



Departamento de Engenharia Electrotécnica

Dimensionamento Automático de Consolas e Pêndulos para Sistemas de Tracção Eléctrica

Dissertação em Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Elaborado por:

Gonçalo Nélon de Sena Costa

Orientador Científico:

Doutor João Martins

Co-Orientador:

Mestre Pedro Pereira

Monte da Caparica

Setembro de 2009

UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Faculdade de Ciências e Tecnologia

Departamento de Engenharia Electrotécnica

Dimensionamento Automático de Consolas e Pêndulos para Sistemas de Tracção Eléctrica

Elaborado por:

Gonçalo Néilson de Sena Costa

Dissertação apresentada na Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Electrotécnica e de Computadores.

Orientador Científico:

Doutor João Martins

Co-Orientador:

Mestre Pedro Pereira

Monte da Caparica

Setembro de 2009

Qu'est-ce qu'un circuit de traction?

Quelque part une source d'énergie, une ligne de contact (ou caténaire), une locomotive qui utilise le courant, un conducteur de retour (les rails de roulement) qui ramène le courant. Contrairement aux applications ordinaires, ce circuit se déforme. Il est plus ou moins long suivant l'implacement du train. Peu importe d'ailleurs qu'il se déforme:

Retenons seulement qu'il est long: 10, 20, 50 Km peut-être.

M. Garreau (La traction Électrique)

SUMÁRIO

O comboio, o meio de transporte que teve maior impacto nos últimos duzentos anos da história da humanidade, necessita de um vasto conjunto infra-estruturas para a sua operação. Nos dias de hoje, grande parte das locomotivas são eléctricas, o que se torna necessário proceder à electrificação da linha através de equipamento de fixação devidamente dimensionado.

O presente trabalho foi desenvolvido no âmbito da dissertação de mestrado cujo objectivo principal é o desenvolvimento de aplicações informáticas, compatíveis com o sistema operativo WindowsTM, que possibilite efectuar de forma automática o cálculo do dimensionamento de Consolas de Catenária e Pêndulos de suporte em sistemas de Tracção Eléctrica.

Para responder ao objectivo proposto, estruturou-se o trabalho em três partes distintas. Numa primeira, a **fundamentação teórica**, realizou-se uma pesquisa bibliográfica sobre conceitos teóricos de tracção eléctrica. A **implementação**, onde foram abordadas duas aplicações informáticas distintas: uma para o dimensionamento de consolas e outra para o cálculo da pendulagem. A terceira parte, diz respeito à apresentação dos **resultados**, ou seja, dedica-se à aferição e comparação dos resultados gerados pelas aplicações com projectos já validados.

Da realização deste trabalho, resultaram duas aplicações informáticas que possibilitam na implantação da catenária, o ajuste dos projectos de montagem do equipamento de suporte de tracção eléctrica às variantes encontradas no terreno, de uma forma rápida e eficiente. Desta forma minimizam-se as dificuldades encontradas pelas equipas de construção com o consequente aumento de produtividade.

Palavras Chave: Equipamento Fixo de Tracção Eléctrica, Catenária, Cabo de Suporte, Pendulagem, Fio de Contacto, Pantógrafo, Terceiro Carril, Electrificação Ferroviária, Dimensionamento Automático.

ABSTRACT

The train, one of the transports with a greatest impact in the last two hundred years of human history, needs a whole infrastructure for its operation. Nowadays, most of the locomotives are electric, which means that it becomes necessary to electrify the railroad with an accurate scale electric traction system support.

This work is a master dissertation whose main objective is to development a computer application, compatible with the operating system WindowsTM, which allows in an automatic way, the calculation of the catenary console and its droppers of support of the electric traction system.

To meet the objective, the work was structured into three distinct parts. In the first one, corresponding to the **theoretical foundations**, a literature search was performed on theoretical concepts about electric traction. The **implementation**, were addressed two separate software programs: one related to the dimension of the catenary consoles and the other to the support droppers determination. The third part concerns the presentation of **results**, where the results generated by both applications are compared with valid data.

In conclusion, two computer applications were made that provides, in the catenary assembly, the adjustment of the projects to the variants found in the construction site in a fast and efficient way. Thus, it is expected to minimize the difficulties encountered by the team of construction with resulting increase in productivity.

Keywords: Electric Traction Equipment, Catenary Wire, Dropper, Contact Wire, Pantograph, Third Rail, Railway Electrification System, Automatic Sizing.

Índice

SUMÁRIO	3
ABSTRACT	4
1. INTRODUÇÃO	9
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	13
2.1. BREVE HISTÓRIA DA TRACÇÃO ELÉCTRICA	13
2.2. ELECTRIFICAÇÃO DAS VIAS	14
2.2.1. Vantagens da Electrificação	14
2.2.2. Tipos de Alimentação	16
2.3. SUPORTES FÍSICOS DE ALIMENTAÇÃO	18
2.3.1. Cabos Aéreos - Catenária	18
2.3.2. Terceiro Carril	21
2.4. COMPONENTES MECÂNICOS DA CATENÁRIA	23
2.4.1. Postes	24
2.4.2. Consola	25
2.4.3. Isolamento Eléctrico e Protecção	26
2.4.4. Classificação de Pendulagem	28
2.5. COTAS E TIPOS DE CONSOLAS	30
2.5.1. Definições de Cotas	30
2.5.2. Tipos de Montagens	33
3. IMPLEMENTAÇÃO – CÁLCULO DA CONSOLA	35
3.1. FERRAMENTA DE DESENVOLVIMENTO	35

3.2.	IDENTIFICAÇÃO DE PARÂMETROS.....	35
3.2.1.	Dados de Entrada.....	36
3.2.2.	Dados de Entrada Reguláveis.....	39
3.2.3.	Dados de Saída.....	40
3.3.	METODOLOGIA	41
3.3.1.	Posicionamento dos Pontos Estratégicos.....	42
3.4.	ALGORITMO DE CÁLCULO DE DADOS AUXILIARES	44
3.4.1.	Determinação do Ângulo do Carril	44
3.4.2.	Determinação da cota PMV.....	45
3.4.3.	Determinação do ponto Fc.....	46
3.4.4.	Determinação do ponto Cs	47
3.4.5.	Determinação do Ângulo do Poste	48
3.4.6.	Determinação dos Pontos P e RP	48
3.4.7.	Determinação dos Pontos A e RA	49
3.5.	ALGORITMO DE CÁLCULO DOS DADOS DE SAÍDA.....	50
3.5.1.	Determinação das Cotas TL e TC/TT	50
3.5.2.	Determinação das Cotas KL e K3/K4.....	51
3.5.3.	Determinação da Cota S	52
3.5.4.	Determinação do Ponto C.....	53
3.5.5.	Determinação da Cota L.....	55
3.6.	FUNCIONALIDADES ADICIONAIS	56
4.	IMPLEMENTAÇÃO – CÁLCULO DO PÊNDELO	62
4.1.	IDENTIFICAÇÃO DE PARÂMETROS.....	62

4.2.	METODOLOGIA	64
4.2.1.	Número de Pêndulos e Distribuição.....	64
4.2.2.	Comprimento dos Pêndulos – Método Matemático	65
4.2.3.	Comprimento dos Pêndulos – Algoritmo	66
4.3.	FUNCIONALIDADES ADICIONAIS	71
5.	APRESENTAÇÃO E TRATAMENTO DE RESULTADOS	73
5.1.	AFERIÇÃO DO CÁLCULO DE CONSOLAS	73
5.1.1.	Ensaio 1	74
5.1.2.	Ensaio 2	75
5.1.3.	Ensaio 3	76
5.1.4.	Ensaio 4	77
5.1.5.	Ensaio 5	78
5.1.6.	Tratamento e Análise dos Resultados Obtidos	79
5.2.	AFERIÇÃO DO CÁLCULO DE PENDULAGEM.....	79
5.2.1.	Ensaio do Vão Normal.....	80
5.2.2.	Ensaio da Pendulagem Y	81
5.2.3.	Observação dos Resultados Obtidos.....	82
6.	CONCLUSÃO	83
	BIBLIOGRAFIA	85
	ANEXOS.....	88
	ANEXO 1 – ESPECIFICAÇÕES DE VIGAS DO TIPO HE.....	89
	ANEXO 2 – ESPECIFICAÇÕES DE VIGAS DO TIPO U	91
	ANEXO 3 – MONTAGENS DE CONSOLA (A A E).....	92

ANEXO 4 – BRAÇOS DE CHAMADA (I A XI).....	93
ANEXO 5 – PORMENOR DA COTA L NAS MONTAGENS A, B, C, E.....	94
ANEXO 6 – RELATÓRIO GERADO NO CÁLCULO DA CONSOLA	95
ANEXO 7 – DISTRIBUIÇÃO DA PENDULAGEM	96
ANEXO 8 – CATENÁRIA SIMÉTRICA (DEMONSTRAÇÃO)	98
ANEXO 9 – RELATÓRIO GERADO NO CÁLCULO DA PENDULAGEM.....	100
ANEXO 10 – PROJECTOS DE CONSOLAS UTILIZADOS NA AFERIÇÃO	101
Projecto de Referência da Simulação 1.....	101
Projecto de Referência da Simulação 3.....	103
Projecto de Referência da Simulação 4.....	104
ANEXO 11 – PROJECTOS DE PENDULAGEM UTILIZADOS NA AFERIÇÃO.....	106
Vãos Normais (sem Y)	106
Pendulagem em Y	107
ANEXO 12 – RELATÓRIOS DA AFERIÇÃO	108
Vãos Normais	108
Pendulagem em Y	109

1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo introdutório serão apresentados os objectivos do trabalho e exposto o roteiro contendo a constituição estrutural do mesmo. Será ainda efectuada uma breve descrição da *PromoRail* (a qual foi parceira neste trabalho), referindo brevemente o seu percurso historial, formulando igualmente os problemas que deram origem ao desenvolvimento do presente trabalho.

A *PromoRail* começou a exercer a sua actividade em Outubro de 1987, sob a designação social de “Carapeta & Filhos, Lda.”, então vocacionada para a indústria hoteleira, compra e venda de prédios e construção civil. Não obstante da sua vocação inicial, em 1990 a empresa decide alargar o seu mercado de interesse ao especializar a sua actividade no sector das obras ferroviárias. Em Outubro de 2000 assinou um protocolo com o *Grupo ProCme* com vista à futura aquisição e, em Agosto 2001, procedeu-se à redenominação institucional da empresa, passando esta assumir a actual denominação social “PromoRail – Tecnologias de Caminhos de Ferro, SA”. Recentemente, em 2006 o *Grupo Edifer* adquire a *PromoRail* e vende 50% do capital à *OPCA*¹.



Figura 1.1. - Veículo auxiliar da *PromoRail* na construção das catenárias.

Presentemente, existem aproximadamente 160 funcionários da *PromoRail* que facultam aos seus accionistas um reforço nas suas competências na construção ferroviária; bem como um posicionamento relevante no contexto de oportunidades de negócios relativos à alta velocidade em Portugal, como o caso do *TGV*²; e impulsiona as suas crescentes

¹ Obras Públicas e Cimento Armado, S.A. - empresa portuguesa exercendo no mercado de engenharia e construção civil;

² “Train à Grande Vitesse” – comboio de alta velocidade.

internacionalizações. A Empresa tem como objectivo prestar serviços de construção, renovação e manutenção de infra-estruturas ferroviárias, actuando de forma integrada e multidisciplinar em todas as áreas envolvidas no domínio da engenharia; agregando os mais elevados índices tecnológicos e capacidade técnica/humana, [1].

No que concerne à electrificação de uma via eléctrica, todos os postes, ao longo de uma determinada linha férrea, detêm um projecto que os identifica e onde estão listadas as características individuais dos mesmos, Anexo 10. Nesse projecto, encontra-se igualmente discriminado o material constituinte da consola a ser instalado no poste, as dimensões dos componentes da própria consola e as cotas a serem respeitadas na configuração final; como por exemplo, a altura e o ângulo entre o centro da bitola e o ponto pelo qual passa o fio de contacto, (Figura 1.2). Esta cota tem de ser respeitada com elevado rigor de forma a garantir um bom contacto entre a linha electrificada e o comboio.

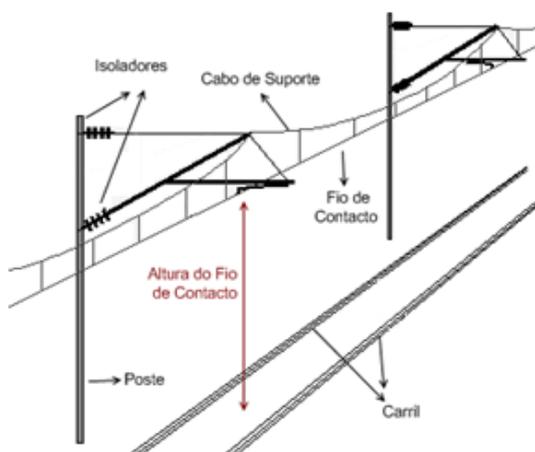


Figura 1.2 – Esboço da configuração física da catenária [2].

O procedimento habitual na montagem destes equipamentos, passa por cortar os componentes da contidas nos projectos, procedendo-se posteriormente ao seu transporte para o local de construção. Porém, na maioria dos casos, após a montagem da consola à medida na oficina, tendo em consideração as dimensões equipamento no terreno verifica-se que a configuração final da consola não respeita as cotas previstas no projecto. Estas imperfeições devem-se ao facto dos projectistas que dimensionam as consolas, se basearem em valores provenientes de um levantamento topográfico desprezando diversos imprevistos técnicos que possam ocorrer no terreno; assim, os projectos por eles elaborados nem sempre se adequam ao local de montagem. Estas pequenas discrepâncias não previstas no projecto, induzem grandes erros na concepção e no desempenho do sistema, os quais têm de ser corrigidos pela equipa de construção num processo de tentativa/erro extremamente moroso dadas as diversas variáveis reguláveis num sistema com poucas soluções possíveis. Todo este processamento introduz

grandes perdas temporais e financeiras para as empresas, na medida que, além dos custos de montagem, deparam-se adicionalmente com decréscimos de produtividade, renumeração extra de mão-de-obra e eventuais desperdícios de recursos materiais pois, por vezes, a calibração leva à realização de acções irreversíveis. A título de exemplo a situação de se cortar em demasia um determinado tubo da consola. Outra ocorrência que é desejável eliminar, é o procedimento de montar previamente arames no lugar dos pêndulos, de forma a ajustá-los convenientemente para posterior utilização como referência no corte dos pêndulos, evitando assim o desperdício deste caro material.

São fundamentalmente estas as razões que estão na origem do presente trabalho, pretendendo-se então maximizar a produtividade das construções no terreno ao se efectuar automaticamente o dimensionamento das consolas individualmente de cada poste através de uma aplicação informática de fácil interpretação. Esta deverá estar preparada para receber parâmetros de entrada, nomeadamente os valores reais mensurados em terreno e as cotas que o projecto exige, e em função destes retornar a melhor solução para se obter uma configuração final da consola válida. Desta forma, o objectivo é eliminar o método de tentativa/erro na montagem dos diversos equipamento de fixação do sistema de tracção eléctrica por parte da equipa de construção e, conseqüentemente uma diminuição de perdas temporais e de custos produtivos associados a calibrações e desperdício material.

Neste sentido, foi proposto desenvolver nesta dissertação de mestrado, um cálculo optimizado que dimensione a catenária dos sistemas de tracção eléctrica que vá ao encontro das necessidades da empresa *PromoRail*, a qual estabeleceu com a *Uninova*, um protocolo de cooperação. De uma forma mais detalhada, pretende-se com a realização deste trabalho, desenvolver uma aplicação informática compatível com o sistema operativo WindowsTM que possibilite ao utilizador efectuar num processo automático, o cálculo do dimensionamento de consolas e pêndulos de suporte. Relativamente às consolas, tem-se como objectivo determinar a composição dos seus elementos constituintes e as suas dimensões, contemplando igualmente uma representação visual dos resultados. Relativamente aos pêndulos será também considerado o cálculo da sua dimensão e distâncias entre os mesmos.

A par destes objectivos mencionados, ambiciona-se ainda personalizar a aplicação informática de modo a que os seus resultados retornados permitam auxiliar a equipa de montagem a exercerem as suas funções na construção de instalações fixas de tracção eléctrica em Portugal.

Para responder aos objectivos propostos, o trabalho será estruturado em três partes distintas. Numa primeira, correspondente à fundamentação teórica, será realizada uma pesquisa bibliográfica sobre os seguintes conceitos teóricos: tracção eléctrica, vantagens e

desvantagens da electrificação das vias, função e composição dos sistemas de alimentação, dando-se especial ênfase às catenárias e seus constituintes. A implementação surgirá como segunda parte do trabalho, onde serão abordadas duas aplicações informáticas distintas: uma relativo ao dimensionamento de consolas e outra ao cálculo da pendulagem. A terceira parte deste trabalho, diz respeito à apresentação dos resultados, ou seja, dedica-se à validação e comparação dos resultados gerados pelas aplicações, com projectos reais.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

No presente capítulo irão ser abordados diversos temas relacionados com tracção eléctrica, nomeadamente: uma breve história sobre o aparecimento da primeira locomotiva eléctrica; as vantagens e tipos de electrificação das vias ferroviárias; a descrição dos métodos físicos que permitem essa alimentação; e posteriormente será estudado com adequado pormenor os componentes mecânicos da instalação fixa da catenária, juntamente com as cotas convencionadas pela Empresa na montagem deste equipamento.

2.1. BREVE HISTÓRIA DA TRACÇÃO ELÉCTRICA

A Tracção Eléctrica, como o próprio nome indica, trata-se do fenómeno de transformação de energia eléctrica em mecânica, promovendo o deslocamento de um ou mais veículos. Actualmente é um tema bastante debatido e explorado a nível mundial devido, não só à crise financeira e ambiental, como também na sua potencialidade em diversas áreas industriais, como é o caso da rodoviária ou da ferroviária.

O primeiro momento histórico, que permitiu dar início ao extenso processo de desenvolvimento da tracção eléctrica até aos dias de hoje, surgiu em 1820 com a descoberta do electromagnetismo por Hans Christian Ørsted, a qual demonstrou a existência da interacção entre o campo magnético e a corrente eléctrica ao verificar que o ponteiro de uma bússola deflectia do norte magnético quando se ligava ou desligava uma bateria eléctrica conectada a um circuito junto dessa bússola [3]. Esta descoberta deu origem a diversas investigações com intuito de se explicar o então desconhecido fenómeno, que contribuíram significativamente para o aumento do conhecimento da área da Electricidade e para o desenvolvimento da Física, numa era quando a máquina a vapor já produzia força motriz. Embora posteriormente tenham sido desenvolvidos diversas aplicações eléctricas, como por exemplo, o telégrafo, a iluminação urbana, ou até mesmo pequenas máquinas capazes de criarem movimento a partir de uma pilha eléctrica, a tracção a vapor foi-se mantendo passado muitos anos devido em grande parte pelos problemas inerentes à construção de máquinas de conversão de energia eléctrica em mecânica de uma forma ineficaz. Mais tarde, em 1860, Antonio Pacinotti arquitectou um modelo de uma máquina electromagnética com induzido em anel e formulou o princípio da reversibilidade das máquinas de corrente contínua. Porém, só uma década mais tarde, que se começou a construir máquinas de corrente continua para aplicações industriais. [4]

Foi fundamentalmente estas tecnologias que permitiram o alemão Ernst Werner von Siemens, inventor, industrial e fundador da actual empresa *Siemens AG* [5], implementar a primeira locomotiva eléctrica. Foi na Exposição Internacional de Berlim de 1879 que Siemens apresentou um pequeno tractor accionado por um motor eléctrico de corrente contínua, que rebocou três pequenos vagões, cada um composto por seis lugares. O conjunto transitava sobre carris, numa via circular de 300 m de comprimento a uma velocidade média de 12 km/h. A alimentação era feita através por um carril central, em corrente contínua, com uma tensão de 150 V, sendo o retorno efectuado pelos carris de rolamento. Embora os frutos do desenvolvimento tecnológico ao longo destes 130 anos, tenham permitido aos sistemas de tracção eléctrica terem sofrido infinitos aperfeiçoamentos, algumas das características actuais ainda permanecem semelhantes ao primeiro sistema apresentado por Ernst Siemens [4].

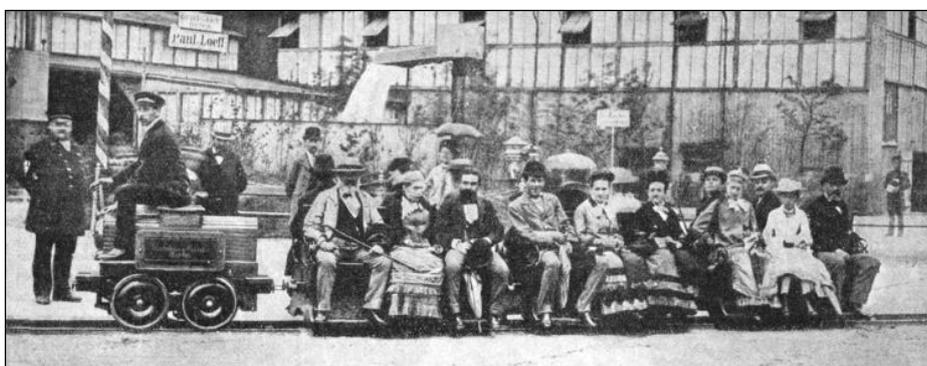


Figura 2.1 – Primeiro sistema público de Tracção Eléctrica, Exposição Internacional de Berlim de 1879, [4]

2.2. ELECTRIFICAÇÃO DAS VIAS

O mundo ferroviário, desde o início dos seus tempos, já testemunhou quatro tipos de tracção: animal, vapor, diesel e eléctrica. A tracção animal e a vapor tornaram-se obsoletas à excepção em zonas histórico-turísticas. Neste capítulo pretende-se fundamentalmente justificar as vantagens da electrificação das vias e descrever as topologias de alimentação existentes.

2.2.1. Vantagens da Electrificação

O processo de electrificação vias ferroviárias é sinónimo de grande investimento, quer no próprio sistema de alimentação, nomeadamente na cablagem da catenária e sistema de suspensão, quer em dispendiosas locomotivas eléctricas. Portanto, é fundamental elaborar um estudo para se apurar se a electrificação de uma determinada via é justificável, pois para

linhas curtas contendo pouco tráfego a tracção diesel poderá ser a solução com dispêndios de operação menor, como Ilustrado em 2.2.

