevada capacidade - Avaliação de up-rating - Dimensionamento elétrico e mecânico

Nuno Tiago Sousa Tavares

VERSÃO FINAL

Dissertação realizada no âmbito do
Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores
Major Energia

Orientador: Prof. José Neves dos Santos
Coorientador: Engª. Marcela Teixeira
Julho 2013

© Nuno Tiago Sousa Tavares, 2013

Resumo

Neste Relatório de projeto é apresentado o trabalho realizado, com o objetivo de analisar a viabilidade de um uprating dos cabos de uma linha aérea, assim como o desenvolvimento de uma aplicação informática, realizada em *Microsoft Access* em conjunto com o *Visual Basic for Applications*, que permite realizar o cálculo mecânico, elétrico e térmico para essa linha de uma forma simplista.

Este trabalho encontra-se dividido em duas partes distintas. A primeira parte diz respeito essencialmente às bases teóricas do projeto, sendo composta pelos capítulos entre o 1 e o 4. Nestes capítulos encontram-se referidos todos os dados sobre cabos HTLS, a formulação do cálculo mecânico, elétrico e térmico e uma explicação da rede elétrica nacional.

A segunda parte foca-se nos aspetos práticos realizados ao longo deste projeto, sendo constituída pelos capítulos 5, 6 e 7, o capítulo 5 dedica-se a explicar o modo de funcionamento da aplicação informática desenvolvida e a confirmar o bom funcionamento da mesma, o capitulo 6 apresenta um caso de estudo de um projeto de uprating de uma linha aérea fornecida pela REN.

O trabalho foi realizado nas instalações da empresa *Grupo Cabelte S.A.*, no departamento de desenvolvimento e inovação, em Arcozelo.

Abstract

In this project is presented the work carried out, in order to analyze the feasibility of uprating the conductors of an overhead line, as well as the development of a computer application, held in Microsoft Access in conjunction with Visual Basic for Applications, allowing perform the mechanical, electrical and thermal calculations for a overhead line in a simplistic way.

This work is divided into two distinct parts. The first part relates essentially to the theoretical bases of the project, and the chapters that make up this part are all chapters between 1 and 4. In these chapters is referred all data about HTLS conductors, the formulation method of electrical, mechanical and thermal calculations, and an explanation of the national grid.

The second part focuses on the practical aspects conducted throughout this project, consisting of Chapters 5, 6 and 7, Chapter 5 is devoted to explaining how to operate the developed computer application and confirm its functions properly, the chapter 6 presents a case study of a uprating project of an overhead line provided by REN.

The work was carried out at the company Cabelte in the department of development and innovation in Arcozelo.

Agradecimentos

Começo por agradecer ao Professor José Neves dos Santos, por todo o apoio que me deu, pela disponibilidade e pelos conselhos dados, e à Engenheira Marcela Teixeira, da *Cabelte S.A.*, do Departamento de Inovação e Desenvolvimento, por ter aceitado orientar-me neste projeto, pelo apoio prestado, pelos conhecimentos transmitidos e pela disponibilidade que sempre teve em esclarecer as minhas dúvidas.

Agradeço também a toda a Equipa do Departamento de Inovação e Desenvolvimento, por toda a paciência, disponibilidade e simpatia demonstrada que tornou a integração no ambiente empresarial agradável.

Gostaria de agradecer também ao Professor António Machado e Moura, por toda a documentação facilitada durante a realização deste projeto e pela ajuda prestada antes da sua iniciação.

Aos meus pais, que sempre me proporcionaram as melhores condições para atingir os meus objetivos, pela compreensão, paciência e apoio com que nunca me faltaram.

Agradeço por fim aos meus amigos, irmã e namorada, pelo convívio, pela ajuda e pela motivação que sempre me deram durante o decorrer do curso.

Índice

Resumo ..... **i**

Abstract ..... **iii**

Agradecimentos ..... **v**

Índice ..... **vii**

Lista de figuras ..... **x**

Lista de tabelas ..... **xii**

Abreviaturas e Símbolos ..... **xiv**

Capítulo 1 ..... **1**

Introdução 1
1.1 - Motivação 1
1.2 - Objetivos do projeto de dissertação 2
1.3 - Grupo Cabelte, S.A. 3

Capítulo 2 ..... **5**

Linhas aéreas - Bases teóricas 5
2.1 - Linhas elétricas 5
2.2 - Cabos de fase convencionais 6
2.2.1 - Constituição 6
2.2.2 - Materiais 7
2.2.3 - Construção/Tipo de cabos 8
2.2.4 - Efeito de coroa 11
2.3 - Cabos de guarda 11
2.4 - Isoladores 12
2.4.1 - Cadeias de isoladores em amarração 13
2.4.2 - Cadeias de isoladores em suspensão 14
2.5 - Apoios 16
2.6 - Maciços de fundação 16
2.7 - Rede de terras 17

Capítulo 3 ..... **19**

Cabos HTLS 19
3.1 - Introdução a cabos HTLS 19
3.2 - Perda de tração devido a recozimento 20

3.3 - Princípio de funcionamento 20
3.4 - Materiais 22
3.5 - Cabos HTLS: Aspectos construtivos 23
3.5.1 - Cabos GAP (GTACSR e GZTACSR) 24
3.5.2 - Cabos ACSS 25
3.5.3 - Cabos ZTACIR 27
3.5.4 - Cabos ACCC 28
3.5.5 - Cabos ACCR 29
3.6 - Comparação entre cabos convencionais e cabos HTLS 30
3.7 - Acessórios para cabos HTLS 31
3.8 - Instalação de cabos especiais 33
3.9 - Ensaios em cabos HTLS 34
3.9.1 - Ensaio Flecha/Tensão vs. Temperatura de ensaio 34
3.9.2 - Ensaio de rotura 35
3.9.3 - Ensaio de resistência em corrente alternada 35
3.9.4 - Ensaio de comportamento térmico do isolamento e acessórios 36

Capítulo 4 37

Cálculos de linhas aéreas de Alta Tensão 37
4.1 - Cálculo mecânico 37
4.1.1 - Tensões mecânicas máximas aplicadas aos cabos 38
4.1.2 - Estados atmosféricos 38
4.1.3 - Força do vento 39
4.1.4 - Coeficientes de sobrecarga 40
4.1.5 - Vão crítico e vão equivalente 42
4.1.6 - Estado mais desfavorável 43
4.1.7 - Equação de estados 43
4.1.8 - Determinação das flechas 44
4.2 - Cálculo elétrico 46
4.2.1 - Intensidade de corrente 46
4.2.2 - Resistência elétrica 46
4.2.3 - Perdas de energia na linha 48
4.2.4 - Reatância 49
4.2.5 - Queda de Tensão 50
4.2.6 - Capacidade 51
4.2.7 - Suscetância 51
4.2.8 - Condutância 52
4.2.9 - Impedância 52
4.2.10 - Admitância 52
4.2.11 - Impedância característica 53
4.3 - Cálculo Térmico 53
4.3.1 - Perdas de calor por convecção 54
4.3.2 - Perdas de calor irradiadas 56
4.3.3 - Ganho de calor solar 56

Capítulo 5 61

Programa de cálculo Elétrico, Térmico e Mecânico 61
5.1 - Interface para trabalho 61
5.2 - Teste do programa 63

Capítulo 6 67

Caso de estudo 67
6.1 - Objetivo 67
6.2 - Regulamentação 68
6.3 - Características da linha 68
6.4 - Características dos cabos 70
6.5 - Cálculo térmico 71
6.6 - Cálculo mecânico 72

6.7 - Cálculo elétrico 76
6.8 - Avaliação do uprating 80
6.8.1 - Análise dos resultados do cálculo mecânico 80
6.8.2 - Análise dos resultados do cálculo elétrico 82
6.8.3 - Conclusões da análise 83

Capítulo 7 85

Conclusões 85

Referências 87

Anexo A – Valores intermédios cálculo mecânico para os vários cabos 89

Anexo B – Vãos desnivelados (L_1) 91

Anexo C – Metodologias seguidas pela aplicação informática 92

Anexo D – Peças desenhadas 96

Lista de figuras

Figura 2.1 – Constituição de um cabo. 6

Figura 2.2 – Constituição de um cabo AAC. 8

Figura 2.3 – Constituição de um cabo AAAC. 9

Figura 2.4 – Constituição de um cabo ACAR. 9

Figura 2.5 – Constituição de um cabo ACSR. 10

Figura 2.6 – Exemplo de um OPGW. 12

Figura 2.7 - Cadeia de isoladores em amarração [6]. 14

Figura 2.8 - Pinça de amarração. 14

Figura 2.9 - Cadeia de isoladores em suspensão [6]. 15

Figura 2.10 - Pinça de suspensão. 15

Figura 3.1 – Evolução da flecha num cabo HTLS [9]. 21

Figura 3.2 – Constituição de um cabo tipo GAP. 24

Figura 3.3 – Constituição de um cabo tipo ACSS. 25

Figura 3.4 – Constituição de um cabo tipo ZTACIR. 27

Figura 3.5 – Constituição de um cabo tipo ACCC. 28

Figura 3.6 – Constituição de um cabo tipo ACCR. 29

Figura 3.7 – Comportamento da flecha com o aumento da temperatura [18]. 31

Figura 3.8 – Pinça de amarração [19]. 32

Figura 3.9 – Pinça de suspensão. 32

Figura 3.10 – "grips" convencionais e Chicago "grips". 33

Figura 3.11 – Ensaio Flecha/Tensão vs. Temperatura. 34

Figura 3.12 – Ensaio de rotura. 35

Figura 3.13 – Ensaio de resistência em corrente alternada. 36

Figura 3.14 – Ensaio de comportamento térmico do isolamento e acessórios. 36

Figura 4.1 – Esquema de forças aplicadas num cabo [6]. 41

Figura 4.2 – Árvore de decisão [7]. 43

Figura 4.3 – Vãos em patamar. 45

Figura 4.4 – Vãos em declive. 45

Figura 4.5 – Geometria dos cabos de uma linha dupla. 50

Figura 5.1 – Exemplo de formulário para cálculo mecânico. 62

Figura 5.2 – Exemplo de formulário para controlo de base de dados. 63

Figura 6.1 – Comprimento dos braços nas famílias de apoios. 69

Figura 6.2 – Comprimento das flechas para os vários cabos do vão 1 ao 13. 80

Figura 6.3 – Comprimento das flechas para os vários cabos do vão 14 ao 26. 80

Figura 6.4 – Comparação das catenárias no vão 2. 81

Figura 6.5 – Perdas de potência na linha. 82

Figura 6.6 – Quedas de tensão na linha. 82

Figura 6.7 – Exemplo da forma final da linha, entre os apoios 145 e 148, após a realização do uprating. 83

Lista de tabelas

Tabela 2.1 — Características do alumínio [2]. 7

Tabela 2.2 — Características das almas. 8

Tabela 3.1 — Características dos condutores HTLS [2]. 22

Tabela 3.2 — Características das almas especiais. 23

Tabela 3.3 — Características dos cabos GAP em comparação ao ACSR. 24

Tabela 3.4 — Características do cabo ACSS em comparação ao ACSR. 26

Tabela 3.5 — Características do cabo ZTACIR em comparação ao ACSR. 27

Tabela 3.6 — Características do cabo ACCC em comparação ao ACSR. 28

Tabela 3.7 — Características do cabo ACCR em comparação ao ACSR. 30

Tabela 4.1 — Pressão dinâmica do vento em função da altura e da zona [4]. 40

Tabela 4.2 — Coeficiente de Termo resistividade [2]. 47

Tabela 4.3 — Fator de calor solar em relação a altitude [23]. 57

Tabela 4.4 — Coeficientes para a equação [23]. 57

Tabela 4.5 — Constante de azimute solar [23]. 59

Tabela 5.1 — Características do cabo ACSR “BEAR”. 63

Tabela 5.2 — Características do cabo ACSR “BEAR”. 64

Tabela 5.3 — Dados para o cálculo térmico. 65

Tabela 5.4 — Exemplo de Cálculo Térmico. 65

Tabela 6.1 — Características dos apoios ao longo da linha. 68

Tabela 6.2 — Dados da linha. 69

Tabela 6.3 — Características dos cabos HTLS. 71

Tabela 6.4 — Dados para o cálculo térmico. 72

Tabela 6.5 — Temperatura nominal dos cabos. 72

Tabela 6.6 — Cálculo mecânico para os vários cantões (ACSR 325 “BEAR”). 73

Tabela 6.7 — Cálculo mecânico para os vários cantões (GTACSR-342). 73

Tabela 6.8 — Cálculo mecânico para os vários cantões (ACSS/AW)..... 74

Tabela 6.9 — Cálculo mecânico para os vários cantões (ACCR 556-T16)..... 74

Tabela 6.10 — Flechas para os vários cabos à temperatura normal de funcionamento. 75

Tabela 6.11 — Dados do cálculo elétrico para as famílias de apoio (ACSR 325 “BEAR”). 76

Tabela 6.12 — Dados finais do cálculo elétrico (ACSR 325 “BEAR”). 77

Tabela 6.13 — Dados do cálculo elétrico para as famílias de apoio (GTACSR-342). 77

Tabela 6.14 — Dados finais do cálculo elétrico (GTACSR-342)..... 77

Tabela 6.15 — Dados do cálculo elétrico para as famílias de apoio (ACSS/AW). 78

Tabela 6.16 — Dados finais do cálculo elétrico (ACSS/AW). 78

Tabela 6.17 — Dados do cálculo elétrico para as famílias de apoio (ACCR 556-T16). 79

Tabela 6.18 — Dados finais do cálculo elétrico (ACCR 556-T16). 79

Abreviaturas e Símbolos

Lista de abreviaturas (ordenadas por ordem alfabética)

AGS	Armor grip suspensions
AT	Alta Tensão
EDS	Every-Day Stress
HTLS	High-Temperature Low-Sag
IACS	International Annealed Copper Standard
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
REN	Redes Energéticas Nacionais
RSLEAT	Regulamento de Segurança de Linhas Elétricas de Alta Tensão
TAL	Thermal-resistant aluminium alloy
ZTAL	Super Thermal-resistant aluminium alloy

Capítulo 1

Introdução

1.1 - Motivação

Com o aumento do setor industrial nos países desenvolvidos em conjunto com o aumento da população e a melhoria da qualidade de vida, o consumo de energia elétrica tem aumentado de forma gradual. Como tal, as empresas produtoras de eletricidade têm que aumentar a produção de energia, de forma a satisfazer o incremento de carga.

Uma consequência direta do aumento do fornecimento elétrico são os congestionamentos na rede de transporte e distribuição. Deste modo, é necessário realizar investimentos na rede, de forma a suportar esse aumento de trânsito de potência.

A primeira possibilidade de investimento sempre que é necessário aumentar a capacidade de transporte de uma rede é a criação de novas linhas, mas tal investimento apresenta vários problemas. Para começar temos o problema de saturação do terreno. Devido ao número cada vez maior de linhas os terrenos para a criação de linhas começam a escassear, o que cria dificuldades na obtenção de licenças para a criação de novas linhas aéreas. Outro problema causado pelo aumento do número de linhas aéreas é o impacto ambiental e visual negativo; ainda é importante referir que o período de tempo, entre o momento em que é necessário o aumento da potência elétrica até à conclusão da linha pode ultrapassar uma década. A construção de novas linhas envolve também um custo demasiado elevado, o que torna esta hipótese de investimento uma escolha muito indesejada.

Outra solução de investimento seria aumentar a secção dos cabos, mas tal hipótese apresenta demasiados inconvenientes, pois uma maior secção pressupõe maiores esforços mecânicos sobre os apoios e consequentemente obrigaria ao reforço de apoios, fundações e acessórios. Isto representa maiores custos e ainda torna necessário a obtenção de licenças.

O aumento da tensão de exploração também é uma hipótese viável de aumentar a capacidade de transporte de uma linha, mas esta é uma solução dispendiosa, devido ao fato de a linha requerer um novo projeto e as subestações terem de se adaptar à nova tensão.

Considerando todos os fatores anteriores, pode-se concluir que nenhuma opção é totalmente favorável, pois todas elas necessitam de reforçar a linha. Como tal, foi desenvolvida uma nova tecnologia de cabos que apresenta a capacidade de transportar uma maior quantidade de energia com a mesma secção que um cabo convencional. Estes cabos

são denominados por cabos de elevada capacidade ou cabos HTLS (alta temperatura e baixa flecha: *High - Temperature and Low -Sag conductors*). O uso deste tipo de cabos permite o aumento da capacidade de transporte de uma linha, sem que sejam necessárias grandes alterações nos apoios, resultando então em tempos de execução mais reduzidos e menor impacto visual e ambiental. Embora esta solução seja bastante atrativa e preferível em comparação com as restantes hipóteses de aumento de capacidade de transporte, a sua aplicação tem sido bastante reduzida devido aos elevados custos dos cabos HTLS.

1.2 - Objetivos do projeto de dissertação

O tema de dissertação é o estudo de cabos aéreos de elevada capacidade, também denominados por cabos HTLS e a avaliação de um "uprating" de uma linha aérea convencional, através do dimensionamento elétrico e mecânico. Foi necessário o desenvolvimento de uma aplicação informática que realizasse os dimensionamentos de forma a facilitar a análise do projeto de uprating.

Os objetivos pretendidos pelo *Grupo Cabelte, S.A.* para este projeto de dissertação em ambiente industrial são os seguintes:

- Inventariação das principais soluções para os cabos nus de linhas aéreas de elevada capacidade de transporte e reduzida flecha. Cabos e acessórios;
- Desenvolvimento de uma aplicação informática que permita avaliar a exequibilidade de um "uprating" da linha convencional através da utilização destes cabos, mediante estudo elétrico e mecânico da linha;
- Caso de aplicação para os cabos ACSS e cabos GTACSR;
- Elaboração de um manual contendo toda a informação relevante associada aos pressupostos, parâmetros e cálculos da aplicação que permita a sua gestão e manutenção.

O interesse do grupo neste novo tipo de tecnologias justifica-se pelo fato de existir atualmente uma maior necessidade de transportar energia de forma mais eficiente e de uma forma mais simplista. Como estes cabos permitem aumentar a capacidade de transporte das redes sem reforçar de estruturas o seu número de encomendas tem vindo a subir de forma gradual. O *Grupo Cabelte, S.A.* como tal deseja com esta tese aprofundar os seus conhecimentos na aplicação, construção e funcionamento destes cabos.

1.3 - Grupo Cabelte, S.A.

O *Grupo Cabelte S.A.*, tem como principal atividade industrial o fabrico de cabos de energia isolados de baixa, média e alta tensão, cabos nus para linhas aéreas, cabos de telecomunicações em cobre e fibra ótica, cabos para a indústria automóvel e cabos para aplicações especiais.

Para o desenvolvimento da sua atividade de produção possui três pólos industriais:

Dois em Portugal (Vila Nova de Gaia e Vila Nova de Famalicão) e, um em Espanha (Pamplona).

Relativamente à gama de produtos mais diretamente ligada com o projeto de dissertação, cabos nus para linhas aéreas, o Grupo possui uma experiência de cerca de 20 anos, sendo um dos principais fornecedores das companhias elétricas de Portugal e Espanha.

A sua gama de fabrico é constituída por cabos ACSR, AAC, AAAC, AACSR, ACSR/AW, ACAR e os OPGW. A empresa também espera expandir o seu negocio e começar o fabrico de cabos HTLS, mais concretamente o ACSS e o GTACSR.

Capítulo 2

Linhas aéreas - Bases teóricas

2.1 - Linhas elétricas

Uma linha elétrica é um circuito constituído por cabos elétricos, que têm como objetivo o transporte de corrente elétrica, tanto contínua como alternada, desde a sua produção até aos consumidores.

Quando o transporte de energia elétrica é realizado em corrente alternada, é possível ser feito em sistemas trifásicos ou monofásicos. Nos trifásicos se o sistema é equilibrado, apenas se tem em consideração uma das fases, pois devido ao seu equilíbrio o que se verifica para uma fase, verifica-se nas restantes fases. Quando estamos perante uma linha aérea de alta tensão, trata-se geralmente de um circuito trifásico de corrente alternada.

Nas linhas aéreas de alta tensão o isolamento é feito pelo ar, ou seja, os cabos não são revestidos com materiais isolantes (polímeros) encontrando-se "nus". O custo de um cabo nu de alta tensão é muito mais baixo que o de um cabo isolado, o que constitui a razão principal para que as linhas aéreas sejam o tipo de sistema de transmissão de energia elétrica em grande escala mais implementado.

Nas linhas de transporte de energia existem quatro grandezas típicas, designadas por constantes físicas elétricas. Estas grandezas são a resistência, o coeficiente de auto-indução, a capacidade e condutância [1].

As linhas aéreas encontram-se divididas em linhas curtas, médias, e longas:

- As linhas curtas são identificadas por terem um comprimento inferior a 100 km, e por a sua tensão ser inferior a 100 kV.
- As linhas longas são identificadas por terem um comprimento superior a 100 km, e por a sua tensão ser superior a 100 kV.
- É considerado por linha média toda a linha que tenha características mistas das linhas curtas e longas, ou seja, que apresente comprimentos superiores a 100 km, e tensões inferiores a 100 kV, ou vice-versa.

Uma linha é constituída essencialmente por: cabos de fase; cabos de guarda; isoladores; apoios; fundações e rede de terras.

2.2 - Cabos de fase convencionais

Os cabos de fase são os elementos principais de uma linha elétrica, pois é a através deles que a corrente é transportada até às cargas.

Os cabos de linhas aéreas de alta tensão são, regra geral, cabos nus, ou seja sem isolamento, podendo ser constituídos por um único metal, sendo estes cabos denominados cabos homogéneos, ou por mais de um tipo de metal, denominados cabos heterogéneos. Normalmente estes últimos são constituídos por alumínio-aço, de forma a garantir a condutividade elétrica elevada e uma maior resistência mecânica do cabo, conferidas pelo alumínio e o aço respetivamente. Os cabos homogéneos são mais implementados especialmente em subestações ou em linhas de vãos reduzidos.

2.2.1 - Constituição

Os cabos são constituídos por fios metálicos cableados em camadas concêntricas, de sentidos alternados. O número de camadas pode variar entre 1 e habitualmente 5 camadas.

Os cabos podem ser constituídos por dois metais. Um dos metais tem uma maior resistência mecânica e situa-se no centro do cabo, sendo esta parte denominado por alma. O outro tipo de metal apresenta menor resistência mecânica mas superior condutividade elétrica, situa-se na periferia do cabo. Ao longo deste projeto designamos esta parte por ”condutor”.

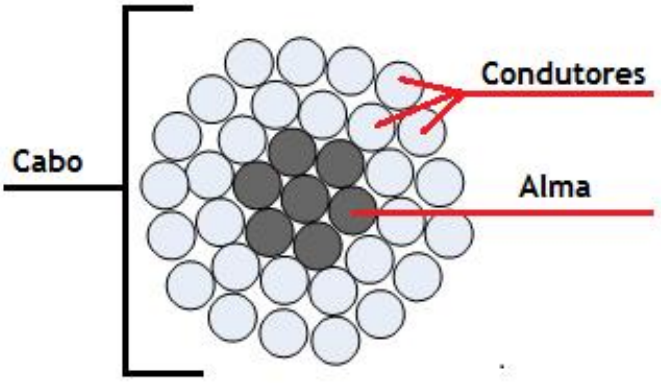


Figura 2.1 – Constituição de um cabo.

2.2.2 - Materiais

Os cabos empreendidos em linhas de transporte de AT têm na sua maioria como material condutor o alumínio.

O alumínio é o elemento metálico mais abundante na crosta terrestre; é um metal muito leve, dútil, resistente à corrosão e tem um baixo ponto de fusão, aproximadamente 660 °C, tendo uma multiplicidade de aplicações em várias áreas [2].

O alumínio tem elevadas condutividades elétricas e térmicas, embora ainda sejam inferiores às do cobre. O alumínio é mais usado devido ao seu menor custo e densidade, que são bastante inferiores ao cobre, permitindo uma maior distância entre os apoios. O metal na presença de oxigénio fica revestido 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 elevado quando exposto a condições atmosféricas normais.

Nos cabos de alumínio das linhas aéreas de alta tensão são usados tanto fios de alumínio como ligas de alumínio.

O alumínio 1350 é a forma mais utilizada para condutores elétricos, apresentando-se no mínimo constituído por 99,5% de alumínio, ou seja é um metal altamente puro e como tal não é considerado uma liga de alumínio. Este tipo de alumínio tem uma condutividade de 61% IACS (*International Annealed Copper Standard*). O padrão IACS refere-se ao valor da resistividade do cobre recozido a 20°C, considerado 100% IACS para a resistividade de 17,141 $\Omega mm^2/km$ [2].

O aumento da resistência mecânica é conseguido através da introdução de certos elementos, como ferro, silicone, magnésio, cobre, zinco, entre outros e embora a liga de alumínio final tenha menor condutividade que o alumínio 1350, o seu uso pode ser justificado pelo aumento da resistência à tração. A liga de alumínio mais empreendida para transporte de energia é a 6201-T81 [2].

Tabela 2.1 — Características do alumínio [2].

Designação	Carga de rotura mínima [daN/mm^2]	Condutividade (%IACS)	Temperatura de funcionamento admissível (°C)
1350-H19	16,2	61	90
6201-T81	16,2	52,5	90

A grande parte dos cabos nus apresenta uma alma na sua constituição. A alma de um cabo é constituída por uma material metálico localizado na zona central do cabo, ou seja, a alma é o núcleo do cabo e tem por objetivo suportar parte do peso do cabo de forma a aumentar a sua resistência à tração. A alma normalmente é feita de materiais mais rígidos que o

alumínio. Aplicando uma alma nos cabos aéreos podemos obter menores flechas nos vãos de uma linha, sem diminuir a sua condutividade.

Na tabela 2.2 especificam-se os vários materiais que normalmente constituem as almas em conjunto com a sua tração máxima, o seu coeficiente de dilatação térmica e o seu módulo de elasticidade.

Tabela 2.2 — Características das almas.

Material	Tensão de rotura [daN/mm^2]	Coeficiente de dilatação (x10-6/°C)	Módulo de elasticidade (N/mm^2)
Aço revestido a alumínio	12,5 – 13,5	11,8	21000
Aço galvanizado	12,5 – 13,5	11,5	15200

2.2.3 - Construção/Tipo de cabos

- AAC

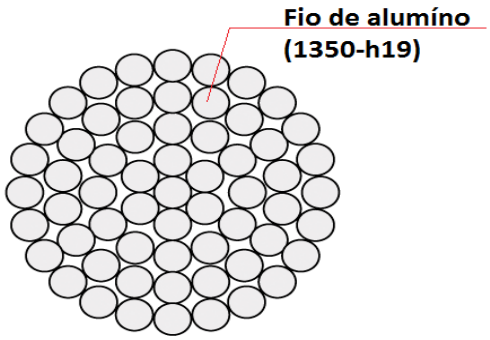


Figura 2.2 – Constituição de um cabo AAC.

Os cabos AAC (*All Aluminium Conductor*) são integralmente formados por alumínio com elevado grau de pureza, do tipo 1350-H19. Este tipo de cabo é formado por fios de alumínio, enrolados em camadas concêntricas. Devido ao fato de ele usar somente alumínio de elevada pureza para suportar o seu peso, implica que a sua flecha seja maior; assim o AAC é mais utilizado para áreas urbanas onde o espaçamento é curto e os apoios se encontram próximos uns dos outros [3].

A vantagem do uso deste tipo de cabos é a elevada resistência à corrosão, o que faz com que ele seja aplicado em zonas costeiras. Os AAC foram desenvolvidos devido à corrosão galvânica que os cabos de tipo ASCR estão suscetíveis.

- AAAC

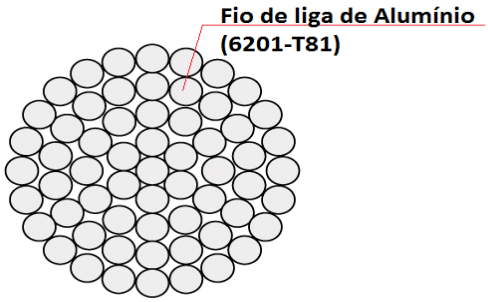


Figura 2.3 – Constituição de um cabo AAAC.

Os cabos AAAC (*All Aluminium Alloy Conductor*) são completamente formados por fios de liga de alumínio do tipo 6201-T81, que são ligas de alumínio de elevada resistência à tração, enrolados em camadas concêntricas. Foram criados para satisfazer a necessidade de um cabo económico para aplicações gerais que requerem maior resistência à tração do que obtida através dos condutores de alumínio de elevada pureza, como o 1350-H19. Uma vez que estes são constituídos por ligas de alumínio têm menor condutividade que os AAC [3].

Uma vantagem do uso deste tipo de cabos é a elevada resistência à corrosão, o que faz com que ele seja aplicado em zonas costeiras, tal como o AAC.

- ACAR

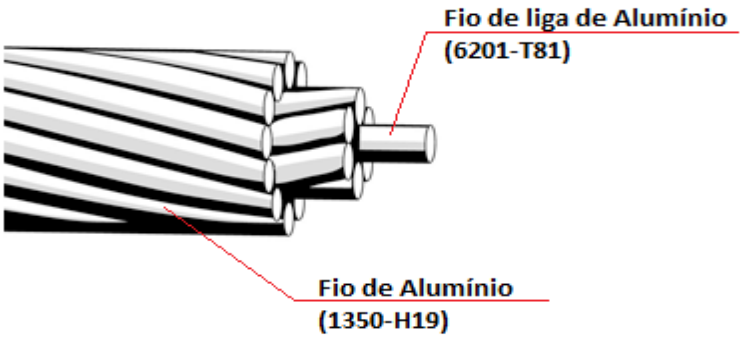


Figura 2.4 – Constituição de um cabo ACAR.

Os cabos ACAR (*Aluminium Conductor Alloy Reinforced*) são formados por condutores de alumínio de elevado grau de pureza do tipo 1350-H19 enrolados á volta de uma alma constituída de liga de alumínio do tipo 6201-T81 [3].

Como o seu peso se encontra suportado pela alma de liga de alumínio, este tipo de cabos tem uma resistência à tração superior aos AAC, podendo ser aplicados em linhas que possuem vãos maiores.

Como estes cabos têm na sua constituição alumínio de um elevado grau de pureza, eles apresentam melhor condutividade que os cabos AAAC.

Outra vantagem do uso deste tipo de cabos é a elevada resistência à corrosão em relação ao ACSR.

Pode-se concluir que este cabo é uma junção do AAC com o AAAC, o que faz com que se tenha as vantagens dos dois constituídos num só cabo, eliminando assim as desvantagens dos mesmos.

- ACSR

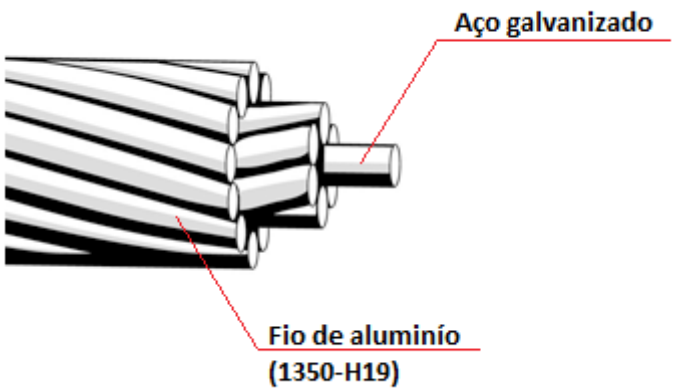


Figura 2.5 – Constituição de um cabo ACSR.

Os cabos ACSR (*Aluminium Conductor Steel Reinforced*) são formados por condutores de alumínio de elevado grau de pureza, do tipo 1350-H19, enrolados à volta de uma alma constituída por aço galvanizado. O núcleo pode ser constituído por um fio ou por um conjunto de fios, dependendo do tamanho do condutor. A alma pode estar disponível em aço de classe A, B ou C de galvanização, consoante o grau de resistência à corrosão desejada. Para uma proteção adicional à corrosão os cabos podem ser impregnados por uma graxa de proteção [3].

Os cabos ACSR são reconhecidos pela sua economia, fiabilidade e pela sua elevada resistência à tração. Os cabos ACSR combinam o baixo peso e a elevada condutividade do alumínio de elevada pureza, com a elevada resistência à tração do aço. Estes cabos podem fornecer uma maior quantidade de energia, com uma menor flecha e maiores tempos de vida que os outros cabos de linhas aéreas de AT convencionais.

Devido a utilizarem uma alma de aço, estes cabos são mais suscetíveis à corrosão do que os cabos constituídos somente de alumínio.

Existem variações do ACSR sendo elas o AACSR (Aluminium Alloy Conductor Steel Reinforced) ou o ACSR/AW (Aluminium Conductor, Aluminium Clad Steel Reinforced), que têm propriedades mecânicas semelhantes ao ACSR mas oferecem melhor condutividade e

melhor resistência à corrosão, devido ao fato de a alma se encontrar revestida por uma película de alumínio.

2.2.4 - Efeito de coroa

O efeito de coroa é um fenómeno associado a grande parte dos dispositivos elétricos, incluindo as linhas aéreas de alta tensão. Este fenómeno acontece principalmente em linhas de muito alta tensão, quando o campo elétrico na superfície dos cabos atinge um limiar no qual o dielétrico do ar se rompe, criando assim pequenas descargas em torno do cabo. Estas descargas provocam perdas de potência elétrica, que causam prejuízos às empresas de transporte de energia elétrica; logo, as empresas de transporte devem ter em consideração o efeito de coroa para linhas de tensão superior a 200 kV e tentar minimiza-lo. Como este fenómeno está dependente do campo elétrico, o mesmo aumenta com o nível de tensão e diminui com o aumento da secção e do diâmetro do cabo.

Durante estados atmosféricos nefastos, ou seja, em condições em que haja presença de água na linha, como neve, chuva e nevoeiro, o efeito de coroa é mais elevado, podendo o zumbido que é provocado em consequência de este fenómeno tornar-se audível nas imediações da linha.

A "quantidade de coroa" é uma função que relaciona a tensão da linha, o diâmetro dos cabos, a distância dos cabos entre si, o estado dos cabos, da elevação acima do mar e do estado atmosférico a que a linha se encontra.

Existem várias maneiras de diminuir o efeito de coroa, sendo elas:

- Aumentar o diâmetro do cabo;
- Aumentar o espaçamento entre cabos;
- Utilizar anéis de coroa;
- Escolher uma geometria adequada.

2.3 - Cabos de guarda

Estes cabos têm como função a proteção das linhas aéreas de alta tensão e por diversas vezes, têm também a função de comunicação de dados.

Estes cabos têm uma constituição semelhante às dos cabos de fase, sendo utilizados os mesmos materiais na sua construção, que tem como função ligar as várias torres adjacentes à rede de terra e também protegem os cabos de alta tensão de descargas atmosféricas.

A sua secção deve ser estabelecida para que a temperatura não ultrapasse 170 °C quando atravessada durante 0,5 s por uma corrente igual a 75 % da corrente de defeito fase-terra. A temperatura final máxima admissível no curto-circuito para cabos de guarda em alumínio-aço é de 200 °C, e para cabos em aço é de 400 °C, sendo que nos cálculos de aquecimento sofrido pelos cabos será considerada uma temperatura inicial de 30 °C [4]. Esta temperatura pode variar caso tenha fibras óticas incorporadas no cabo.

O cabo de guarda permite a inclusão de fibra ótica na sua constituição, utilizada na transferência de dados a alta velocidade em longas distâncias. Podendo ser utilizada para fins próprios de controlo da linha, ou pode até ser vendida ou alugada a terceiros para servir como uma conexão de fibra de alta velocidade entre cidades.

Estes cabos também contribuem na redução da indução em circuitos de telecomunicações estabelecidos na vizinhança das linhas.

Os cabos mais utilizados para a função de proteção e transferência de dados, são os OPGW (*Optical Ground Wire*). Um cabo OPGW contém uma estrutura tubular com uma ou mais fibras óticas dentro da dita estrutura, sendo rodeado por camadas de aço e fios de alumínio.

Quando não há interesse em transferir dados entre linhas o cabo de guarda mais implementado é o ACSR.



Figura 2.6 – Exemplo de um OPGW.

2.4 - Isoladores

Os isoladores têm como principal função evitar a passagem de corrente dos cabos aos respetivos apoios, aos quais estão ligados. Os isoladores são fabricados em material cerâmico ou vidro, devendo ser dimensionados corretamente de forma a evitar o contornamento do isolamento, contornamento este que acontece geralmente devido aos seguintes fenómenos [5]:

- Condutividade através da massa do isolador: a corrente elétrica circula através da massa do isolador até ao apoio, mas uma vez que o valor da corrente em circulação é desprezável este incidente não é grave;
- Condutividade superficial: devido ao depósito de impurezas, como humidade e poeiras à superfície dos isoladores, pode acontecer que uma corrente circule pela

superfície do isolador. É possível minimizar este fenómeno utilizando isoladores com formas e dimensões adequadas;

- Perfuração da massa do isolador: deve-se à acumulação de humidade e poeiras na superfície dos isoladores. A probabilidade deste fenómeno acontecer aumenta com o aumento da tensão e tem efeitos nefastos graves, uma vez que a corrente que circula já não toma um valor desprezável;
- Contornamento: este fenómeno acontece quando se forma um arco elétrico através do ar entre o cabo e o apoio, pois a rigidez dielétrica do ar é por diversas vezes insuficiente para evitar o seu aparecimento.

A escolha dos isoladores é condicionada pela zona onde a linha será implementada, no que diz respeito à poluição, pois a poluição agrava o perigo dos isoladores serem contornados.

Nas linhas podem ser implementados dois tipos de isoladores, sendo eles os isoladores fixos ou as cadeias de isoladores. Isoladores fixos têm sido cada vez menos implementados em relação à cadeia de isoladores mesmo sendo mais baratos. As vantagens do uso de cadeia de isoladores prendem-se com o fato de possuírem uma boa flexibilidade, o que amortece os esforços mecânicos da linha. As cadeias de isoladores apresentam também vantagens no que se refere à rotura de um isolador, pois a mesma não implica a substituição da cadeia toda, sendo necessário substituir o isolador em questão.

Numa linha aérea são aplicáveis dois tipos de cadeias de isoladores, sendo elas as cadeias de amarração e cadeias de suspensão.

2.4.1 - Cadeias de isoladores em amarração

As cadeias de amarração fazem a ligação entre o cabo e o apoio numa posição horizontal. Estas cadeias são usadas normalmente em apoios de ângulo, apoios de fim de linha e apoios em derivação, ou seja são utilizadas nos apoios sujeitos a elevados esforços mecânicos. As cadeias em amarração podem ser ascendentes ou descendentes conforme a colocação das linhas [6]. Com a aplicação deste tipo de cadeias, os deslocamentos da cadeia de isoladores devido ao estado atmosférico é praticamente nulo.

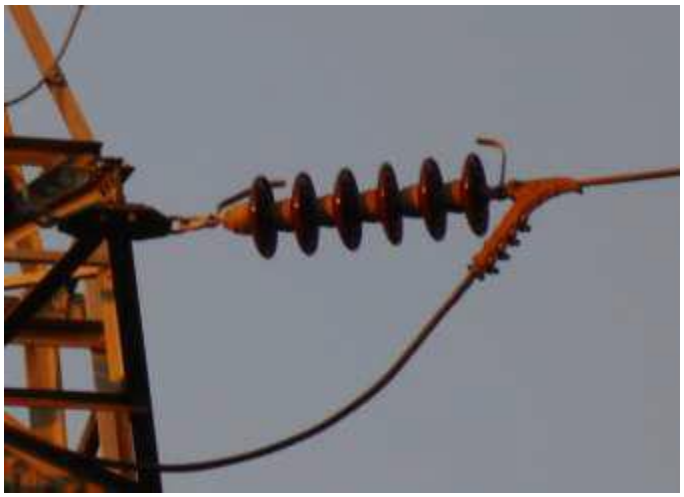


Figura 2.7 - Cadeia de isoladores em amarração [6].

Os cabos de fase e cabos de guarda ficam presos às cadeias em amarração através de um acessório designado por pinça de amarração. Este tipo de cadeias ainda se caracteriza pelo fato dos cabos terem que ser cortados e fixos em cada um dos lados do apoio.

A continuidade elétrica do circuito é garantida por um troço de cabo designado por "jumper", sendo este ligado a cada pinça de amarração.



Figura 2.8 - Pinça de amarração.

2.4.2 - Cadeias de isoladores em suspensão

As cadeias de suspensão fazem a ligação entre o cabo e o apoio numa posição vertical. Estas cadeias encontram-se paralelas ao apoio, onde os cabos das linhas se encontram suspensos. São utilizadas principalmente em apoios de alinhamento, ou seja quando os esforços mecânicos exercidos no apoio não são suficientemente elevados [7].

Com a aplicação deste tipo de cadeias, os deslocamentos da cadeia de isoladores devido ao estado atmosférico já não é nulo, pois estas cadeias compensam eventuais diferenças de

tensão mecânica. A maior liberdade de movimento a que os cabos vão estar expostos pode fazer com que os mesmos se aproximem perigosamente uns dos outros, ou até dos apoios.

Este tipo de cadeias apresenta ainda a vantagem de serem mais económicas que as cadeias de amarração. Esta redução de preço acontece pois só é necessária uma cadeia em suspensão em cada apoio, enquanto nas cadeias de amarração são necessárias duas em cada apoio.

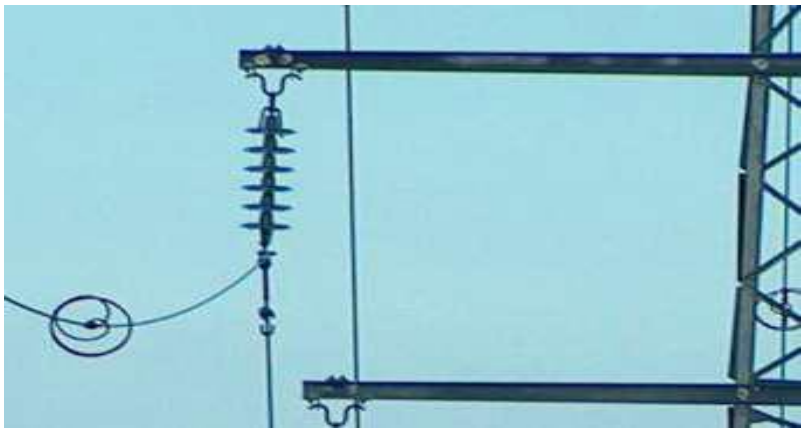


Figura 2.9 - Cadeia de isoladores em suspensão [6].

Os cabos ficam presos às cadeias em suspensão através de um acessório designado por pinça de suspensão. Ao contrário do que acontecia nas pinças de amarração, o cabo não necessita de ser cortado para efetuar a ligação, o que é uma vantagem.

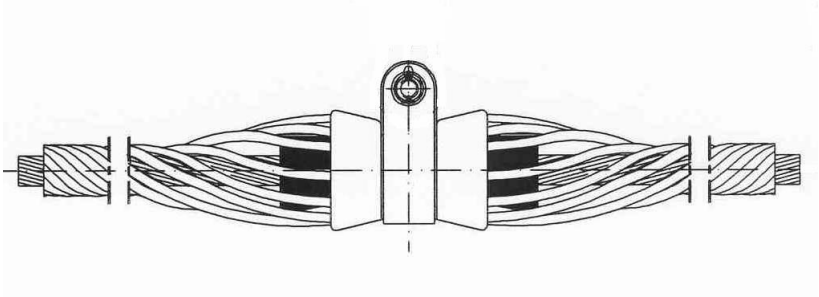


Figura 2.10 - Pinça de suspensão.

2.5 - Apoios

Os apoios, tal como o próprio nome indica, tem com principal função servir de apoio às linhas, fixando a linha ao terreno através das suas fundações. Os apoios também garantem que as linhas respeitam as distâncias mínimas entre os cabos e ao espaço envolvente, nomeadamente ao solo, a árvores ou a edifícios.

Normalmente nas linhas aéreas são utilizados apoios de metal, como o aço, ou apoios de betão. Apoios metálicos têm a vantagem de poderem ser montados no local de implementação, o que facilita a sua instalação e o seu transporte. Este é um fator importante, se tivermos em atenção que diversas vezes se instalam apoios em zonas de difícil acesso.

Existem vários tipos de apoios, sendo eles [6]:

- Apoios de alinhamento;
- Apoios de ângulo;
- Apoios de reforço em alinhamento;
- Apoios de reforço em ângulo;
- Apoios de derivação;
- Apoios de reforço de derivação;
- Apoios de fim de linha.

2.6 - Maciços de fundação

Os maciços de fundação têm a função de transmitir ao solo todos os esforços resultantes do seu próprio peso e das forças exteriores que lhe estão aplicadas: forças de tração, forças provocadas devido à ação do vento, peso dos apoios e todos os outros componentes que lhe estão associados. Estes diversos esforços fazem com que os maciços possam ser solicitados à tração, compressão, torção em torno de um eixo horizontal e mesmo à flexão [6].

Os apoios de uma linha têm que ter o maciço de fundação devidamente dimensionados. O seu bom dimensionamento é importante de forma a garantir que sob o efeito das solicitações máximas, a que se encontrarem submetidos, não se verifiquem aumentos perigosos das flechas dos cabos ou não se dê o derrubamento dos apoios.

Os critérios para o dimensionamento do maciço de fundação são:

- Natureza dos terrenos;
- A responsabilidade da linha na rede elétrica;
- A altura do apoio;
- A função do apoio;
- Os esforços envolvidos.

2.7 - Rede de terras

Os apoios de uma linha devem ser individualmente ligados à terra através de um elétrodo de terra, devendo ser igualmente ligados à terra dos apoios, as estruturas metálicas dos aparelhos de corte e dos aparelhos de manobra. A rede de terras tem como função a proteção de pessoas, prevenindo a eletrocuções destas que possam eventualmente entrar em contato com o apoio no caso de existir falhas de isolamento.

A rede de terras deve garantir os seguintes requisitos [4]:

- Evitar danos nos equipamentos;
- Garantir a segurança das pessoas;
- Assegurar um nível de fiabilidade elevado na linha;
- Suportar termicamente a maior corrente de defeito possível;
- Apresentar elevada resistência mecânica e à corrosão.

Capítulo 3

Cabos HTLS

3.1 - Introdução a cabos HTLS

Os cabos HTLS são um novo tipo de cabos nus de alta tensão, que têm uma capacidade de transporte de potência muito maior do que os cabos nus convencionais, referidos anteriormente na subsecção 2.2.4.

Estes cabos apresentam baixa flecha a elevadas temperaturas ao contrário do que acontece com os cabos convencionais, que a partir de uma pré-determinada temperatura, normalmente em torno dos 90 °C, a flecha aumenta de uma maneira demasiado elevada.

Estes tipos de cabos têm um elevado interesse para aplicação em casos de "uprating" nas linhas. Define-se por "uprating" o aumento da capacidade de transporte (corrente) de uma linha, sem aumentar a sua tensão de exploração e sem realizar grandes investimentos na mesma.

Com a aplicação de cabos HTLS a maior parte dos materiais utilizados pela linha poderão manter-se, não sendo necessário reforçar os apoios, o que aconteceria caso fosse decidido aumentar a secção dos cabos convencionais de forma a suportar mais corrente. O aumento da secção implica que o cabo a implementar fique mais pesado e com maior diâmetro, o que implica um maior esforço realizado nos vários apoios da linha.

A aplicação deste tipo de cabos não precisa de licenças pois é considerada uma operação de manutenção. A introdução de cabos HTLS não aumenta o impacto visual nem ambiental, porque visualmente são semelhantes aos cabos convencionais.

Estes cabos têm outros casos de aplicação interessantes, sem ser necessariamente o aumento de corrente a circular na linha. Devido ao fato de os cabos HTLS possuírem flecha reduzida, os mesmos podem ser aplicados em vãos com níveis de flecha elevados, em que as mesmas estejam em risco de provocar danos ou de não cumprirem com o que se encontra estipulado pelas normas. Estes casos podem ser travessias de rios, passagem por cima de prédios e passagem por zonas de vegetação demasiado alta.

3.2 - Perda de tração devido a recozimento

Os cabos aéreos convencionais quando se encontram operacionais a temperaturas elevadas sofrem efeitos negativos nas características de tração e flecha. Estes efeitos acontecem devido ao efeito do recozimento do alumínio [8].

Recozimento é um processo metalúrgico que acontece no metal quando o mesmo se encontra a elevadas temperaturas. As altas temperaturas provocam o amolecimento do metal, ficando mais dútil e perdendo a sua resistência à tração.

Este processo é especialmente importante para os cabos AAC, AAAC e ACAR, pois são constituídos somente por alumínio, que apresenta uma temperatura de recozimento muito baixa, podendo o aumento da flecha devido ao aumento da temperatura ser suficiente para provocar a quebra da linha e até pôr em risco bens e pessoas.

Nos cabos ACSR, este efeito já não é tão percetível como nos restantes cabos, devido ao fato de utilizarem alma de aço para suporte mecânico. A temperatura a que o aço sofre recozimento é bastante superior à temperatura de recozimento do alumínio, mas mesmo assim, devido à perda de resistência mecânica do alumínio a altas temperaturas, a flecha do cabo pode aumentar perigosamente.

No alumínio tipicamente usado nas linhas aéreas de AT, 1350-H19, este processo inicia-se normalmente à temperatura de 90 °C, sendo então esta a temperatura máxima considerada a que um condutor pode operar sem acontecer perda de tração. A temperaturas inferiores a 90 °C este processo é ignorado.