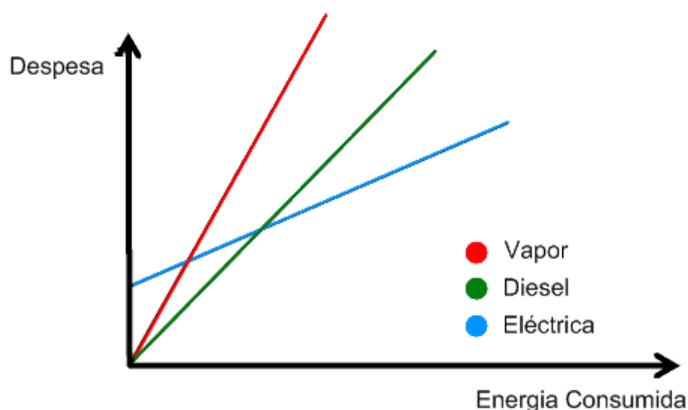


Figura 2.2 – Despesa de Operação das Tracções a Vapor, Diesel e Eléctrica, [8].

Todavia, caso justifique e após efectuado o investimento, obtém-se um sistema com múltiplas vantagens, sobressaindo-se as seguintes:

- Maior potência por unidade de volume - uma locomotiva a eléctrica apresenta 3000 a 7500 kW contra os 2000 a 3000 kW da diesel;
- Maior aceleração comparativamente com qualquer outro tipo de locomotiva;
- O motor das locomotivas eléctricas apresenta maior duração de vida com menor necessidade de manutenção;
- A possibilidade de operar momentaneamente em sobrecarga, contrariamente às locomotivas a diesel que são operadas com taxa de utilização moderada;
- Imune a perdas de potência em troços de elevada altitude – as locomotivas a diesel têm piores desempenhos pois nessas zonas o oxigénio é rarefeito, essencial para a combustão;
- Maior segurança em troços de túneis longos;
- Dispensa o transporte de geradores eléctricos a bordo, optimizando a relação potência/peso;
- Possibilidade na implementação da travagem regenerativa, um processo que permite travar electricamente o comboio reaproveitando energia eléctrica para a rede ou baterias.

Outro factor a ter em consideração, é a possibilidade de se transportar uma determinada carga com menos locomotivas em comparação com os restantes tipos de tracção, o que resultará conseqüentemente, num menor dispêndio económico. Como já referido, a

actual política mundial demonstra grande preocupação ambiental, o que torna a tracção eléctrica numa das favoritas, dado causar menor índice de poluição sonora, obter rendimentos energéticos de ordem superior não libertando qualquer fumo. Por outro lado, é possível gerar electricidade através de diversos materiais combustíveis, o que torna este sistema flexível e pouco dependente dos preços desses materiais. Outro factor importante a ter em consideração quando se electrifica uma via, é o próprio preço da energia eléctrica da respectiva região, dá-se como exemplo a Suíça, um dos países com energia eléctrica mais barata contendo a maioria das vias ferroviárias electrificadas [6].

2.2.2. Tipos de Alimentação

Geralmente os troços ferroviários são alimentados pela central eléctrica mais próxima ao local. O transporte de energia é feito em linhas de alta tensão desde a central até às subestações eléctricas posicionadas ao longo da via, onde o valor da tensão é reduzido para o seu valor nominal e injectada isoladamente entre os circuitos de alimentação dos troços cuja subestação abastece. Ao contrário do que acontece na rede nacional, onde toda ela se encontra interligada, os diversos troços da via estão electricamente isolados uns dos outros de modo a promover uma acessível e optimizada gestão energética. Na Figura 2.3 observa-se o esquema eléctrico de duas subestações a receberem energia da rede nacional e a alimentarem individualmente o seu troço de catenária com a tensão nominal. Contudo, caso uma subestação seja colocada fora de serviço, o troço da catenária associado poderá ser alimentado pelas subestações adjacentes fechando os disjuntores da zona neutra. Note-se que o circuito da catenária fecha-se pelos carris de rolamento, que está ao mesmo potencial do solo, (Figura 2.4), [6].

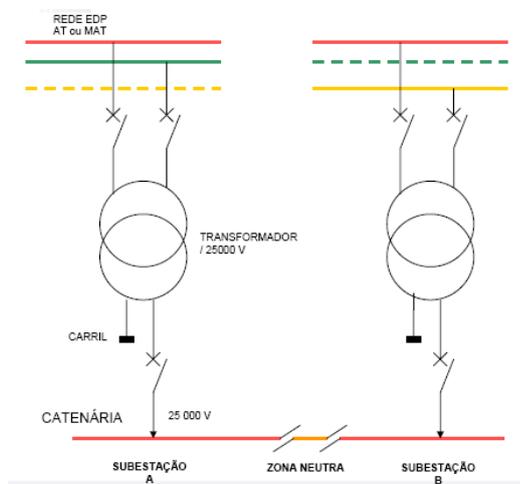


Figura 2.3 – Ligações de Subestações AC da rede eléctrica nacional à catenária [7].

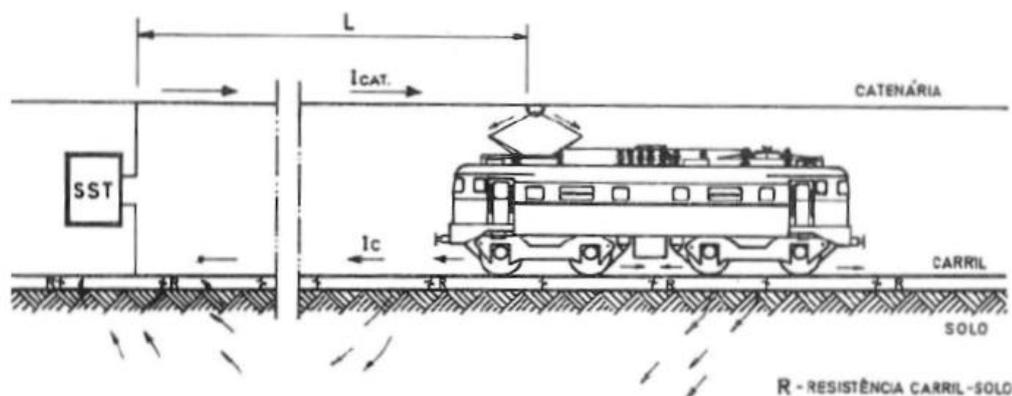


Figura 2.4 – Circuito de Alimentação das Locomotivas Eléctricas [7]

Os sistemas eléctricos podem ser classificados em dois tipos, corrente contínua ou corrente alternada. Na maioria dos casos, os sistemas de corrente contínua são utilizados em centros urbanos ou em metropolitanos, têm baixo valor de tensão eléctrica que rondam entre os 750 V no caso dos eléctricos e dos metros; e entre 1 500 a 3 000 V nos comboios. Quanto aos sistemas de corrente alternada satisfazem os rápidos troços entre cidades ao possuir valores de tensão com maior ordem de grandeza, 15 000 V com frequência de $16\frac{2}{3}$ Hz, ou 25 000 V a 50 Hz. A maioria dos centros urbanos possui sistemas de corrente contínua a baixa tensão pelo simples facto de antigamente ser demasiado dispendioso produzir energia eléctrica alternada com alta tensão e haver dúvidas quanto à sua segurança [8].

Contudo, sistemas que suportam corrente alternada de alta tensão apresentam diversas vantagens:

- Maior facilidade de manutenção, dado não conter escovas ou colectores nos motores eléctricos nas locomotivas;
- Sendo o transporte de energia efectuado em alta tensão, menor densidade de corrente circulará nos condutores, o que permite dimensioná-los com menor secção, tornando o sistema mais leve e barato, tanto os condutores como o sistema de suporte;
- Havendo uma menor intensidade de corrente eléctrica, verifica-se menores perdas por efeito de Joule;
- Com menores perdas por efeito de Joule, menor a necessidade de diversas subestações de transformação distribuídas ao longo da via-férrea, o que reflecte novamente em menor dispensas financeiras. Regularmente, é necessário construir uma subestação de 20 em 20 km em sistemas de corrente contínua, contra os 50 km dos sistemas de corrente alternada.

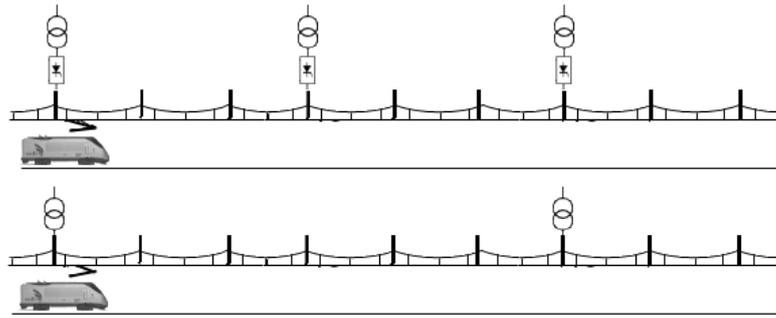


Figura 2.5 – Distribuição das subestações do sistema DC e AC, respectivamente, [8].

Uma desvantagem dos sistemas de corrente alternada está relacionada com a necessidade de instalar nas locomotivas, equipamento complementar para converter a energia para baixa tensão. Por outro lado, tendo em conta que globalmente existem vários sistemas eléctricos com diferentes dimensionamentos técnicos, verifica-se que em quase todas as fronteiras existem incompatibilidades eléctricas. Assim sendo, a única forma das locomotivas internacionais ultrapassarem este obstáculo sem perdas temporais, é prepará-las com sistemas de conversão, robustos o suficiente para admitir ambas as electrificações, o que acrescenta custos extras a todo o conceito [6].

2.3. SUPORTES FÍSICOS DE ALIMENTAÇÃO

No presente capítulo será abordado duas topologias de sistemas físicos que transportam energia eléctrica para as locomotivas em movimento. A primeira, descrita com maior detalhe, é designada por Catenária (cabos aéreos), enquanto que a segunda é designada por Terceiro Carril (condutor terrestre).

2.3.1. Cabos Aéreos - Catenária

Matematicamente a designação de catenária é dada à forma geométrica que apresenta uma corda suspensa pelas suas extremidades e sujeita a acção da gravidade. Esta forma é bem visível nas linhas eléctricas de alta tensão ou nas linhas de telefone. Os primeiros sistemas de tracção eléctrica a serem alimentados via aérea, consistia apenas num fio devidamente suspenso em vários apoios, como é visível nos eléctricos da *Carris* e nalguns troços do Metro do Porto. Esse fio de contacto tem obviamente o formato de uma catenária. Porém, com a necessidade de elevar a ordem de grandeza da velocidade às dos eléctricos, foi necessário suspender o fio de alimentação com uma forma aproximadamente rectilínea, através de um cabo de suporte e pêndulos. Ao conjunto destes condutores que alimentam electricamente os

veículos de tracção eléctrica continuou a designar-se catenária. Em sentido mais amplo, designa toda a instalação incluindo postes, suspensões e aparelhagem eléctrica [9].

O sistema da catenária é então composto pelo fio de contacto, o qual está suspenso pelo cabo de suporte através dos pêndulos, de tal forma que fique alinhado em cima da via, (Figura 2.6). O fio de contacto abastece o comboio com energia eléctrica através do deslizamento efectuado entre este e um órgão denominado por pantógrafo, uma peça mecânica fixada no topo do comboio que exerce constantemente uma força vertical ascendente no sentido da catenária, (Figura 2.7). De modo a minimizar o desgaste mecânico proveniente da

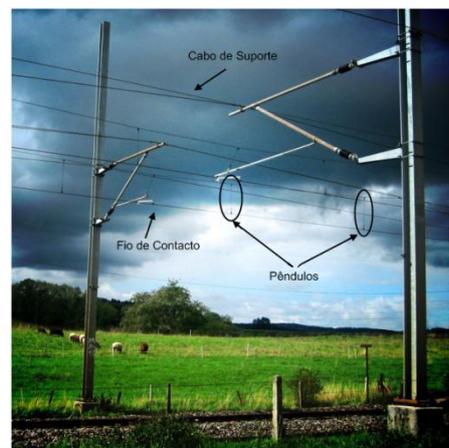


Figura 2.6 – Sistema da Catenária [10].

fricção entre o fio de contacto e pantógrafo, instala-se o condutor longo da via em forma de *zig-zag*, com um deslocamento acerca de 30 cm do centro do carril para um lado e para o outro, abrangendo assim, uma maior área de superfície do arco do pantógrafo revigorado por grafite.



Figura 2.7 – Esquerda: pantógrafo a deslizar ao longo do fio de contacto [11].
Direita: pantógrafo gasto pela fricção [8].

É fulcral que haja uma eficaz e contínua conexão entre o fio de contacto e o pantógrafo, caso contrário causará arcos eléctricos entre os mesmos deteriorando-os rapidamente. Como já referido, evita-se este fenómeno ao manter o fio de contacto esticado, correctamente posicionado pela sustentação do cabo de suporte, e aplicando no pantógrafo uma força vertical ascendente. Todavia, o problema não fica totalmente resolvido. As diferenças de temperatura registadas ao longo do ano fazem com que a flecha do fio de contacto se altere e, portanto, as condições de captação não sejam uniformes no tempo. Dada

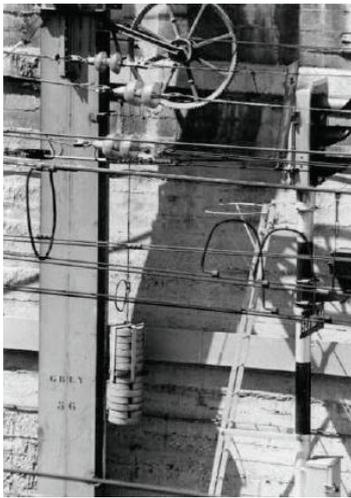


Figura 2.8 – Aparelho Tensor [8].

a natureza do material da catenária (cobre), estima-se que em cada 1500 m de comprimento, o cabo poderá apresentar variações de 50 cm devido a fenómenos térmicos [9]. Para minimizar esse efeito, a solução consiste em promover uma força tensora a que os condutores da catenária estão submetidos seja constante com a temperatura. Todos os fios dos cabos, sejam ou não de tracção eléctrica, terão de ter amarrações nos seus extremos ou seja, na colocação de um sistema de roldanas e pesos, denominado aparelho tensor, (Figura 2.8). Consoante as variações de temperatura, os fios contraem-se ou dilatam-se e os pesos sobem ou descem. Então, é importante conceber de

um sistema de suporte robusto em que os seus pontos de suspensão sejam móveis para compensar estas dilatações e contracções dos cabos.

Distingue-se dois tipos de equipamento de suspensão da catenária: equipamento com independência mecânica e sem independência mecânica. Nos sistemas com independência mecânica a catenária assenta em tubos constituintes da consola que se encontra fixa a um poste, como se apresenta na Figura 2.6. Tendo em conta que a aplicação informática a desenvolver tem a função de dimensionar este tipo de equipamento, o mesmo será analisado com maior ênfase no capítulo seguinte. Quanto ao equipamento sem independência mecânica, designam sistemas em que as catenárias de múltiplas vias são fixadas a uma estrutura comum em forma de portal, dada a inexistência de espaço físico para implantar postes, como se apresenta na Figura 2.9. A solução geral é a utilização de pórticos flexíveis ou rígidos [9].

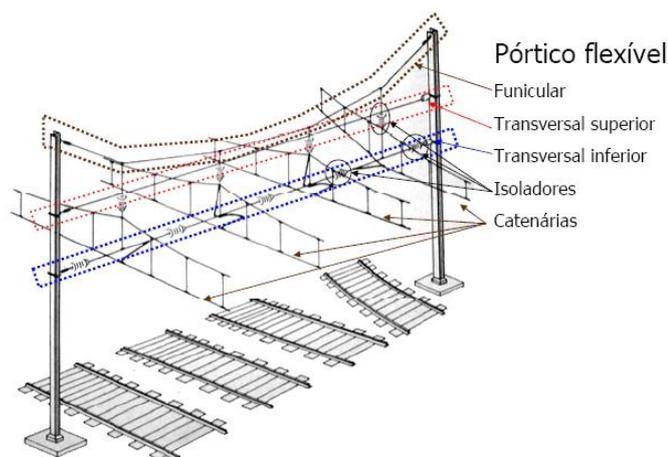


Figura 2.9 – Pórtico Flexível [7].

O pórtico flexível é a solução mais simples e económica, composto fundamentalmente por dois cabos transversais e um cabo funicular. O cabo transversal inferior sustenta o fio de contacto, o superior sustém o cabo de suporte da catenária e o

funicular suporta o peso do conjunto. Dada a impossibilidade de garantir uma posição rígida, esta solução não suporta velocidades superiores a 200km/h. Todavia, a segunda solução com pórticos rígidos já suporta velocidades dessa ordem de grandeza. Composto por uma viga auto suportada onde estão fixados postales que suportam consolas semelhantes às de plena via. Em ambas as topologias a catenária encontra-se separada das estruturas de suspensão mediante um isolador eléctrico. Comparando ambos os sistemas e tendo em conta dos efeitos térmicos nos materiais constituintes, conclui-se que o equipamento com independência mecânica permite que o fio de contacto se mantenha melhor posicionado, sendo por esse facto o utilizado para altas velocidades [9].

Outro cabo que poderá estar presente na catenária é o *Feeder*. Como o nome indica, trata-se de um cabo de alimentação com a função de efectuar ligações eléctricas em dois pontos independentemente da catenária, por exemplo, ligar uma subestação longínqua a uma linha, tal como acontece no troço entre Entrecampos a Alvito, alimentado por *Feeders* vindos da linha de Sintra [9]. Os *Feeders* são fixados nos mesmos postes das catenárias, porém dado o transporte eléctrico ser em alta tensão, eles têm de possuir uma distância de segurança mínima de 2m. Como tal, os postes da catenária são alongados através de postales em ferros geminados.

2.3.2. Terceiro Carril

Outro método de electrificação das vias ferroviárias pode ser feito através de contactos deslizantes, desde um condutor rígido em paralelo ou dentro do plano de rolamento, ou seja, por um terceiro carril, Figura 2.10. Tipicamente este método é confinado a sistemas ferroviários de potências relativamente baixas e em zonas geográficas onde é possível encontrar na proximidade energia eléctrica para abastecer as fontes do sistema de tracção eléctrica, tal como o caso dos metropolitanos. Em 109 metropolitanos existentes em várias cidades do mundo, cerca de 67% são equipadas com terceiro carril [12]. Deste modo, importa especificar as vantagens do terceiro carril [13]:

- Menor custo de instalação em comparação com a catenária;
- Maior imunidade a danos ambientais, desprezando as inundações ou acumulações de neve;
- Ideal para linhas com espaço vertical reduzido, tais como túneis e pontes;
- Causa menor impacto visual, pois dispensa os cabos de suporte e respectiva pendulagem;

- Melhor acesso de manutenção, o terceiro carril encontra-se junto da via no chão, contrariamente da catenária que se encontra a 7 m de altura.
- Maior robustez em relação ao sistema da catenária. O condutor do terceiro carril suporta forças mecânicas de maior amplitude e, em caso de uma das diversas escovas deslizantes se danificar, o veículo eléctrico poderá prosseguir a viagem. O mesmo não se verifica na catenária, onde o pantógrafo é vulnerável à mínima colisão a qualquer consola desalinhada ou objecto estranho. Nestas situações é provável que o pantógrafo provoque grandes danos no sistema de suporte, comprometendo gravemente o sistema e a continuidade da viagem;

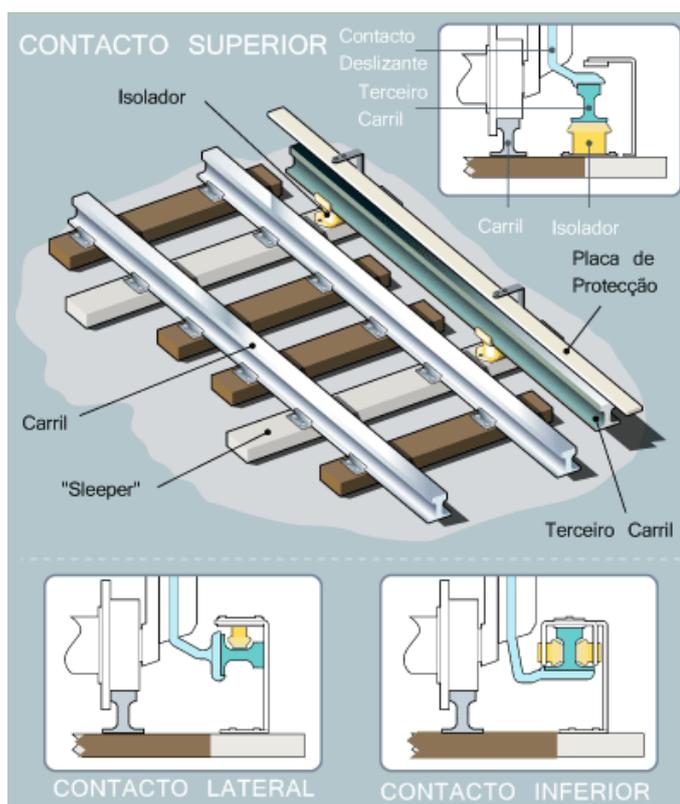


Figura 2.10 – Composição e diferentes topologias de vias com Terceiro Carril [14].

Todavia, a vantagem que este sistema oferece na sua simples concepção do condutor ser instalado junto ao carril no solo, poderá ter um grande inconveniente nas passagens de nível, principalmente para os peões. A linha tem de ser construída de forma a evitar o fácil acesso ao terceiro carril. Na Figura 2.10 é possível verificar três tipos de protecções existentes para minimizar contactos directos acidentais por terceiros. Outro inconveniente desta concepção está relacionado com limitações de potência que o terceiro suporta sem que haja arcos voltaicos para o solo ou carril de rolamento com o excesso de tensão eléctrica, ou perdas por efeito de Joule com o excesso de corrente eléctrica. Neste sentido, tal como todos os outros sistemas de alimentação por corrente contínua, é necessário projectar um maior número

de subestações de transformação, o que conduz ao aumentando significativo do custo de operação [13].

2.4. COMPONENTES MECÂNICOS DA CATENÁRIA

Neste capítulo, são descritos os conceitos relacionados com os componentes mecânicos presentes na instalação fixa dos sistemas de tracção eléctrica, dando-se especial atenção aos utilizados em Portugal.