3.3 - Princípio de funcionamento

Com o objetivo de aumentar a potência transportável pelas linhas sem ser necessário aumentar as secções dos cabos, o que implicaria um novo dimensionamento dos apoios da linha, foram desenvolvidas construções específicas que utilizam condutores que eliminam ou reduzem o efeito de recozimento dos materiais condutores.

Distinguem-se dois tipos de construção:

- Utilização de ligas de alumínio desenvolvidas para funcionarem a temperaturas elevadas sem entrar em recozimento. Estas ligas de alumínio são o TAL (*Thermal-resistant aluminium alloy*) e ZTAL (*Super Thermal-resistant aluminium alloy*);
- Utilização de alumínio já recozido no processo de produção a temperaturas acima dos 400°C. Este alumínio e denominado 1350-0 [9].

O coeficiente de dilatação térmica para os cabos convencionais, é definido pelo somatório ponderado de todos os materiais constituintes dos cabos, pois tanto a alma como o condutor aguentam com a tração mecânica imposta.

Nos cabos HTLS, com o aumento da temperatura a que o cabo está sujeito, a tração mecânica suportada pelo condutor irá ser gradualmente transferida para a alma. Isto deve-se ao fato de o coeficiente de dilatação térmica do condutor ser muito maior do que o coeficiente de dilatação térmica da alma. Assim sendo, toda a tração mecânica será

totalmente suportada pela alma, pois o alumínio ficará folgado, ficando somente a alma a suportar o peso do cabo. A partir deste ponto de transação o cabo assume somente o coeficiente de dilatação térmica da alma, fazendo com que o aumento da flecha em relação à temperatura aconteça de uma forma mais lenta. A temperatura a que esta transação acontece é definida como temperatura de joelho (*Knee-point temperature*) [9].

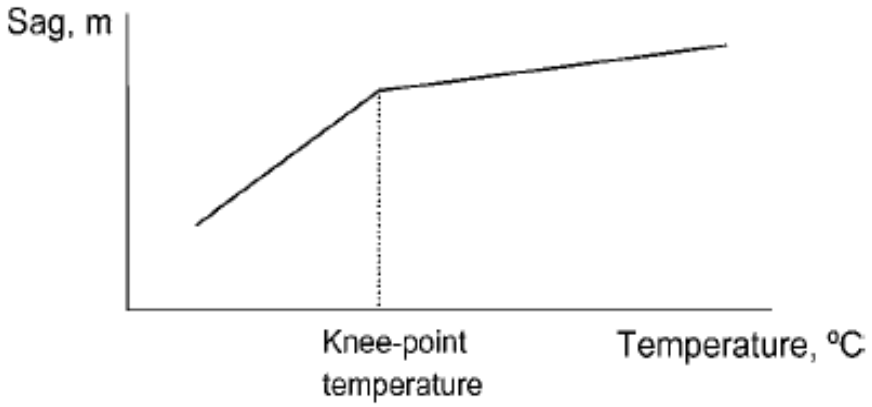


Figura 3.1 – Evolução da flecha num cabo HTLS [9].

De forma a diminuir a sua flecha a elevadas temperaturas, os cabos HTLS têm, por norma, uma temperatura de joelho inferior à temperatura de joelho do ACSR, que normalmente acontece entre os 75 °C e os 90 °C [10]. A temperatura de joelho é desprezada nos cálculos mecânicos dos cabos convencionais, pois a temperatura de joelho é semelhante à temperatura de recozimento do alumínio.

De forma a diminuir a temperatura de joelho têm sido implementados novos tipos de almas com coeficientes de dilatação térmica inferiores ao aço. Deste modo, o condutor fica em folga mais rapidamente.

A temperatura de joelho varia em função do tipo de cabo, da proporção entre as secções de alumínio e do núcleo, do comprimento do vão e da tensão a que o cabo se encontra. É muito difícil definir um valor específico de temperatura de joelho para um cabo sem submeter o mesmo a ensaios. Como tal, esse valor normalmente é definido entre intervalos [9].

3.4 - Materiais

Os cabos HTLS empreendidos em linhas de transporte de AT, tal como os cabos convencionais têm na sua maioria como material condutor o alumínio. Como foi dito na secção 3.3 estes cabos utilizam certas ligas de alumínio desenvolvidas para funcionarem a temperaturas elevadas sem entrar em recozimento.

Existem ligas metálicas, feitas à base de alumínio e zircónio, que não perdem as suas características mecânicas, tanto inicialmente com ao longo dos anos de uso, até temperaturas de 220 °C, sendo essas ligas as TAL e as ZTAL. Utiliza-se também alumínio já recozido no processo de produção a temperaturas acima dos 400°C denominado 1350-0 [9].

A tabela 3.1 apresenta as características dos condutores implementados em cabos HTLS.

Tabela 3.1 — Características dos condutores HTLS [2].

Designação	Carga de rotura mínima [daN/mm^2]	Condutividade (%IACS)	Temperatura de funcionamento admissível (°C)
1350-0	6	63	200-250
TAL	16,2	60	150
ZTAL	16,2	60	220

Os cabos HTLS são constituídos por uma alma metálica de alta resistência mecânica. Certos cabos HTLS usam o aço como material de alma, que tem características iguais às apresentadas na tabela 2.2. Recentemente têm sido implementadas almas de materiais constituídas à base de fibras de carbono e vidro e almas constituídas por fibra de alumina. Estas almas têm um peso inferior ao aço e proporcionam uma maior resistência à tração e um coeficiente de dilatação térmica menor que o aço, que faz com que a sua flecha não aumente de forma tao rápida com o aumento da temperatura em relação ao aumento originado quando se usa almas de coeficiente de dilatação térmica maior [11].

A tabela 3.2 apresenta as características das almas implementadas em cabos HTLS.

Tabela 3.2 — Características das almas especiais.

Material	Tensão de rotura [daN/mm^2]	Coeficiente de dilatação (x10-6/°C)	Módulo de elasticidade (N/mm^2)
Fibra de alumina	14,0	6,3	-
Invar revestido a alumínio	10,5 – 11,0	3,7	15500
Invar galvanizado	10,5 – 11,0	2,8	16500
Fibras de vidro e carbono	24,6	1,6	-

3.5 - Cabos HTLS: Aspectos construtivos

Os primeiros cabos HTLS a serem produzidos no mercado foram desenvolvidos no início da década de 70, no Japão e na América. No Japão, foi desenvolvido o cabo do tipo GAP, GTACSR (*Gap Type Thermal-Resistant Aluminium Alloy Conductor Steel Reinforced*). Na américa surgiu o primeiro cabo que utiliza alumínio recozido, sendo esse o cabo ACSS (*Aluminium Conductor Steel Supported*).

Já na década de 80, a liga metálica invar foi utilizada como um novo material para almas e juntamente com o desenvolvimento da liga de alumínio *ZTAL*, foi desenvolvido o cabo ZTACIR (*Super Thermal-Resistent Aluminium Alloy Conductor Invar Reinforced*). O cabo GZTACSR (*Gap Type Super Thermal-Resistant Aluminium Alloy Conductor Steel Reinforced*) também surgiu neste período de tempo.

Recentemente começaram por ser aplicados, especialmente na América do Norte, cabos com alma compósita. Esses cabos tratam-se dos ACCR (*Aluminium Conductor Composite Reinforced*) e dos ACCC (*Aluminium Conductor Composite Core*) [9].

3.5.1 - Cabos GAP (GTACSR e GZTACSR)

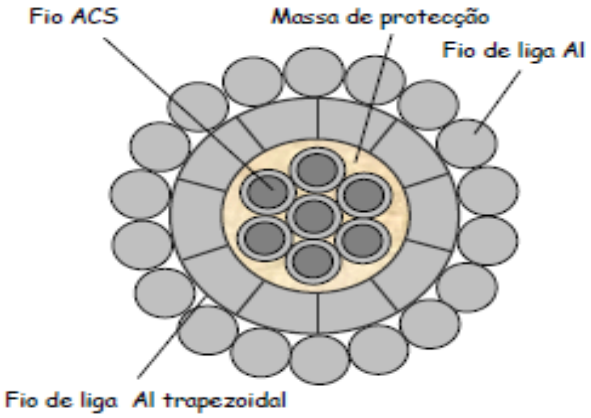


Figura 3.2 – Constituição de um cabo tipo GAP.

Os cabos GAP são constituídos por um núcleo de aço de alta resistência revestido a alumínio.

Existe um espaçamento entre a alma e os condutores que se encontra preenchido por uma massa de proteção. Os seus condutores estão divididos em duas camadas, uma de forma circular e outra de forma trapezoidal, sendo constituídas por ligas de alumínio termo-resistente (*TAL*) ou ligas de alumínio super termo-resistente (*ZTAL*). Estas ligas de alumínio são compostas principalmente por alumínio e zircónio, conseguindo manter as suas propriedades mecânicas a temperaturas elevadas. A camada interior dos condutores tem forma trapezoidal de forma a manter este espaçamento entre o núcleo e o condutor.

A presença da massa de proteção reduz o atrito entre a alma e o condutor, dando a estes cabos uma elevada capacidade de absorção de vibração. Esta redução de atrito permite que os cabos possam ser apertados apenas pelo núcleo de aço. O espaçamento entre os condutores e a alma faz com que toda a tração esteja a ser exercida no núcleo de aço. Como resultado o coeficiente de dilatação térmica é igual ao do aço desde o momento da sua instalação [12].

A seguinte tabela mostra a temperatura máxima que estes cabos suportam em comparação ao ASCR e a corrente que podem transportar tendo os cabos a mesma secção.

Tabela 3.3 — Características dos cabos GAP em comparação ao ACSR.

Designação	Temperatura máxima [°C]	Corrente máxima
ACSR	90	I_{max} do ACSR
GTACSR	150	1,6*I_{max} do ACSR
GZTACSR	220	2* I_{max} do ACSR

Como nos cabos GAP toda a tração mecânica é suportada pela alma de aço, devido ao espaçamento entre os condutores e a alma, desde a sua instalação, considera-se como temperatura de joelho a temperatura ambiente, no momento de instalação [3].

As vantagens do uso deste tipo de cabo são [3]:

- Elevada temperatura de operação;
- Elevada capacidade de transporte;
- Elevada resistência à tração;
- Baixa flecha a elevadas temperaturas;
- Tecnologia completamente comprovada.

As desvantagens são:

- Maiores cargas de gelo devido ao maior diâmetro;
- Necessita de novas técnicas de tensionamento;
- Elevado custo;
- Utiliza acessórios de fixação diferentes.

3.5.2 - Cabos ACSS

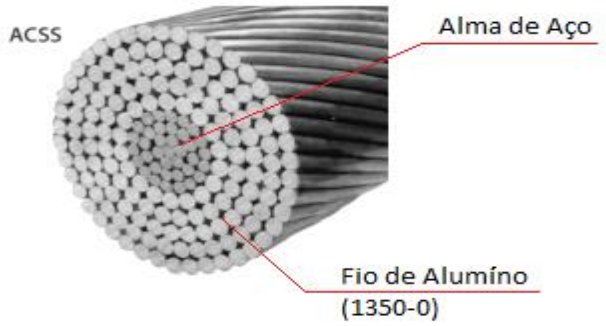


Figura 3.3 – Constituição de um cabo tipo ACSS.

O cabo ACSS é constituído por uma alma de aço, tendo como material condutor alumínio do tipo 1350-0. O alumino deste tipo já se encontra recozido, fazendo com que ele não sofra perdas de propriedades mecânicas a temperaturas elevadas [8].

A resistência à tração nos cabos ACSS é primariamente a força da alma de aço. O alumínio também contribui para a resistência à tração mas a sua resistência tem um valor bastante pequeno. Como o alumínio presente neste cabo já se encontra recozido, o aumento da temperatura não vai reduzir a resistência à tração do alumínio, o que não provoca grandes variações nas flechas. Nos cabos ACSS, a temperatura máxima é limitada pela suscetibilidade da temperatura do revestimento protetor dos fios de aço da alma e da capacidade de temperatura da aparelhagem adjacente ao cabo.

Devido à elevada dutilidade dos cabos ACSS, os acessórios de fixação aos apoios vão ser maiores do que os usados num cabo ACSR de secção semelhante.

O ACSS também está disponível com os condutores em formas trapezoidais. O uso desta forma faz com que a resistência elétrica do condutor diminua devido à maior quantidade de alumínio.

Os cabos ACSS são caracterizados por terem uma temperatura de joelho entre os 40 e os 60 °C [13].

A seguinte tabela mostra a temperatura máxima que estes cabos suportam em comparação ao ASCR e a corrente que podem transportar tendo os cabos a mesma secção.

Tabela 3.4 — Características do cabo ACSS em comparação ao ACSR.

Designação	Temperatura máxima [°C]	Corrente máxima
ACSR	90	I_{max} do ACSR
ACSS	220	$2,5*I_{max}$ do ACSR

As vantagens do uso deste tipo de cabo são [3]:

- Elevada temperatura de operação;
- Elevada capacidade de transporte;
- Elevada característica de auto amortecimento;
- Baixa flecha a elevadas temperaturas;
- Tecnologia completamente comprovada.

As desvantagens são:

- Diferentes tipos de acessórios de fixação que o ACSR;
- Dificuldades na sua produção.

3.5.3 - Cabos ZTACIR

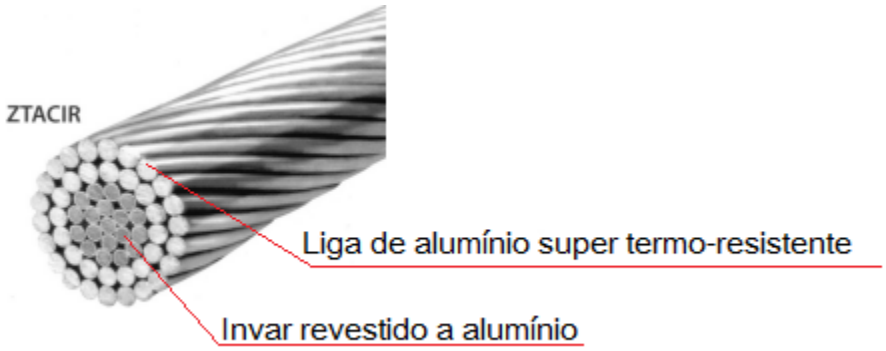


Figura 3.4 – Constituição de um cabo tipo ZTACIR.

O cabo ZTACIR é constituído por uma alma de invar, que é uma liga feita à base de níquel e de ferro. Este material apresenta um coeficiente de dilatação térmica inferior ao do aço, permitindo assim que estes cabos tenham flechas reduzidas. O ZTACIR tem como condutor uma liga de alumínio super termo-resistente (*ZTAL*), que permite que o cabos funcione a elevadas temperaturas sem entrar em recozimento [3].

Os cabos ZTACIR são caracterizados por terem uma temperatura de joelho entre os 85 e os 100 °C [14].

A tabela 3.5 mostra a temperatura máxima que estes cabos suportam em comparação ao ASCR e a corrente que podem transportar tendo os cabos a mesma secção.

Tabela 3.5 — Características do cabo ZTACIR em comparação ao ACSR.

Designação	Temperatura máxima [°C]	Corrente máxima
ACSR	90	I_{max} do ACSR
ZTACIR	210	2,2*I_{max} do ACSR

As vantagens do uso deste tipo de cabo são [3]:

- Elevada temperatura de operação;
- Elevada capacidade de transporte;
- Baixa flecha a elevadas temperaturas.

A desvantagem é a seguinte:

- Nas baixas temperaturas tem flecha semelhante aos cabos ACSR.

3.5.4 - Cabos ACCC



Figura 3.5 – Constituição de um cabo tipo ACCC.

O cabo ACCC é constituído por barras de alumínio do tipo 1350-0 com forma trapezoidal e por uma alma constituída por fibra de vidro e carbono. Como acontece no cabo ACSS, o alumino já se encontra recozido fazendo com que ele não sofra perdas de propriedades mecânicas a temperaturas elevadas.

Devido ao fato de a alma ser produzida através de fibra de vidro e carbono, sendo a fibra 25% mais resistente e 60% mais leve do que o aço, permite com a introdução dos fios com forma trapezoidal aumentar a quantidade de alumínio presente no cabo na ordem dos 28% sem aumentar o diâmetro do cabo e o seu peso [15].

Os cabos ACCC são caracterizados por terem uma temperatura de joelho entre os 40 e os 60 °C [10].

A tabela 3.6 mostra a temperatura máxima que estes cabos suportam em comparação ao ASCR e a corrente que podem transportar tendo os cabos a mesma secção.

Tabela 3.6 — Características do cabo ACCC em comparação ao ACSR.

Designação	Temperatura máxima [°C]	Corrente máxima
ACSR	90	I_{max} do ACSR
ACCC	200	$2*I_{max}$ do ACSR

As vantagens do uso deste tipo de cabos são [3]:

- Elevada temperatura de operação;
- Elevada capacidade de transporte;
- Elevada característica de auto amortecimento;
- Baixa flecha a elevadas temperaturas.

As desvantagens são:

- Pouco experiencia no terreno;
- Custo elevado;
- Acessórios de fixação mais pesados.

3.5.5 - Cabos ACCR

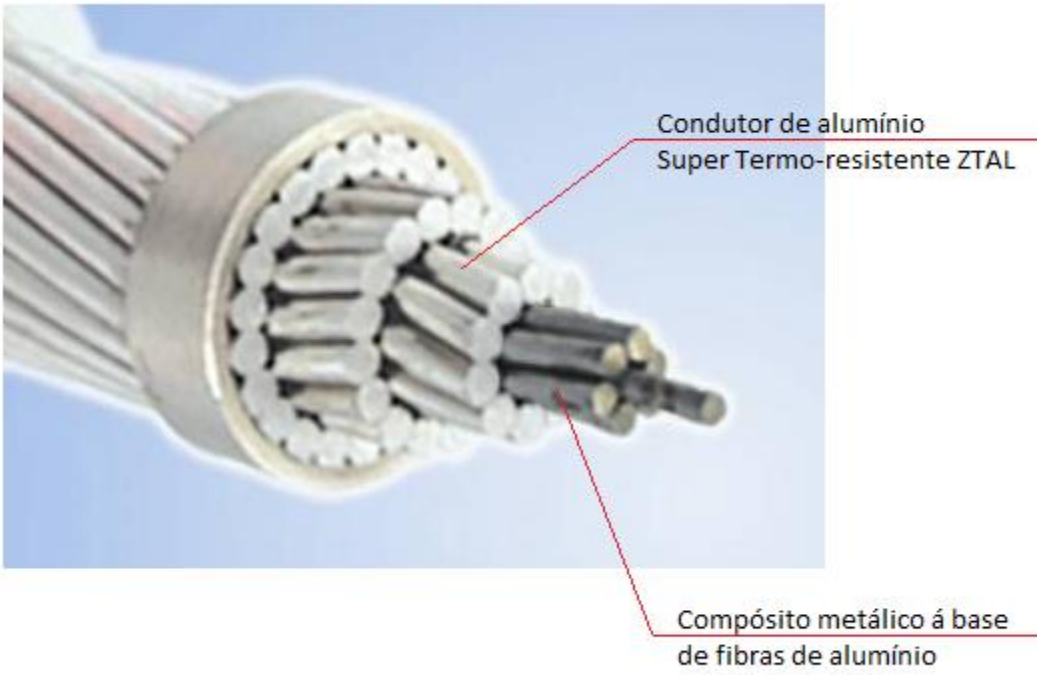


Figura 3.6 – Constituição de um cabo tipo ACCR.

O cabo ACCR é constituído por ligas de alumínio super termo-resistente, ou seja uma liga constituída por alumínio e zircónio. A sua alma é constituída por inúmeras fibras de óxido de alumínio embebido numa matriz de alumina. Sendo esta muito resistente à corrosão não são necessárias proteções adicionais na alma à corrosão, como acontece nos cabos de alma de aço [16].

Os cabos ACCR são caracterizados por terem uma temperatura de joelho em volta dos 70 °C [17].

A tabela 3.7 mostra a temperatura máxima que estes cabos suportam em comparação ao ACCR e a corrente que podem transportar tendo os cabos a mesma secção.

Tabela 3.7 — Características do cabo ACCR em comparação ao ACSR.

Designação	Temperatura máxima [°C]	Corrente máxima
ACSR	90	I_{max} do ACSR
ACCR	220	$2,5*I_{max}$ do ACSR

As vantagens do uso deste tipo de cabos são [3]:

- Elevada temperatura de operação;
- Elevada capacidade de transporte;
- Elevada característica de auto amortecimento;
- Baixa flecha a elevadas temperaturas.

As desvantagens são:

- Elevado custo;
- Acessórios de fixação mais pesados.

3.6 - Comparação entre cabos convencionais e cabos HTLS

Os cabos convencionais como os ACSR, AAC, ACAR e AAAC, que são cabos que usam alumínio endurecido ou fios de liga de alumínio para a condução de eletricidade, têm certas limitações relativamente à capacidade de corrente elétrica que podem transportar, devido ao processo de recozimento do alumínio, que faz com que o mesmo perca as suas propriedades mecânicas.

Como já foi referido na secção 3.2, recozimento é um processo metalúrgico que através da aplicação de calor num determinado metal, no caso de estudo o alumínio, faz com que a dureza do mesmo diminua e ele fique mais dútil. Devido à passagem de corrente elétrica nos condutores, os mesmos estarão a uma determinada temperatura, devido ao efeito de joule e à própria temperatura ambiente, o que implica que se a corrente aumentar, os condutores podem entrar em recozimento. Quando se inicia o recozimento, o alumínio irá tornar-se demasiado dútil para suportar o seu próprio peso, o que fará com que o seu peso seja suportado na totalidade pela alma do cabo, provocando o aumento da flecha [8].

O aumento da flecha é um efeito nefasto para as linhas, pois existe a necessidade de manter uma distância mínima dos cabos de linha aérea de AT ao solo e a outros recursos, definidas pelas normas. Se essa distância for ultrapassada pode colocar em perigo bens e pessoas.

Os cabos HTLS foram desenvolvidos para eliminar ou reduzir o efeito do recozimento na força do condutor ao mesmo tempo que diminuem o aumento da flecha. Estes cabos usam como material condutor certas ligas de alumínio que não perdem a sua força mecânica a

elevadas temperatura. Uma vez que suportam temperaturas elevadas, podem transportar mais corrente.

A figura 3.7 representa a evolução da flecha em relação à temperatura para os vários cabos:

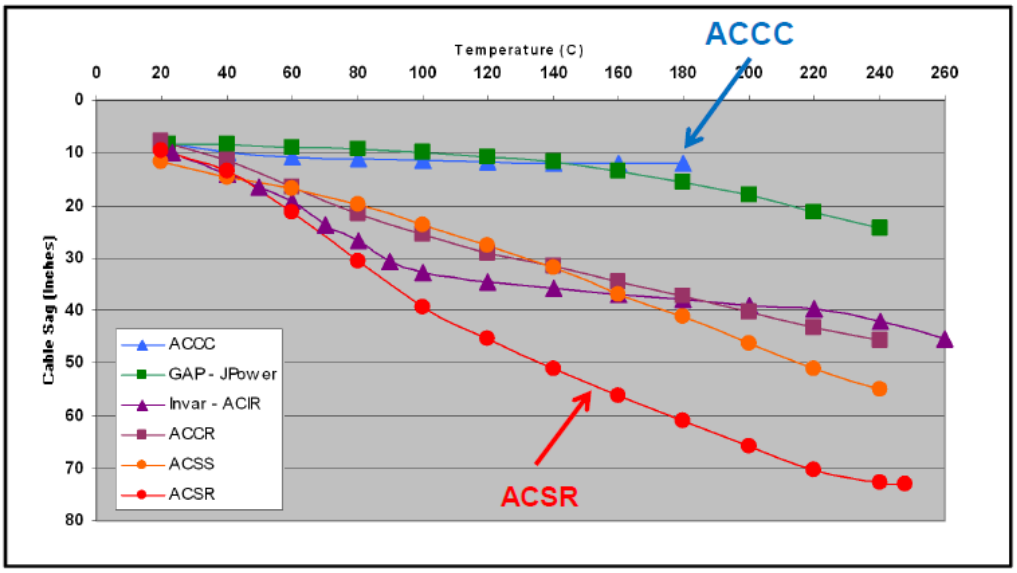


Figura 3.7 – Comportamento da flecha com o aumento da temperatura [18].

Analisando a imagem acima pode-se concluir que todos os cabos HTLS apresentam uma melhor relação temperatura-flecha em comparação ao cabo ACSR. Dos cabos HTLS o ACSS é o que apresenta a pior relação entre flecha e temperatura e o ACCC apresenta a melhor relação flecha-temperatura. Estes resultados eram esperados pois a alma do ACSS é feita de aço, tendo o aço um coeficiente de dilatação térmica cerca de dez vezes maior do que o de fibras de vidro e carbono, empreendido no ACCC. Os restantes valores também seguem a regra de quanto menor for o coeficiente de dilatação térmica da alma menor será a flecha com o aumento da temperatura. O único que não cumpre esta regra é o cabo GAP, mas tal deve-se à sua construção que o diferencia dos restantes cabos.

3.7 - Acessórios para cabos HTLS

Ao substituir numa linha os cabos convencionais por cabos HTLS, pode-se manter a maioria dos equipamentos utilizados anteriormente. O único equipamento que este tipo de cabos pode afetar de uma maneira nefasta, levando à necessidade de os substituir por um mais adequado, é o acessório de fixação dos cabos. Ao incrementar a temperatura que existirá nos cabos, os acessórios de fixação têm que ser substituídos por uns que suportem esse incremento. Os acessórios de fixação de cabos são equipamentos que suportam e mantém os cabos apertados [8].

Entretanto, como os cabos de linhas aéreas tratam-se de cabos nus, ou seja não têm material isolante em seu redor, os acessórios de fixação têm que ter por si um elemento isolador, para evitar a circulação de corrente elétrica do cabo para o apoio. Em cabos convencionais este isolamento não representa um problema, pois a temperatura do cabo nunca ultrapassa os 100 °C, mas para cabos HTLS a temperatura pode atingir um pico de 250 °C, sendo essencial substituir o acessório de fixação por um acessório de fixação resistente à temperatura [12].

No caso de uma amarração, a pinça de amarração deve ser de compressão (*dead-end compression clamp*), em que o cabo se encontra comprimido na primeira parte da câmara interior. Seguidamente apenas a alma é presa ao parafuso de olho. A pinça de amarração também é constituída por um "*jumper*" que é a zona onde irá ligar o cabo de um vão ao cabo do próximo vão [19] [16].

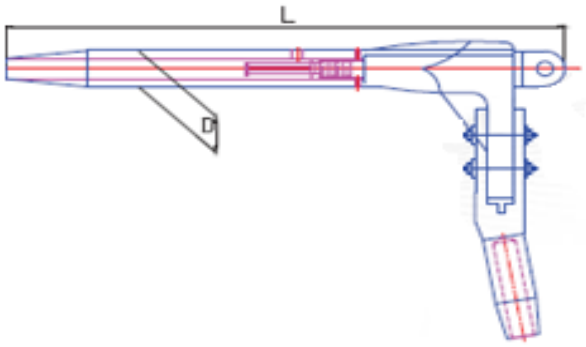


Figura 3.8 – Pinça de amarração [19].

Em relação às pinças de suspensão podem ser aplicadas as mesmas que são aplicadas no ACSR, sendo elas as pinças do tipo AGS (*Armor grip suspensions*). Este tipo de pinças têm múltiplas camadas que maximizam a proteção mecânica e a dissipação de calor, enquanto minimizam a transferência de calor para a cadeia de isoladores.

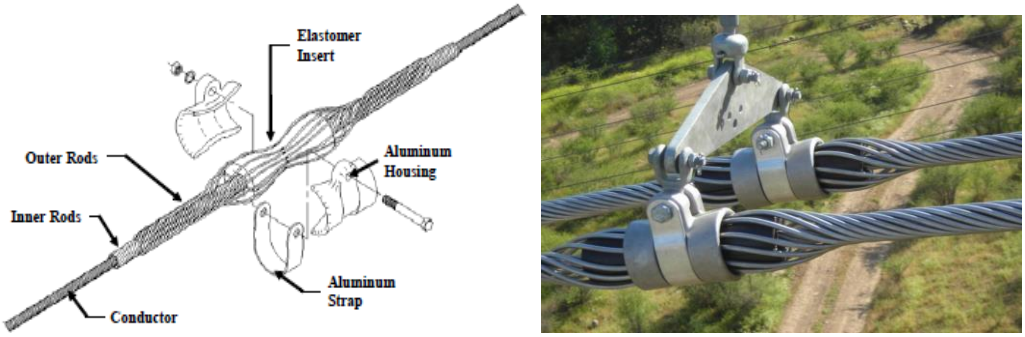


Figura 3.9 – Pinça de suspensão.

3.8 - Instalação de cabos especiais

O método utilizado para a instalação de cabos HTLS é o mesmo que o aplicado para o cabo convencional ACSR, sendo este designado por lançamento tensionado (*Tension Stringing*).Na sua instalação é necessário manter o cabo constantemente tensionado sem nunca entrar em contato com o solo, através de um "*puller*" e de um tensionador [20].

Na instalação dos cabos ACCC e ACSS devido a utilizarem condutores feitos à base de alumínio 1350-0 de elevada dutilidade, é necessário usar "*Chicago grips*" na instalação. Esta necessidade acontece pois a sua "boca" deve ter um tamanho maior do que as que são aplicadas nos cabos convencionais. O uso incorreto destes equipamentos pode levar a derrapagens do núcleo e danificar a superfície do cabo que usa alumínio muito sensível [19].



Figura 3.10 – "grips" convencionais e Chicago "grips".

Resumindo as tarefas que são necessárias realizar para a sua instalação são:

- Instalação do *Puller*, do tensionador e das roldanas;
- Realização de um pequeno corte no condutor para futura fixação na pinça de amarração;
- Colocação dos cabos em roldanas;
- Extração do antigo cabo;
- Substituição das cadeias de isoladores (se necessário);
- Circulação do novo cabo;
- Instalação da pinça de amarração;
- Fixação dos cabos.

3.9 - Ensaios em cabos HTLS

Existem uma série de ensaios a que se tem que submeter um cabo HTLS antes de poder ser implementado no terreno. Estes ensaios são realizados com vista a perceber o funcionamento do cabo, analisar se satisfaz os requisitos para a sua implementação no terreno e procurar dados referentes ao cabo, como carga de rotura, módulo de young, temperatura de joelho, entre outros.

Seguidamente indicam-se os ensaios específicos de caracterização do comportamento especial destes cabos:

3.9.1 - Ensaio Flecha/Tensão vs. Temperatura de ensaio

Este ensaio tem como objetivo analisar o aumento da flecha, consoante o aumento da temperatura. Este ensaio permite obter a temperatura de joelho, permitindo ainda fazer comparações entre os vários cabos HTLS e convencionais. Este ensaio é realizado colocando os cabos em tração, ligados a uma fonte de corrente regulável, provocando variações ao longo do tempo de forma a aumentar a temperatura do cabo, devido ao efeito de Joule. Ao longo desse tempo vai-se realizando medições do comprimento da flecha.

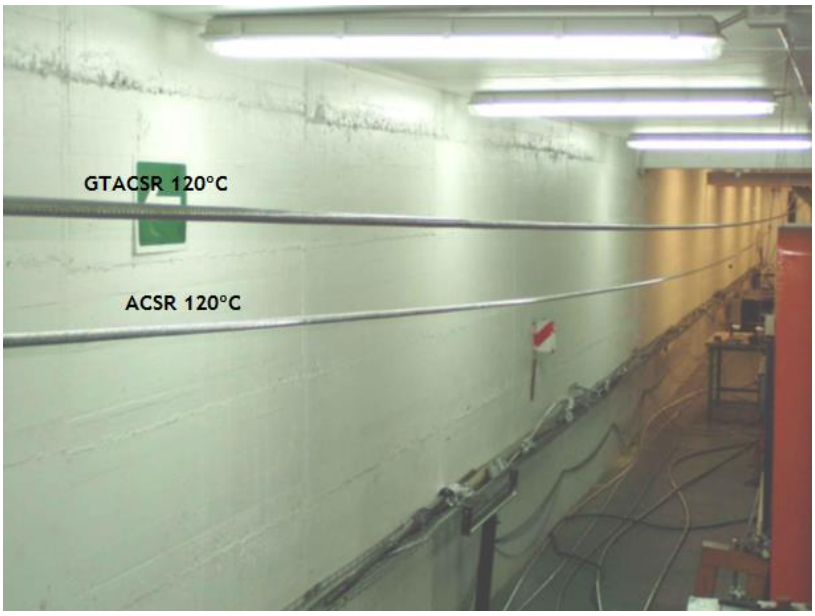


Figura 3.11 – Ensaio Flecha/Tensão vs. Temperatura.

3.9.2 - Ensaio de rotura

Este ensaio, tal como o próprio nome indica, tem como objetivo determinar a carga de rotura de um cabo. Este é um ensaio de grande importância, pois permite descobrir o máximo de tensão mecânica que pode ser aplicada no cabo, ou seja o máximo de força que o cabo aguenta antes de se quebrar ou provocar deslizamento do alumínio.

Este ensaio é realizado colocando o cabo sobre o efeito de tração, provocando o aumento da força de tração ao longo do tempo, até ao ponto em que o cabo começa a romper, sendo a tração nesse momento considerada como a tração de rotura.



Figura 3.12 - Ensaio de rotura.

3.9.3 - Ensaio de resistência em corrente alternada

Realiza-se este ensaio com o objetivo de descobrir a resistência elétrica de um cabo em corrente alternada. Para tal, é necessário ligar o cabo a uma fonte de corrente alternada. Posteriormente através de um voltímetro ligado em paralelo com o cabo e um amperímetro ligado em série, obtém-se a corrente e a tensão no cabo. Através da aplicação da lei de Ohm e dos valores de corrente e tensão obtidos no ensaio, pode-se determinar a resistência do cabo em corrente alternada.

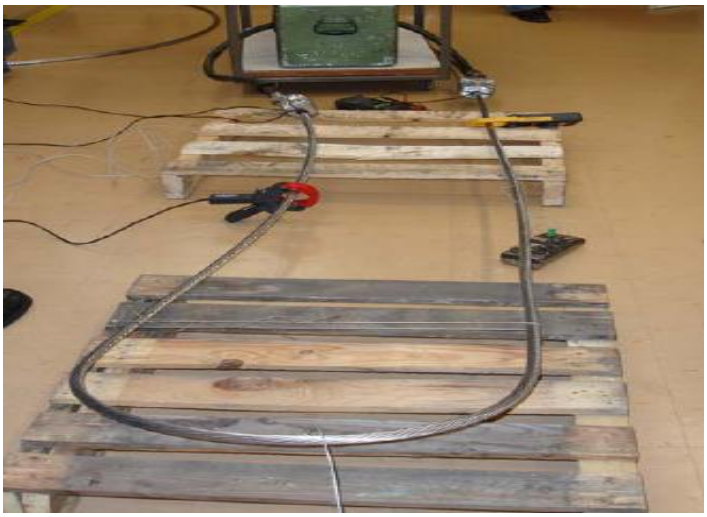


Figura 3.13 – Ensaio de resistência em corrente alternada.

3.9.4 - Ensaio de comportamento térmico do isolamento e acessórios

Realiza-se este ensaio com o objetivo de descobrir se os acessórios e o isolamento, suportam com o incremento de temperatura a que o cabo vai estar sujeito. Para realizar este ensaio é necessários ligar o cabo aos vários equipamentos, seguidamente aquece-se o cabo até à temperatura desejada através da introdução de corrente no mesmo e por fim, realiza-se medições no isolamento de forma a confirmar se existe uma corrente de defeito a circular pelo mesmo.



Figura 3.14 - Ensaio de comportamento térmico do isolamento e acessórios.

Capítulo 4

Cálculos de linhas aéreas de Alta Tensão

4.1 - Cálculo mecânico

O cálculo mecânico de uma linha aérea é efetuado com o intuito de garantir que a mesma estará em condições de suportar todos os esforços mecânicos a que estará sujeita nas várias condições atmosféricas. Este cálculo pretende garantir que estejam asseguradas as condições de segurança bem como as condições de estabilidade da linha [21].

Num projeto, um dos fatores mais importantes a ter em consideração é a escolha da secção do cabo. De forma a obter a secção ideal do cabo a adotar numa linha, é necessário que o projetista tenha em consideração vários critérios, que são citados a seguir [22]:

- Intensidade admissível em regime permanente;
- Queda de tensão na linha;
- Características mecânicas dos cabos;
- Intensidade de curto-circuito admissível:
  - Esforços térmicos;
  - Esforços eletrodinâmicos;
- Efeito coroa;
- Aparelhagem de proteção;
- Normalização;
- Condições de segurança;
- Condições regulamentares;
- Perdas de energia;
- Custo.

Na realização de um "uprating" das linhas aéreas de AT através da substituição dos seus cabos por cabos de elevada temperatura e baixa flecha, é desejado não causar alterações nos apoios. Para garantir que os esforços aplicados no apoio pelo novo cabo são semelhantes aos aplicados pelos cabos anteriores, a secção a escolher deve ter cerca de ±5% da secção do cabo anteriormente instalado.

Como num “uprating” não é necessário dimensionar o apoio, o cálculo mecânico realizado para descobrir as forças a que o mesmo está sujeito torna-se desnecessário, como tal os nossos objetivos serão:

- A determinação da tensão e flecha da linha, para os cabos convencionais, para a temperatura de funcionamento antes de ser realizado o incremento de potência a transitar na linha, de forma a verificar a flecha do cabo convencional.
- A determinação da tensão e flecha da linha para os cabos de alta temperatura e reduzida flecha, para a temperatura de funcionamento depois de ter sido realizado o incremento de potência a transitar na linha, de forma a comparar estas flechas com as flechas dos cabos convencionais antes de realizar o uprating.

4.1.1 - Tensões mecânicas máximas aplicadas aos cabos

A definição da tensão máxima que pode ser aplicada numa linha é um fator condicionante do projeto. Ao valor de tensão máxima está relacionado o valor de flecha mínima da linha nas condições atmosféricas mais desfavoráveis.

De acordo com o EN500341-1 um projeto de linhas deve garantir que a tensão máxima admissível nos cabos não exceda 40% da tensão de rotura dos cabos. Assim a fórmula de cálculo da tensão máxima que pode ser considerada é [4]:

$$\mathrm{t}_{\mathrm{seg}} = \frac{0.4 \times T_R}{\sigma} [daN/mm^2], \tag{4.1}$$

Seja:

$\mathrm{t}_{\mathrm{seg}}$:tensão máxima ou tensão de segurança dos cabos;

T_R : Tração de rotura dos cabos em daN;

σ : Secção do cabo em mm^2.

Embora este cálculo seja importante, a tensão estabelecida como máxima será geralmente inferior à de segurança. A sua escolha tem em conta as irregularidades no traçado da linha, passagem ou não por zonas propícias à formação de mangas de gelo, existência ou não de ângulos pronunciados, entre outros.

4.1.2 - Estados atmosféricos

Para realizar o cálculo mecânico de uma linha aérea é necessário ter em conta os vários agentes atmosféricos a que ela vai estar sujeita, como o vento, temperaturas e a formação de gelo. A sua atuação depende das características da região e da época do ano.

Assim, é usual definir três estados atmosféricos para considerar as circunstâncias que se apresentam como mais desfavoráveis sob os diversos pontos de vista [21][4].

- Estado de vento reduzido (estado de Inverno): este estado atmosférico é caracterizado por ter vento reduzido e por temperatura mínima de -5 °C. Neste estado também existe a possibilidade de formação de manga de gelo, sendo nesse caso a temperatura mínima de 10 °C.
- Estado de vento máximo (estado de Primavera): este estado atmosférico é caracterizado por ter um vento forte e temperatura moderada, de 15 °C, e ausência de gelo.
- Estado de flecha máxima (estado de Verão): este estado é caracterizado pela ausência de vento e pela temperatura máxima que se faz sentir, sendo de 75 °C, e pela ausência de gelo.

No estado de inverno, para efeito de cálculo das tensões mecânicas, o valor de pressão dinâmica do vento a considerar é igual a 40% da pressão dinâmica do vento fornecido na tabela 4.1.

No caso de se estar a realizar um uprating a uma linha já existente através de cabos de alta temperatura e reduzida flecha, no estado de flecha máxima, não se considera a temperatura definida no EN50341-1 de 75 °C, mas a temperatura a que o cabo se encontra em funcionamento à corrente nominal. Esta temperatura pode ser calculada através de um cálculo térmico, utilizando como base a norma IEEE 738-2006.

4.1.3 - Força do vento

A força do vento sobre os cabos é considerada horizontal em relação aos cabos, afetando desta forma, a superfície do cabo e da manga de gelo.

De forma a quantificar as ações do vento para linhas aéreas, o território Português é dividido em duas zonas [4]:

- Zona A: A totalidade do território, com excepção das regiões pertencentes à zona B.
- Zona B: As regiões autónomas dos Açores e da Madeira e as regiões continentais situadas no interior de uma faixa de 5 km de largura ao longo da costa ou em altitudes acima dos 600 m.

A força exercida pelo vento nos cabos de uma linha é dada por:

$$\mathrm{F_v} = G_c \times G_q \times C_c \times q_h \times (d + 2e)\,[daN/m], \tag{4.2}$$

Sendo:

G_c: Fator de ressonância estrutural do cabo, tomando o valor de 0.6;

G_q: Fator de rajada, tem valor 1;

C_c: Coeficiente de forma do cabo;

q_h : Pressão dinâmica do vento;
d : Diâmetro do cabo;
e : Espessura do gelo.

O valor do coeficiente de forma vária consoante o diâmetro dos cabos sendo:

1.2 para $d \leq 12.5mm$
1.1 para $12.5 \leq d \leq 15.8mm$
1.0 para $d \geq 15.8mm$

O valor da pressão dinâmica do vento vária consoante a altura e a zona de vento, sendo:

Tabela 4.1 — Pressão dinâmica do vento em função da altura e da zona [4].

	q_h (Pa)	
Altura (m)	Zona A	Zona B
0	727	880
10	727	880
20	727	880
30	855	1035
40	960	1161
50	1049	1270
60	1129	1366
70	1201	1453
80	1266	1532
90	1328	1606

4.1.4 - Coeficientes de sobrecarga

Os cabos de uma linha aérea estão sujeitos a esforços mecânicos. Estes coeficientes refletem a influência desses esforços na linha, sendo esses esforços mecânicos resultantes do seu peso próprio, da influência do vento e da presença de gelo na linha [6].

Na figura 4.1 são apresentadas as várias forças a que um cabo se encontra sujeito.

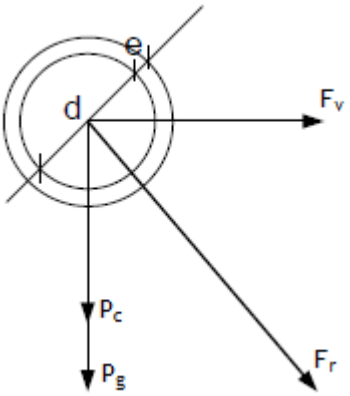


Figura 4.1 – Esquema de forças aplicadas num cabo [6].

Através da aplicação do teorema de Pitágoras obtém-se a força resultante F_r que é dada por:

$$\mathrm{F_r} = \sqrt{(P_c + P_g)^2 + F_v^{\,2}}\ , \tag{4.3}$$

Sendo:
P_c : Peso próprio do cabo;
P_g : Peso da manga de gelo;
F_v : Força do vento no cabo.

O peso da manga de gelo é modelizado da seguinte forma [4]:

$$\mathrm{P_g} = \frac{\omega_g \times \pi}{4}\left[(d+2e)^2 - d^2\right], \tag{4.4}$$

Sendo:
w_g : Peso específico do gelo, toma o valor de 0.9 Kg/dm^3;
d : Diâmetro do cabo;
e : Espessura da manga de gelo.

Como dito anteriormente a força do vento é dado por:

$$\mathrm{F_v} = G_c \times G_q \times C_c \times q_h \times (d+2e)\,[daN/m], \tag{4.5}$$

Considerando as equações atrás pode-se concluir que a força resultante será:

$$\mathrm{F_r} = \sqrt{\left(P_c + \frac{\omega_g \times \pi}{4}\left[(d+2e)^2 - d^2\right]\right)^2 + G_c \times G_q \times C_c \times q_h \times (d+2e)^2}\ , \tag{4.6}$$

O coeficiente de sobrecarga, relativo a um dado estado atmosférico, é dado pela relação entre a intensidade da solicitação resultante e o peso linear do cabo, sendo:

$$\mathrm{m} = \frac{\mathrm{F_r}}{P_c} = \frac{\sqrt{(P_c + \frac{w_g \times \pi}{4}\left[(d+2e)^2 - d^2\right])^2 + G_c \times G_q \times C_c \times q_h \times (d+2e)^2}}{P_c}, \qquad (4.7)$$

Assim, torna-se possível calcular os coeficientes de sobrecarga associados a cada estado atmosférico, tendo em conta as condições climatéricas que caracterizam cada estado.

Analisando a expressão anterior verifica-se que, no estado de flecha máxima, devido à ausência de vento e gelo, o coeficiente de sobrecarga torna-se unitário.

4.1.5 - Vão crítico e vão equivalente

Designa-se por vão crítico, o vão para o qual os cabos submetidos a uma tensão máxima, num dos dois estados atmosféricos de vento reduzido ou de vento máximo, adquirem a mesma tensão máxima quando ficam sujeitos às condições do outro nesses dois estados. O vão crítico é calculado através da expressão seguinte:

$$\mathrm{L_{cr}} = \frac{\sigma \times t_{\max}}{\omega}\sqrt{\frac{24 \times \alpha \times (\theta_2 - \theta_1)}{m_2^2 - m_1^2}}[m], \qquad (4.8)$$

Sendo:

σ : Secção do cabo;

$t_{\max}$: Tensão mecânica máxima aplicada ao cabo [daN/mm^2];

ω : Peso linear do cabo;

α : Coeficiente de dilatação linear;

θ_2 : Temperatura no estado de vento máximo;

θ_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.

Tanto num projeto de uma nova linha como num uprating de uma linha existente, caso se esteja na presença de um cantão, que é um conjunto de vãos de suspensão entre cadeias de amarração, torna-se necessário encontrar o vão equivalente do conjunto de vãos. O cálculo é feito através da seguinte expressão:

$$\mathrm{L_{eq}} = \sqrt{\frac{\sum_1^x L_i^3}{\sum_1^x L_i}}[m], \qquad (4.9)$$

4.1.6 - Estado mais desfavorável

Para o cálculo da tensão de montagem é necessário determinar o estado atmosférico mais desfavorável. Para tal, é necessário conhecer o vão equivalente, o vão crítico e os coeficientes de sobrecarga, através desses valores e da consulta do seguinte árvore de decisão é possível determinarmos o estado atmosférico mais desfavorável.

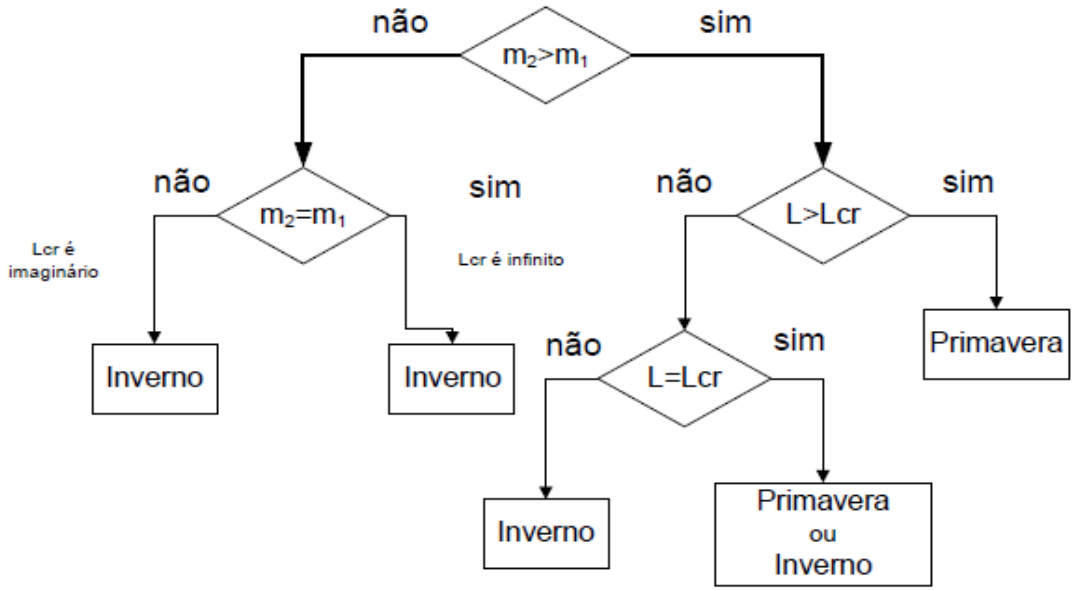


Figura 4.2 – Árvore de decisão [7].

4.1.7 - Equação de estados

A equação de estados é uma equação de equilíbrio mecânico, que relaciona a tensão mecânica nos cabos de uma linha aérea num determinado estado atmosférico, com outra tensão existente nos cabos noutro estado atmosférico conhecido. Resumindo esta equação faz uma modelização das variações da tensão, através da variação da temperatura, sendo:

$$\theta_i + \frac{t_i}{\alpha \times E} - \frac{m_i^2 \times \omega^2 \times L_{eq}^2}{24 \times \alpha \times \sigma^2 \times t_i^2} = \theta_k + \frac{t_k}{\alpha \times E} - \frac{m_k^2 \times \omega^2 \times L_{eq}^2}{24 \times \alpha \times \sigma^2 \times t_k^2}\,, \qquad (4.10)$$

Sendo:
ω: Pesos específico volumétrico;
t_i e t_k: Tensão mecânica no estado i e no estado k;

θ_i e θ_k : Temperatura no estado i e no estado k;
α : Coeficiente de dilatação térmica;
E : Módulo de Young;
m_i e m_k : Coeficiente de sobrecarga no estado i e no estado k;
L_{eq} : Vão equivalente;
σ : Secção do cabo.