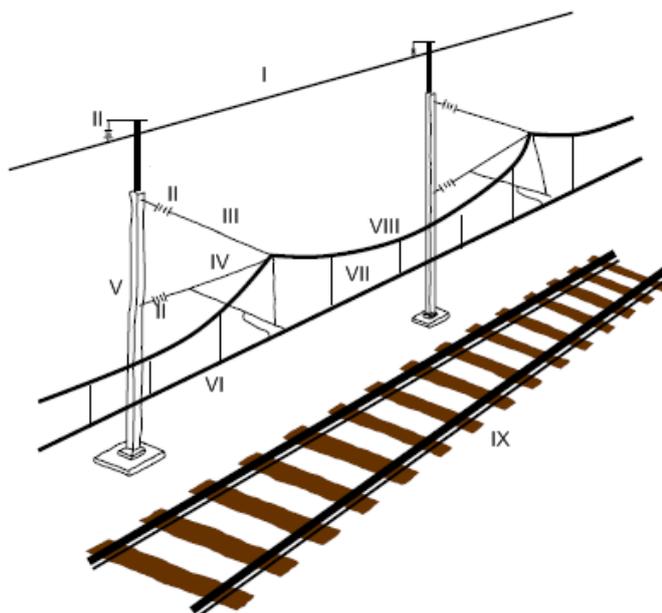


Figura 2.13 – Esquema da Instalação Fixa da Catenária [7].

Na Figura 2.13, observa-se uma instalação fixa com dependência mecânica, a qual é fundamentalmente constituída pelos seguintes componentes:

- *Feeder* (I);
- Isoladores (II);
- Consolas
 - Tubo/Cabo do Tirante (III);
 - Tubo do Pé da Consola (IV);
 - Tubo do Antibalançante e Braço de Chamada;
- Postes (V);
- Catenária
 - Fio de Contacto (VI);
 - Pêndulos (VII);
 - Cabo de Suporte (VIII).
- Carril de Rolamento (IX);

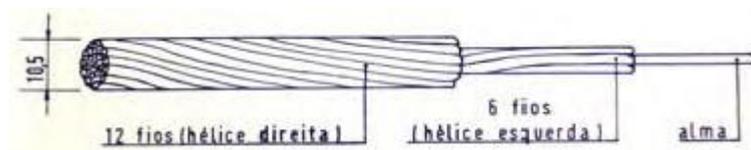


Figura 2.14 – Pormenor dos constituintes do Cabo de Suporte [7].

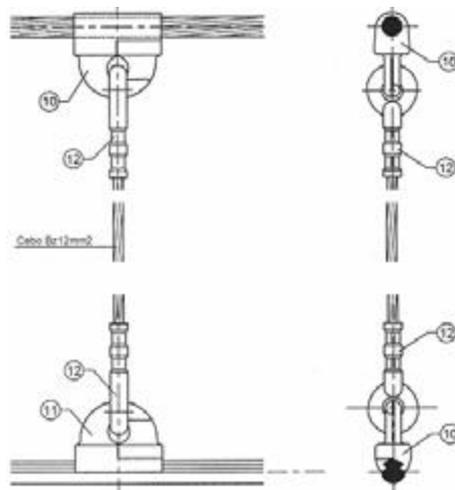


Figura 2.15 – Desenho dos Pêndulos [7].

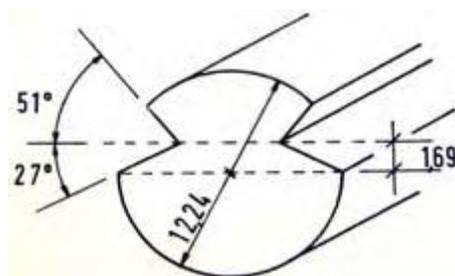


Figura 2.16 – Secção do Fio de Contacto [7].

O fio de contacto, apresentado na Figura 2.16, possui uma secção com saliências de modo a permitir um melhor encravamento da meia garra ao pêndulo, como se mostra na Figura 2.15. De notar que o cabo de suporte é composto por diversos fios, (Figura 2.14), enquanto o fio de contacto que é homogéneo; porém ambos possuem secções de dimensão aproximada. Desta forma, o fio de contacto apresenta um maior índice de rigidez, enquanto o cabo de suporte maior flexibilidade, características ideais para se adaptarem à forma da catenária (fio de contacto rígido e contínuo, cabo de suporte curvilíneo).

2.4.1. Postes

No que diz respeito aos postes de catenária, existem diversas topologias umas mais adoptadas em certos países do que outras, as sendo as mais frequentes:

- Vigas do tipo HE (Portugal, França e Reino Unido – Anexo 1);

- Ferros U de secção constante (Espanha – Anexo 2), ou de secção maior na base do que no topo (Espanha e Alemanha);
- Postes de betão armado de secção circular maior na base.

O poste utilizado em Portugal, em vigas do tipo HE, é fundado em maciços de betão que são construídos com forma paralelepípedica ou cilíndrica. Os primeiros são construídos antes da montagem dos postes, com uma cavidade (designada por carote) para a sua futura montagem, enquanto os maciços cilíndricos são construídos de forma mecanizada através de um furo no solo de cerca de 0,75 m de diâmetro e profundidade entre 2 a 4 m, posteriormente o betão é introduzido no furo com o poste já montado e aprumado. Na armação das vigas do tipo HE, tal como em qualquer outro poste, há que prever o perfil da plataforma da via que comporte os maciços de fundação, os sistemas de drenagem e os cabos do sistema ferroviário, nomeadamente de sinalização, telecomunicação e telecomando [9].

2.4.2. Consola

Como referido anteriormente, o sistema de suspensão de poste com consola é considerado equipamento com independência mecânica, ou seja, cada um destes postes serve única e exclusivamente a catenária de uma via, Figura 2.17.



Figura 2.17 – Via dupla com duas catenárias independentes [9].

As consolas, apresentadas na Figura 2.18, formam um triângulo com a face do topo do poste e são compostas por um cabo ou tubo, (denominado por tirante) relativamente horizontal (embora cada vez mais se utilize em tubo por causa da tendência para as altas velocidades); e por outro tubo (designado por pé de consola ou simplesmente por consola), que intersecta o tirante obliquamente deste o poste. Outrora, as consolas eram feitas em aço, em países como Alemanha, Espanha, Itália e Bélgica têm-se desenvolvido esforços para as

substituir por tubos de alumínio, um metal mais leve. Independentemente da sua composição, é junto à junção do tirante e da consola que o cabo de suporte é assente.

Uma vez que o fio de contacto necessita de zigzeaguear ao longo da linha, sendo a sua posição garantida através de um braço de chamada articulado num antibalançante com ligeira inclinação em relação à horizontal e que se fixa no tubo da consola, sendo da extremidade oposta suspenso por um pêndulo em cabo. O formato do braço de chamada tem de ser tal que impeça a sobreelevação do fio de contacto por acção da força radial que este lhe transmite e um comprimento suficiente para que não seja atingido pelo pantógrafo quando este desliza pela catenária. Sabendo que toda a consola se encontra à mesma diferença de potencial da catenária, esta é fixada ao poste mediante isoladores eléctricos [9].

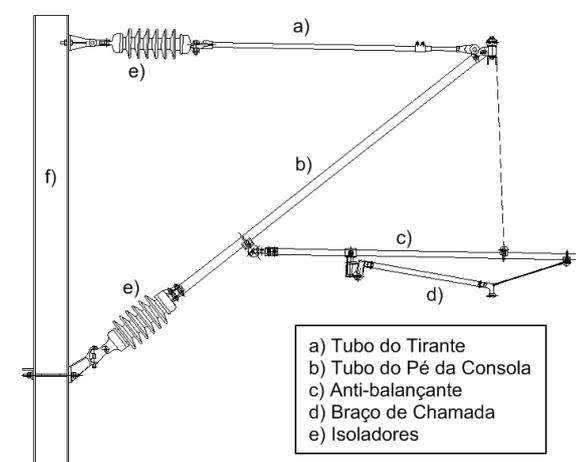


Figura 2.18 – Constituintes da Consola [15].

2.4.3. Isolamento Eléctrico e Protecção

Todos os circuitos eléctricos, seja a catenária ou *Feeders*, têm de ser isolados. Desde o início histórico da electrificação de vias ferroviárias até aos dias de hoje que se tem utilizado isoladores cerâmicos devido ao seu já conhecido desempenho noutras aplicações eléctricas. Existe em certos casos, como as linhas francesas, a tendência de substituir este por um outro isolador composto por vidro temperado, que permitem identificar facilmente um isolador partido em caso de defeito. Mais recentemente começaram a ser utilizados isoladores em material sintético que têm a vantagem de serem inquebráveis e portanto, ideais para locais próximos de passagens superiores passíveis de actos de vandalismo. Porém, só o tempo dirá se a sua durabilidade é comparável com os antigos isoladores.

Os isoladores utilizados nas catenárias inserem-se numa de duas topologias: do tipo cadeia, como as utilizadas em França; ou do tipo maciço como na Alemanha e Portugal, (Figura 2.19). O encadeamento de isoladores adapta-se bem a esforços de tracção, todavia

perante esforços existentes no tubo da consola e em algumas situações no tubo do tirante de compressão, não possuem um desempenho tão eficiente. Dessa forma, verifica-se em poucos casos como em Espanha no troço Madrid – Lérida isoladores de vidro temperado quando sujeitos a tracção e isoladores maciços cerâmicos quando sujeitos à compressão [9].

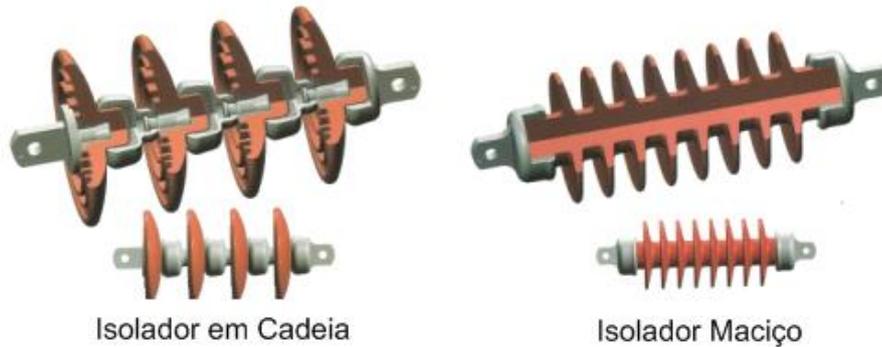


Figura 2.19 – Tipos de Isoladores [9].

As Figuras 2.20 e 2.21 exibem o desempenho dos isoladores nas catenárias separando as partes em tensão dos componentes de suporte.

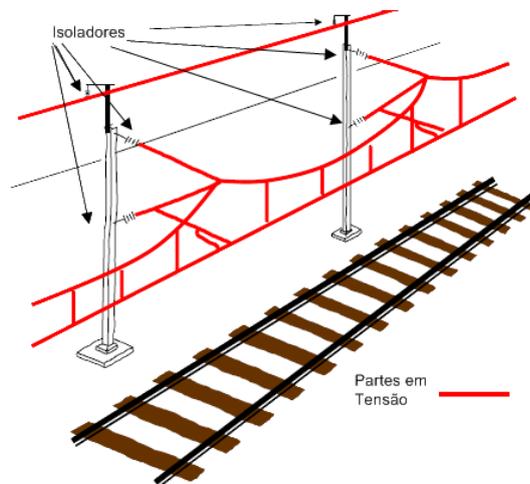


Figura 2.20 – Isoladores nas consolas fixadas a postes [7].

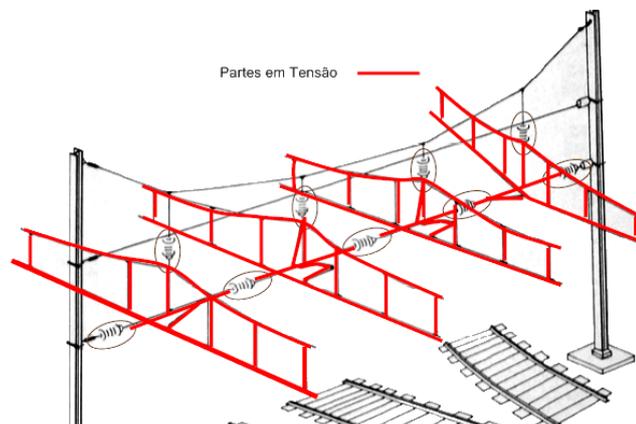


Figura 2.21 – Isoladores no Pórtico Flexível [7].

Independentemente da função dos isoladores, todos os componentes metálicos que se encontraram em contacto físico com a catenária, são protegidos para evitar acidentes de consequências materiais, animais ou humanas em caso de contornamento ou rotura dos referidos isoladores. Prioritariamente, o componente a proteger é o próprio poste da catenária. Sabendo que a catenária é uma rede eléctrica de neutro à terra, uma solução de protecção é a ligação dos postes ao circuito de retorno, tanto pelo carril ou pela terra. Desta forma, provoca-se a actuação dos disjuntores da subestação, desligando todo o sistema de tracção eléctrica a jusante desta em caso de corrente de defeito.

Caso esta ligação à terra não existisse, a corrente de curto-circuito que atravessaria o isolador contornado e o maciço de fundação que tem uma resistência óhmica significativa, provocaria tensões perigosas no solo provocando danos nos cabos enterrados do sistema ferroviário e possíveis electrocussões animais/humanas [9].

2.4.4. Classificação de Pendulagem

Na catenária, o factor mais relevante é a velocidade os comboios atingem, mais concretamente a velocidade com que o pantógrafo circula sob ela. Consoante a velocidade desejada num determinado troço e o orçamento para o implementar, assim dependerá o formato da catenária, nomeadamente, a precisão do posicionamento do fio de contacto, a distribuição dos pêndulos e a curvatura do cabo de suporte (designada por flecha). O formato mais simples e económico é essencialmente constituído unicamente pelo fio de contacto, o qual é fixado ao poste, através da consola, dispensando o cabo de suporte e pêndulos para o efeito. As catenárias que possuem curtos cabos de suporte fixados localmente junto ao poste também se incluem nesta classe. Estas configurações, em que o fio de contacto apresenta uma flecha significativa, são utilizadas para alimentar metros de superfície, ou outros veículos em estações ou estaleiros de tráfego lento.

Outra topologia de catenária é a designada por pendulagem de vão normal, ou catenária simples (Figura 2.22). Esta já possui um cabo de suporte que sustenta o fio de contacto por todo o vão através de pêndulos simetricamente distribuídos ao longo deste. Embora corrija parcialmente a flecha do fio de contacto a meio do vão, ainda não é satisfatório para comboios de alta velocidade.

Para reduzir ao máximo possível as oscilações sentidas pelo pantógrafo para altas velocidades, têm-se promovido duas soluções em quase toda a Europa (Figura 2.22): a suspensão Y, uma montagem que tende a uniformizar a flexibilidade da catenária ao longo do vão; ou dimensionando uma flecha inicial do fio de contacto de modo a compensar a sobre-elevação do pantógrafo, que terá assim uma trajectória quase rectilínea. A suspensão em

Y tem sido considerada nestas últimas décadas, essencial para velocidades superiores a 120 km/h. Contudo, recentemente em alguns países, como Portugal, têm-se adoptado esta técnica para novas montagens [9].

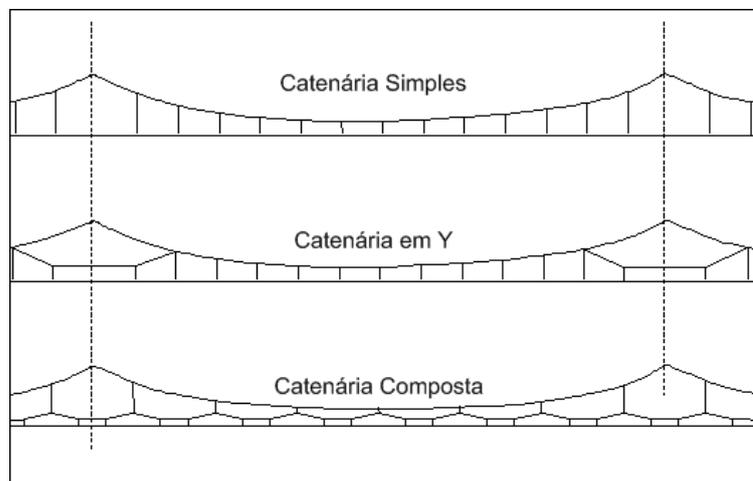


Figura 2.22 – Tipos de Catenárias [2].

Além das catenárias anteriormente classificadas, existem várias outras soluções que podem ser constituídas por diversos andares de cabos de suporte e pêndulos, derivado à necessidade de maior rigidez para fios de contactos de maiores secções (Figura 2.23).

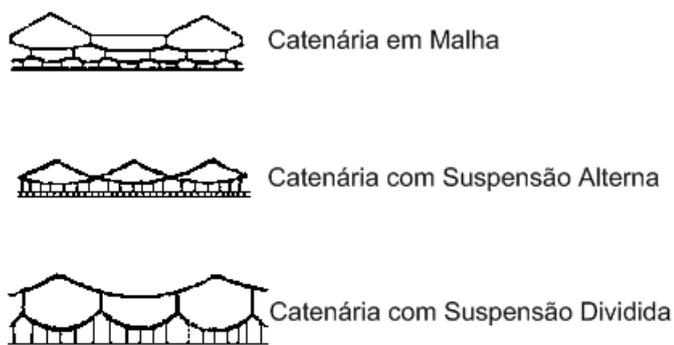


Figura 2.23 – Tipos de Catenárias Híbridas [8].

Além da classificação do formato e composição da catenária, existe outro tipo de classificação associado ao seu plano vertical longitudinal à via, ou outras palavras, o desalinhamento entre o cabo de suporte e o fio de contacto. Existem três topologias de catenárias quanto à sua curvatura, apresentadas na Figura 2.24 [16]:

- **Catenária Poligonal** – o cabo de suporte e o fio de contacto encontram-se sensivelmente alinhados segundo um plano vertical pelos principais tubos da consola

(tirante e pé de consola) e pelo braço de chamada, respectivamente. O desalinhamento por eles apresentado é nulo;

- Catenária Curvilínea ou Inclinada – neste tipo, somente o cabo de suporte é fixado à consola, enquanto o fio de contacto descreve uma curva inclinada causado por uma tensão mecânica presente no mesmo. Nesta situação o desalinhamento pode variar mas tem sempre o mesmo sinal;
- Catenária Ondular – este é um caso particular do anterior, em que o cabo de suporte é fixado alternadamente à esquerda e à direita do fio de contacto, portanto o desalinhamento é sinusoidal.

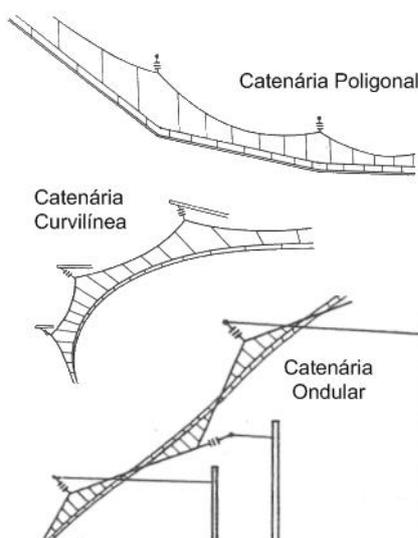


Figura 2.24 – Classificação de Catenárias [16].

Fundamentalmente a vantagem das catenárias inclinadas e ondulares é dispensarem o antibalançante; no entanto, o antibalançante é um elemento crítico para manter o fio de contacto no ponto exacto. Assim sendo, estas catenárias são mais vulneráveis às variações de temperatura e outras condições climáticas, exigindo verificações periódicas e ajustes de manutenção. Embora a catenária poligonal seja mais complexa e dispendiosa de implementar é mais adoptada dada a sua fácil manutenção.

2.5. COTAS E TIPOS DE CONSOLAS

2.5.1. Definições de Cotas

Num projecto de catenária com o equipamento aéreo suspenso em consolas, indicam-se todas as cotas que permitem aos intervenientes no processo de montagem levar a cabo as suas funções, originando uma instalação com as condições de exploração pretendida.

Algumas destas cotas têm referenciais distintos, uns segundo um referencial da via, outro num referencial do pantógrafo, como se apresenta na Figura 2.25.

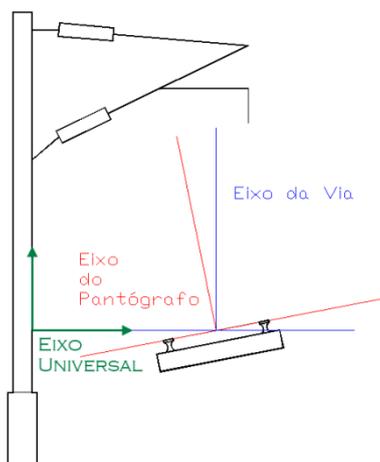


Figura 2.25 – Referenciais.

Ambos os referenciais têm a origem no ponto médio da bitola assente no ponto dos carris porém, enquanto o eixo da via está alinhado com a força gravítica da terra, o eixo do pantógrafo encontra-se alinhado com a inclinação do terreno de construção. Estas cotas de projecto (apresentadas na Figura 2.26) são de especial importância em diversas etapas da construção, nomeadamente:

- Na aquisição
 - Altura do Poste;
- Construção em estaleiro
 - Comprimento total do tirante (TL);
 - Comprimento do tirante em tubo (TT) ou comprimento tirante em cabo (TC);
 - Comprimento total do pé da consola (KL);
 - Comprimento do tubo consola 30x38 (K3) ou comprimento do tubo consola 40x49 (K4);
 - Comprimento do braço de chamada (L);
 - Distância da furação da fixação do tirante ao topo do poste (k);
 - Distância da fixação do antibalançante ao pé de consola (C);
- Construção dos maciços
 - Nivelamento do maciço, ou seja, distância vertical entre o topo do maciço à origem dos referenciais (Niv) – considera-se este nivelamento negativo quando o topo do maciço estiver abaixo da origem e positivo caso contrário;
 - Altura de Encastramento;

- Montagem
 - Altura do fio de contacto ao plano de rolamento (H);
 - Abertura de catenária (E);
 - Distância entre as fixações do tirante e do pé da consola (A);
 - Distância horizontal entre a posição do cabo de suporte relativamente à perpendicular ao eixo da via (S) – considera-se um desalinhamento positivo quando o cabo encontra-se mais distante ao poste e negativo caso contrário;
 - Distância horizontal, segundo o referencial do pantógrafo, entre a posição do fio de contacto relativamente à perpendicular do mesmo referencial (D) – considera-se um desalinhamento positivo quando o fio encontra-se mais distante ao poste e negativo caso contrário;
 - Distância vertical entre o fio de contacto e o braço de chamada (B);
 - Distância vertical da fixação do tirante à posição do cabo de suporte (F) – considera-se positivo se o cabo de suporte estiver a uma altura inferior ao ponto de fixação e negativo caso contrário;
 - Implantação do Poste
 - Distância horizontal das fases exteriores do poste e do carril (i);
 - Distância horizontal do eixo central do poste à fase exterior do carril (I);
 - Distância do poste ao ponto médio do carril (PMV);
 - Comprimento do antibalançante (L);
 - Escala da via representa a distância vertical do ponto mais alto ao ponto mais baixo da cabeça do carril no interior da bitola (Esc) – considera-se positiva para inclinações que se afastem do poste e negativo caso contrário;
 - Contra-Flecha é uma cota horizontal em mm/m que indica quantos milímetros o poste se encontra inclinado a 1m de altura da via (Cf) – considera-se positivo para inclinações para o interior da via e negativo caso contrário.

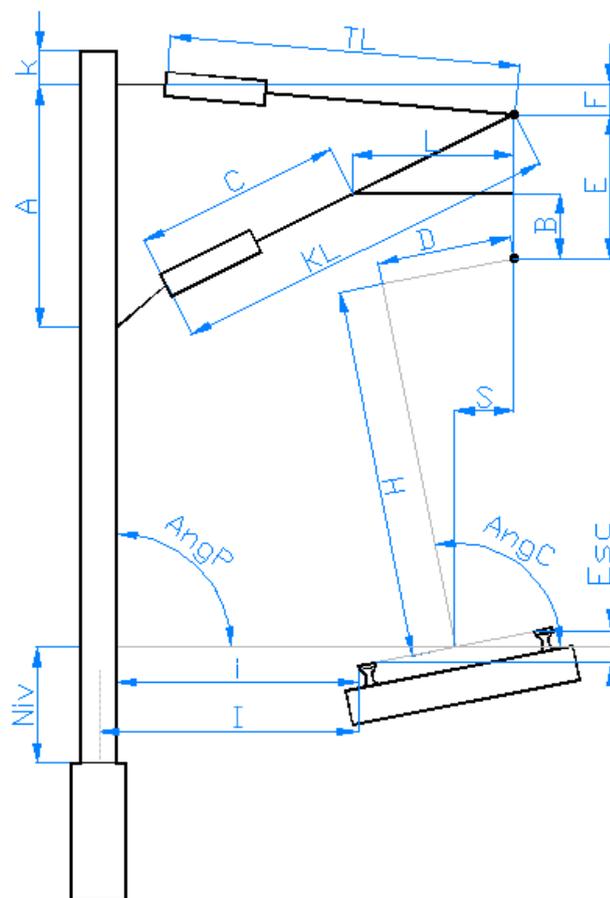


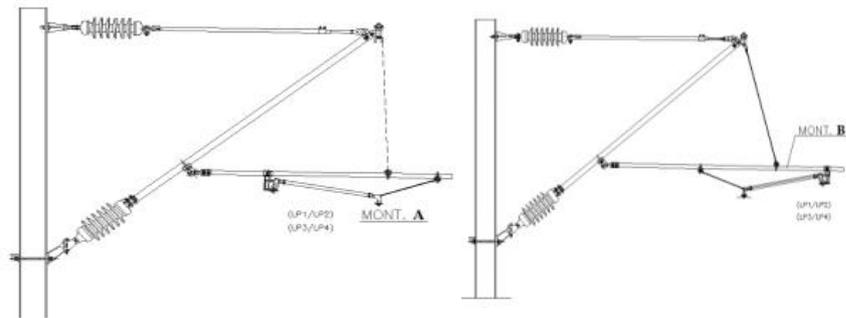
Figura 2.26 – Cotas da Consola

2.5.2. Tipos de Montagens

Para além do conhecimento das diversas cotas aqui representadas, é igualmente importante saber as diferentes topologias de montagens relativamente à concepção das consolas. Será reconhecido os diferentes tipos de montagens, de “A” a “E”, apresentadas na Figura 2.27 e Anexo 3:

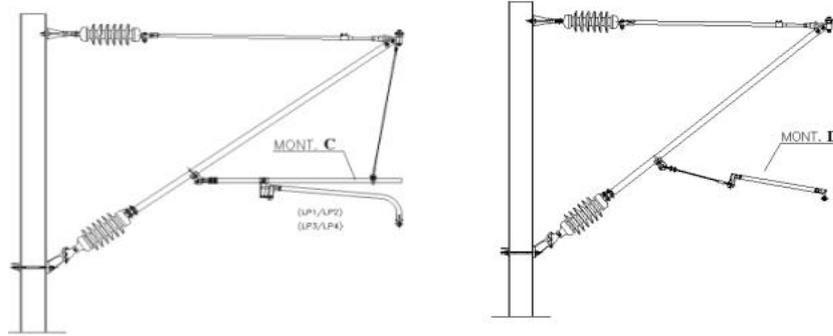
- A. Consola com braço de chamada e antibalançante à tracção comprido;
- B. Consola com braço de chamada e antibalançante à compressão;
- C. Consola com braço de chamada e antibalançante à tracção curto;
- D. Consola com braço de chamada com cabo de bronze;
- E. Consola com antibalançante de fio de contacto sobreelevado.

A identificação das cotas e distinção da forma geométrica das diferentes topologias de consolas é fundamental para se desenvolver o algoritmo de dimensionamento automático de consolas, robusto suficiente para se adaptar, determinarem e retornar dados válidos para todas as situações possíveis.



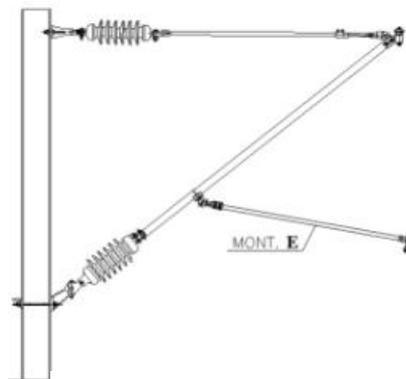
Montagem A

Montagem B



Montagem C

Montagem D



Montagem E

Figura 2.27 – Tipos de montagens (A e E) [15].

3. IMPLEMENTAÇÃO – CÁLCULO DA CONSOLA

O resultado do presente trabalho foi dividido em duas partes separadas com funções distintas. A primeira é dedicada ao cálculo da consola e a segunda ao cálculo dos pêndulos da catenária. Neste capítulo, será apresentada a primeira, indicando todos os detalhes efectuados na sua implementação.

3.1. FERRAMENTA DE DESENVOLVIMENTO

O primeiro passo foi a escolha de ferramenta de desenvolvimento. Face ao cálculo matemático necessário à determinação da forma geométrica da consola, a primeira escolha recaiu sobre o *MatLab*TM, porém levantou-se a questão de como elaborar o desenho da configuração final, o que seria bastante complexo com este software. Considerou-se outras ferramentas tal como a linguagem *C#* pelo *Microsoft Visual Studio*TM ou *Java* da *Sun Microsystems*TM, as quais se apresentam como excelentes escolhas dado que permitem efectuar cálculos matemáticos ao nível pretendido e desenvolver uma interface gráfica acessível ao utilizador. Das duas linguagens, seleccionou-se o *Java* suportado pelo ambiente de desenvolvimento *NetBeans*TM, fundamentalmente porque permite uma melhor compatibilidade entre os diversos sistemas operativos da *Microsoft*TM, *Linux*TM e *Macintosh*TM.

Java é uma linguagem de programação orientada por objectos que, ao contrário das linguagens convencionais que são compiladas para código nativo, é compilada para um *bytecode* que é executado por uma máquina virtual, o que garante que o programa seja reconhecido por todos os computadores independentemente do seu sistema operativo, desde que contenham instalado a referida máquina virtual (aplicação com acerca de dez megabytes). *Java* não só permite desenhar a interface gráfica necessária à introdução/recepção de dados, como também permite elaborar desenhos a duas dimensões, bem como gerar documentos em *pdf*, características essenciais para o desenvolvimento e apresentação de resultados do presente trabalho.

3.2. IDENTIFICAÇÃO DE PARÂMETROS

Perante o cálculo de uma consola é fundamental definir todos os parâmetros de entrada e saída. Esta definição baseou-se no facto de que a configuração final das consolas têm de conter um conjunto de parâmetros rigorosos por forma a respeitar as imposições dos

projectos e da fiscalização. Os restantes parâmetros são constantes de entrada ou parâmetros ajustáveis de saída.

3.2.1. Dados de Entrada

A Tabela 3.1 identifica as cotas que o utilizador do programa terá de inserir no formulário de entrada para proceder ao cálculo da respectiva consola. Na terceira coluna identificam-se os valores padrão de cada um dos parâmetros que estarão por defeito inseridos na aplicação evitando, desta forma, um preenchimento exaustivo por parte do utilizador.

Tabela 3.1 – Dados de Entrada

Cotas	Unidade	Por defeito (m)
H	(m ou mm)	5,60
E		1,40
A		1,80
i		2,20
D		0,00
F		0,00
B		0,00
Viga		0,00
Niv		-0,75
Cf		mm/m ou °
Esc	(m ou mm) ou °	0 ou 90°

Na aplicação, a interface gráfica, apresentada na Figura 3.1, serve para o utilizador preencher as cotas nos respectivos campos, e tendo ainda a possibilidade de preencher os dados referentes à contra-flecha e à escala numa unidade linear ou angular, consoante preferir.

Figura 3.1 – Interface Gráfica do Formulário de Entrada de Dados.

Foram também definidas constantes que não se prevêem que varieem a longo prazo. A apresentação desta, foi colocada na aba traseira do formulário de entrada, mantendo-os relativamente ocultas não sobrecarregar a aplicação (Tabela 3.2 e Figura 3.2).

Tabela 3.2 – Constantes

Constantes	Unidade	Por defeito (m)
K	(m ou mm)	0,15
Cabeça do carril		0,072
Bitola		1,668

Figura 3.2 – Formulário das Constantes, na segunda aba.

Outro dado importante é a identificação do tipo de montagem da consola (de A a E) e o tipo de braço de chamada a incluir (de I a XI). Estes são apresentados nos desenhados dos Anexos 3 e 4. Na Figura 3.3 apresenta-se a respectiva janela de selecção.

Figura 3.3 – Interface Gráfica da selecção do Modelo da Consola e Tipo de Braço de Chamada.

Por fim, é fundamental a identificação identifique dos tipos e dimensões dos fixadores bem como dos próprios tubos do tirante e do pé da consola. Nesse sentido, foi-se incluindo na aplicação uma base de dados baseada num sistema de ficheiros responsável por

armazenar essa informação. Esta base de dados permite a introdução ou eliminação dos referidos dados, para que em futuros cálculos, estes tipo de dados sejam simplesmente seleccionados e não novamente preenchidos. A base de dados foi dimensionada para receber a informação presente na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Parâmetros da Base de Dados – Comprimento das Fixações e Distâncias a subtrair do comprimento total dos Tubos.

Cotas	Unidade	Por defeito (m)
Fixação do Tirante	(m ou mm)	Nome do Desenho: E-6179 – [I] Distancia: 0,13
Fixação da Consola		Nome do Desenho: E-6161 [I-A] Distancia X: 0.2 Distancia Y: 0.14
Tubo do Tirante e da Consola		0 e 0

A base de dados é composta por três campos distintos, sendo que cada um deles possui uma estrutura do tipo árvore:

- Campo da Fixação do Tirante – permite inserir a informação de diversas fixações do tirante, identificando o seu desenho, tipo e comprimento;
- Fixação do Pé da Consola – de forma idêntica ao anterior, permite armazenar a informação da fixação do pé da consola, identificando o desenho, tipo e duas distâncias (componente x e y da dimensão da fixação em relação ao poste);
- Tubo do Tirante e do Pé da Consola – permite inserir dados relacionados com o tubo e isolante do tirante e do pé da consola, identificando os seus desenhos, tipos, isoladores (Zona Terrestre, Zona Marítima e Sintético), e as dimensões que os isoladores ocupam na cota total dos seus respectivos tubos. A dimensão para o tirante corresponde à diferença ($TL - TT$, caso seja um tubo) ou ($TL - TC$, caso seja um cabo). Relativamente ao pé da consola, a distância é dada por ($KL - K3$, se o tubo for de secção 30x38) ou ($KL - K4$, para secção 40x49).

Juntamente a esta base de dados, foi integrado um gestor que possibilita ao utilizador eliminar equipamentos já não utilizados e introduzir novos que cheguem eventualmente ao mercado, (Figura 3.4).

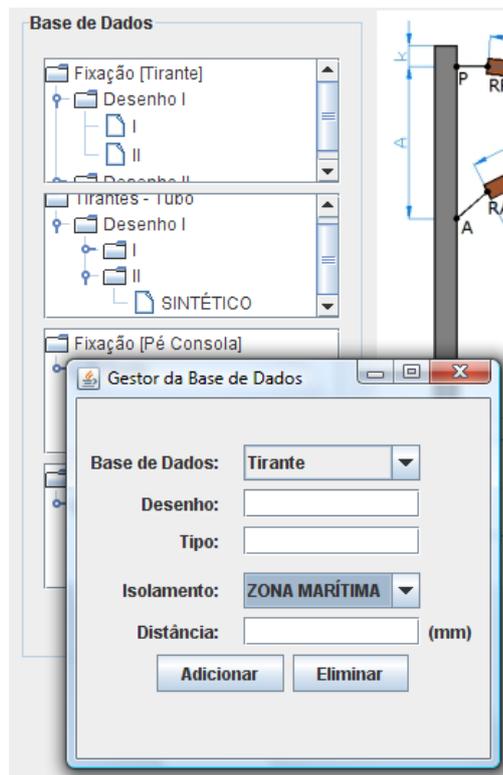


Figura 3.4 – Estrutura da Base de Dados e seu Gestor.

3.2.2. Dados de Entrada Reguláveis

No estabelecimento de consolas é importante poder efectuar um calculo com os dados de projecto base, para posteriormente ser comparados com um segundo cálculo resultante de regulações de alguns dos pãrametros de entrada. Uma vez que alguns parãmetros não podem ser modificados (sendo necessário respeitar as dimensões indicadas pelo projecto), serão apenas ajustáveis os dados presentes na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Dados de Entrada Reguláveis

Cotas	Unidade	Por defeito (m)
i	(m ou mm)	2,20
D		0,00
F		0,00
B		0,00
Cf	mm ou °	0 ou 90°
Esc	(m ou mm) ou °	0 ou 90°

Para tal, foi implementado um formulário distinto do principal, que só se torna visível quando for selecionado o botão “Ajustar”. Evitando o preenchimento de campos repetidos, tornou-se este segundo formulário sensível ao principal, de modo a duplicar os pãrametros já preenchidos para os seus campos, como se apresenta na Figura 3.5. Desta forma

será apenas necessário corrigir os campos do segundo formulário que difiram do principal. A selecção do botão “Determinar” desencadeia a execução de um segundo cálculo de ajuste. O resultado será retornado para o ecrã, em paralelo com o do primeiro cálculo, possibilitando a comparação entre eles (o cálculo do projecto e o resultante de pequenos ajustes efectuados).

Figura 3.5 – Formulários de entrada (Principal e Secundário de Ajuste).

3.2.3. Dados de Saída

Em função de todos os dados de entrada, o programa retorna as dimensões das cotas que permitem a correcta armação da consola, tal como se apresenta na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Dados de Saída

Cotas (m ou mm)	Por defeito
TL	-1
TT/TC	-1
KL	-1
K3/K4	-1
S	-1
C	-1
L	-1

A inicialização das variáveis, com o valor impossível -1, permite identificar algum eventual erro de cálculo resultante de uma introdução incorrecta de parâmetros de entrada. De modo a evitar esta situação, sempre que se introduzir valores absurdos (como letras ou caracteres estranhos) nos campos do formulário de parâmetros de entrada, estes alertam o utilizador alterando a cor de fundo para vermelho. Após o cálculo de consola os resultados, serão apresentados para o ecrã, como exemplificado na Figura 3.6.

Resultados		
TL: 2.876	TT: 2.876	L: 2.379
KL: 3.347	K4: 3.347	
S: 0.0	C: 0.608	

Figura 3.6 – Interface Gráfica da apresentação dos dados de saída.

3.3. METODOLOGIA

Estando perante um sistema com diversas cotas verticais e horizontais segundo dois referenciais distintos (o da via e o do pantógrafo), decidiu-se determinar, através de operações algébricas e trigonométricas, diversos pontos cartesianos relativamente ao mesmo referencial posicionados estrategicamente na consola. Neste sentido, optou-se por considerar todas as cotas introduzidas como vectores (com dada amplitude e um ângulo).

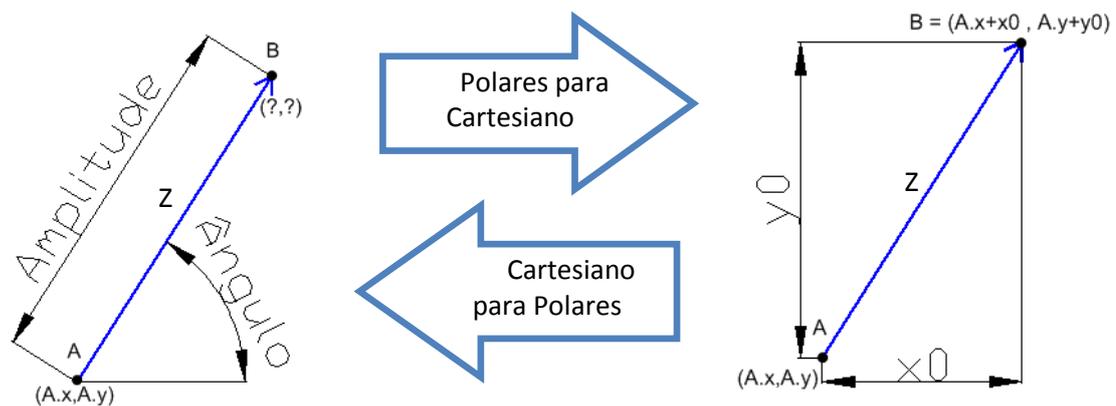


Figura 3.7 – Transformação de coordenadas polares para cartesianas e vice-versa.

Para transformar um vector Z de coordenadas polares para coordenadas cartesianas, procedeu-se à determinação habitual das componentes x e y , expressões (3.1) e (3.2) respectivamente.

$$Z \cdot x_0 = |Z| \times \cos(\hat{\text{Angulo}}) \quad (3.1)$$

$$Z \cdot y_0 = |Z| \times \text{sen}(\hat{\text{Angulo}}) \quad (3.2)$$

Da mesma forma, também foi utilizada a habitual transformação inversa, para compo um vector a partir de coordenadas cartesianas (3.3) e (3.4).

$$|Z| = \sqrt{x_0^2 + y_0^2} \quad (3.3)$$

$$\hat{\text{Angulo de } Z} = \tan^{-1}\left(\frac{y_0}{x_0}\right) \quad (3.4)$$

Estas transformações vão ser utilizadas para determinar, por exemplo, a posição do ponto B (as suas componentes x e y) da Figura 3.7, através das componentes do ponto inicial (ponto A), e da amplitude e ângulo do vector Z.

3.3.1. Posicionamento dos Pontos Estratégicos

Para simplificar o cálculo dos parâmetros de saída, em função dos de entrada (conjuntos de cotas e ângulos de referenciais distintos), adoptou-se um único referencial universal (Figura 2.25) posicionando-o na face externa do poste virado para a via-férrea, à mesma altura da origem dos restantes referenciais mencionados anteriores (Figura 3.8), segmentando-se os componentes do sistema obtendo-se os pontos da Tabela 3.6.

Tabela 3.6 - Pontos Estratégicos no mapeamento da consola.

Pontos	Breve Descrição
0,0	Origem do referencial universal.
P	Ponto de fixação do tirante ao poste.
RP	Ponto de junção entre o fixador do tirante com o seu isolador.
IsoT	Ponto de junção entre o Isolador do tirante com o seu tubo.
A	Ponto de fixação do pé da consola ao poste.
RA	Ponto de junção entre o fixador do pé da consola com o seu isolador.
IsoC	Ponto de junção entre o Isolador do pé de consola com o seu tubo.
Cs	Ponto por onde passa o cabo de suporte.
Fc	Ponto por onde passa o fio de contacto.
C	Ponto de intercepção entre o antibalançante com o tubo do pé da consola.
PMV	Ponto médio da via.

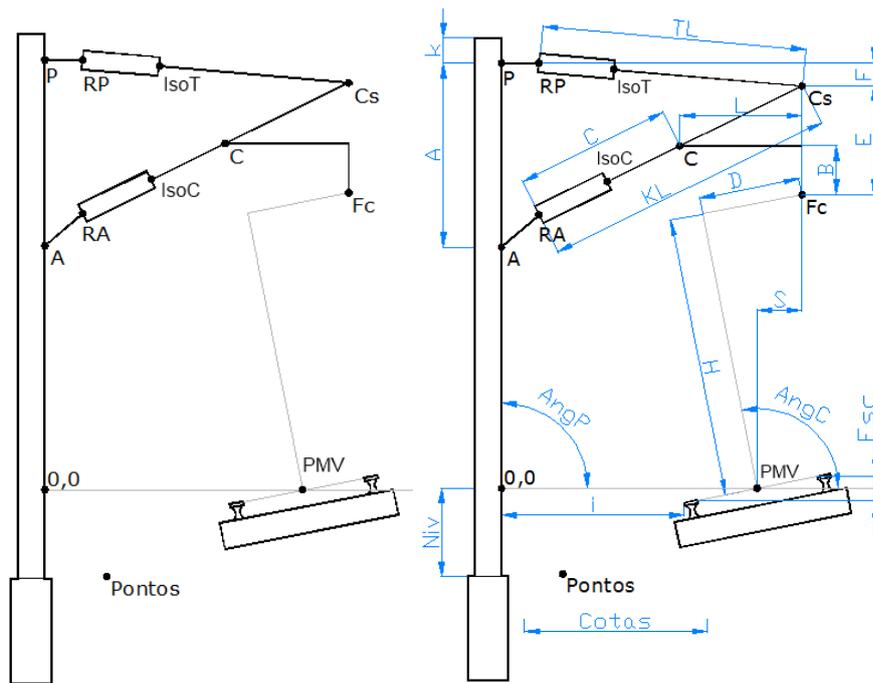


Figura 3.8 – Posicionamento dos Pontos Estratégicos.