Na situação de um "uprating" de uma linha aérea, em que temos por objetivo o cálculo da tensão mecânica no cabo correspondente à temperatura de funcionamento normal do mesmo, pode ser necessário calcular duas vezes distintas a equação de estados. Esta necessidade surge porque com o aumento da temperatura a tensão mecânica suportada pelo cabo é gradualmente transferida para a alma. Se a temperatura do cabo em funcionamento normal for superior à temperatura de joelho, calcula-se a tensão mecânica no cabo da seguinte forma:

- Resolve-se a equação de estados para uma temperatura igual à temperatura de joelho, usando como coeficiente de dilatação térmica, módulo de young e secção, os valores que são definidos pelos materiais da alma e condutor juntos. O coeficiente de sobrecarga no estado desconhecido toma o valor de 1, pois desejamos calcular a tensão mecânica para o caso em que a flecha torna um valor máximo. O estado atmosférico conhecido é o estado mais desfavorável determinado anteriormente.
- Após o cálculo da tensão mecânica à temperatura de joelho, resolve-se novamente a equação de estados para uma temperatura igual à temperatura do cabo em funcionamento normal, usando como coeficiente de dilatação térmica, módulo de young e secção os valores definidos somente pelo material da alma, desprezando a parte condutora. O coeficiente de sobrecarga, tanto no estado desconhecido como no estado conhecido, toma o valor de 1. O estado conhecido é o calculado no passo anterior.

4.1.8 - Determinação das flechas

O cálculo das flechas dos cabos é realizado de maneira diferente no caso de estarmos a lidar com vãos em patamar ou vãos em declive [6].

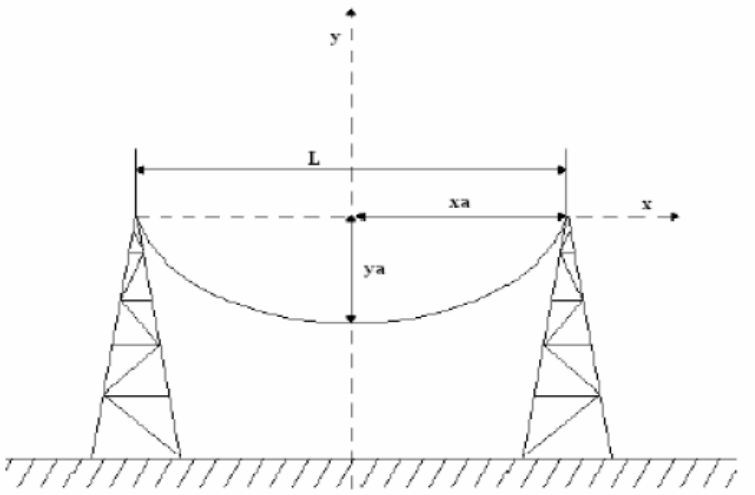


Figura 4.3 – Vãos em patamar.

Nos vãos em patamar a flecha dos cabos é determinada a partir da expressão:

$$f = \frac{L^2 \times \omega}{8 \times t \times \sigma}[m], \tag{4.11}$$

Sendo:
ω: Pesos específico volumétrico;
t: Tensão mecânica.

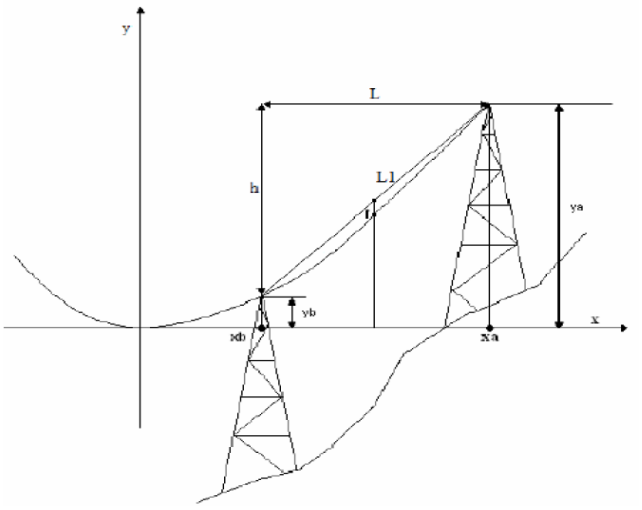


Figura 4.4 – Vãos em declive.

Nos vãos em declive a flecha dos cabos é determinada a partir da expressão:

$$f = \frac{L \times L_1 \times \omega}{8 \times t \times \sigma}[m], \tag{4.12}$$

Sendo:
ω: Peso específico volumétrico;
t: Tensão mecânica.

4.2 - Cálculo elétrico

O cálculo elétrico de linhas aéreas no caso de "uprating" tem por objetivo:

- Calcular as perdas de energia por efeito joule e as quedas de tensão na linha à corrente transmitida pela linha após o uprating;
- Determinar as várias características elétricas da linha.

4.2.1 -Intensidade de corrente

A expressão seguinte indica o valor da intensidade de corrente de serviço, que circula nos condutores das linhas elétricas de energia.

$$I_s = \frac{P}{\sqrt{3} \times U_c \times \cos(\varphi)} [A], \tag{4.13}$$

Sendo:
I_s: Intensidade de corrente de serviço [A];
P: Potência [W];
U_c: Tensão composta [V];
$\cos(\varphi)$: fator de potência, na falta de outro valor considera-se normalmente 0,9.

Conhecida a intensidade de corrente, a densidade de corrente pode ser calculada, através da seguinte expressão:

$$d = \frac{I_S}{S} [A/mm^2], \tag{4.14}$$

Sendo:
I_s: Intensidade de corrente de serviço [A];
S: Secção do cabo [mm^2].

4.2.2 -Resistência elétrica

A resistência elétrica de um cabo é dada pela seguinte fórmula:

$$R = \frac{\rho_\theta \times l}{S}[\Omega], \tag{4.15}$$

Sendo:
ρ_θ : Resistividade do condutor a uma determinada temperatura [Ω/km];
l : Comprimento do condutor [km];
S : Secção do cabo [mm^2].

Podemos também determinar a resistência por quilómetro da seguinte forma:

$$R_k = \frac{R}{l} = \frac{\rho_\theta}{S}[\Omega / km], \tag{4.16}$$

Como o valor da resistividade do condutor é conhecido de acordo com a natureza do mesmo, à temperatura de 20°C, caso a temperatura do condutor seja diferente desse valor, torna-se necessário efetuar uma correção do valor da resistividade para essa mesma temperatura. A resistividade do condutor é dada pela seguinte fórmula:

$$\rho = \rho_{20°C} \times [1 + \alpha_{20°C}(\theta_{Final} - 20)], \tag{4.17}$$

Sendo:
ρ : Resistividade do condutor à temperatura desejada;
$\rho_{20°C}$: Resistividade do condutor a 20 °C;
$\alpha_{20°C}$: Coeficiente de Termo resistividade;
θ_{Final} : Temperatura do cabo à temperatura desejada.

O coeficiente de Termo resistividade varia consoante o tipo de material utilizado, sendo habitualmente usados os seguintes valores:

Tabela 4.2 — Coeficiente de Termo resistividade [2].

Material	**Coeficiente de Termo resistividade (/°C)**
Cobre	0,00393
Fio de alumínio	0,00403
Liga de alumínio	0,00347

No caso da linha candidata a uprating ser uma linha dupla, é necessário realizar a resistência em paralelo através da seguinte expressão:

$$R_{Total} = \frac{R_{fase\ 1} \times R_{fase\ 2}}{R_{fase\ 1} + R_{fase\ 2}} [\Omega], \tag{4.18}$$

A resistência que normalmente se encontra associada a um condutor é a resistência em corrente contínua, salvo indicação contrária. Para corrente alternada, a resistência no condutor é diferente da resistência em corrente contínua, devido ao efeito pelicular. Este efeito provoca um ligeiro aumento de resistência, que é agravado na presença de cabos de diâmetros maiores ou quando a transmissão de energia é feita a frequências elevadas. Este efeito é pouco significativo na presença de cabos com diâmetros usuais e frequências na ordem dos 50 Hz.

Em seguida, são apresentadas duas formas diferentes de se calcular o aumento da resistência devido ao efeito pelicular:

Segundo Rayleigh:

$$\frac{R_a}{R_c} = 1 + \frac{10^{-8}}{12} \times \left(\frac{\omega \times \mu}{R_c} \right)^2 - \frac{10^{-16}}{180} \times \left(\frac{\omega \times \mu}{R_c} \right)^4, \tag{4.19}$$

Sendo:
R_a: Resistência em corrente alternada;
R_c: Resistência em corrente contínua;
ω: Frequência angular da corrente alternada, dada por $\omega = 2 \times \pi \times f$;
μ: Permeabilidade magnética do condutor.

Segundo Still:

$$\frac{R_a}{R_c} = 1 + \frac{\sqrt{1 + \left(a \times D^2 \times f \right)^2} - 1}{2}, \tag{4.20}$$

Sendo:
a: Constante igual a 0.0105 para o cobre e 0.0063 para o alumínio;
D: Diâmetro do cabo em polegadas;
f: Frequência da corrente alternada.

4.2.3 -Perdas de energia na linha

As perdas de energia por efeito Joule calculam-se recorrendo à seguinte expressão:

$$p = 3 \times R \times I^2 \ [W], \tag{4.21}$$

Sendo:

R : Resistência linear [Ω/km];
I : Intensidade de corrente de serviço [A].

4.2.4 -Reatância

O valor da reatância influencia fortemente a capacidade de transporte de uma linha, assim como a sua queda de tensão.

Considerando, de maneira a simplificar os cálculos, que as linhas são percorridas por correntes trifásicas equilibradas e de sequência direta, pode-se determinar o valor da reatância indutiva através da seguinte expressão.

$$X = \omega \times L \times l \ [\Omega], \tag{4.22}$$

Sendo:
ω: Frequência angular da corrente alternada, dada por $\omega = 2 \times \pi \times f$;
L: Coeficiente de auto-indução;
l: Comprimento da linha.

A expressão utilizada para o cálculo do coeficiente de auto-indução em linhas elétricas trifásicas assume que as linhas são simétricas, que os condutores são maciços e constituídos por materiais não magnéticos e que o efeito pelicular é desprezado [6].

$$L = \left[0.5 + 2 \times \ln\left(\frac{D}{r} \right) \right] \times 10^{-4} \ [H / km], \tag{4.23}$$

Sendo:
D: Distância equivalente entre fases [m];
r : Raio do cabo [m].

A distancia equivalente entre fases é dada por [1]:

$$D = \sqrt[3]{D_{12} \times D_{13} \times D_{23}} \ , \tag{4.24}$$

Sendo:
D_{12}, D_{13} e D_{23}: Distâncias entre as fases.

No caso de a linha aérea se tratar de uma linha dupla, o cálculo da distância equivalente entre fases vai ser calculado de maneira diferente da fórmula anterior, pois uma linha dupla é formada por dois ternos ligados em paralelo, apresentando dois cabos por fase.

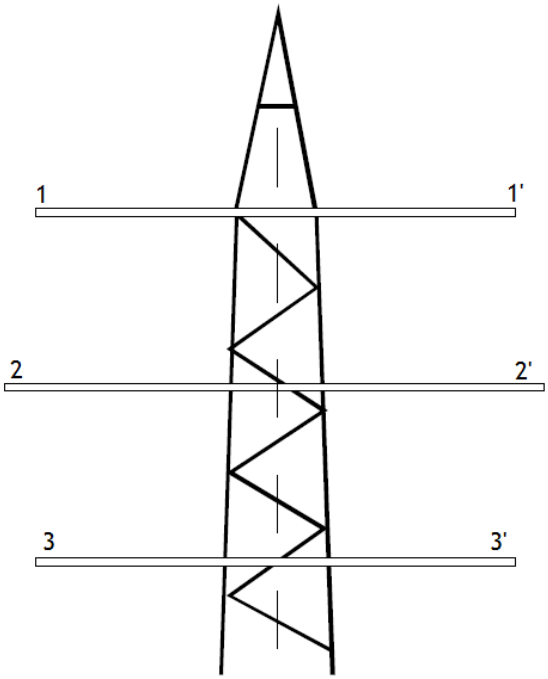


Figura 4.5 – Geometria dos cabos de uma linha dupla.

A distancia equivalente entre fases para uma linha dupla é dada por:

$$D = \sqrt[3]{D_1 \times D_2 \times D_3}\ , \tag{4.25}$$

Com:

$$D_1 = \frac{\sqrt{D_{12} \times D_{12'} \times D_{13} \times D_{13'}}}{D_{11'}}\ , \tag{4.26}$$

$$D_2 = \frac{\sqrt{D_{21} \times D_{21'} \times D_{23} \times D_{23'}}}{D_{22'}}\ , \tag{4.27}$$

$$D_3 = \frac{\sqrt{D_{31} \times D_{31'} \times D_{32} \times D_{32'}}}{D_{33'}}\ , \tag{4.28}$$

4.2.5 -Queda de Tensão

A queda de tensão nos condutores numa linha aérea pode ser determinada através da seguinte expressão:

$$\Delta V = \sqrt{3} \times I \times (R \times \cos(\varphi) + X \times sen(\varphi))\ [V]\ , \tag{4.29}$$

Sendo:
R : Resistência da linha;
X : Reatância da linha;
I : Intensidade de corrente;
$\cos(\varphi)$: Fator de potência.

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

4.2.6 -Capacidade

Define-se por capacidade elétrica pela relação entre a carga capacitiva eletrostática do cabo, por unidade de comprimento, e a diferença de potencial existente entre o cabo e o seu invólucro, quando os cabos são sujeitos a um sistema polifásico simétrico de diferenças de potencial em relação a esse invólucro.

No caso das linhas aéreas de AT, é considerado como invólucro a terra.

Para uma linha aérea trifásica, a capacidade elétrica por fase é dada pela seguinte expressão:

$$C_k = \frac{24.2}{\log\frac{D}{r}} \times 10^{-9} \ [F/km], \tag{4.30}$$

Sendo:
D : Distância equivalente entre fases [m];
r : Raio do cabo [m].

4.2.7 -Suscetância

A Suscetância calcula-se através da seguinte expressão:

$$B_k = C_k \times \omega \ [S/km], \tag{4.31}$$

Sendo:
C_k : Capacidade da linha;
ω : Frequência angular.

4.2.8 -Condutância

Define-se por condutância de uma linha, a condutância do meio dielétrico que envolve os cabos. No caso das linhas aéreas o meio dielétrico é o ar. O valor da condutância vária consoante as condições atmosféricas, o estado da superfície do condutor, numero de apoios varia por quilómetro de linha e tipo de isoladores na cadeia.

A condutância determina-se através da seguinte expressão:

$$G_k = \frac{p}{Us^2} \times 10^{-3} \ [S/km], \tag{4.32}$$

Sendo:
p : Energia perdida [kW/km];
Us : Tensão simples [kV].

4.2.9 -Impedância

A impedância é uma grandeza de valor complexo, que se determina através da seguinte expressão:

$$\underline{Z_k} = R_k + jX_k \ [\Omega/km], \tag{4.33}$$

O módulo e a fase da impedância são calculados através das seguintes equações:

$$|Z_k| = \sqrt{R_k^2 + X_k^2}, \tag{4.34}$$

$$\angle Z_k = arctg \frac{X_k}{R_k}, \tag{4.35}$$

4.2.10 -Admitância

A admitância é uma grandeza de valor complexo, que se determina através da seguinte expressão:

$$\underline{Y_k} = G_k + jB_k \ [\Omega/km], \tag{4.36}$$

O módulo e a fase da admitância são calculados através das seguintes equações:

$$|Y_k| = \sqrt{G_k^2 + B_k^2}, \tag{4.37}$$

$$\angle Y_k = arctg \frac{B_k}{G_k}, \tag{4.38}$$

4.2.11 -Impedância característica

A impedância característica define-se pela relação entre a tensão e a intensidade de corrente em todos os pontos de uma linha. A impedância característica é uma característica elétrica independente do comprimento da linha e é calculada pela expressão:

$$\overline{Z_c} = \sqrt{\frac{\overline{Z}}{\overline{Y}}} \ [\Omega], \tag{4.39}$$

Sendo:
$\overline{Z}$: Impedância [Ω/km] ;
$\overline{Y}$: Admitância [Ω/km].

4.3 - Cálculo Térmico

O cálculo térmico de uma linha aérea é efetuado com o intuito de calcular a temperatura de funcionamento de um cabo, em função do valor da intensidade de corrente que circula dentro de si e das condições atmosféricas; ou calcular a corrente que circula num condutor para uma determinada temperatura.

Na hipótese de ser realizado um "uprating", este cálculo é um ponto de grande importância, pois permite determinar a temperatura do cabo sem ser necessário recorrer a ensaios práticos. O valor de temperatura calculado é necessário para o estudo mecânico da linha aérea, mais concretamente para traçar a evolução da flecha ao longo da temperatura.

A temperatura do cabo é uma função dos seguintes aspetos [23]:

- Propriedades do material condutor
- Diâmetro do cabo
- Condições da superfície do cabo
- Condições ambientais
- Corrente elétrica no condutor

A expressão matemática que permite determinar a corrente que circula num condutor a uma determinada temperatura é:

$$I = \sqrt{\frac{q_c + q_r - q_s}{R(T_c)}} \ [A], \tag{4.40}$$

Sendo:

q_c : Perdas de calor por convecção [W/m];

q_r : Perdas de calor irradiadas [W/m];

q_s : Ganho de calor solar [W/m];

$R(T_c)$: Resistência do condutor à temperatura de funcionamento, por unidade de comprimento [Ω/m].

A resistência do condutor ($R(T_c)$) à temperatura de funcionamento é calculada recorrendo às fórmulas 4.16 e 4.17, que foram definidas no ponto 4.2.2. Se a resistência fornecida for a resistência em corrente contínua é necessário recorrer à fórmula 4.19 ou 4.20 para descobrir o valor da resistência em corrente alternada.

4.3.1 -Perdas de calor por convecção

Convecção é um processo de transporte de massa e de transferência de calor, caracterizado pelo movimento das moléculas de um fluido, devido à sua diferença de densidade, através do meio de calor. Este processo não pode ocorrer em sólidos. Numa linha aérea este processo acontece pela transferência de calor dos cabos para o ar.

Existe dentro do processo de convecção, o processo de convecção natural, no qual o movimento do fluido não é gerado por qualquer fonte externa, somente por diferenças de densidade nos fluidos. Este processo acontece numa linha aérea quando a força do vento é nula.

As perdas de calor por convecção são determinadas através das seguintes expressões:

$$q_{c1} = \left[1.01 + 0.0372 \times \left(\frac{D \times \rho_f \times V_W}{\mu_f}\right)^{0.52}\right] \times k_f \times K_{angle}(T_c - T_a), \tag{4.41}$$

$$q_{c2} = \left[0.0119 \times \left(\frac{D \times \rho_f \times V_W}{\mu_f}\right)^{0.6}\right] \times k_f \times K_{angle}(T_c - T_a), \tag{4.42}$$

Sendo:

D: Diâmetro do cabo [mm];

ρ_f : Densidade do ar [kg/m^3];

V_W : Velocidade do vento [m/s];

μ_f : Viscosidade dinâmica do ar [Pa-s];

k_f : Condutividade térmica do ar [W/(m°C)];

K_{angle} : Fator de direção do vento;

T_c : Temperatura do cabo [°C];

T_a : Temperatura ambiente [°C].

A primeira expressão aplica-se a situações de baixa velocidade de vento, mas a sua aplicação é incorreta para situações de alta velocidade de vento. A segunda expressão aplica-se para grandes velocidades de vento, mas é incorreta para baixas velocidades de vento. A qualquer velocidade de vento, o valor de perdas de calor por convecção a aplicar é o maior dos dois valores calculados através das expressões anteriores.

Se a força do vento for nula, ocorre o processo de convecção natural, sendo nesse caso a expressão para o cálculo de perdas a seguinte:

$$q_{cn} = 0.0205 \times \rho_f^{0.5} \times D^{0.75} \times (T_c - T_a)^{1.25}, \tag{4.43}$$

A densidade do ar calcula-se através da seguinte expressão:

$$\rho_f = \frac{1.293 - 1.525 \times 10^{-4} + 6.379 \times 10^{-9} \times H_e^2}{1 + 0.00367 \times T_{film}}, \tag{4.44}$$

Sendo:

H_e : Elevação acima do mar [m];

T_{film} : Média da temperatura ambiente e da temperatura do cabo, calcula-se através de $T_{film} = (T_c + T_a)/2$.

A viscosidade dinâmica do ar calcula-se através da seguinte expressão:

$$\mu_f = \frac{1.458 \times 10^{-6} (T_{film} + 273)^{1.5}}{T_{film} + 383.4}, \tag{4.45}$$

Sendo:

T_{film} : Média da temperatura ambiente e da temperatura do cabo, calcula-se através de $T_{film} = (T_c + T_a)/2$.

A condutividade térmica do ar calcula-se através da seguinte expressão:

$$k_f = 2.424 \times 10^{-2} + 7.477 \times 10^{-5} T_{film} - 4.407 \times 10^{-9} T_{film}^2, \tag{4.46}$$

Sendo:

T_{film} : Média da temperatura ambiente e da temperatura do cabo, calcula-se através de $T_{film} = (T_c + T_a)/2$.

O fator de direção do vento calcula-se através da seguinte expressão:

$$K_{ang} = 1.194 - \cos(\phi) + 0.194\cos(2\phi) + 0.368\sin(2\phi), \quad (4.47)$$

Sendo:
ϕ: Ângulo entre a direção do vento e da linha.

4.3.2 -Perdas de calor irradiadas

A irradiação térmica é a energia emitida pelo material sob forma de ondas eletromagnéticas. A radiação térmica é um resultado direto dos movimentos aleatórios de átomos e moléculas na matéria. Uma vez que estes átomos e moléculas são compostos de partículas carregadas (protões e eletrões), o seu movimento resulta na emissão de radiação, o que faz com que o material perca energia.

Nas linhas aéreas as perdas de calor irradiadas são dadas pela seguinte expressão:

$$q_r = 0.0178 \times D \times \varepsilon \left[\left(\frac{T_c + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_a + 273}{100} \right)^4 \right], \quad (4.48)$$

Sendo:
D: Diâmetro do cabo [mm];
ε: Emissividade;
T_c: Temperatura do cabo [°C];
T_a: Temperatura ambiente [°C].

4.3.3 -Ganho de calor solar

Ganho de calor solar refere-se ao aumento da temperatura de um espaço ou de um objeto, que resulta da radiação solar. A quantidade de ganho solar aumenta com a intensidade do sol e com a capacidade de qualquer material interveniente para transmitir ou resistir à radiação.

Nas linhas aéreas o ganho de calor solar é calculado pela seguinte expressão:

$$q_s = \alpha \times Q_{se} \sin(\theta) A', \quad (4.49)$$

Sendo:
α: Absorvidade solar;
Q_{se}: Energia total calorífica solar e do céu irradiada, retificada à elevação [w/m^2];
θ: Ângulo efetivo de incidência de raios solares;
A': Área projetada do cabo por unidade de comprimento [m^2/m].

A energia total calorífica solar e do céu irradiada, e retificada à elevação calcula-se através da seguinte expressão:

$$Q_{se} = K_{solar} \times Q_s \,, \tag{4.50}$$

Sendo:

K_{solar} : Fator de calor solar em relação à altitude;

Q_s : Energia total calorífica solar e do céu irradiada [w/m^2].

O fator de calor solar em relação à altitude pode ser obtido consultando-se a seguinte tabela:

Tabela 4.3 — Fator de calor solar em relação a altitude [23].

Elevação acima do nível do mar [m]	Fator de calor solar em relação à altitude (K_{solar})
0	1,00
1000	1,10
2000	1,19
4000	1,28

A energia total calorífica solar e do céu irradiada, calcula-se através da seguinte equação de regressão:

$$Q_s = A + B \times H_c + C \times H_c^2 + D \times H_c^3 + E \times H_c^4 + F \times H_c^5 + G \times H_c^6 \,, \tag{4.51}$$

Sendo:

A, B, C, D, E, F e G : Coeficientes para a equação;

H_c : Altitude do sol.

Os coeficientes de calor solar são dependentes do tipo de atmosfera a que os cabos se encontram. Uma atmosfera limpa facilita a incidência do sol nos cabos provocando um maior aquecimento dos mesmos, enquanto uma atmosfera industrial dificulta a incidência do sol nestes.

Os coeficientes de calor solar podem ser obtidos consultando-se a seguinte tabela:

Tabela 4.4 — Coeficientes para a equação [23].