Assim, este método permite determinar a posição de cada um destes pontos em coordenadas cartesianas em relação ao referencial (0,0), para que seja facilitada a determinação dos vários dados pretendidos, como por exemplo:

- A obtenção de cotas, como por exemplo a cota a F, resulta da subtração das componentes y dos pontos P e Cs;
- A determinação de distâncias entre dois pontos, como por exemplo a cota TL (distância entre os pontos RP e Cs), obtém-se por aplicação do teorema de Pitágoras entre a diferença das componentes x e y (3.5) como se apresenta na Figura 3.9;

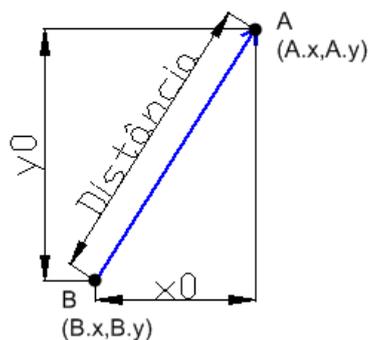


Figura 3.9 – Distância entre o ponto A e B.

$$Distância = \sqrt{(A.x - B.x)^2 + (A.y - B.y)^2} \quad (3.5)$$

3.4. ALGORITMO DE CÁLCULO DE DADOS AUXILIARES

Após a introdução dos parâmetros de entrada nos respectivos campos do formulário principal ou no de ajuste, será necessário -se a clicar no botão “Determinar” (Figura 3.10) para dar início ao cálculo automático da consola. Este passa por determinar diversos ângulos e pontos estratégicos auxiliares segundo o referencial universal convencionado, com a finalidade de determinar as cotas correspondentes aos parâmetros de saída.

Figura 3.10 – Botões para iniciar o cálculo automático.

3.4.1. Determinação do Ângulo do Carril

O primeiro parâmetro a ser processado é o responsável por indicar o ângulo do plano de rolamento. Poderá ser introduzido numa forma angular em graus (AngC), ou numa forma linear designado por escala (Esc). Como referido no subcapítulo 3.2.1. (Dados de Entrada), a escala representa a cota ilustrada na Figura 3.11:

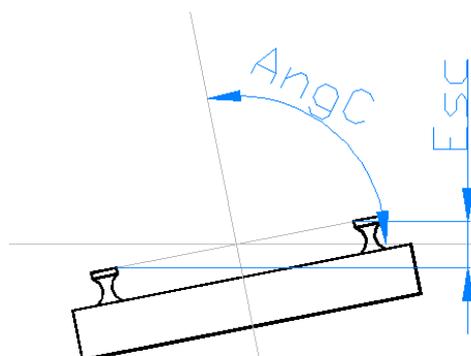


Figura 3.11 – Cota Escala.

Caso seja introduzido o ângulo do carril é efectuado o cálculo da escala utilizando (3.6) e (3.7).

$$AngC = AngC^* \times \frac{\pi}{180} \quad (3.6)$$

$$Esc = Bitola \times \cos(AngC) \quad (3.7)$$

Caso seja introduzida directamente a escala, é determinado o ângulo:

$$AngC = \cos^{-1} \frac{Esc}{Bitola} \quad (3.8)$$

3.4.2. Determinação da cota PMV

A cota PMV (Figura 3.12) corresponde ao comprimento horizontal medido do ponto médio da via ferroviária ao poste e é dado por (3.9):

$$PMV = I - \frac{Viga}{2} + \left(Cabeça\ do\ Carril + \frac{Bitola}{2} \right) \times \sin(AngC) \quad (3.9)$$

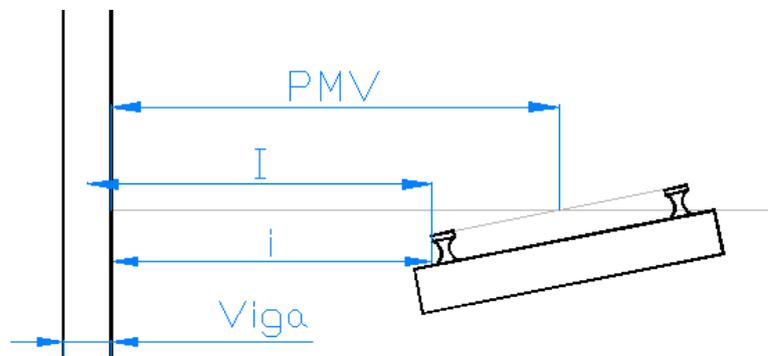


Figura 3.12 – Cotas auxiliares na determinação de PMV.

A relação entre a cota I (distância horizontal do eixo central da viga à fase externa do carril) e i (distância horizontal das fases externas do poste e do carril) é dado por (3.10).

$$I = i + \frac{Viga}{2} \quad (3.10)$$

A aplicação encontra-se preparada apenas para receber a cota I, porém, caso se pretenda introduzir a cota i, ignora-se o campo da Viga, tornando $I = i$. Posteriormente, para

efeitos de impressão, é possível novamente identificar o valor da dimensão da viga antes da geração do relatório final.

3.4.3. Determinação do ponto Fc

O ponto Fc corresponde ao local onde o fio de contacto se encontra posicionado na consola. Obtendo-se as coordenadas do ponto de origem do referencial do pantógrafo (0, PMV), adquire-se a coordenada do ponto por onde passa o fio de contacto, adicionando ao primeiro as componentes resultantes da transformação do vector com amplitude H e ângulo AngC, utilizando:

$$Fc'.x = H \times \cos AngC + PMV \quad (3.11)$$

$$Fc'.y = H \times \sen AngC \quad (3.12)$$

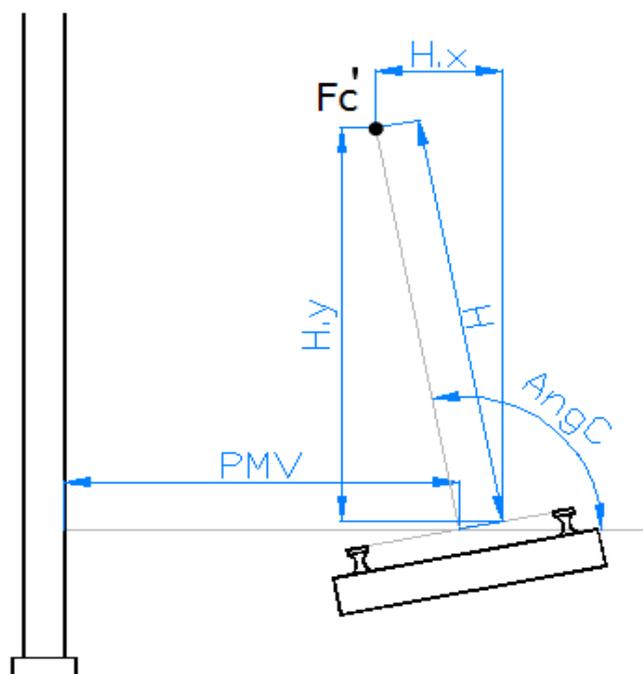


Figura 3.13 – Primeira aproximação do ponto Fc

Como se pode observar na Figura 3.13, este último ponto não representa a verdadeira posição do ponto do fio de contacto, pois falta ter em consideração o desvio imposto pela cota D. Este será dado por:

$$Fc.x = Fc'.x + D \times \cos\left(\frac{\pi}{2} - AngC\right) \quad (3.13)$$

$$Fc.y = Fc'.y - D \times \sen\left(\frac{\pi}{2} - AngC\right) \quad (3.14)$$

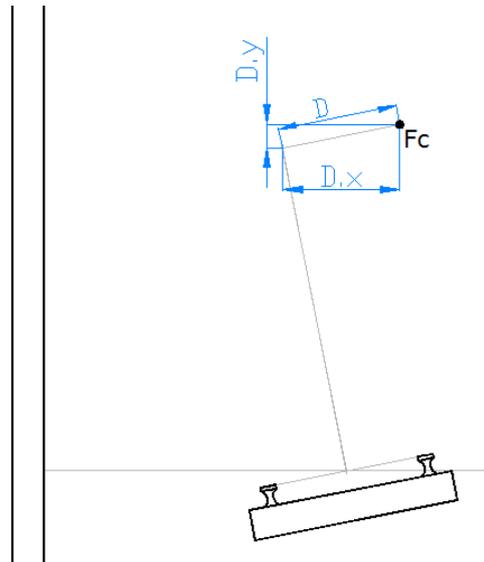


Figura 3.14 – Obtenção do ponto Fc.

3.4.4. Determinação do ponto Cs

O ponto Cs corresponde representa a posição onde se encontra o cabo de suporte. Das três classificações da catenária conhecidas (poligonal, curvilínea ou ondular), actualmente só a poligonal é implantada, portanto, Cs surge a uma distância vertical de E do ponto de Fc (fio de contacto), apresentada na figura 3.15.

$$Cs.x = Fc.x \quad (3.15)$$

$$Cs.y = Fc.y + E \quad (3.16)$$

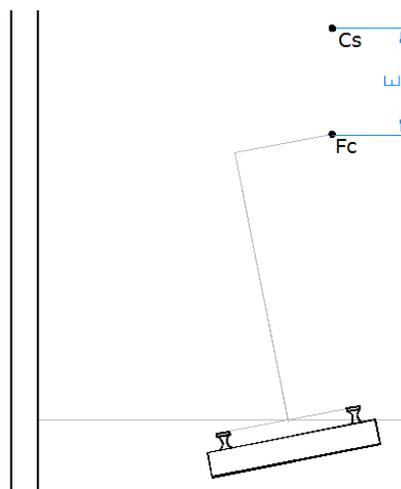


Figura 3.15 – Obtenção do ponto Cs.

3.4.5. Determinação do Ângulo do Poste

Tal como acontece no plano de rolamento, é possível introduzir dois tipos de dados no parâmetro associado à inclinação do poste: por ângulo ($AngP$) ou por contra-flecha (Cf), respectivamente de uma forma angular ou linear.

Na Figura 3.16 apresenta-se a representação gráfica das cotas associadas à inclinação do poste.

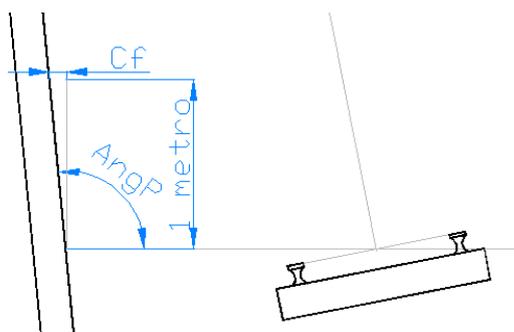


Figura 3.16 – Cota Cf e Ângulo do Poste

Caso seja introduzido o ângulo do poste, a contra flecha é calculada por:

$$AngP = AngP^* \times \frac{\pi}{180} \quad (3.17)$$

$$Cf = 1000 \times \tan\left(\frac{\pi}{2} - AngP\right) \quad (3.18)$$

Com introdução da cota Cf, o ângulo do poste é dado por:

$$AngP = \tan^{-1}\left(-\frac{Cf}{1000}\right) + \frac{\pi}{2} \quad (3.19)$$

3.4.6. Determinação dos Pontos P e RP

Estabelecida a inclinação do poste, o cálculo das coordenadas do ponto P é efectuado por recurso a:

$$P.y = Cs.y + F \quad (3.20)$$

$$P.x = \frac{P.y}{\tan(AngP)} \quad (3.21)$$

O ponto P representa a junção do fixador do tirante com o poste. No entanto, para efeitos de cálculo, pretende-se determinar o ponto de junção entre o fixador e o isolador do tirante, o RP. É com este que será possível mais tarde determinar o comprimento do tubo. Para este cálculo, é necessário conhecer o comprimento do fixador (FixTir), informações disponíveis na base de dados referida no subcapítulo 3.2.1. A determinação de RP, esquematicamente apresentado na Figura 3.17, é efectuado recorrendo a (3.22) e (3.23).

$$RP.x = P.x + FixTir \times \cos\left(\frac{\pi}{2} - AngP\right) \quad (3.22)$$

$$RP.y = P.y - FixTir \times \sin\left(\frac{\pi}{2} - AngP\right) \quad (3.23)$$

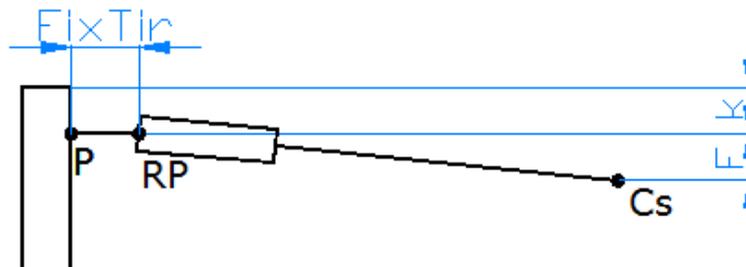


Figura 3.17 – Obtenção dos pontos P e RP.

3.4.7. Determinação dos Pontos A e RA

Na figura 3.18 o ponto A representa a junção do fixador do pé da consola ao poste, sendo a distância entre este ponto ao ponto P denominada por abertura da consola (cota A'). O cálculo das suas coordenadas é o seguinte:

$$A.x = P.x - A' \times \cos(AngP) \quad (3.24)$$

$$A.y = P.y - A' \times \sin(AngP) \quad (3.25)$$

Pelo mesmo motivo descrito na situação do subcapítulo 3.4.6., determinou-se o ponto RA associado à junção entre o fixador do pé da consola (FixCon) ao próprio tubo. Neste caso, o parâmetro FixCon não se trata de uma cota, como no caso anterior, mas sim de um ponto, uma vez que, o fixador possui duas componentes (x e y). Estes valores encontram-se tabelados na base de dados, sendo o cálculo das coordenadas de RA dado por:

$$RA.x = A.x + FixCon.x \times \cos\left(\frac{\pi}{2} - AngP\right) + FixCon.y \times \cos(AngP) \quad (3.26)$$

$$RA.y = A.y - FixTir.x \times \text{sen}\left(\frac{\pi}{2} - \text{AngP}\right) + FixCon.y \times \text{sen}(\text{AngP}) \quad (3.27)$$

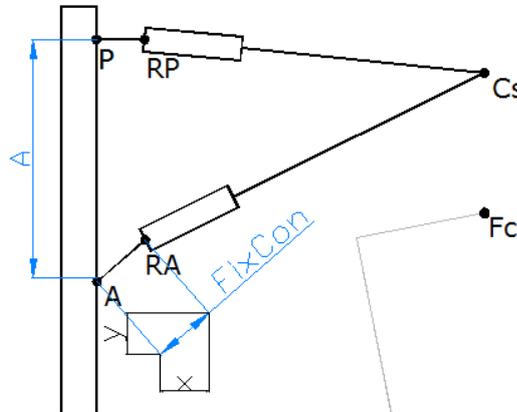


Figura 3.18 Obtenção dos pontos A e RA.

3.5. ALGORITMO DE CÁLCULO DOS DADOS DE SAÍDA

Apresenta-se nesta secção os cálculos necessários à determinação dos parâmetros de saída, fundamentais nas diversas etapas de construção do equipamento da catenária.

3.5.1. Determinação das Cotas TL e TC/TT

A cota TL representa do comprimento do tubo do tirante incluindo o isolador e as restantes peças de apoio, isto é, a distância entre o ponto RP e Cs representados na figura 3.19.

$$TL' = \sqrt{(RP.x - Cs.x)^2 + (RP.y - Cs.y)^2} \quad (3.28)$$

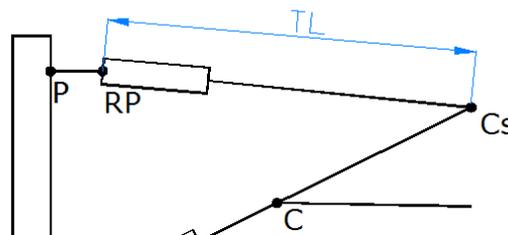


Figura 3.19 – Cota TL

A expressão (3.28) foi utilizada como aproximação para a determinação da cota TL. Testes de campo revelaram uma diferença de 100mm entre os resultados obtidos por

utilização de (3.28) e as cotas de projectos reais. Tal deve-se ao facto de que nas consolas utilizadas em Portugal, o tirante não interceptar o cabo de suporte. Esta situação encontra-se ilustrada com num esquema com maior pormenor na Figura 3.20, onde se evidencia o desvio de 10cm, o qual corresponde à distância entre o final do tubo do tirante e ponto Cs:

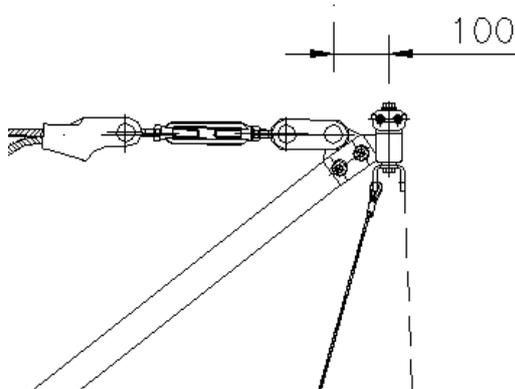


Figura 3.20 – Espaço de 100mm entre o Tirante e o Cabo de Suporte.

Para obter a cota TL deve subtrair-se 100mm ao valor TL'. Para se obter o comprimento do cabo (ou tubo) do tirante (cota TC ou TT, respectivamente), deve-se subtrair a TL o valor constante associado ao comprimento do isolador e restantes peças de apoio, valor este que se encontra na base de dados para a topologia do tirante em causa, (TL-TC ou TL-TT).

3.5.2. Determinação das Cotas KL e K3/K4

O comprimento total do tubo do pé da consola, KL, obtém-se aplicando o teorema de Pitágoras entre o ponto RA e Cs (3.29) como apresentado na figura 3.21.

$$KL = \sqrt{(RA.x - Cs.x)^2 + (RA.y - Cs.y)^2} \quad (3.29)$$

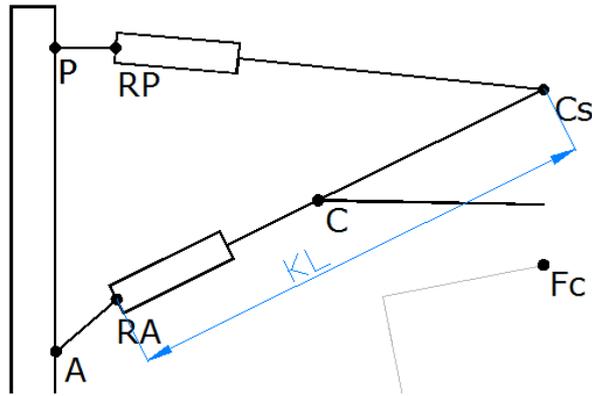


Figura 3.21 - Cota KL

Já a cota K3 (nos tubos 30x38) ou K4 (tubos 40x49) determina-se a partir da subtração da cota KL pelo comprimento do isolador e restantes peças de apoio (KL-K3) ou (KL-K4), valor armazenado igualmente na base de dados para cada tipo de tubo.

3.5.3. Determinação da Cota S

A cota S corresponde à distância horizontal entre a posição do cabo de suporte relativamente à perpendicular ao eixo da via (Figura 3.22), pelo que poderá ser determinada através da subtração da coordenada x do ponto Cs ao ponto médio do carril (3.30):

$$S = C_{s.x} - PMV \quad (3.30)$$

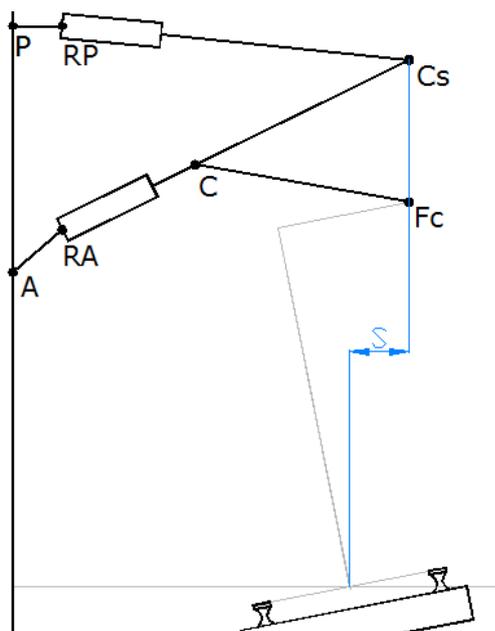


Figura 3.22 - Cota S

3.5.4. Determinação do Ponto C

Para determinação de C, do ponto pelo qual o antibalançante intersecta o tubo do pé da consola depende, do tipo de montagem da consola. Para consolas do tipo A, B ou C, torna-se necessário determinar um ponto intermédio auxiliar (Aux) com uma cota vertical de B medida do ponto Fc e, a partir de Aux, traçar um segmento de recta com 1° de declive até interceptar o tubo do pé da consola (Figura 3.23).

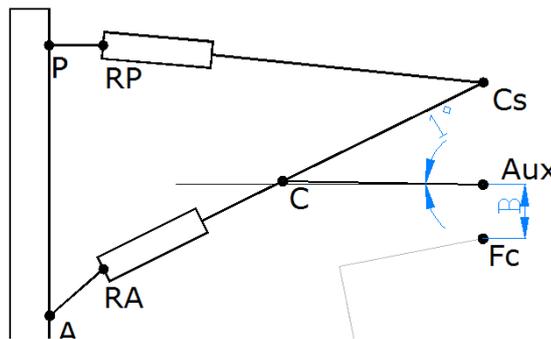


Figura 3.23 – Determinação do ponto C para montagens A, B e C.

As coordenadas do ponto Aux são obtidas pelas equações (3.31) e (3.32):

$$Aux.x = Fc.x \quad (3.31)$$

$$Aux.y = Fc.y + B \quad (3.32)$$

Sabendo que,

$$\frac{C.y - Aux.y}{C.x - Aux.x} = \tan \frac{\pi}{180} \quad (3.33)$$

e que, o declive m determinado a partir dos pontos Cs e Ra é o mesmo que do que determinar a partir dos pontos Cs e C (3.34):

$$m = \frac{Cs.y - RA.y}{Cs.x - RA.x} = \frac{Cs.y - C.y}{Cs.x - C.x} \quad (3.34)$$

a partir das equações (3.33) e (3.34) as coordenadas do ponto C podem ser determinadas por (3.35) e (3.36):

$$C.y = \frac{m \times \frac{Cs.x - Aux.x - Aux.y}{\tan \frac{\pi}{180}} - Cs.y}{\frac{-m}{\tan \frac{\pi}{180}} - 1} \quad (3.35)$$

$$C.x = Cs.x + \frac{C.y - Cs.y}{m} \quad (3.36)$$

Contudo, no caso de se ter uma consola cuja sua montagem seja do tipo D ou E, a cota B fica sem efeito e o antibalançante intercepta o tubo da consola não com um declive de 1° mas de 10°, como se apresenta na Figura 3.24.

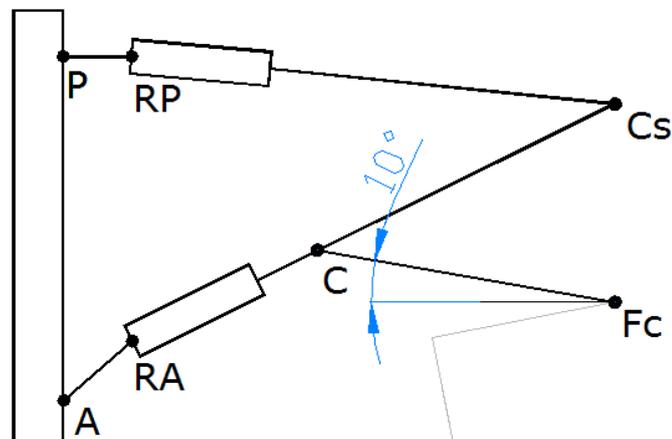


Figura 3.24 – Determinação do ponto C para montagens D e E.

Assim sendo, as expressões para determinar as coordenadas do ponto C vêm simplificadas, na medida que, não existe o ponto intermédio Aux e diferenciam apenas no ângulo (10° em vez de 1°). As coordenadas são dadas por (3.37) e (3.38).

$$C.y = \frac{m \times \frac{Cs.x - Fc.x - Fc.y}{\tan \frac{\pi}{18}} - Cs.y}{\frac{-m}{\tan \frac{\pi}{18}} - 1} \quad (3.37)$$

$$C.x = Cs.x + \frac{C.y - Cs.y}{m} \quad (3.38)$$

3.5.5. Determinação da Cota L

A distância do antibalançante de cada consola é designada por cota L, porém cada tipo de montagem possui um L particular (ver Anexos 4 e 5). Após a análise de cada um deles, foram interpretados os seguintes casos para cada um dos tipos de montagens:

A- O comprimento do L nesta configuração vai deste o ponto C ao ponto do fio de contacto, sendo alongado adicionalmente 50cm no LP1 e LP2, 70cm no LP3 e LP4, e 100cm no LP5, sendo determinado pelas seguintes expressões;

$$L_{A_{LP1 \text{ e } LP2}} = \frac{Fc.x - C.x + 0,500}{\cos\left(\frac{\pi}{180}\right)} \quad (3.39)$$

$$L_{A_{LP3 \text{ e } LP4}} = \frac{Fc.x - C.x + 0,700}{\cos\left(\frac{\pi}{180}\right)} \quad (3.40)$$

$$L_{A_{LP5}} = \frac{Fc.x - C.x + 1,0}{\cos\left(\frac{\pi}{180}\right)} \quad (3.41)$$

B- Nesta configuração o braço de chamada é colocado no lado direito do ponto do fio de contacto. O antibalançante vai desde o ponto C, passa por Fc, acompanha o comprimento do braço de chamada (Bc) e estende-se ainda 15cm. É determinado pela expressão (3.42);

$$L_B = \frac{Fc.x - C.x + Bc.x + 0,150}{\cos\left(\frac{\pi}{180}\right)} \quad (3.42)$$

C- No tipo C, o antibalançante tem ter o comprimento horizontal necessário para unir o ponto C ao Fc. A cota L é assim determinada pela expressão (3.43);

$$L_C = \frac{Fc.x - C.x}{\cos\left(\frac{\pi}{180}\right)} \quad (3.43)$$

D- Trata-se da situação mais simples, bastando calcular a distância do ponto C ao ponto Fc;

$$L_D = \sqrt{(C.x - Fc.x)^2 + (C.y - Fc.y)^2} \quad (3.44)$$

E- Situação igual ao caso D.

Na Figura 3.25 apresenta-se a cota L para o caso A, B ou C à esquerda, e de um caso D ou E à direita.

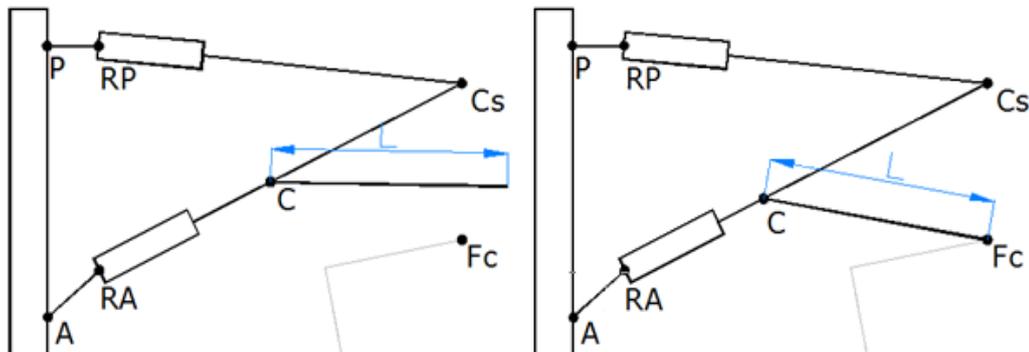


Figura 3.25 – Cota L de um caso A, B ou C à esquerda, e de um caso D ou E à direita.

3.6. FUNCIONALIDADES ADICIONAIS

Com o intuito de aperfeiçoar a aplicação, foram implementadas funcionalidades adicionais que facilitam a sua manipulação. Esta está preparada para receber cotas de parâmetros de entrada em milímetros ou em metros. Nesse sentido, optou-se por implementar um botão do tipo binário posicionado junto do formulário principal, que poderá se encontrar num de dois estados: um designado por “m > mm” e outro por “mm > m”. Basicamente, quando este botão é pressionado, a aplicação converte todos os dados de entrada dos formulários de metros para milímetros ou, de milímetros para metros consoante o estado do botão, conforme se apresenta na Figura 3.26.



Figura 3.26 – Funcionalidade do Botão “m>mm” em ambos os estados.

Existe uma opção designada por “Reconfigurar” que poderá ser seleccionada no menu principal do topo do programa, (ou pelo o atalho "Ctrl + R"), que permite repor o valor por defeito em todos os campos dos formulários de entrada. Esta opção ainda coloca todos os componentes da aplicação no seu estado inicial, arrumando a árvore articulada da base de dados e fechando eventuais janelas adicionais da aplicação, nomeadamente as janelas do gestor da base de dados, do desenho 2D e do gerador de relatórios.

Na parte inferior da aplicação, encontra-se uma caixa de texto que permite retornar para o ecrã o valor de todos os pontos intermédios auxiliares determinados durante o cálculo. Esta caixa permitiu efectuar correcções de forma eficiente a erros de origem algébrica ou informática ao longo de todo o desenvolvimento da aplicação. Todavia, finalizada a aplicação, decidiu-se manter esta funcionalidade activa na versão final para que se possa usufruir de um maior reportório e averiguar os efeitos que as cotas têm nos pontos intermédios e, conseqüentemente, na configuração final da consola. Para quem não esteja familiarizado com os nomes ou posições dos diversos pontos listados nesta caixa de texto, poderá consultar o mapa inicial da aplicação, localizada ao lado direito da base de dados, que ilustra o nome e a posição de cada ponto listado (Figura 3.27). Esta zona foi igualmente reservada para ilustrar o tipo de montagem de consola seleccionada (Figura 3.28).

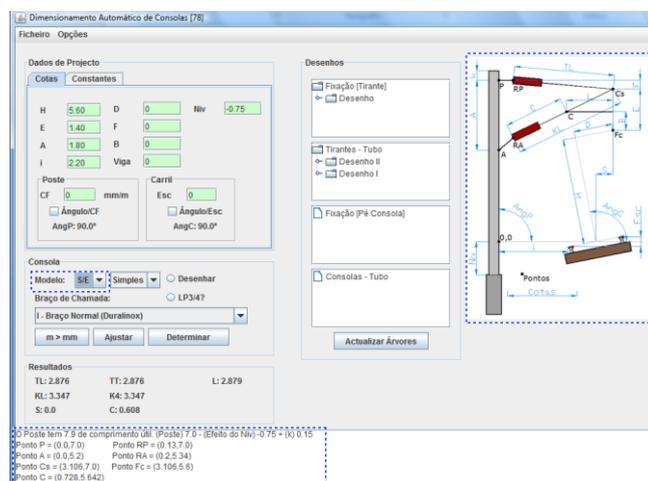


Figura 3.27 – Listagem do valor dos Pontos Intermédios na caixa de texto e Figura dos mesmos.

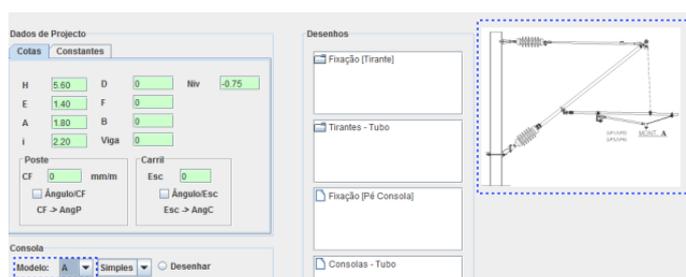


Figura 3.28 – Figura do tipo de montagem A, seleccionada pelo utilizador.

Adicionalmente, a caixa de texto tem, a função de comunicar a topologia dos fixadores e dos tubos irá ser considerada para efeitos de cálculo (nomeadamente os componentes seleccionados da base de dados ou seleccionados por defeito). Após o cálculo poderá ser emitida uma mensagem de erro caso a configuração final da consola apresentar algumas das condicionantes não admitidas:

- Altura do cabo de suporte não se encontrar dentro da abertura da consola (entre a altura do ponto A e P);
- Altura do fio de contacto ultrapassar a altura do ponto P;
- A altura do ponto C não se encontrar dentro da abertura da consola;
- O ponto C interceptar o isolador do tubo da consola;
- O ponto do cabo de suporte, ou do fio de contacto, se encontrar à esquerda do ponto P, encontrando-se do lado oposto da consola;
- O ângulo entre o tubo do tirante com o tubo da consola ser menor que 20° .

Após a determinação dos pontos, ângulos e cotas dos parâmetros intermédios e de saída, a consola será representada num desenho a 2D, numa janela de fundo branco com uma escala quadriculada de 1x1 m, permitindo validar visualmente os resultados obtidos. Para se aceder esta funcionalidade, basta seleccionar a respectiva opção “Desenhar” no menu Consola, (Figura 3.29). Além do aspecto visual, o desenho é sensível ao evento gerado pelo clique do rato que, quando detectado, aparece a posição do ponteiro em coordenadas cartesianas em relação ao referencial universal.

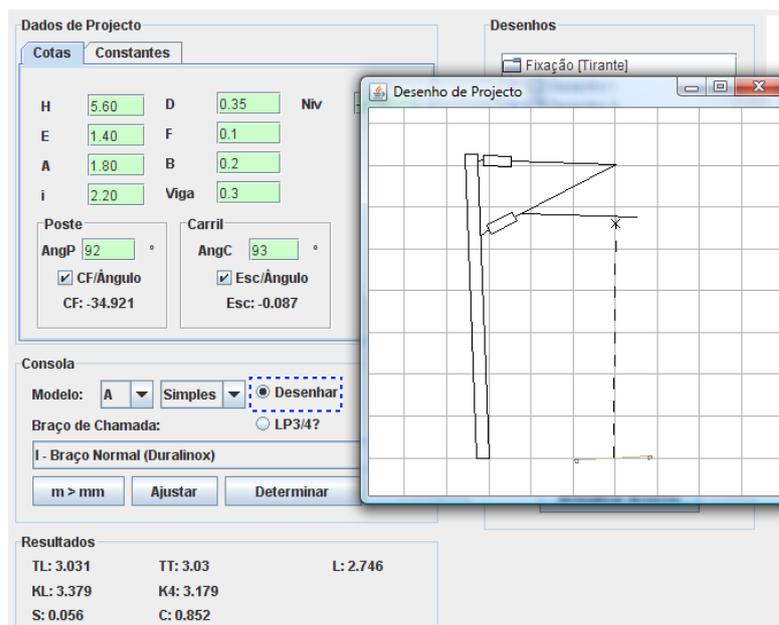


Figura 3.29 – Desenho da consola baseado nos parâmetros resultantes.

Finalmente, após todos os ajustes que se pretende efectuar, será dada a opção de gerar um relatório em formato *pdf* para efeitos de impressão, no qual vêm discriminados todos os parâmetros de entrada e de saída, como apresentado na Figura 3.30. É possível editar campos já preenchidos e inclusivamente adicionar noutros campos novo conteúdo não relevante no cálculo da consola, nomeadamente a localização da obra, identificação e características do poste, outros equipamentos constituintes do sistema, entre outros. De notar que em cada poste poderão existir até três consolas, pelo que, na janela principal da aplicação, nomeadamente no menu “Consola”, existe uma opção que poderá estar num de três estados diferentes: “Simples”, “Dupla” ou “Tripla”. “Simples” indica que os parâmetros de entrada que foram introduzidos correspondem à primeira consola, “Dupla” à segunda e “Tripla” à terceira consola. Considerou-se que cada poste contém única e exclusivamente um relatório, é permitido ao utilizado escolher quantas consolas pretende imprimir no relatório, uma (“Simples”), duas (“Dupla”) ou todas as três (“Tripla”), consoante o número de consolas constituintes do poste a documentar. No Anexo 6 apresenta-se um exemplo dos relatórios gerados.

Figura 3.30 – Interface Gráfica do Gerador de Relatórios.

A protecção da propriedade intelectual foi algo que se teve em consideração. Implementou-se um sistema de segurança com a função de bloquear a aplicação quando fôr ultrapassado o número de execuções autorizadas, Utilizando-se um contador que decrementa sempre que a aplicação é executada. Este número é discretamente apresentado no topo da aplicação juntamente com o título, como se apresenta na Figura 3.31

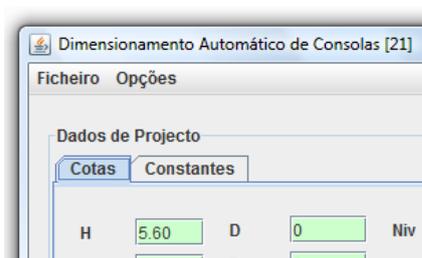


Figura 3.31 – Número restante de autorizações para correr o programa (21).

Quando este número atingir zero, a aplicação não poderá ser iniciada informando da necessidade de contactar o responsável (Figura 3.32).

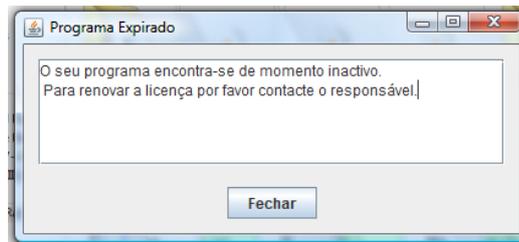


Figura 3.32 – Programa bloqueado.

A renovação ou edição do número de autorizações só é possível através de uma aplicação chave desenvolvida especificamente para o efeito que só o responsável deverá possuir.

4. IMPLEMENTAÇÃO – CÁLCULO DO PÊNDULOS

A segunda parte do trabalho destina-se a calcular de uma forma automática a pendulagem ao longo de um vão, designadamente o espaço entre dois postes consecutivos. No capítulo da introdução foi mencionada a utilização de arames como método auxiliar no estabelecimento da pendulagem. Estes arames são colocados verticalmente entre o cabo de suporte e o fio de contacto, distribuídos nos lugares de pêndulos, para que, num processo de tentativa e erro, sejam cortados de forma a ter a dimensão correcta para cada pêndulo. Após este processo, os arames são retirados e servirão de referência para cortar correctamente os pêndulos evitando desperdícios de material. Embora não se desperdice pêndulos, um material mais caro que o arame, este processo torna-se moroso requerendo bastante tempo de mão-de-obra. Esta parte do trabalho pretende aumentar a eficiência da instalação da pendulagem, para tornar todo este processo expedito e instalando directamente os pêndulos já correctamente dimensionados.

Por conveniência e pelas vantagens referidas no capítulo anterior, decidiu-se manter a mesma ferramenta de desenvolvimento, nomeadamente a linguagem de programação *Java* suportada pelo ambiente *NetBeansTM*.

4.1. IDENTIFICAÇÃO DE PARÂMETROS

Em primeiro lugar é necessário identificar os diferentes parâmetros de entrada e de saída em função das necessidades específicas da pendulagem. Fundamentalmente, a aplicação terá de determinar o número de pêndulos a instalar num dado vão; repartindo-os segundo o desenho de distribuição do tipo de pendulagem elaborado pela empresa *Caminhos de Ferros PortuguesesTM*, apresentado no Anexo 7; e calcular o comprimento desses pêndulos em função das aberturas esquerda e direita (distâncias correspondentes à cota E das consolas do poste esquerdo e direito, respectivamente). Na Figura 4.1. apresenta-se um exemplo de vão com os respectivos pêndulos.

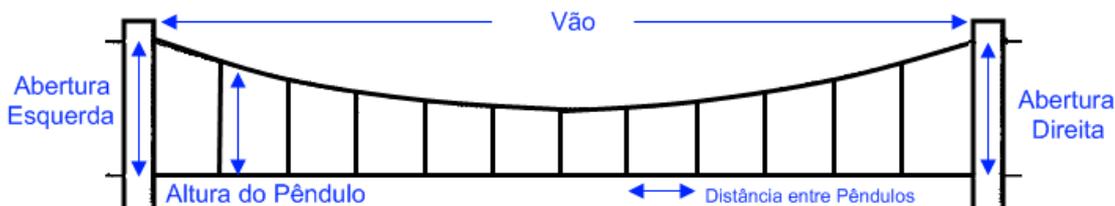


Figura 4.1 – Vão e respectivos parâmetros.

Serão então considerados os parâmetros de entrada apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Parâmetros de Entrada

Parâmetros	Unidade
Identificação do Lanço	Números de ambos os Postes
Vão	m
Abertura Esquerda	
Abertura Direita	
Tipo de Catenária	Vão normal de 9m, 12m ou Pendulagem em Y

Para aumentar a produtividade, a aplicação informática desenvolvida tem a capacidade de inserir, processar e retornar dados de múltiplos vãos em simultâneo, em vez de proceder a todas essas operações caso a caso. Na Figura 4.2 apresenta-se a Tabela utilizada para preencher os parâmetros de vários vãos distintos.

Poste Esq.	Poste Dir.	Ab. Esq.	Ab. Dir.	Vão
1	3	1,4	1,4	52
3	5	1,3	1,3	36
5	7	1,2	1,2	49,5
7	9	1	1	44
9	11	1,1	1,4	33
11	13	1,2	1,3	55
13	15	1,3	1,2	46
15	17	1,4	1,1	25
/	/	0	0	0
/	/	0	0	0

Figura 4.2 – Tabela dos parâmetros de entrada.

Após a introdução destes dados, a aplicação efectuará um cálculo automático da pendulagem gerando uma lista dos parâmetros de saída de cada troço apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Parâmetros de Saída de cada vão.

Parâmetros	Unidade
Número de Pêndulos	-
Lista da Distância relativa entre Pêndulos	m
Lista com os Comprimentos dos Pêndulos	

4.2. METODOLOGIA

4.2.1. Número de Pêndulos e Distribuição

O número de pêndulos depende essencialmente da distância do vão, contudo, a topologia da pendulagem poderá ser um factor determinante no seu cálculo, dado que cada uma delas adopta uma distribuição distinta. Foram considerados três tipos de pendulagem normalizados, apresentados no Anexo 7. Definiu-se como “primeiro espaço” a distância entre o poste o primeiro pêndulo, como “segundo espaço” a distância entre o primeiro e segundo pêndulo, e assim sucessivamente. O “penúltimo espaço” define a distância entre o penúltimo e o último pêndulo sendo que “último espaço” define a distância entre o último pêndulo e segundo poste.

Os três tipos de pendulagem normalizados são:

- Pendulagem de 9m (Vãos normais sem Y) – A distância do primeiro e último espaço vale 2,25m, sendo que os espaços entre os pêndulos centrais valem 9m, dividindo-se o restante comprimento do vão no segundo e penúltimo espaço;
- Pendulagem de 12m (Vãos normais sem Y) – A distância do primeiro e último espaço vale 3m, sendo o restante comprimento dividido de igual forma pelos espaços dos restantes pêndulos, com a condição de que estes espaços não poderem ser maiores do que 12m;
- Pendulagem em Y – Nesta topologia não existe nenhuma regra genérica na sua distribuição, à excepção de que espaços dos pêndulos centrais valem 9m. Podem ser considerados dois casos distintos:
 - Vãos até 40,5m (Y de 6m) – Podem ter duas configurações:
 - (1) o primeiro espaço vale 0,5m, e o segundo vale 6,75m, no terceiro e penúltimo é distribuído o resto do vão, tendo em conta que o último espaço vale 6,25m.
 - (2) o primeiro espaço vale igualmente 0,5m, sendo, o segundo espaço e o último espaço reservados para o resto da distribuição.
 - Vãos superiores a 40,5m (Y de 12m) – Podem ter outras duas configurações:
 - (3) o primeiro e o último espaço valem 2,5m, o segundo e penúltimo valem 6,5m, sendo o terceiro e antepenúltimo reservados para a restante distância do vão;
 - (4) o primeiro e o último espaço valem igualmente 2,5m, o segundo vale 8,75, o penúltimo vale 6,75, e o terceiro e antepenúltimo são reservados para o resto da divisão do vão.

Na Figura 4.3 apresenta-se a interface gráfica onde se pode seleccionar um dos três tipos de pendulagem anteriormente descrito. Após a introdução do comprimento de diversos vãos ao longo das várias linhas da tabela apresentada na Figura 4.2, a aplicação valida esses parâmetros de entrada, considerando apenas os vãos com uma dimensão mínima de 22,5 m. Serão então determinados o número de pêndulos bem como as suas distribuições através de um algoritmo de subtracções sucessivas para todos os casos válidos. Obtido o número de pêndulos e a lista das distribuições, será efectuado cálculo da lista de comprimento dos pêndulos.

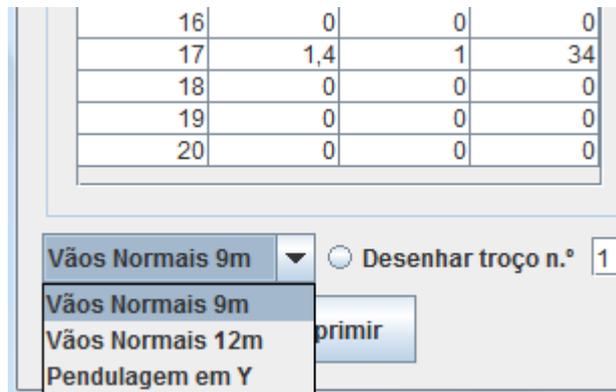


Figura 4.3 – Interface Gráfica da selecção do tipo de Pendulagem

4.2.2. Comprimento dos Pêndulos – Método Matemático

Para determinar o comprimento de cada pêndulo é necessário utilizar a equação matemática que descreve a forma da catenária regular e simétrica. O que se pretende é uma função (4.1) onde se substitui a variável independente, associada às posições dos diversos pêndulos em relação ao extremo (postes) e, posteriormente, somar-se ao resultado a abertura da consola determinando-se assim os comprimentos desejados, tal como se apresenta na Figura 4.4.