Atmosfera limpa	
A	-42,2391
B	63,8044
C	-1,9220

D	$3{,}46921\times10^{-2}$
E	$-3{,}61118\times10^{-4}$
F	$1{,}94318\times10^{-6}$
G	$-4{,}07608\times10^{-9}$
Atmosfera industrial	
A	53,1821
B	14,2110
C	$6{,}6138\times10^{-1}$
D	$-3{,}1658\times10^{-2}$
E	$5{,}4654\times10^{-4}$
F	$-4{,}3446\times10^{-6}$
G	$1{,}3236\times10^{-8}$

A Altitude do sol calcula-se através da seguinte expressão:

$$H_c = \arcsin\left[\cos(Lat)\cos(\delta)\cos(\omega) - \sin(Lat)\sin(\delta)\right], \quad (4.52)$$

Sendo:
Lat : Grau de latitude;
δ : Declinação solar;
ω : Ângulo respetivo à hora.

A declinação solar calcula-se através da seguinte expressão:

$$\delta = 23.4583\sin\left[\frac{284+N}{365}360\right], \quad (4.53)$$

Sendo:
N : Somatório dos dias que já passaram no ano da medição, até ao dia especificado.

O ângulo respetivo à hora calcula-se através da seguinte expressão:

$$\omega = -180 + h\times15, \quad (4.54)$$

Sendo:
h : Hora do dia

O ângulo efetivo de incidência de raios solares calcula-se recorrendo à seguinte expressão:

$$\theta = \arccos\left[\cos(H_c)\cos(Z_c - Z_1)\right], \quad (4.55)$$

Sendo:

H_c: Altitude do sol, que se calcula através da fórmula 4.52;

Z_c: Azimute do sol;

Z_1: Azimute da linha.

O azimute do sol calcula-se recorrendo a seguinte expressão:

$$Z_c = C + \arctan(\chi), \tag{4.56}$$

Onde:

$$\chi = \frac{\sin(\omega)}{\sin(Lat)\cos(\omega) - \cos(Lat)\tan(\delta)}, \tag{4.57}$$

A constante de azimute solar varia em função do ângulo da hora (ω) e da variável do azimute do sol (χ), como mostrado na seguinte tabela:

Tabela 4.5 — Constante de azimute solar [23].

Angulo da hora (ω)	**C se $\chi \geq 0$**	**C se $\chi < 0$**
-180≤ω<0	0	180
0≤ω≤180	180	360

Capítulo 5

Programa de cálculo Elétrico, Térmico e Mecânico

A aplicação informática desenvolvida realiza o cálculo mecânico, elétrico e térmico de uma linha aérea de AT, de forma a avaliar a exequibilidade de um uprating à mesma, através da aplicação de cabos de alta temperatura e baixa flecha. A aplicação foi realizada em *Microsoft Access* em conjunção com o *Visual Basic for Applications*.

O *Microsoft Access* é um sistema de criação e controlo de bases de dados, incluído no pacote "*Microsoft Office Professional*". Ele permite o desenvolvimento de aplicações que envolvem tanto a modelagem e estrutura de dados, como também a interface a ser utilizado pelos utilizadores.

A linguagem de programação disponível no *Access* é a *Microsoft Visual Basic for Applications*. Esta linguagem substitui e estende as capacidades das anteriormente existentes, linguagens de programação de macros específicas para as aplicações. Pode ser usado para controlar a quase totalidade dos aspetos da aplicação anfitriã, incluindo a manipulação de aspetos do interface do usuário, tais como menus e barra de ferramentas e o trabalho com formulários desenhados pelo usuário ou com caixas de diálogo.

5.1 - Interface para trabalho

Este programa é constituído por uma série de formulários.
Existem dois tipos de formulários:

- Formulários para gestão da base de dados: permitem adicionar, alterar e remover cabos da base de dados;
- Formulários de cálculo: destinados a realizar o cálculo térmico, elétrico e mecânico tanto para cabos convencionais como para cabos HTLS. Os cálculos encontram-se de acordo com o estabelecido pela norma europeia EN 50341-1.

Todos os dados demonstrados nos formulários têm explícito as unidades *S.I.* em que têm que ser introduzidos e as unidades a que os dados de saída se encontram de forma a evitar erros pelo utilizador.

As várias entradas de dados na aplicação têm um certo grau de proteção contra erros indesejados. A proteção não cobre toda a gama possível de erros que os utilizadores possam introduzir. Como tal, é necessário ter precaução na entrada de dados de forma a evitar anomalias na aplicação.

Cada um dos formulários de cálculo é constituído por uma zona de seleção dos cabos guardados na base de dados, sendo os dados referentes ao cabo selecionado demonstrados numa zona chamada "*Dados do condutor*"; esta ainda possibilita a entrada manual dos dados do cabo. Perante o estudo a realizar, existe uma parte do formulário destinada à entrada dos valores da linha necessários para a realização do estudo em questão. Em todos os formulários existe uma zona que fornece os resultados dos cálculos realizados, intitulada "*Resultados*". É possível imprimir o formulário depois de realizados os cálculos de forma a manter um registo permanente dos seus valores.

É enviado em anexo informação sobre as várias metodologias seguidas por cada um dos formulários, representados por fluxogramas. Estas metodologias têm como objetivo ajudar na compreensão do funcionamento de cada um dos formulários.



Figura 5.1 – Exemplo de formulário para cálculo mecânico.

Em relação aos formulários para gestão da base de dados, estes interfaces são constituídos por caixas de texto que disponibilizam os dados dos vários cabos e que além da função de consulta de dados permite a sua manutenção. Estes formulários têm também uma série de botões que permitem a fácil navegação entre os vários cabos existentes na base de dados.



Figura 5.2 - Exemplo de formulário para controlo de base de dados.

5.2 - Teste do programa

O programa desenvolvido teve que ser validado de forma a confirmar o seu bom funcionamento. Desta forma foram comparados os resultados obtidos através da aplicação informática com os dados de uma linha aérea de AT disponibilizada pela Empresa REN. A linha em questão é a mesma que será estudada futuramente, no capítulo 6, para avaliar a exequibilidade de um uprating de um dos seus ternos. Os dados comparados neste teste são os da linha antes da realização do uprating, uma vez que os valores após uprating são desconhecidos.

O cabo utilizado foi um ACSR 325 "BEAR", que tem as seguintes propriedades:

Tabela 5.1 — Características do cabo ACSR "BEAR".

Cabo ACSR "BEAR"		
Secção do cabo	326,12	mm^2
Diâmetro	0,02345	m
Coeficiente de dilatação térmica	0,0000178	K^{-1}
Módulo de Young	7950	Kgf/mm^2
Tração de rotura	10938	daN
Peso linear	1,215	Kg/m

Executando o programa com os dados da linha fornecida, os dados do cabo e considerando a temperatura em regime permanente do cabo a 85 °C, pode obter-se a seguinte tabela:

Tabela 5.2 — Características do cabo ACSR "BEAR".

	Dados REN				Dados Programa	
Cantão	Tração no pior estado [daN]	Tensão no pior estado [daN/mm^2]	EDS [%]	Parâmetro [m]	EDS [%]	Parâmetro [m]
1	3360	10,30	22,8	1683	22,835	1682,8893
2	3346	10,26	21,9	1793	21,852	1792,9487
3	3219	9,87	23,1	1464	23,085	1463,8198
4	3176	9,74	20,8	-	20,754	1692,0689
5	3353	10,28	22,3	1740	22,313	1738,5363
6	3277	10,05	22,3	1629	22,252	1636,5748
7	3285	10,07	22,8	-	22,76	1587,1201
8	2717	8,33	18,8	1257	18,834	1257,2691
9	1570	4,81	9,6	415	9,581	413,1551

Como se pode observar na tabela 5.2, os valores do parâmetro e do EDS obtidos no programa são bastante próximos dos valores fornecidos pela REN, indicando que o programa funciona corretamente, pois apresenta uma margem de erro bastante reduzida podendo ser desprezada.

É necessário também referir que para realizar este estudo mecânico foi necessário fazer umas alterações na codificação do programa, pois o mesmo é baseado nas normas Europeias, enquanto estes valores fornecido pela REN foram obtidos tendo em consideração as normas Portuguesas, como definidas no RSLEAT [24].

De forma a verificar se o programa destinado ao cálculo térmico foi realizado de uma forma correta, foram comparados os resultados obtidos com um exemplo fornecido pelo IEEE 738-2006.

Os dados fornecidos pelo exemplo são os seguintes:

Tabela 5.3 — Dados para o cálculo térmico.

Dados		
Velocidade do vento	0,61	m/s
Emissividade	0,5	
Absorvidade solar	0,5	
Temperatura ambiente	40	°C
Temperatura do cabo	100	°C
Diâmetro do cabo	28,1	Mm
Resistência ac a 25 °C	0,07283	Ω/km
Resistência ac a 75 °C	0,08688	Ω/km
Azimute da linha	90	°
Latitude	30	°
Atmosfera	Limpa	
Hora	11	
Data	10/06/2013	
Elevação acima do mar	100	m

Utilizando estes dados no programa, foi possível obter o valor da corrente no cabo à temperatura de 100 °C:

Tabela 5.4 — Exemplo de Cálculo Térmico.

Dados Exemplo			
Perda de calor por convecção [W/m]	**Perda de calor irradiada [W/m]**	**Ganho de calor solar [W/m]**	**Corrente [A]**
82,3	24,44	14	994
Dados Programa			
Perda de calor por convecção [W/m]	**Perda de calor irradiada [W/m]**	**Ganho de calor solar [W/m]**	**Corrente [A]**
81,57	24,41	14,01	989,58

Os valores obtidos no programa são bastante próximos aos fornecidos pelo IEEE 736-2006. A diferença existente entre eles podia ser atenuada se os valores das perdas de calor por convecção fossem mais próximos uns dos outros. Esta discrepância acontece pois no exemplo a variável densidade do ar é obtida através de valores tabelados, enquanto no programa é obtida através de uma fórmula matemática. Considera-se que a aplicação informática funciona corretamente, pois tanto o uso da fórmula como o uso dos valores tabelados são procedimentos considerados corretos.

Capítulo 6

Caso de estudo

6.1 - Objetivo

A Empresa REN pretende aumentar a capacidade de transporte de um terno da linha dupla de Ourique – Estói ½, a 150kV, no troço compreendido entre o seu apoio 144 e a subestação de Estói, sem realizar alteração das estruturas. Esta necessidade de realizar um uprating à linha surge porque a REN pretende interligar um dos ternos desta linha com a linha de Tunes - Tavira, constituindo assim as ligações Tunes – Estói e Estói – Tavira, a 150kV.

A remodelação e o aumento da capacidade de transporte de energia pressupõe a substituição da totalidade de um terno de cabos ACSR 325 "Bear", por um dos seguintes cabos HTLS:

- ACCR 556-T16
- ACSS/AW (264-AL0/62-14EHSA)
- GTACSR-342

O objetivo do uprate a esta linha é fazer com que no terno que usa cabos convencionais fique a circular 854A a uma temperatura ambiente de 15 °C, ou de 751A a uma temperatura ambiente de 30 °C. No terno que utilizará cabos HTLS a corrente a circular passa a ser de 1141A a 15 °C ou de 1063A a 30 °C.

Os cabos devem obrigatoriamente estar expostos a um EDS inferior a 22% e a tração máxima em todos os cabos da linha deve ser inferior ou igual a 3860 daN. Os cabos HTLS em funcionamento à sua temperatura nominal devem ter uma flecha inferior à flecha dos cabos convencionais à sua temperatura nominal.

6.2 - Regulamentação

O projeto realizado obedecerá ao disposto na norma Europeia, EN50341-1, conjugada pelos aspetos normativos nacionais referentes a Portugal.

6.3 - Características da linha

O troço da linha em estudo tem um comprimento total de 12.243km, é uma linha dupla trifásica, constituída por 6 cabos ACSR 325 "Bear". O troço da linha é constituído por 26 apoios reticulados em aço galvanizado das famílias "AW" e "CW". Considera-se que a linha situa-se numa zona sem formação de gelo, tem como fator de potência 0.9 e a distância entre apoios CW é de 3626.45m e entre apoios AW é de 8617.27m.

Seguidamente é apresentado todos os dados dos vários apoios ao longo do troço da linha:

Tabela 6.1 — Características dos apoios ao longo da linha.

Apoio	Família	Classificação	Altura útil [m]	Altura total [m]	Altura do solo [m]
144	cwt1	Amarração	22,6	39,45	379,36
145	cwt3	Amarração	34,6	51,45	289,6
146	cwr2	Amarração	28,6	45,45	254,3
147	awr1	Amarração	19	35	298,3
148	aws1	Suspensão	16,8	35	318,42
149	aws1	Suspensão	16,8	35	318,23
150	cws1	Suspensão	16,8	35	328,54
151	cws4	Suspensão	16,8	35	324,2
152	awr2	Suspensão	22,8	41	287,68
153	awr3	Amarração	31	47	317,44
154	aws3	Suspensão	28,8	47	227,33
155	aws3	Suspensão	28,8	47	216,77
156	aws3	Suspensão	28,8	47	213,79
157	aws3	Suspensão	28,8	47	219,66
158	aws3	Suspensão	28,8	47	225,44
159	aws3	Suspensão	28,8	47	222,01
160	aws3	Suspensão	28,8	47	228,98
161	awr3	Suspensão	28,8	47	310,05

162	aws1	Suspensão	16,8	35	307,48
163	cwr2	Amarração	28,6	45,45	314,39
164	aws1	Suspensão	16,8	35	225,17
165	aws1	Suspensão	16,8	35	159,93
166	aws1	Suspensão	22,8	41	135,61
167	aws1	Amarração	22,8	41	122,68
168	cwt3	Amarração	34,6	51,45	113,45
169	cwa1	Amarração	22,6	39,45	94,9
SubEt	PAL1/AP20	Amarração	12	14,5	90,39

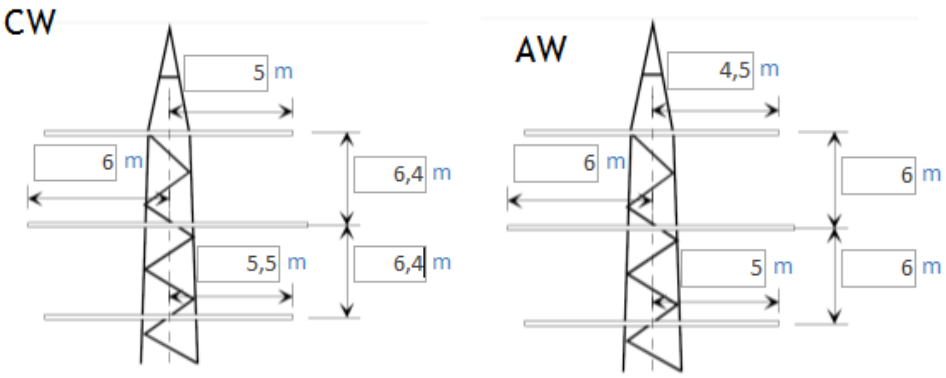


Figura 6.1 - Comprimento dos braços nas famílias de apoios.

De forma a realizar os cálculos mecânicos da linha, são necessários vários dados, como o comprimento dos vãos e o desnível entre apoios da linha. O desnível é calculado através da soma da diferença entre a altura do solo na zona do apoio em relação ao nível do mar com a diferença de altura entre os apoios do vão.

Seguidamente são apresentados todos os dados referentes ao troço da linha:

Tabela 6.2 — Dados da linha.

1º Apoio	2º Apoio	Cantão	Vão [m]	Vão equivalente [m]	Diferença de altura entre apoios [m]	Desnível [m]
144	145	1	469,90	469,9	12	101,76
145	146	2	728,43	728,43	6	41,3
146	147	3	312,71	312,71	9,6	53,6
147	148	4	523,90	666,7	2,2	22,32
148	149	4	295,87	666,7	0	0,19

149	150	4	388,23	666,7	0	10,31
150	151	4	329,65	666,7	0	4,34
151	152	4	832,61	666,7	6	42,52
152	153	4	835,81	666,7	8,2	37,96
153	154	5	665,75	568,9	2,2	92,31
154	155	5	402,85	568,9	0	10,56
155	156	5	593,26	568,9	0	2,98
156	157	5	485,36	568,9	0	5,87
157	158	5	461,23	568,9	0	5,78
158	159	5	475,85	568,9	0	3,43
159	160	5	451,96	568,9	0	6,97
160	161	5	589,02	568,9	0	81,07
161	162	5	769,72	568,9	12	14,57
162	163	5	205,93	568,9	11,8	18,71
163	164	6	582,74	455,7	11,8	101,02
164	165	6	427,23	455,7	0	65,24
165	166	6	329,99	455,7	6	30,32
166	167	6	321,04	455,7	0	12,93
167	168	7	394,27	394,27	11,8	21,03
168	169	8	296,17	296,17	12	30,55
169	SubEt	9	74,24	74,24	10,6	15,11

6.4 - Características dos cabos

Como o troço da linha, onde será realizado o estudo, é uma linha dupla trifásica, esta será constituída por 6 cabos. Antes do uprating a linha é constituída por 6 cabos ACSR 325 “Bear”, com as características definidas anteriormente na tabela 5.1. Após o uprating, a linha será constituída por 3 cabos ACSR 325 “Bear” e por 3 cabos HTLS a selecionar de uma das 3 hipóteses de estudo. Estes cabos apresentam as seguintes características:

Tabela 6.3 — Características dos cabos HTLS.

	GTACSR-342	ACSS/AW	ACCR 556-T16
Secção do cabo [mm^2]	342	326,1	328
Secção da alma [mm^2]	47,81	61,7	46
Diâmetro [mm]	23,73	23,45	23,5
Coeficiente de dilatação térmica acima do joelho [K^{-1}]	0,0000118	0,0000119	0,0000063
Coeficiente de dilatação térmica abaixo do joelho [K^{-1}]	0,0000193	0,0000188	0,0000165
Módulo de young acima do joelho [Kgf/mm^2]	19340	17400	21600
Módulo de young abaixo do joelho [Kgf/mm^2]	7880	8805	7800
Tracção de rotura [daN]	11986	12382	10120
Peso linear [Kg/m]	1,1859	1,183	0,937
Temperatura de joelho [°C]	Temp. Ambiente	40 a 60	40 a 70

Existe uma grande dificuldade em definir as temperaturas de joelho para os vários cabos para um só valor sem a realização do ensaio flecha/tensão vs. temperatura definido na subsecção 4.9.1, mas é considerado que a temperatura de joelho normalmente se situa dentro de uma certa gama de temperaturas. Para a realização deste estudo considerou-se que o valor da temperatura de joelho era o maior possível, de forma a fazer o cálculo para o pior cenário possível, pois se os requisitos da REN são respeitados para o pior cenário torna-se desnecessária a realização do cálculo mecânico que considere o valor de temperatura de joelho mais próximo da realidade. O único cabo que não é abrangido por este problema é o GTACSR, pois o mesmo já se encontra com folga entre o condutor de alumínio e alma de aço desde a sua instalação. Como tal considera-se como temperatura de joelho a temperatura ambiente.

Pode-se ver também que os cabos escolhidos têm todos pesos semelhantes ao cabo ACSR previamente instalado na linha e todos têm secções semelhantes. A semelhança de secções garante que os apoios vão suportar os novos cabos colocados, não sendo necessário realizar alterações nos apoios.

6.5 - Cálculo térmico

O primeiro passo para avaliar a exequibilidade de um uprating é o cálculo da temperatura do cabo, pois é necessário saber se o cabo HTLS selecionado aguenta com o incremento de temperatura que surgirá com o aumento da corrente. Também é necessário saber este valor para a realização do cálculo mecânico das flechas.

Neste cálculo foram considerados os dados apresentados na tabela 6.4.

Tabela 6.4 — Dados para o cálculo térmico.

Dados		
Velocidade do vento	0,61	m/s
Emissividade	0,5	
Absorvidade solar	0,5	
Temperatura ambiente	30	°C
Azimute da linha	90	°
Latitude	30	°
Atmosfera	Industrial	
Hora	11	
Data	13/12/2013	
Elevação acima do mar	350	m

Utilizando os dados em conjunção com os dados dos cabos no programa, foi possível obter as seguintes temperaturas de funcionamento à temperatura ambiente de 30 °C:

Tabela 6.5 — Temperatura nominal dos cabos.

ACSR 325 "Bear" [°C]	**GTACSR-342 [°C]**	**ACCR 556-T16** [°C]	**ACSS/AW** [°C]
87	133	131,58	143

Pode-se verificar que os cabos HTLS selecionados vão aguentar com o incremento de corrente que existirá na linha, pois nenhum deles atinge o seu limite de capacidade térmico.

6.6 - Cálculo mecânico

De forma a obter a tensão de montagem para os cantões do troço da linha à temperatura de funcionamento obtida anteriormente no cálculo térmico, é necessário definir a tensão do pior estado. Como foi dito anteriormente, o EDS tem de ser sempre inferior ou igual a 22%, como tal foi necessário variar a tensão mecânica no cabo, no pior estado atmosférico, de forma a obedecer a este requisito, tendo sempre atenção ao fato de que a tração mecânica no cabo tem que ser sempre inferior ou igual a 3860daN.

Utilizando os dados da linha referidos anteriormente na aplicação informática, foi possível obter os valores das tabelas 6.6, 6.7, 6.8,6.9 e 6.10, para os vários cantões da linha:

Tabela 6.6 — Cálculo mecânico para os vários cantões (ACSR 325 "BEAR").

Cantão	Tração no pior estado [daN]	Tensão no pior estado [daN/mm^2]	Tensão de segurança [daN/mm^2]	EDS [%]	Tensão à temperatura nominal [daN/mm^2]	Parâmetro [m]
1	3326,424	10,2		21,829	6,03816	1620,71168
2	3456,872	10,6		21,883	6,67176	1790,77728
3	3163,364	9,7		21,904	5,23462	1405,03235
4	3261,2	10		21,917	6,57749	1765,47407
5	3391,648	10,4	13,41592	21,856	6,35028	1704,48827
6	3130,752	9,6		21,774	5,85534	1571,64073
7	3261,2	10		21,849	5,71479	1533,91545
8	3130,752	9,6		21,847	5,10448	1370,10119
9	3261,2	10		21,932	2,15433	578,247

Tabela 6.7 — Cálculo mecânico para os vários cantões (GTACSR-342).

Cantão	Tração no pior estado [daN]	Tensão no pior estado [daN/mm^2]	Tensão de segurança [daN/mm^2]	EDS [%]	Tensão à temperatura nominal [daN/mm^2]	Parâmetro [m]
1	3659,4	10,7		21,955	7,21382	2080,3832
2	3830,4	11,2		21,956	7,4609	2151,63825
3	3420	10		21,784	6,80423	1962,26213
4	3591	10,5		21,875	7,39657	2133,08621
5	3727,8	10,9	14,01871	21,846	7,30513	2106,71596
6	3454,2	10,1		21,799	7,14474	2060,46132
7	3556,8	10,4		21,847	7,04203	2030,84093
8	3385,8	9,9		21,761	6,74127	1944,10519
9	3625,2	10,6		21,992	5,07118	1462,47033

Tabela 6.8 — Cálculo mecânico para os vários cantões (ACSS/AW).

Cantão	Tração no pior estado [daN]	Tensão no pior estado [daN/mm^2]	Tensão de segurança [daN/mm^2]	EDS [%]	Tensão à temperatura nominal [daN/mm^2]	Parâmetro [m]
1	3750,15	11,5		21,918	6,98304	1924,91069
2	3847,98	11,8		21,423	7,47533	2060,61294
3	3521,88	10,8		21,888	6,14441	1693,73804
4	3684,93	11,3		21,849	7,4978	2066,80691
5	3847,98	11,8	15,18798	21,995	7,31903	2017,52805
6	3554,49	10,9		21,853	6,91167	1905,23718
7	3652,32	11,2		21,868	6,6366	1829,41273
8	3489,27	10,7		21,887	6,02089	1659,68912
9	3717,54	11,4		21,73	2,96532	817,40562

Tabela 6.9 — Cálculo mecânico para os vários cantões (ACCR 556-T16).

Cantão	Tração no pior estado [daN]	Tensão no pior estado [daN/mm^2]	Tensão de segurança [daN/mm^2]	EDS [%]	Tensão à temperatura nominal [daN/mm^2]	Parâmetro [m]
1	3411,2	10,4		21,737	5,55023	1942,87667
2	3640,8	11,1		21,871	6,1315	2146,35219
3	3148,8	9,6		21,704	4,83881	1693,84171
4	3378,4	10,3		21,847	6,03353	2112,05746
5	3542,4	10,8	12,34146	21,963	5,86784	2054,05715
6	3214,4	9,8		21,814	5,51742	1931,39142
7	3312,8	10,1		21,81	5,27759	1847,43812
8	3116	9,5		21,747	4,74107	1659,62749
9	3017,6	9,2		21,851	2,22159	777,67505

Recorrendo as fórmulas 3.11 e 3.12 e aos valores determinados anteriormente é possível, para a aplicação informática desenvolvida, determinar as flechas dos vários vãos da linha à temperatura de funcionamento normal.