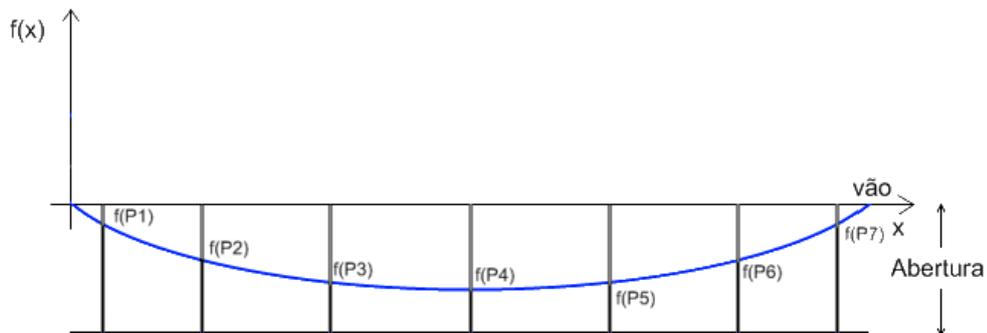


Figura 4.4 – Função catenária em relação aos comprimentos dos pêndulos a determinar.

$$\begin{aligned} \text{Comprimento do Pêndulo}_i & & (4.1) \\ &= \text{Função Catenária}(\text{Posição Absoluta do Pêndulo}_i) + \text{Abertura} \end{aligned}$$

Esta função, que descreve a forma da catenária regular e simétrica, (demonstrada em Anexo 8), é a seguinte:

$$f(x, a, \gamma) = \frac{1}{2\gamma} [\cosh(\gamma(2x - a)) - \cosh(\gamma a)] \quad (4.2)$$

$$\gamma = \frac{\rho g}{2T_0} \quad (4.3)$$

Esta função depende de uma variável e de duas constantes, nomeadamente:

- A variável independente x , associada à posição do pêndulo, relativamente ao poste extremo esquerdo, que se pretende calcular o seu comprimento;
- A constante a , correspondente à distância entre os dois postes da catenária, ou seja, ao vão;
- A constante γ , resultante da divisão entre a multiplicação da densidade do cabo de suporte com a constante gravítica, sobre o dobro da tensão horizontal ao qual o cabo se encontra sujeito no ponto mais baixo da catenária, a meio vão.

A utilização das expressões (4.1) a (4.2) resulta em erros que oscilam entre os 8 e os 30 cm. Tal deve-se ao facto destas equações considerarem uma catenária simétrica e regular, quando na realidade esta se encontra sujeita a uma tensão constante imposta pelo sistema de sustentação, tornando-a mais próxima de um sistema de segmento de rectas entre pêndulos, do que uma forma curvilínea ponderada.

4.2.3. Comprimento dos Pêndulos – Algoritmo

De forma a ultrapassar as dificuldades anteriores, foi seguida a metodologia descrita em [23]. Para se obter o comprimento dos pêndulos ao longo de um vão, é necessário conhecer a deflexão do cabo de suporte nos pontos, nos quais serão instalados esses mesmos pêndulos. Em seguida, o cabo de suporte deverá submetido à carga uniforme do seu próprio peso (p – peso por unidade de comprimento), e das cargas pontuais dos pêndulos (R_i), $i = 1 \dots n$, sendo n o número total de pêndulos. A carga de um pêndulo é dada pelo seu peso

que depende, dentro de outros factores, do seu comprimento e da porção do fio de contacto que está a suportar. De notar que as cargas envolventes no cabo de suporte são de origem vertical, obtendo-se conseqüentemente uma tensão horizontal constante em todos os pontos desta, T_{ax} .

A curvatura traçada pelo cabo de suporte é uma catenária definida por um parâmetro a que depende da carga do cabo de suporte p , e da tensão horizontal T_{ax} . Desde modo, sabendo que ambas as variáveis são constantes, pode-se adoptar um modelo da catenária composto por uma sequencia de arcos descontínuos, como apresentado na Figura 4.5.

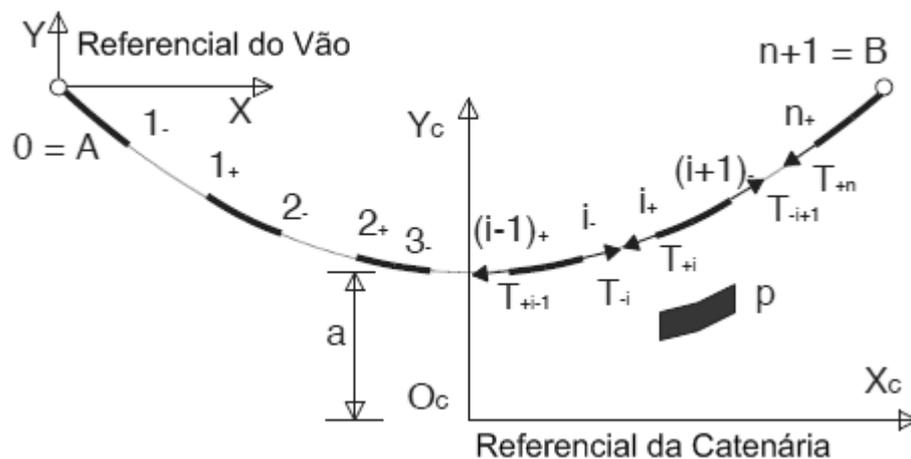


Figura 4.5 – Representação de diferentes arcos da catenária.

Como se pode observar na figura 4.5, cada ponto real i é subdividido em dois pontos (i^- e i^+). Verificam-se alguns segmentos da curva real do cabo de suporte situados entre os pontos genéricos $(i+1)^-$ e i^- , assim como, outros segmentos não reais entre i^- e i^+ , que representam o peso deste segmento relacionado com a carga do pêndulo deste ponto. Os valores T_i^- e T_i^+ representam respectivamente a tensão esquerda e direita do ponto i .

Considerando o vão, poderemos associar a este um sistema de referência com origem no ponto A. Então, o sistema de referência da catenária irá variar para cada segmento da curva real. Assim, o segmento entre os pontos reais $i-1$ e i terá como origem referencial da catenária $O_{ci}(x_{ci}, y_{ci})$. Ponderando a figura 4.6, para o ponto i de coordenadas (x_i, y_i) obtém-se a expressão (4.4).

$$y_i - y_{ci} = a \cdot \cosh\left(\frac{x_i - x_{ci}}{a}\right) \quad (4.4)$$

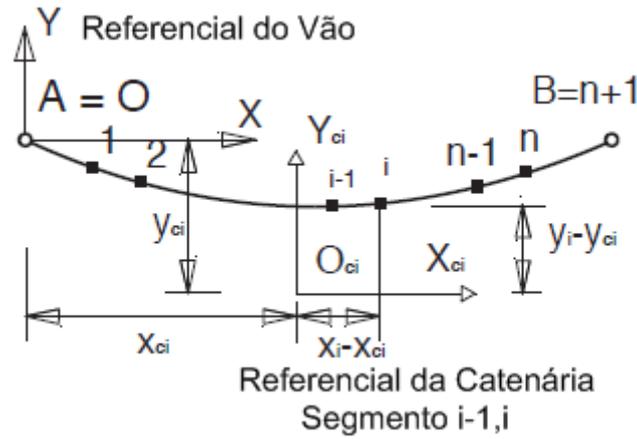


Figura 4.6 – Referencial da Catenária para o segmento $(i-1,i)$.

Assumindo que cada pêndulo suporta metade do peso do fio de contacto situado entre dois pêndulos consecutivos, a carga presente em cada pêndulo é descrita por (4.5).

$$R_i = q \cdot \frac{x_i - x_{i-1}}{2} + q \cdot \frac{x_{i+1} - x_i}{2} + P_{pi} + P_g, i = 1 \dots n \quad (4.5)$$

Considere-se q o peso por unidade de comprimento do fio de contacto e P o peso do pêndulo que depende do seu comprimento desconhecido. Note-se que nesta primeira iteração considera-se zero para se obter R_i aproximado. Em seguida, com a tensão T_a é efectuada a primeira estimacão do parâmetro a e T_{ax} admitindo que a carga p no cabo de suporte encontra-se uniformemente distribuída ao longo do seu comprimento horizontal. Assim, o momento dos pêndulos juntamente com o peso do cabo de suporte respeitante ao poste esquerdo é dado por (4.6).

$$M_{PB} = \sum_{i=1}^n R_i \cdot (L - x_i) + p \cdot \frac{L^2}{2} \quad (4.6)$$

Sendo L o comprimento do vão entre postes. Assim, considerando (4.6) e conhecida a tensão do cabo de suporte, resulta (4.7).

$$T_{ay} \cdot L + T_{ax} \cdot h - M_{PB} = 0, T_{ay} = \sqrt{T_a^2 - T_{ax}^2} \quad (4.7)$$

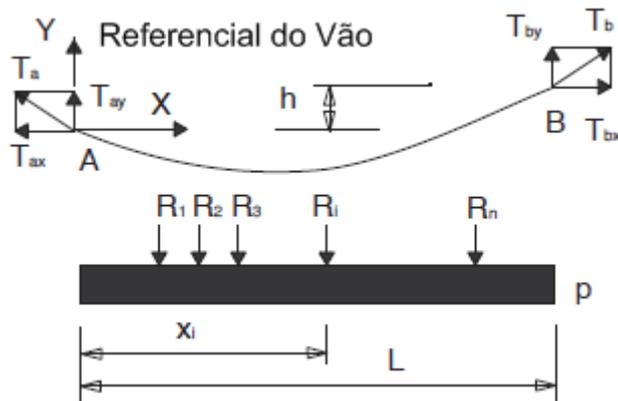


Figura 4.7 – Esquema das cargas e tensões na catenária.

A partir das equações (4.6) e (4.7) pode-se obter uma equação dependente de T_{ax} , que poderá ser resolvida de forma a parametrizar a , como demonstrado em (4.8).

$$T_{ax} = \frac{2.M_{PB} + \sqrt{4.T_a^2.L^2.(L^2+h^2) - 4.M_{PB}^2.L^2}}{p.2.(L^2+h^2)} \quad (4.8)$$

$$a = \frac{T_{ax}}{p}$$

Sendo h a diferença vertical dos pontos A e B (altura das fixações do cabo de suporte no poste esquerdo e direito, respectivamente). Agora, determina-se a deflexão do fio do cabo de suporte nos pontos onde serão aplicados os pêndulos aplicando equações de estática (4.9) de acordo com a Figura 4.8.

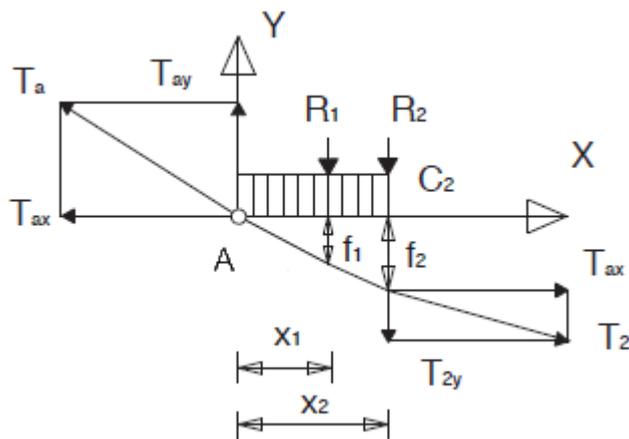


Figura 4.8 – Segmento do cabo de suporte e forças associadas.

$$\sum M_{C_i} = 0, f_i = \frac{1}{T_{ax}} \cdot \left[T_{ax} \cdot x_i - p \cdot \frac{x_i^2}{2} - \sum_{j=1}^i R_j (x_i - x_j) \right], i = 1 \dots n \quad (4.9)$$

Uma vez obtidas as deflexões, pode-se calcular o comprimento e o peso dos pêndulos de acordo com a seguinte expressão:

$$L_{pi} = H_c + y_i, \quad P_{pi} = L_{pi} \cdot S \cdot \gamma, \quad i = 1 \dots n \quad (4.10)$$

Sendo S a área da secção dos pêndulos. Agora que se obteve os pesos dos pêndulos, torna-se aplicar a equação da tensão horizontal do cabo de suporte (4.8) obtendo-se um novo valor T'_{ax} mais preciso. Esta iteração é repetida até $T'_{ax} = T_{ax}$ ou pela condição $\left| \frac{T_{ax} - T'_{ax}}{T_{ax}} \right| \leq \epsilon$. Achado um T_{ax} preciso, obtém-se o comprimento dos pêndulos.

Este algoritmo, foi implementado recorrendo a um conceito informático designado por vector. Conceptualmente, um vector poderá ser interpretado como uma tabela constituída por uma linha e "n+1" (diversas) colunas. Cada célula desta tabela (vector) é identificada por um endereço que vai de "0" a "n". Então, o algoritmo utilizado nesta aplicação procede à determinação da altura dos pêndulos, aplicando diversas operações matemáticas a partir de um vector (DisPend[0...n]) que contém a informação da distribuição dos pêndulos. Este último vector é obtido pelas regras mencionadas no subcapítulo 4.2.1. onde se verifica que a célula "0" vale a distância do primeiro poste ao primeiro pêndulo, a célula "1" a distância do primeiro ao segundo pêndulo e assim consecutivamente, até à última célula "n" que vale a distância entre o último pêndulo (pêndulo "n") e o segundo poste do lança. Após todas as operações matemáticas, obtém-se um vector (AltPend[0...n]) contendo o comprimento dos pêndulos.

Então, após o preenchimento dos parâmetros de entrada e seleccionado o botão "Determinar", a aplicação efectua o cálculo de todos os lanços considerados, procede às instruções do algoritmo e obtém para cada um deles, uma lista que contém o número de pêndulos juntamente com as suas distribuições e comprimentos, como apresentado na Figura 4.9.

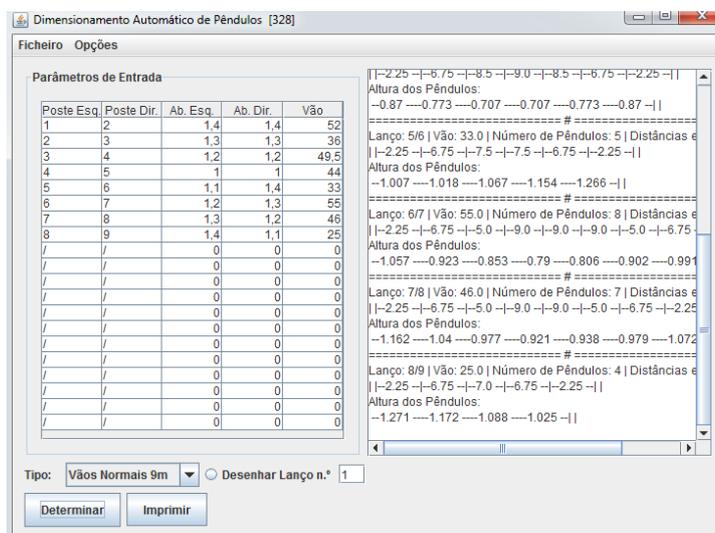


Figura 4.9 – Apresentação dos Dados de Saída.

4.3. FUNCIONALIDADES ADICIONAIS

Nesta segunda aplicação foram também integradas algumas das funcionalidades adicionais já implementadas na primeira. Uma dessas funções é a representação visual, numa janela à parte o desenho 2D do formato da catenária e seus pêndulos, de qualquer um dos vinte troços válidos introduzidos no formulário. O desenho é acompanhado por uma grelha que se ajusta automaticamente numa escala de 10x1m, e é sensível ao evento do clique do rato que indica a posição do ponteiro no desenho no topo junto ao título. Na Figura 4.10 apresenta-se um exemplo onde, clicando no extremo direito do fio de contacto, é identificado o ponto com a coordenada horizontal de 54m (comprimento do vão) e vertical 0m (à mesma altura do referencial, extremo esquerdo do fio de contacto).

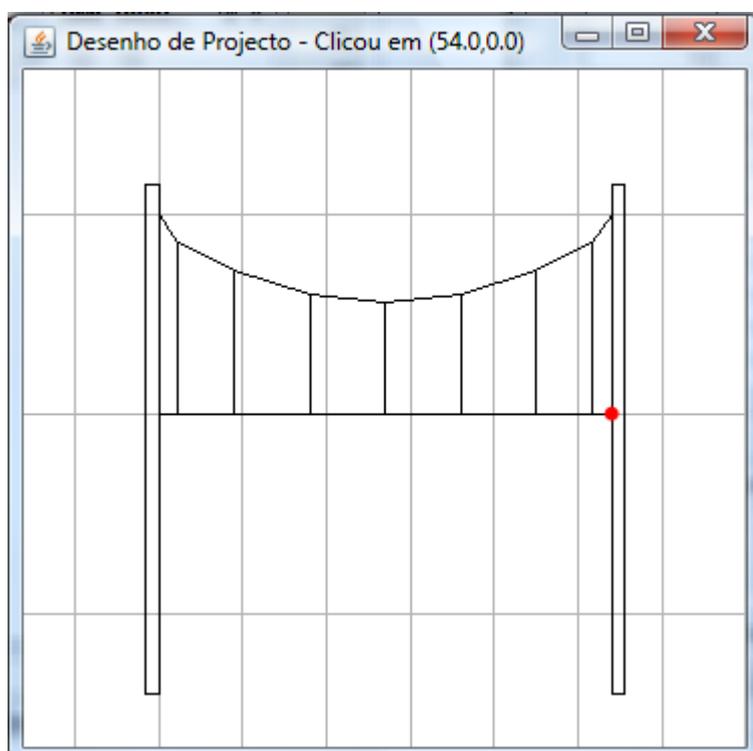


Figura 4.10 – Janela do Desenho 2D

Outra funcionalidade incluída foi a possibilidade de exportar toda a informação, designadamente os parâmetros de entrada e saída, para um ficheiro no formato *pdf* como se apresenta na Figura 4.11. No relatório será introduzido, para cada lanço seleccionado, uma tabela contendo todos os parâmetros de entrada e saída associados a esse mesmo lanço, como se apresenta no Anexo 9.

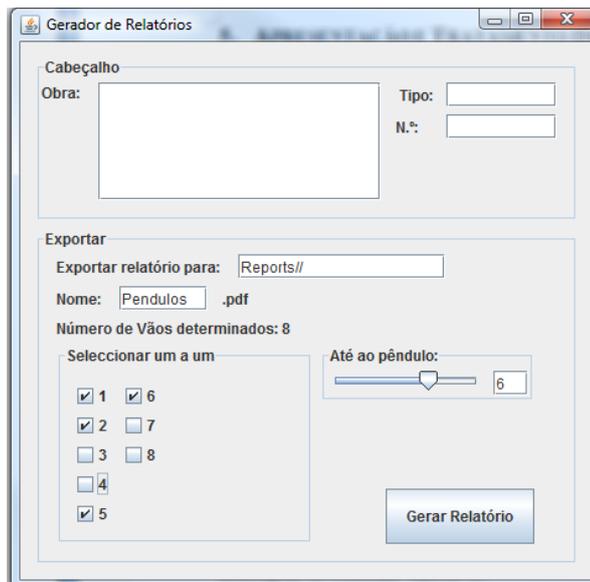


Figura 4.11 – Janela para Exportar Relatório com Parâmetros.

Finalmente, como medida de segurança, foi também utilizado a base de dados da primeira aplicação para limitar o número de execuções.

5. APRESENTAÇÃO E TRATAMENTO DE RESULTADOS

Este capítulo será subdividido em duas partes, uma para cada aplicação desenvolvida: cálculo da consola e cálculo da pendulagem. No intuito de validade e testar a robustez das aplicações, foram efectuadas diversas simulações as quais resultaram parâmetros de saída que serão comparados com dados validados em tabelas e projectos oficiais.

5.1. AFERIÇÃO DO CÁLCULO DE CONSOLAS

O dimensionamento de consolas, será alvo de um conjunto de simulações, sendo considerados os parâmetros de entrada provenientes de projectos de construção e, após a execução do mesmo, será verificado o nível de compatibilidade dos seus resultados com os dos projectos. Nesse sentido, seleccionaram-se cinco telas finais de construção do troço Lousado – Nine, do grupo CME. Estes projectos apresentam-se no Anexo 10.

5.1.1. Ensaio 1

Poste: 33-06, consola simples, montagem do tipo B:

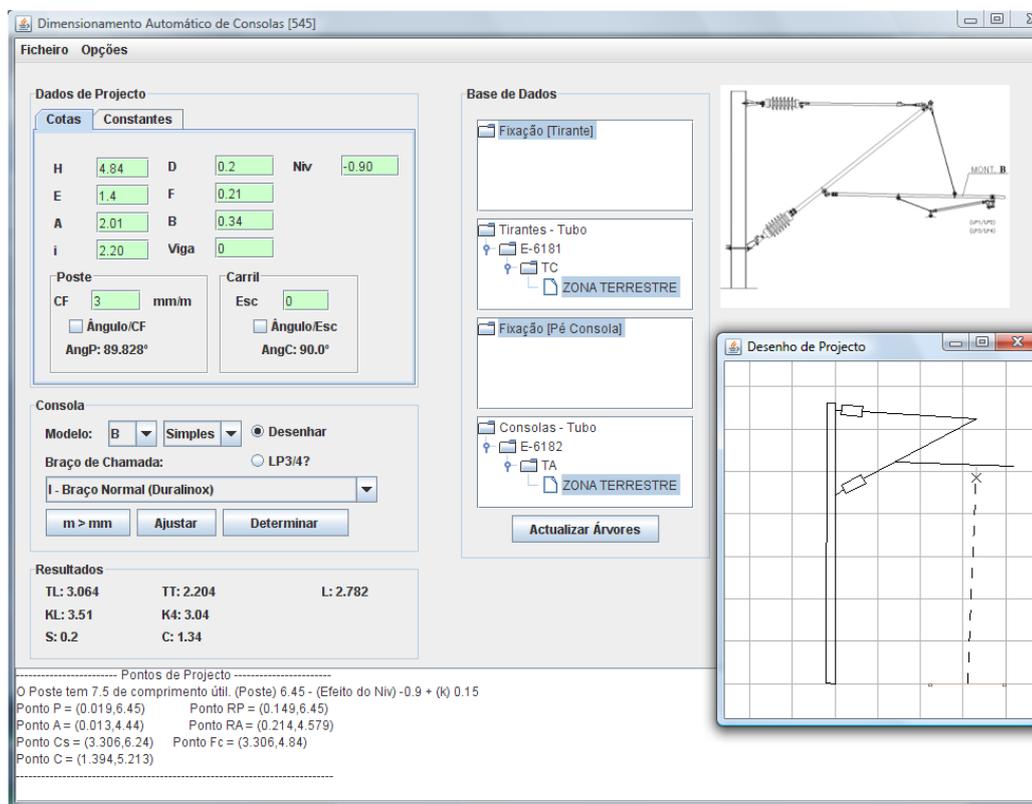


Figura 5.1 – Resultados do ensaio 1.