Tabela 6.10 — Flechas para os vários cabos à temperatura normal de funcionamento.

1º Apoio	2º Apoio	Flecha ACSR [m]	Flecha GTACSR [m]	Flecha ACSS/AW [m]	Flecha ACCR [m]
144	145	17,42477	13,57468	14,67109	14,53542
145	146	37,09719	30,87545	32,23934	30,95149
146	147	8,82663	6,32011	7,32209	7,32164
147	148	19,45088	16,09875	16,61501	16,25904
148	149	6,19799	5,12984	5,29434	5,18091
149	150	10,6753	8,83554	9,11888	7,92213
150	151	7,69471	6,36862	6,57285	6,43203
151	152	49,14705	40,67714	41,97152	41,08214
152	153	49,51209	40,97927	42,2341	41,38728
153	154	32,71508	26,54981	27,72349	27,23046
154	155	11,90562	9,63252	10,05834	9,87946
155	156	25,8114	20,88332	21,8065	21,4187
156	157	17,27729	13,9786	14,59655	14,33696
157	158	15,60218	12,62331	13,188134	13,28594
158	159	15,60138	13,4355	14,02949	13,74411
159	160	14,98192	12,12148	12,65733	12,43223
160	161	25,14364	20,77969	21,69829	21,31241
161	162	43,45696	35,15988	36,71417	36,06125
162	163	2,65033	2,52655	2,63824	2,59133
163	164	27,41169	20,90859	22,61206	22,30585
164	165	14,6854	11,20146	12,11407	11,95002
165	166	8,69729	6,63396	7,17444	7,07729
166	167	8,20403	6,25772	6,76755	6,6759
167	168	12,68566	9,58161	10,6366	10,53282
168	169	8,04522	5,66984	6,64146	6,64171
169	SubEt	1,21587	0,48074	0,86013	0,90407

6.7 - Cálculo elétrico

Como já foi referido anteriormente, este cálculo tem como objetivo principal a obtenção das perdas por efeito joule na linha aérea e da queda de tensão que acontece na mesma.

Como este ensaio depende da família de apoios existentes na linha, foi necessário realizar o cálculo elétrico para os dois tipos de famílias de apoios, sendo as perdas de potência e a queda de tensão na linha, a soma dos valores obtidos para cada um dos cálculos.

Utilizando os dados da linha referidos anteriormente, foi possível obter os de perdas de potência e quedas de tensão para a linha fornecidos pelas tabelas 6.11, 6.12, 6.13, 6.14, 6.15, 6.16, 6.17 e 6.18:

Tabela 6.11 — Dados do cálculo elétrico para as famílias de apoio (ACSR 325 "BEAR").

	DADOS CW	**DADOS AW**
Intensidade de corrente por cabo [A]	751	751
Densidade de corrente [A/mm^2]	2,30283	2,30283
Resistência elétrica por fase [Ω]	0,40339	0,95855
Perdas por fase [MW]	0,6825	1,6219
Distância equivalente entre fases [m]	10,32084853	9,735094557
Coeficiente de auto-indução [H/km]	0,001407321	0,001394354
Reatância [Ω/km]	0,442123	0,438049
Reatância da linha [Ω]	1,603336	3,774788
Queda de tensão [V]	1381,3257	3262,4447
Capacidade [nF/km]	8,21067	8,28986
Suscetância [S/km]	2,58E-06	2,60E-06
Perdas por quilómetro [kW/km]	188,2005818	188,2150612
Condutância [S/km]	0,000156834	0,000156846
|Impedância| [Ω/km]	0,455901219	0,451951797
∠Impedância [°]	75,87782455	75,75182032
|Impedância| [Ω/km]	0,000156855	0,000156868
∠Impedância [°]	0,942263209	0,951276834

Tabela 6.12 — Dados finais do cálculo elétrico (ACSR 325 "BEAR").

Cálculo elétrico total	
Resistência elétrica por fase [Ω]	1,36194
Perdas por fase [MW]	5,378124
Reatância da linha [Ω]	2,3044
Queda de tensão [V]	4643,7704
Queda de tensão em ralação à tensão da linha [%]	3,1

Tabela 6.13 — Dados do cálculo elétrico para as famílias de apoio (GTACSR-342).

	DADOS CW	**DADOS AW**
Intensidade de corrente por cabo [A]	1063	1063
Densidade de corrente [A/mm^2]	3,10819	3,10819
Resistência elétrica por fase [Ω]	0,36863	0,87596
Perdas por fase [MW]	1,2496	2,9694
Distância equivalente entre fases [m]	10,32084853	9,735094557
Coeficiente de auto-indução [H/km]	0,001403666	0,00139198
Reatância [Ω/km]	0,440975	0,437303
Reatância da linha [Ω]	1,599172	3,768361
Queda de tensão [V]	1894,251	4475,8008
Capacidade [nF/km]	8,23284	8,30453
Suscetância [S/km]	2,59E-06	2,61E-06
Perdas por quilómetro [kW/km]	344,5794096	344,5870908
Condutância [S/km]	0,00028715	0,000287156
|Impedância| [Ω/km]	0,452539103	0,448962497
∠Impedância [°]	77,01916248	76,91392347
|Impedância| [Ω/km]	0,000287161	0,000287168
∠Impedância [°]	0,51606252	0,520544452

Tabela 6.14 — Dados finais do cálculo elétrico (GTACSR-342).

Cálculo elétrico total	
Resistência elétrica por fase [Ω]	1,24459
Perdas por fase [MW]	5,367533

Reatância da linha [Ω]	4,219
Queda de tensão [V]	6370,0518
Queda de tensão em ralação à tensão da linha [%]	4,2

Tabela 6.15 – Dados do cálculo elétrico para as famílias de apoio (ACSS/AW).

	DADOS CW	**DADOS AW**
Intensidade de corrente por cabo [A]	1063	1063
Densidade de corrente [A/mm^2]	3,25974	3,25974
Resistência elétrica por fase [Ω]	0,37792	0,89803
Perdas por fase [MW]	1,2811	3,0442
Distância equivalente entre fases [m]	10,32084853	9,735094557
Coeficiente de auto-indução [H/km]	0,00140604	0,001394354
Reatância [Ω/km]	0,44172	0,438049
Reatância da linha [Ω]	1,601877	3,774788
Queda de tensão [V]	1911,8155	4517,5297
Capacidade [nF/km]	8,21843	8,28986
Suscetância [S/km]	2,58E-06	2,60E-06
Perdas por quilómetro [kW/km]	353,2655903	353,2673341
Condutância [S/km]	0,000294388	0,000294389
|Impedância| [Ω/km]	0,453847217	0,450274921
∠Impedância [°]	76,72517987	76,61791334
|Impedância| [Ω/km]	0,000294399	0,000294401
∠Impedância [°]	0,502492936	0,506858101

Tabela 6.16 – Dados finais do cálculo elétrico (ACSS/AW).

Cálculo elétrico total	
Resistência elétrica por fase [Ω]	1,27595
Perdas por fase [MW]	5,376665
Reatância da linha [Ω]	4,3253
Queda de tensão [V]	6429,3452
Queda de tensão em ralação à tensão da linha [%]	4,3

Tabela 6.17 — Dados do cálculo elétrico para as famílias de apoio (ACCR 556-T16).

	DADOS CW	DADOS AW
Intensidade de corrente por cabo [A]	1063	1063
Densidade de corrente [A/mm^2]	3,24085	3,24085
Resistência elétrica por fase [Ω]	0,35989	0,85519
Perdas por fase [MW]	1,22	2,899
Distância equivalente entre fases [m]	10,32084853	9,735094557
Coeficiente de auto-indução [H/km]	0,001405614	0,001393928
Reatância [Ω/km]	0,441587	0,437915
Reatância da linha [Ω]	1,601391	3,773635
Queda de tensão [V]	1881,5494	4445,616
Capacidade [nF/km]	8,22101	8,29249
Suscetância [S/km]	2,58E-06	2,61E-06
Perdas por quilómetro [kW/km]	336,4171573	336,4174501
Condutância [S/km]	0,000280348	0,000280348
|Impedância| [Ω/km]	0,452600772	0,449019655
∠Impedância [°]	77,33393117	77,23121491
|Impedância| [Ω/km]	0,00028036	0,00028036
∠Impedância [°]	0,527823182	0,532411985

Tabela 6.18 — Dados finais do cálculo elétrico (ACCR 556-T16).

Cálculo elétrico total	
Resistência elétrica por fase [Ω]	1,21508
Perdas por fase [MW]	5,375026
Reatância da linha [Ω]	4,119
Queda de tensão [V]	6327,1654
Queda de tensão em ralação à tensão da linha [%]	4,2

6.8 - Avaliação do uprating

A avaliação do uprating do troço da linha Ourique – Estói ½ vai ser realizada analisando os dados obtidos no cálculo mecânico e elétrico fornecidos anteriormente de uma forma independente. Analisando para cada tipo de cálculo qual é a melhor hipótese, somente após uma análise é que poderá ser tomada a decisão correta.

6.8.1 - Análise dos resultados do cálculo mecânico

De forma a facilitar a compreensão dos valores obtidos no cálculo mecânico, foi criado um gráfico que regista os valores das flechas dos cabos à sua temperatura de funcionamento permanente, nos vários vãos da linha aérea, referidos nas figuras 6.2 e 6.3.

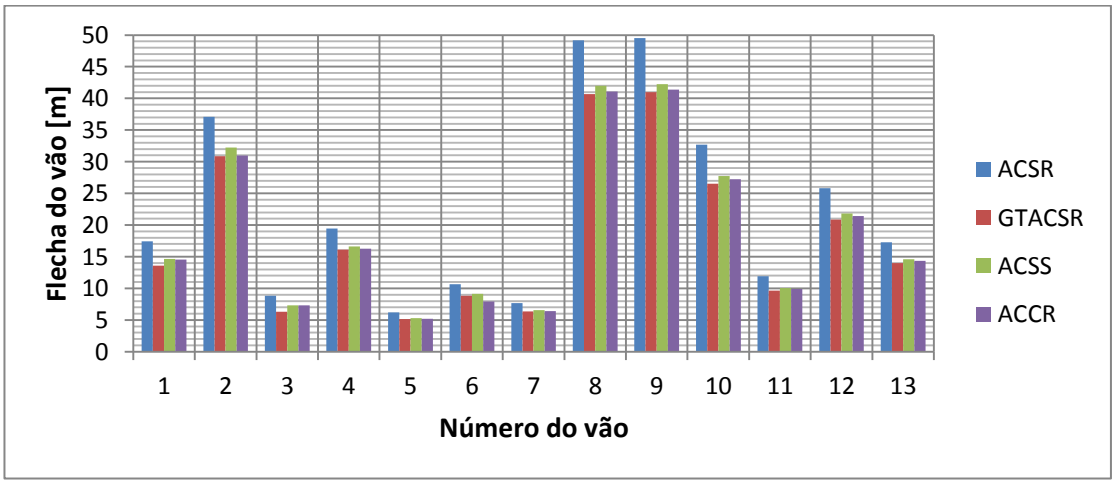


Figura 6.2 – Comprimento das flechas para os vários cabos do vão 1 ao 13.

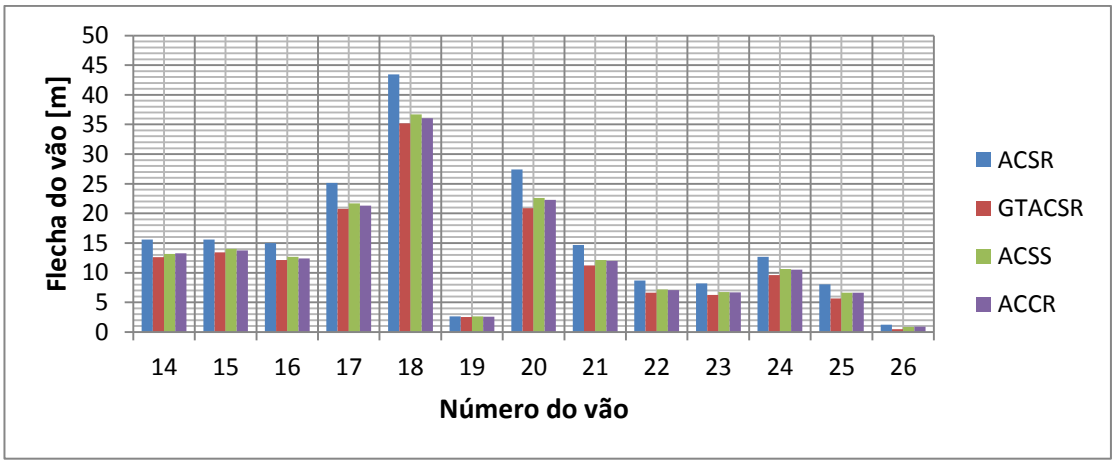


Figura 6.3 – Comprimento das flechas para os vários cabos do vão 14 ao 26.

Tomando como exemplo o vão 2 ou seja o vão entre os apoios 145 e 146, pois trata-se de um vão de difícil traçado, devido ao seu elevado comprimento e ao seu desnível.

Apresenta-se na figura 6.4 um taçado em autoCAD das catenários do referido vão.

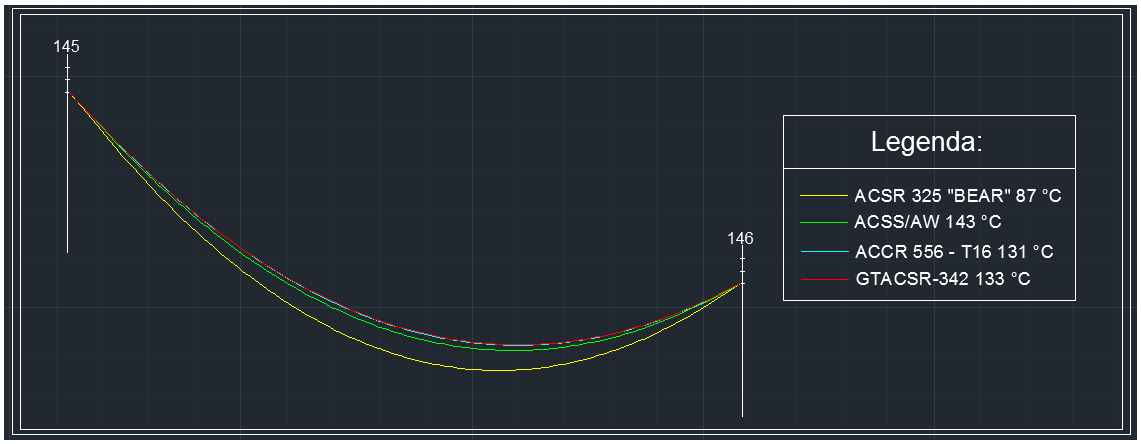


Figura 6.4 – Comparação das catenárias no vão 2.

Na figura 6.4 não é possível distinguir claramente as catenárias do cabo GTACSR e a do cabo ACCR, dado que existe semelhanças nos valores das suas flechas, sendo a discrepância de flecha entre estes apenas de 0,08 metros.

Através da analise cuidada das figuras 6.2, 6.3 e 6.4 é possível concluir que todos os cabos HTLS escolhidos têm flechas inferiores à flecha do cabo ACSR à sua temperatura de funcionamento normal, o que nos sugere que aqueles cabos cumprem com o requisito estabelecido pela REN (novo cabo tenha à sua temperatura de funcionamento normal uma flecha inferior à do cabo ACSR a 87 °C). Como as flechas dos cabos HTLS são inferiores às do cabo ACSR que está instalado antes do uprating, pode-se deduzir que as distâncias mínimas ao solo são cumpridas.

Pode-se, contudo, ver que dos cabos HTLS o que tem menor flecha é o GTACSR-342. Este resultado já era esperado, pois o GTACSR é o que tem menor temperatura de joelho devido ao seu espaçamento entre a alma e o alumínio, que existe desde o momento de instalação, o que faz com que o seu peso seja suportado quase sempre pela alma, fazendo com que a sua flecha cresça mais lentamente com o aumento da temperatura; ao contrario dos outros cabos, que têm temperaturas de joelho superiores.

Também é possível ver que os resultados obtidos confirmam o gráfico apresentado pela figura 3.7, em relação à ordem dos cabos com maior flecha.

6.8.2 - Análise dos resultados do cálculo elétrico

De forma a escolher o cabo HTLS que tem melhor desempenho elétrico, é necessário comparar as quedas de tensão na linha e as perdas nos 3 cabos. De forma a facilitar a análise, é útil uma consulta atenta das figuras 6.5 e 6.6.

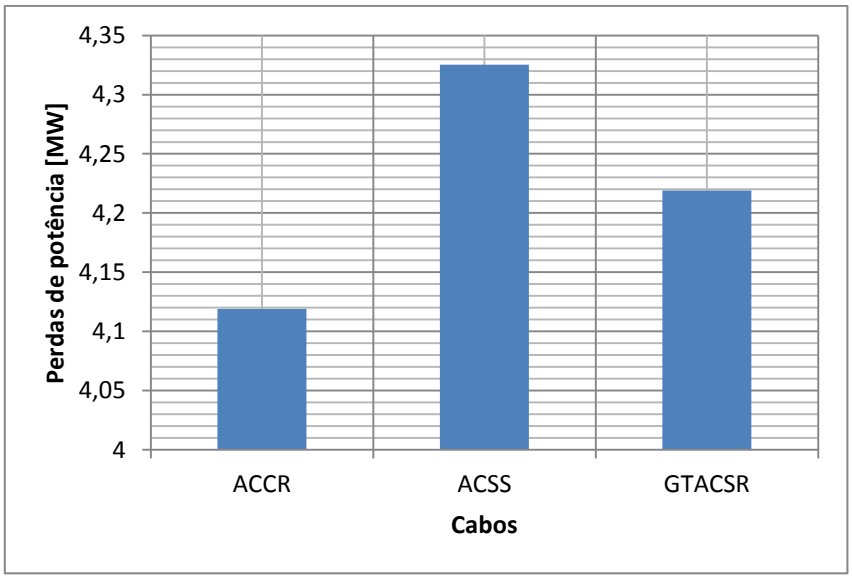


Figura 6.5 - Perdas de potência na linha.

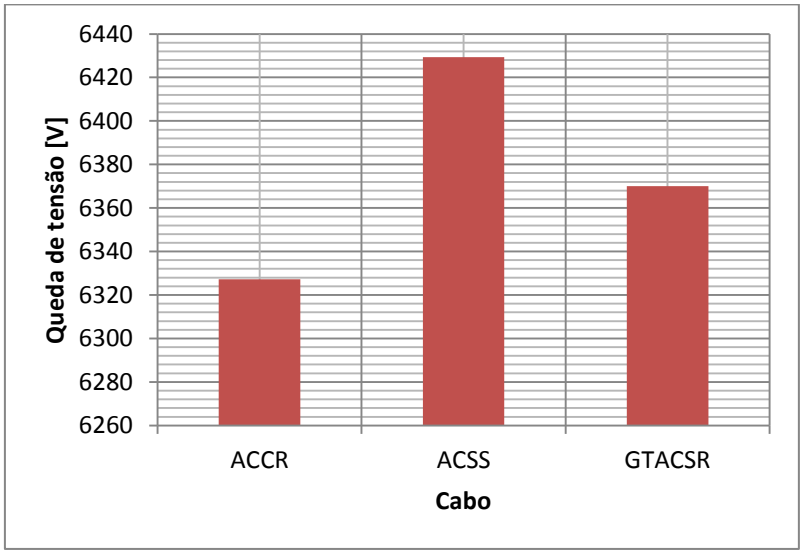


Figura 6.6 - Quedas de tensão na linha.

Analisando estas figuras, pode-se concluir que o cabo ACCR é o que apresenta melhores características elétricas. Este resultado acontece pois o cabo ACCR tem uma alma compósita constituída por uma alma de fibra de óxido de alumínio, o qual tem uma maior resistência

mecânica do que as almas de aço. Devido a esta diferença nos materiais da alma é possível, para a mesma secção, que os cabos ACSS e GTACSR, dispor de um cabo com a mesma resistência à tração mecânica, com uma secção de alma inferior e maior quantidade de alumínio, o que aumenta a sua condutividade, diminuindo a resistência elétrica e diminuindo as perdas por efeito joule e as quedas de tensão.

As quedas de tensão na linha para todos os cabos HTLS têm um valor aceitável, pois não são superiores a 5% da tensão nominal.

6.8.3 - Conclusões da análise

Conforme visto antes, sob o ponto de vista mecânico, a melhor opção para um uprating do troço da linha Ourique – Estói ½ é o cabo GTACSR-342, e sob o ponto de vista elétrico é o cabo ACCR 556 – T16. Como os dois cálculos não conduziram à mesma solução, há que tomar a decisão com base noutros fatores, relevantes à REN.

Neste projeto de uprating, o principal objetivo para a REN é aumentar a capacidade de um terno da linha sem provocar o aumento da flecha, em relação ao cabo anteriormente implementado. Desta forma pode-se verificar que todos os cabos considerados neste estudo podem ser implementados, pois todos cumprem com este requesito.

Como todas as empresas, a REN deseja maximizar o lucro que obtém através do transporte de energia, como tal é muito importante ter em atenção as perdas nas linhas. Outro aspeto que dá maior importância ao cálculo elétrico é a possibilidade de amortização, a longo prazo, do investimento no projeto de uprating, pois com menos perdas de potência na linha a entidade produtora de energia não necessita de fornecer o excesso de potência que seria perdida por efeito joule, diminuindo assim os seus custos de produção de energia elétrica. Portanto o cálculo elétrico vai ser o cálculo mais importante para a escolha do cabo HTLS a implementar. Como se pode verificar, o cabo ACCR 556 – T16 apresenta menos perdas e menos quedas de tensão, devendo pois ser o escolhido.

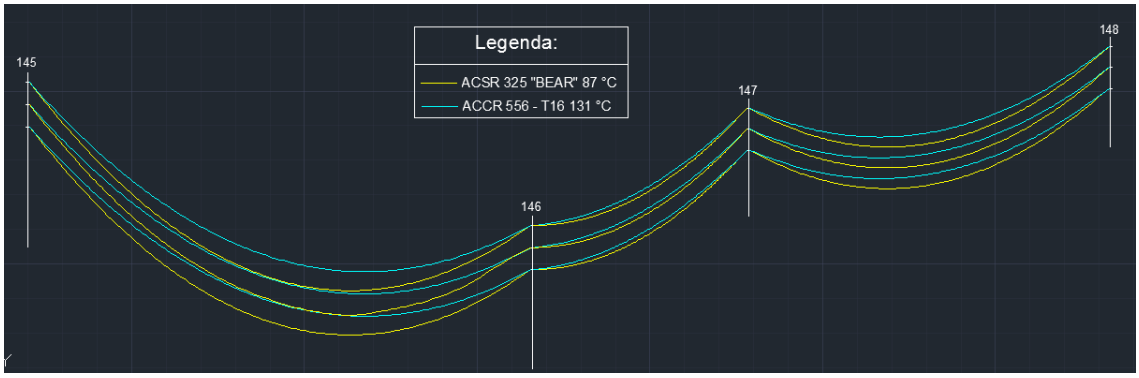


Figura 6.7 – Exemplo da forma final da linha, entre os apoios 145 e 148, após a realização do uprating.

Outro aspeto que pode ser referido é que o terno que sofrerá o uprate, não vai estar a transportar o máximo de corrente que teria capacidade de transportar, pois o cabo tem uma

capacidade de transporte até cerca de 220 °C, o que permite transportar até um máximo de 1400 A com a temperatura ambiente a 30 °C ou 1450 A com a temperatura ambiente a 15 °C. Esta margem permite evitar congestionamentos e futuros upratings na linha a longo prazo proporcionados pelo aumento do consumo energético, sendo uma segurança extra para a empresa responsável pelo transporte de energia.

É enviado em anexo o perfil longitudinal em AutoCAD da linha aérea após o uprating com cabos ACCR.

Capítulo 7

Conclusões

Com este trabalho foi possível verificar que a realização do uprating de uma linha aérea de alta tensão é um problema cuja decisão envolve uma série de aspetos diferentes, como aspetos térmicos, mecânicos, elétricos, regulamentares e ambientais para a obtenção da solução final.

Através do trabalho desenvolvido pode concluir-se que a aplicação deste tipo de cabos pode ser muito vantajosa, pois permite aumentar a capacidade de transporte nas linhas, sem ser necessário realizar alterações nas suas estruturas, o que é uma solução simples e "pouco dispendiosa" quando comparada com a substituição ou elevação dos apoios.

Todavia, os cabos HTLS têm também algumas desvantagens que podem limitar a sua aplicação, sendo o custo elevado um dos principais fatores que desencoraja a sua aplicação, pois um cabo HTLS pode ter um custo 3 a 6 vezes superior do que um cabo ACSR de secção semelhante. Outro fator é a dificuldade de produção de cabo HTLS que usam alumínio recozido (1350-0), pois este alumínio é extremamente maleável e ao ser submetido a processos mecânicos como a trefilagem e o enrolamento em volta da alma, facilmente se danifica, o que desencoraja as empresas produtoras de cabos a fabrica-los.

Um aspeto importante que se pode concluir é que algumas tecnologias de cabos HTLS existentes já estão a ser ultrapassadas em termos de eficiência, especialmente os cabos que usam almas de aço. Os cabos que usam almas de aço vão apresentar sempre piores características mecânicas e elétricas do que os cabos que usam almas compósitas devido ao seu maior coeficiente de dilatação térmica e à sua menor resistência à tração em relação às almas compósitas que implica que se introduza almas de secções maiores.

O programa computacional desenvolvido foi um contributo importante para ajudar à tomada de decisão, e terá alta utilidade em situações futuras sobre o reforço da capacidade de transporte de linhas aéreas. Os testes realizados permitiram comprovar a sua fiabilidade. O caso de estudo real mostrou o quanto os cabos HTLS podem ser importantes e úteis num futuro próximo em Portugal.

Foi possível reparar que as várias tecnologias HTLS partilham certas características. Estas incluem um baixo coeficiente de dilatação térmica e características elétricas e mecânicas estáveis a elevadas temperaturas. Generalizando, todos os cabos HTLS consistem num núcleo

de elevada resistência e baixo coeficiente de dilatação térmica, rodeados de forma concêntrica por fios de alumínio de elevada condutividade.

Durante este projeto foi possível verificar a importância da realização de ensaios mecânicos e elétricos aos vários cabos em estudo, especialmente o ensaio que relaciona a tração do cabo com a temperatura, pois com na sua ausência os cálculos mecânicos realizados não darão valores precisos ao que acontece na realidade.

A realização deste projeto em ambiente empresarial decorreu como planeado, sendo atingidos todos os objetivos exigidos pela empresa. Foi uma experiência enriquecedora pois permitiu consolidar, aprofundar e aplicar conhecimentos já adquiridos e desenvolver novas competências numa área de grande interesse.

Referências

[1] Checa, Luis M. (1986), “Linhas de Transporte de Energia.”

[2] The Aluminum Association, “Aliminum Electrical Conductor Handbook.”

[3] “Upgrading overhead lines with high temperature, low sag conductors”. Disponível em http://alexandria.tue.nl/extra1/afstversl/E/624669.pdf. Acesso em 20/Maio/2013.

[4] EN50341-1 (2001). “Overhead electrical lines exceeding AC 45kV.” CENELEC.

[5] Távora, Francisco. "Linhas de Transmissao de Energia Electrica."

[6] Leite, Helder. (2008). "Apontamentos de RTDI 2008/2009- Elaboração de Projectos de Linhas Aéreas de Distribuição de Energia."

[7] Leite, Helder. (2012). "Apontamentos de RTDI 2011/2012- As Linhas Aéreas"

[8] PJM INTERCONNECTION, “BARE OVERHEAD TRANSMISSION CONDUCTOR RATINGS”. Disponível em http://www.pjm.com/~/media/planning/design-engineering/maac-standards/bare-overhead-transmission-conductor-ratings.ashx. Acesso em 20/Maio/2013.

[9] “Aspects to take into account in the application of mechanical calculation to high temperature low sag conductors”. Disponível em https://addi.ehu.es/bitstream/10810/4704/3/AlbizuIET2010.pdf. Acesso em 20/Maio/2013.

[10] “High Temperature Strenght and Creep of na Al Conductor with a Hybrid Composite Core”. Disponível em http://www.iccm-central.org/Proceedings/ICCM16proceedings/contents/pdf/FriI/FrIA2-01ge_alawaraa225745p.pdf. Acesso em 14/Junho/2013.

[11] “Transmission Line Loading: Sag Calculations and High-Temperature Conductor Technologies”. Disponível em http://home.eng.iastate.edu/~jdm/wind/TransmissionLineLoadingDesignCriteriaAndHTS.pdf. Acesso em 20/Maio/2013.

[12] “GAP – type Conductors: Influence of high temperature in the compression clamp system”. Disponível em http://www.labplan.ufsc.br/congressos/Powertech/papers/209.pdf. Acesso em 20/Maio/2013.

[13] “State of the art HTLS Conductor”. Disponível em http://www.codeasa.com/Presentacion-METAL-LINK.pdf. Acesso em 14/Junho/2013.

[14] “Uprating using hHight-Temperature Electrical Conductors”. Disponível em http://www.cired.net/publications/cired2001/1_15.pdf. Acesso em 14/Junho/2013.

[15]CTC CORPORATION, “Optimizando la Eficiencia de la Energía en Líneas Aéreas Expuestas”. Disponível em http://www.cigre.cl/sem_9_sept/presentaciones/Composite%20Technology%20Corporation.pdf. Acesso em 20/Maio/2013.

[16]3M, “Aluminum Conductor Composite Reinforced Techical Notebook”. Disponível em http://www.energy.ca.gov/2004_policy_update/documents/2004-06-14-workshop/public_comments/2004-06-28_3M_PART3.PDF. Acesso em 20/Maio/2013.

[17]Cigré, “Study Committee B2 technical Advisory Group B2-AG-06”. Disponível em http://www.aeolus.bz/Seminar%202011/Brian%20-%20New%20Conductor%20use%20Tutorial%20in%20CIGRE%20format%2028%20Feb%202011.pdf. Acesso em 14/Junho/2013.

[18]“ACCC™The High Efficiency -High Capacity Conductor”. Disponível em https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=5&ved=0CE4QFjAE&url=http%3A%2F%2Fwww.geocities.com%2Fieee_tpc%2Fieee_presents%2FPresentations_WGTPC%2FTPC_ESMOL%2FBryant_ACCCconductor.pdf&ei=p0w_Ufv-AsmXhQeg8ICYBg&usg=AFQjCNGRi3Y0hYLuaWZ30QIdw3Q0RO39Jg&sig2=i_USN7-BCnm7-eipvIkhNQ&bvm=bv.43287494,d.ZG4&cad=rja. Acesso em 20/Maio/2013.

[19]CTC Global, “ACCC Conductor Installation Presentation”

[20]3M, “3M ACCR – CONDUTOR EM ALUMÍNIO REFORÇADO POR COMPÓSITO: GUIA DE INSTALAÇÂO E MANUTENÇÂO”. Disponível em http://multimedia.3m.com/mws/mediawebserver?mwsId=66666UuZjcFSLXTtnxfVMXMaEVuQEcuZgVs6EVs6E666666--. Acesso em 20/Maio/2013.

[21]Vale, António Almeida do. "Linhas Aéreas de Transmissão de Energia."

[22]Ferreira, Jose Rui. (2004). "Linhas de Transmissao." Apontamentos de Sistemas Electricos de Energia I http://paginas.fe.up.pt/~mam/Linhas-01.pdf

[23]IEEE 738-2006. “IEEE Standard for Calculating the Current-Temperature of bare Overhead Conductors.”

[24]RSLEAT Regulamento de Segurança de Linhas Elétricas de Alta Tensão. (2001)

Anexo A – Valores intermédios cálculo mecânico para os vários cabos

ACSR 325 “BEAR”´

Cantão	F.V 1 [daN/m]	F.V 2 [daN/m]	m1	m2	$L_{cr\ [m]}$	Pior estado
1	0,540288	1,35072	1,09441	1,49529	248,3705	Primavera
2	0,540288	1,35072	1,09441	1,49529	258,1105	Primavera
3	0,540288	1,35072	1,09441	1,49529	236,1955	Primavera
4	0,481194	1,202985	1,07557	1,40724	273,4053	Primavera
5	0,540288	1,35072	1,09441	1,49529	253,2405	Primavera
6	0,481194	1,202985	1,07557	1,40724	262,4691	Primavera
7	0,540288	1,35072	1,09441	1,49529	243,5005	Primavera
8	0,540288	1,35072	1,09441	1,49529	233,7605	Primavera
9	0,409156	1,022889	1,05518	1,3072	321,5432	Inverno

GTACSR-342

Cantão	F.V 1 [daN/m]	F.V 2 [daN/m]	m1	m2	$L_{cr\ [m]}$	Pior estado
1	0,546739	1,366848	1,10116	1,52593	281,15557	Primavera
2	0,546739	1,366848	1,10116	1,52593	294,29368	Primavera
3	0,546739	1,366848	1,10116	1,52593	262,76222	Primavera
4	0,48694	1,217349	1,08102	1,43309	309,7847	Primavera
5	0,546739	1,366848	1,10116	1,52593	286,41082	Primavera
6	0,48694	1,217349	1,08102	143309	297,98338	Primavera
7	0,546739	1,366848	1,10116	1,52593	273,2727	Primavera
8	0,546739	1,366848	1,10116	1,52593	260,13459	Primavera
9	0,414041	1,035103	1,0592	1,32735	367,7977	Inverno

ACSS/AW

Cantão	F.V 1 [daN/m]	F.V 2 [daN/m]	m1	m2	$L_{cr\ [m]}$	Pior estado
1	0,540288	1,35072	1,09936	1,51778	287,76882	Primavera
2	0,540288	1,35072	1,09936	1,51778	295,27584	Primavera
3	0,540288	1,35072	1,09936	1,51778	270,25246	Primavera
4	0,481194	1,202985	1,07956	1,42621	317,48838	Primavera
5	0,540288	1,35072	1,09936	1,42621	295,27584	Primavera
6	0,481194	1,202985	1,07956	1,42621	306,24985	Primavera
7	0,540288	1,35072	1,09936	1,51778	280,26181	Primavera
8	0,540288	1,35072	1,09936	1,51778	267,75012	Primavera
9	0,409156	1,022889	1,05812	1,32198	376,69171	Inverno

ACCR 556-T16

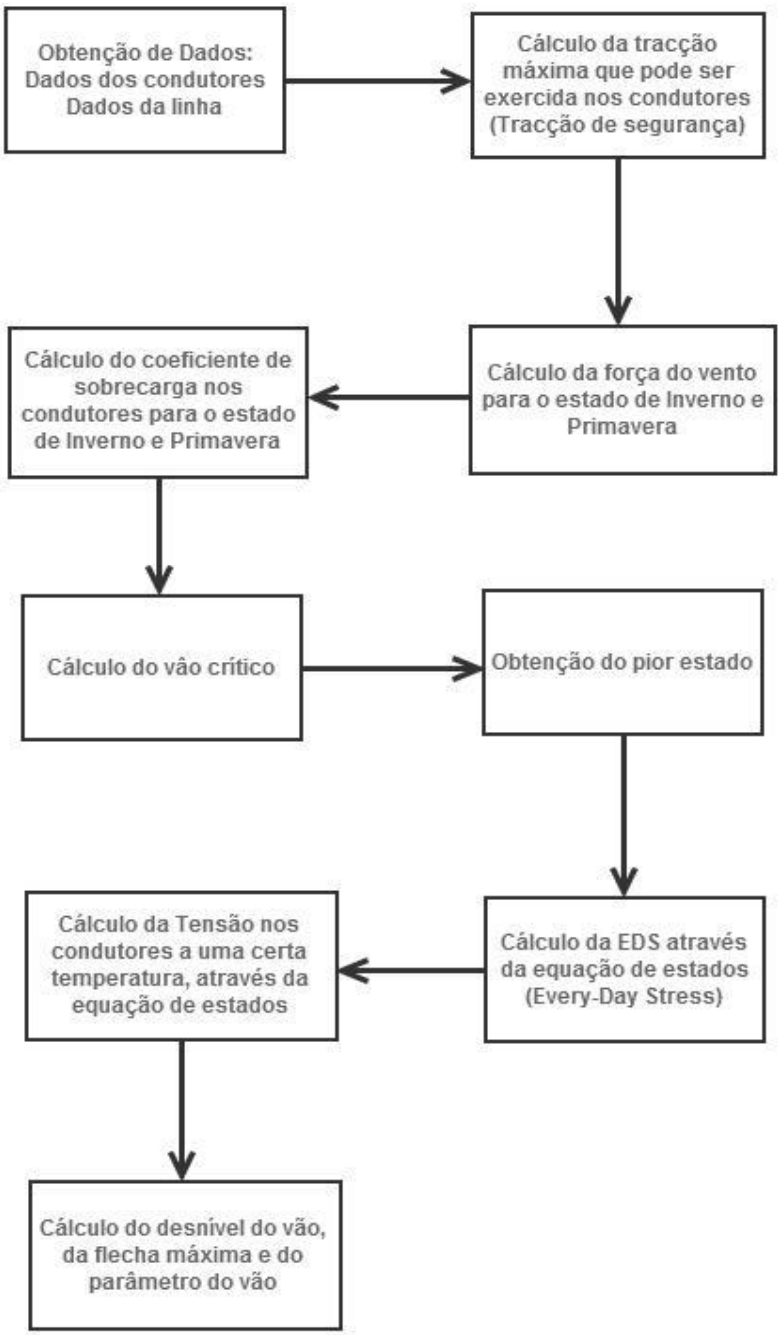
Cantão	F.V 1 [daN/m]	F.V 2 [daN/m]	m1	m2	$L_{cr\ [m]}$	Pior estado
1	0,54144	1,3536	1,15495	1,75696	244,70304	Primavera
2	0,54144	1,3536	1,15495	1,75696	261,17343	Primavera
3	0,54144	1,3536	1,15495	1,75696	225,87972	Primavera
4	0,48222	1,20555	1,12466	1,62953	272,11178	Primavera
5	0,54144	1,3536	1,15495	1,75696	254,11469	Primavera
6	0,48222	1,20555	1,12466	1,62953	258,90247	Primavera
7	0,54144	1,3536	1,15495	1,75696	237,64429	Primavera
8	0,54144	1,3536	1,15495	1,75696	223,52681	Primavera
9	0,410028	1,02507	1,09155	1,48217	285,84249	Inverno

Anexo B – Vãos desnivelados (L_1)

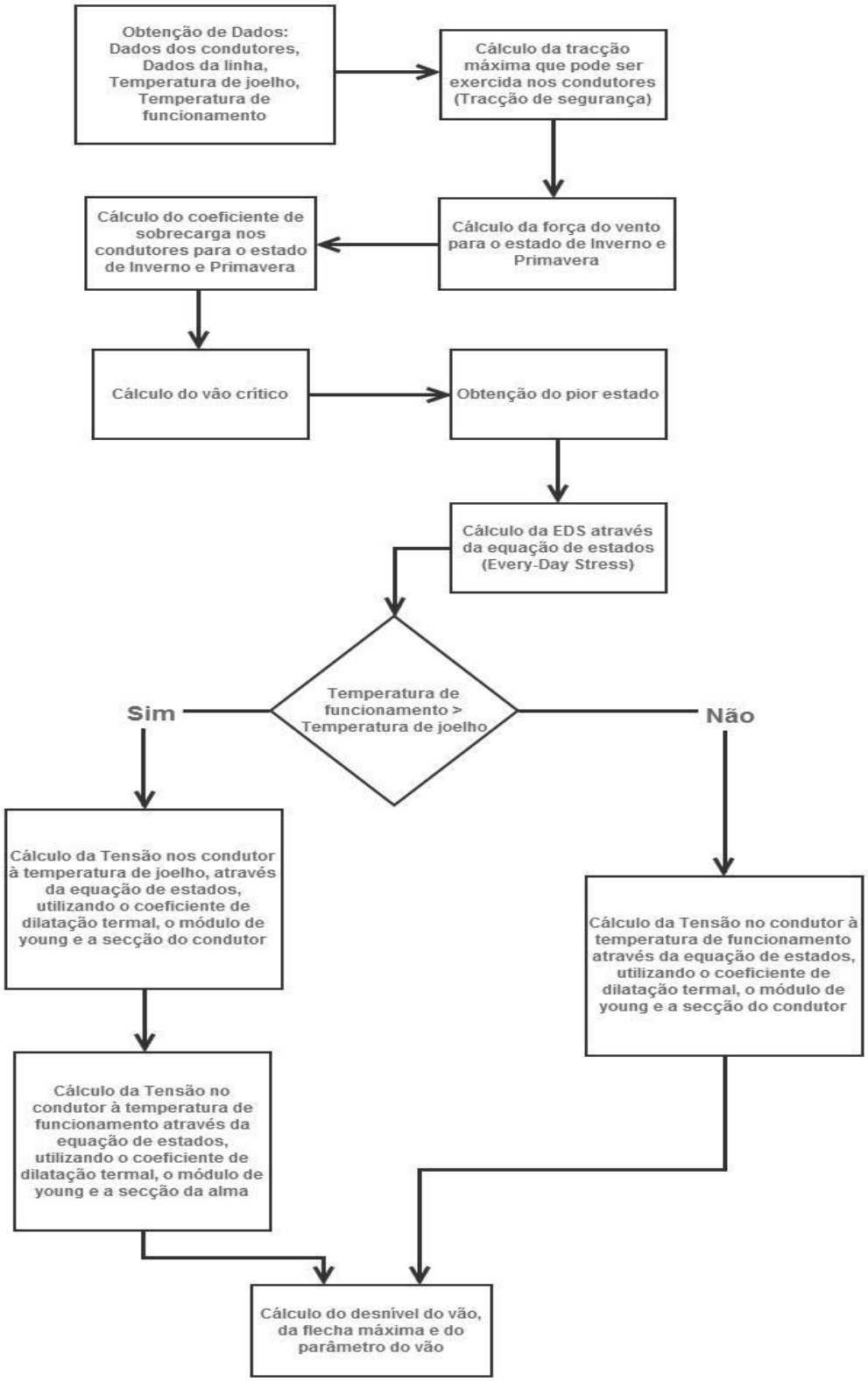
1º Apoio	2º Apoio	L_1 [m]
144	145	480,79217
145	146	729,59986
146	147	317,2704
147	148	524,37524
148	149	295,87006
149	150	388,33688
150	151	329,67857
151	152	833,69501
152	153	836,67157
153	154	672,11918
154	155	402,98838
155	156	593,26748
156	157	485,39549
157	158	467,26575
158	159	475,24238
159	160	452,01374
160	161	594,57288
161	162	769,85189
162	163	206,77821
163	164	591,43127
164	165	432,18252
165	166	331,38
166	167	321,30027
167	168	394,83046
168	169	297,74145
169	SubEt	75,76206

Anexo C – Metodologias seguidas pela aplicação informática

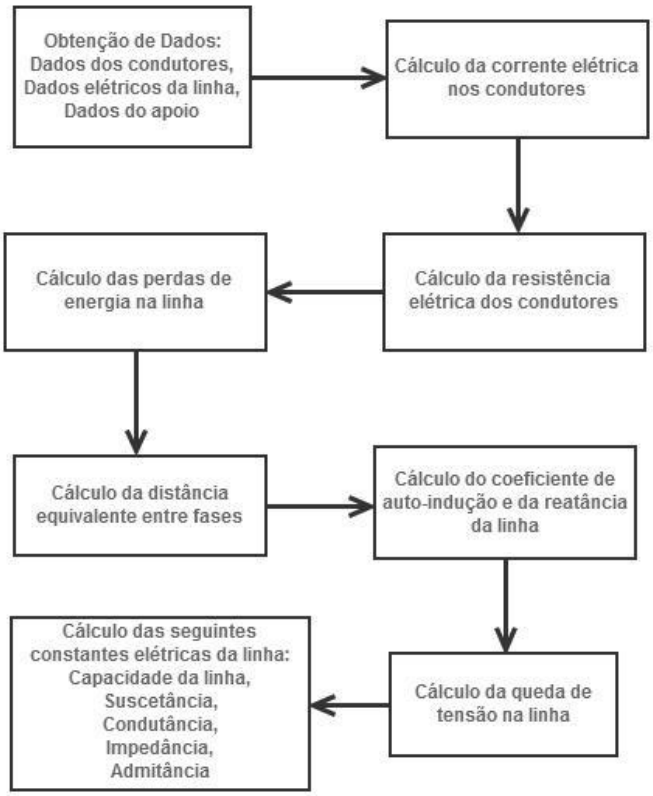
Cálculo Mecânico com cabos convencionais:



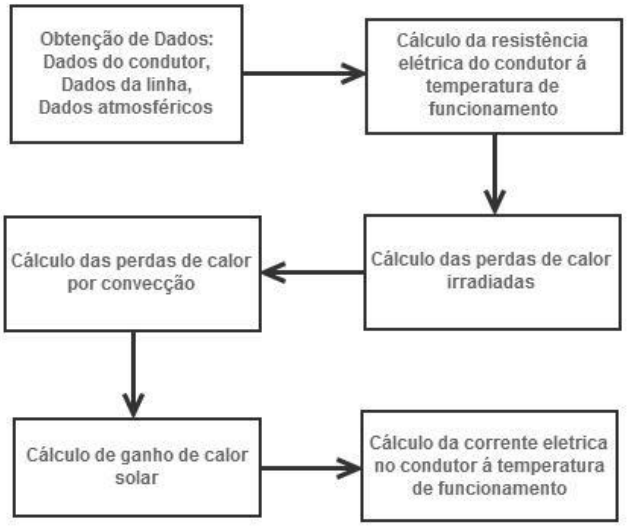
Cálculo Mecânico com cabos HTLS:



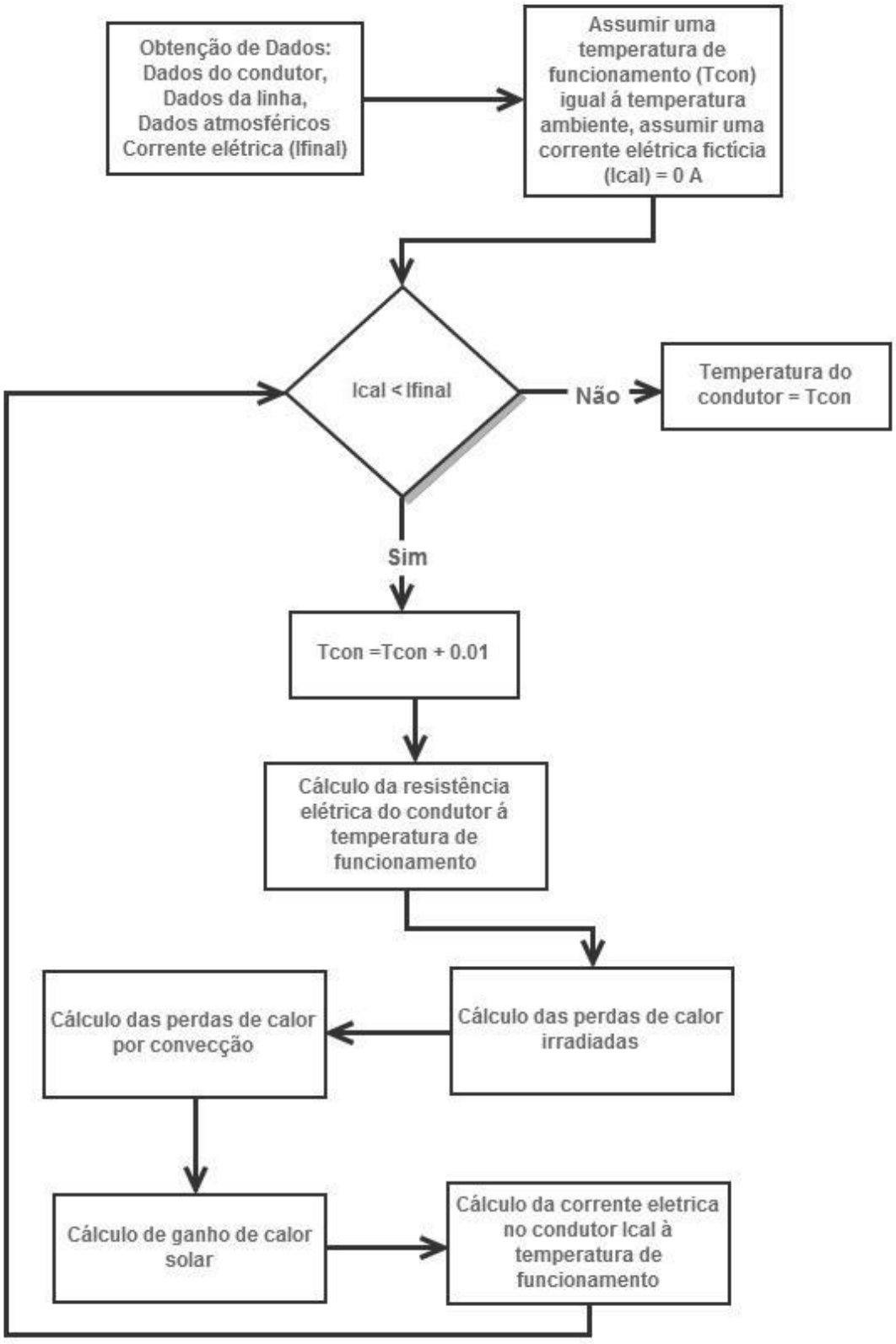
Cálculo Elétrico:



Cálculo térmico, cálculo da Corrente através da Temperatura



Cálculo térmico, cálculo da Temperatura através da Corrente



Anexo D – Peças desenhadas

Enviado em anexo a este documento perfil longitudinal final da linha após a implementação do cabo ACCR 556 – T16.