Diferença entre os valores tabelados e os parâmetros de saída:

Tabela 5.1 – Resultados obtidos na simulação 1.

Cotas	Projecto (m)	Aplicação (m)	Diferença Absoluta (cm)
TL	3,080	3,064	1,6
TT	2,220	2,204	
KL	3,520	3,510	1,0
K3	3,050	3,040	
S	0,200	0,200	0,0
C	1,310	1,340	3,0
L	2,790	2,782	0,8

5.1.2. Ensaio 2

Poste: 33-13, consola simples, montagem do tipo A:

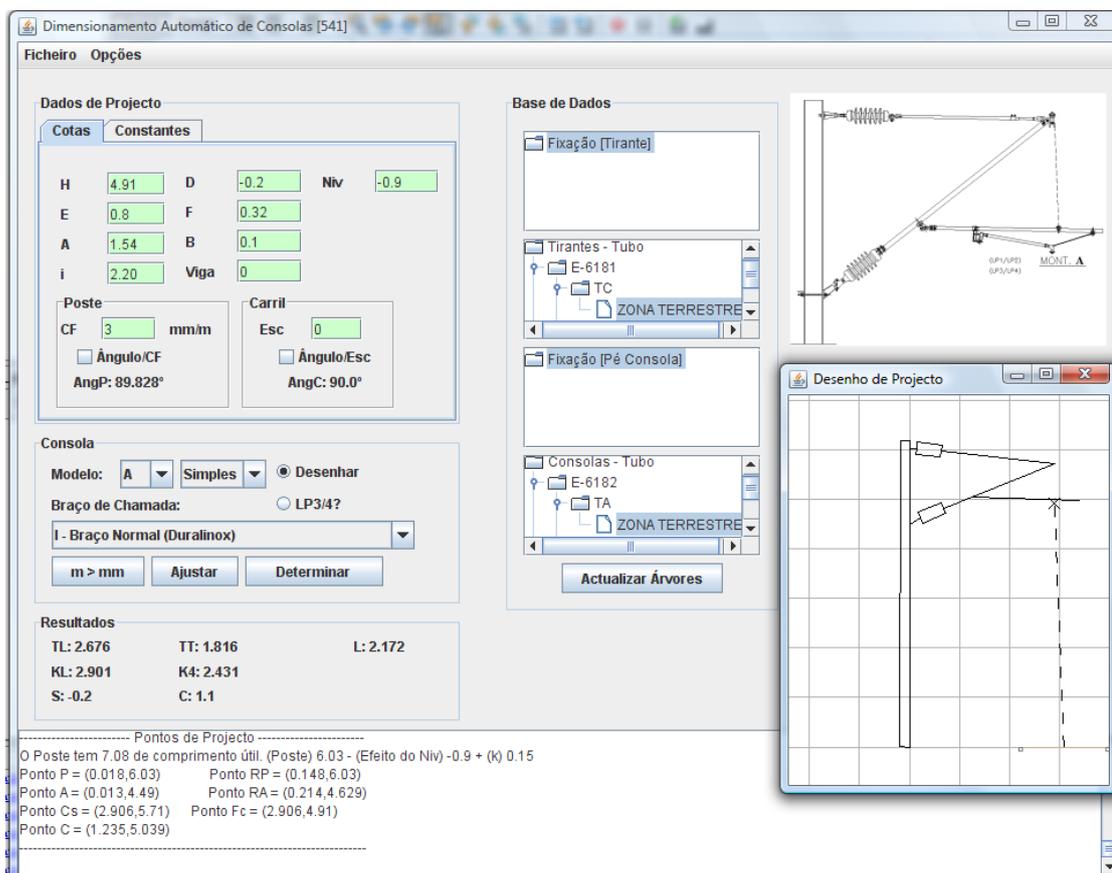


Figura 5.2 – Resultados do ensaio 2.

Diferença entre os valores tabelados e os parâmetros de saída:

Tabela 5.2 - Resultados obtidos na simulação 2.

Cotas	Projecto (m)	Aplicação (m)	Diferença Absoluta (cm)
TL	2,700	2,676	2,4
TT	1,840	1,816	
KL	2,910	2,901	0,9
K3	2,440	2,431	
S	-0,200	-0,200	0,0
C	1,120	1,100	2
L	2,170	2,172	0,2

5.1.3. Ensaio 3

Poste: 33-16, consola simples, montagem do tipo A:

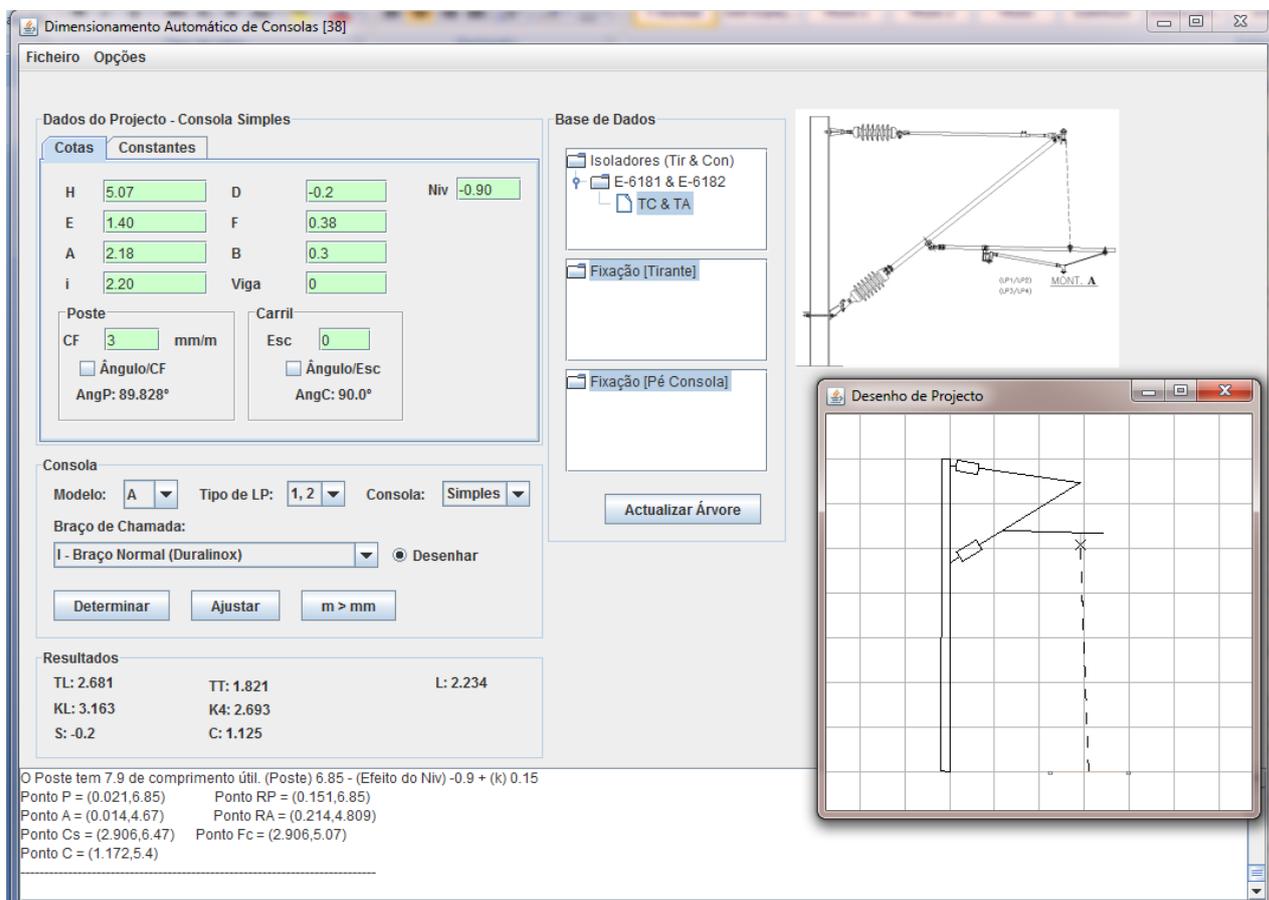


Figura 5.3 - Resultados do ensaio 3.

Diferença entre os valores tabelados e os parâmetros de saída:

Tabela 5.3 - Resultados obtidos na simulação 3.

Cotas	Projecto (m)	Aplicação (m)	Diferença Absoluta (cm)
TL	2,68	2,681	0,1
TT	1,82	1,821	
KL	3,17	3,163	0,7
K3	2,70	2,693	
S	-0,20	-0,200	0,0
C	1,12	1,125	0,5
L	2,17	2,234	6,4

5.1.4. Ensaio 4

Poste: 33-17, consola simples, montagem do tipo A:

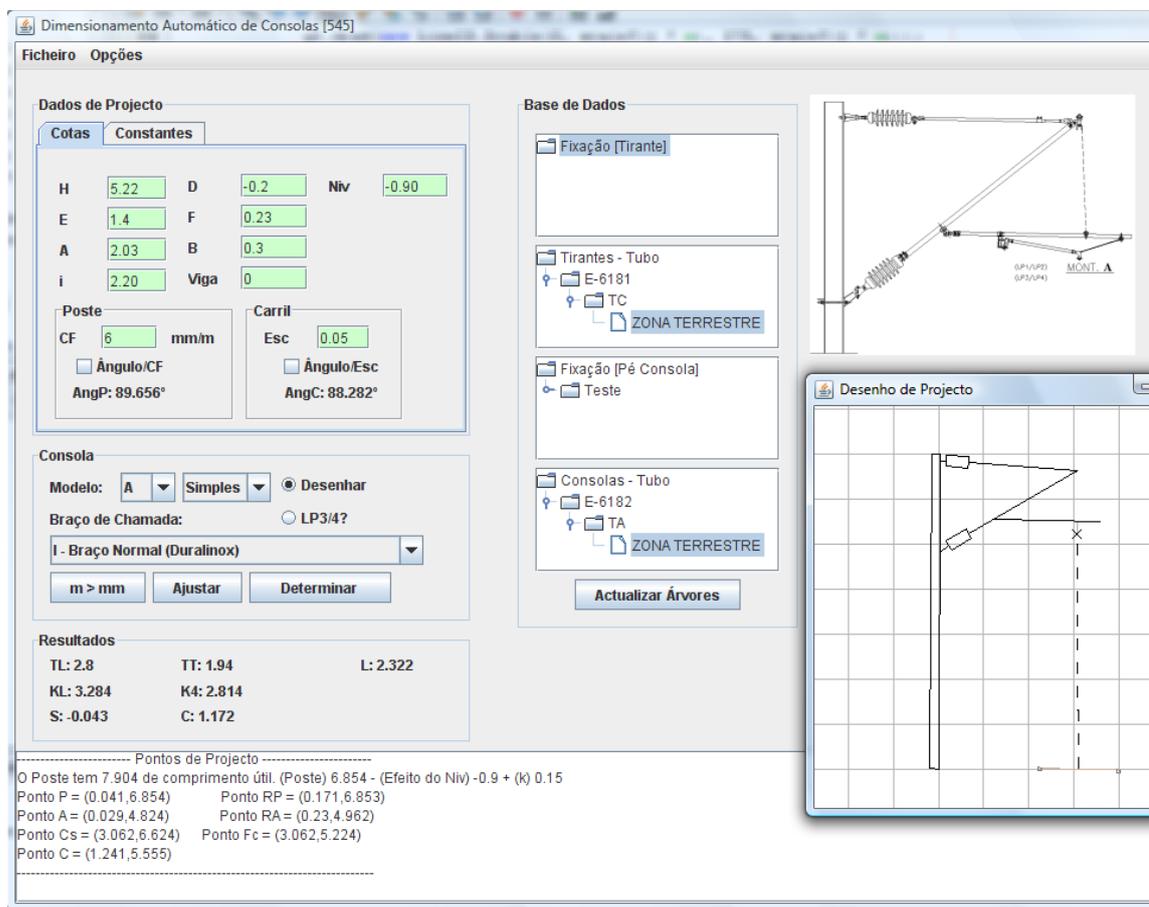


Figura 5.3 - Resultados do ensaio 4.

Diferença entre os valores tabelados e os parâmetros de saída:

Tabela 5.4 - Resultados obtidos na simulação 4.

Cotas	Projecto (m)	Aplicação (m)	Diferença Absoluta (cm)
TL	2,840	2,800	4,0
TT	1,980	1,940	
KL	3,270	3,284	1,4
K3	2,800	2,814	
S	-0,050	-0,043	0,7
C	1,170	1,172	0,2
L	2,260	2,322	6,2

5.1.5. Ensaio 5

Poste: 33-18, consola simples, montagem do tipo B:

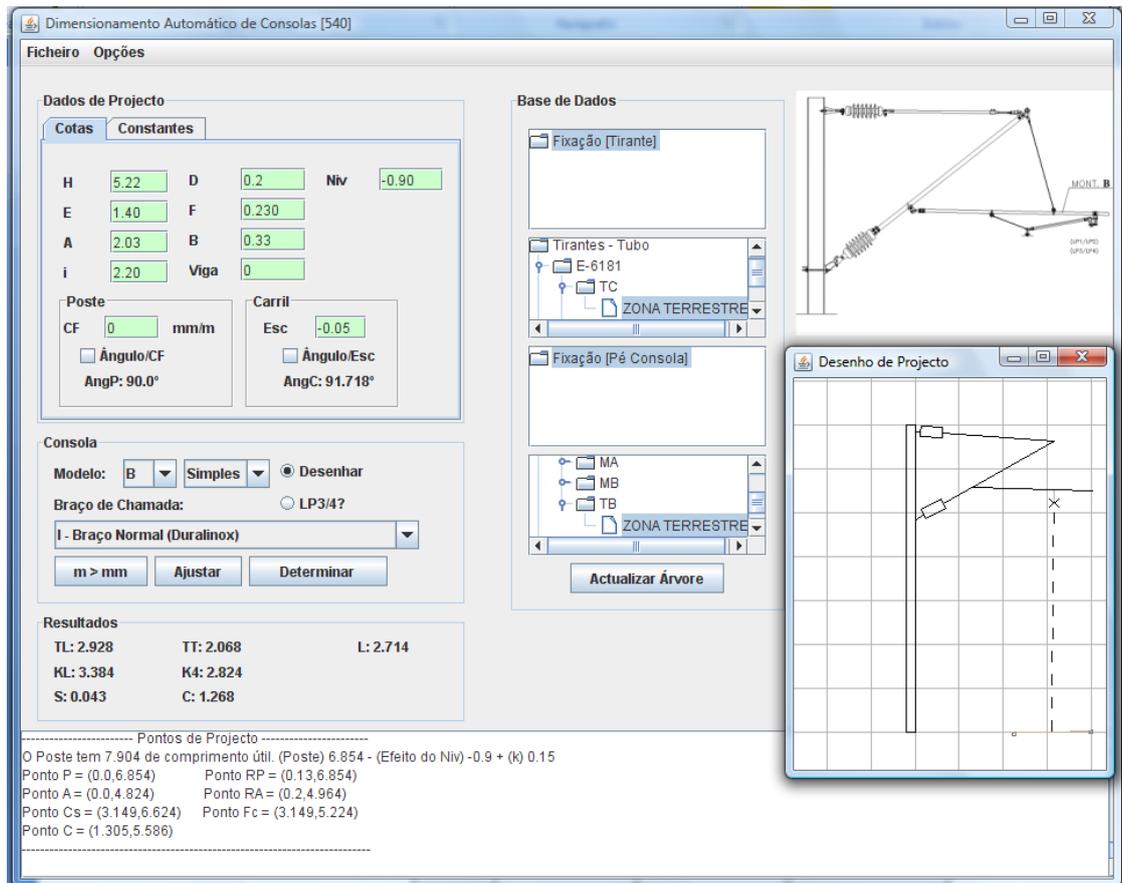


Figura 5.5 - Resultados do ensaio 5.

Diferença entre os valores tabelados e os parâmetros de saída:

Tabela 5.5 - Resultados obtidos na simulação 5.

Cotas	Projecto (m)	Aplicação (m)	Diferença Absoluta (cm)
TL	2,950	2,928	2,2
TT	2,090	2,068	
KL	3,390	3,384	0,6
K4	2,830	2,824	
S	0,050	0,043	0,7
C	1,260	1,268	0,8
L	2,700	2,714	1,4

5.1.6. Tratamento e Análise dos Resultados Obtidos

Apresenta-se a tabela 5.6 o valor médio e o desvio padrão referentes à diferença absoluta entre os valores projectados e os resultantes dos cálculos.

Tabela 5.6 - Valor Médio e Desvio Padrão da Diferença Absoluta das cinco aferições.

Cota	Diferença Absoluta	
	Valor Médio (cm)	Desvio Padrão (cm)
TL	2,06	1,4
KL	0,92	0,3
S	0,28	0,4
C	1,3	1,2
L	3,0	3,0

Analisando, primeiramente, o valor médio da diferença absoluta de maior relevância no terreno, nomeadamente as cotas TL e KL, as quais correspondem às dimensões dos dois tubos principais constituintes das consolas; verifica-se que estas apresentam um bom nível de precisão, ao se considerar que a precisão de corte dos tubos em oficina é na ordem dos 2 cm

A cota S é possivelmente, a menos relevante dos parâmetros de saída, dado não representar o comprimento físico de nenhum constituinte da consola; contudo, apresenta uma diferença absoluta média na ordem dos 30 mm, o que garante um bom posicionamento da consola face à via.

Relativamente aos parâmetros C (associado ao posicionamento do antibalançante) e L (comprimento do braço de chamada) observa-se, respectivamente, um valor médio da diferença absoluta de 1,3 cm e 3,0 cm. Estes últimos erros são, tal como os restantes, completamente aceitáveis uma vez que o equipamento associado a estes parâmetros têm grande flexibilidade de ajuste aquando da montagem.

5.2. AFERIÇÃO DO CÁLCULO DE PENDULAGEM

Tal como para as consolas também a distribuição e comprimentos de pêndulos num vão, foi de igual modo sujeita a aferição. Foram consideradas cinco vão normais distintos e outros cinco vão de pendulagem em Y. Após o cálculo, os parâmetros de saída foram comparados aos valores tabelados nos projectos apresentados no Anexo 11.

5.2.1. Ensaio do Vão Normal

Baseado em tabelas oficiais, foram seleccionados cinco vãos distintos (27; 36; 49,5; 54 e 62 m) todos com a abertura esquerda e direita de 1,6 m, (Anexo 11.1). Após o cálculo, obtiveram-se os resultados apresentados na Figura 5.7. O respectivo relatório final desta aferição arquivando-o em Anexo 12.1.

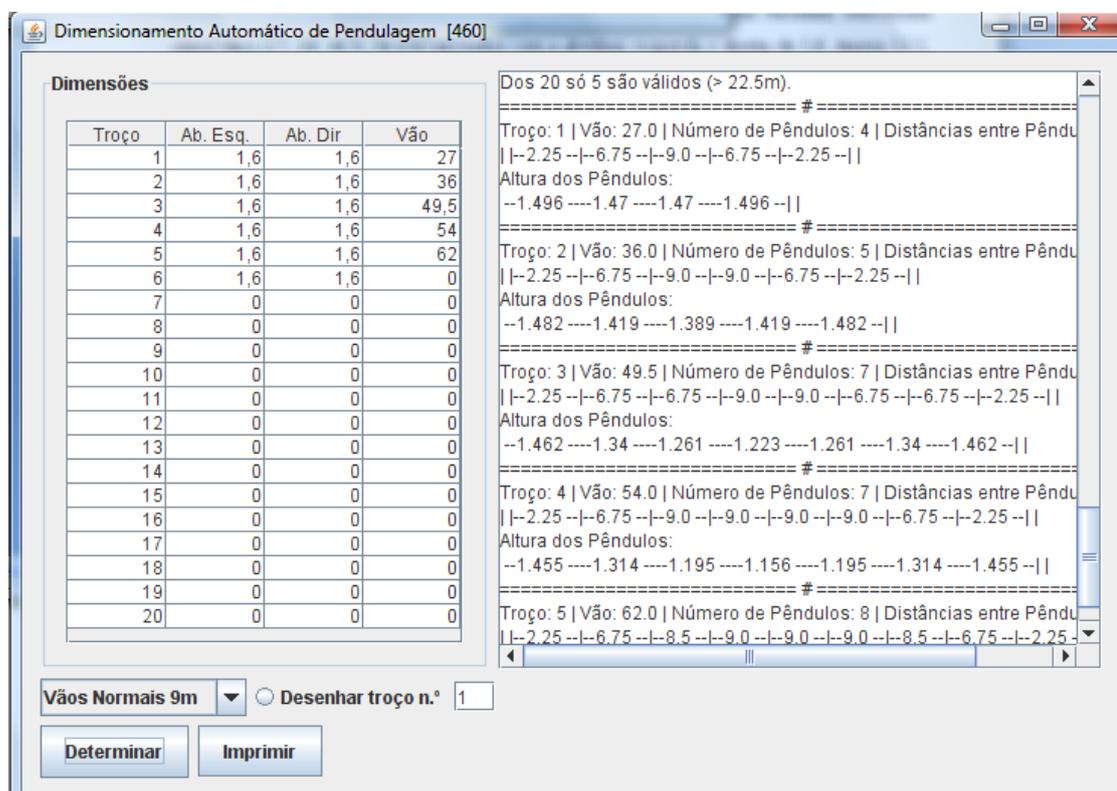


Figura 5.7 – Ensaio dos cinco vãos normais.

Diferença entre os valores tabelados e os parâmetros de saída é apresentada na Tabela 5.7.

Tabela 5.7 – Diferença absoluta entre dados da aplicação e dos projectos de vãos normais.

		Pêndulos (cm)							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Troços	1	0,4	0,0	0,0	0,4	-	-	-	-
	2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,2	-	-	-
	3	0,2	0,0	0,1	0,3	0,1	0,0	0,2	-
	4	0,5	0,4	0,5	0,4	0,5	0,4	0,5	-
	5	0,3	0,3	0,1	0,2	0,2	0,1	0,3	0,3

5.2.2. Ensaio da Pendulagem Y

Foram seleccionados cinco vãos (45; 51,3; 54; 58,5 e 63 m), todos com 1,4m de abertura numa catenária com pendulagem em Y, (Anexo 11.2). Os resultados obtidos apresentam-se na Figura 5.8 e o relatório final no Anexo 12.2.

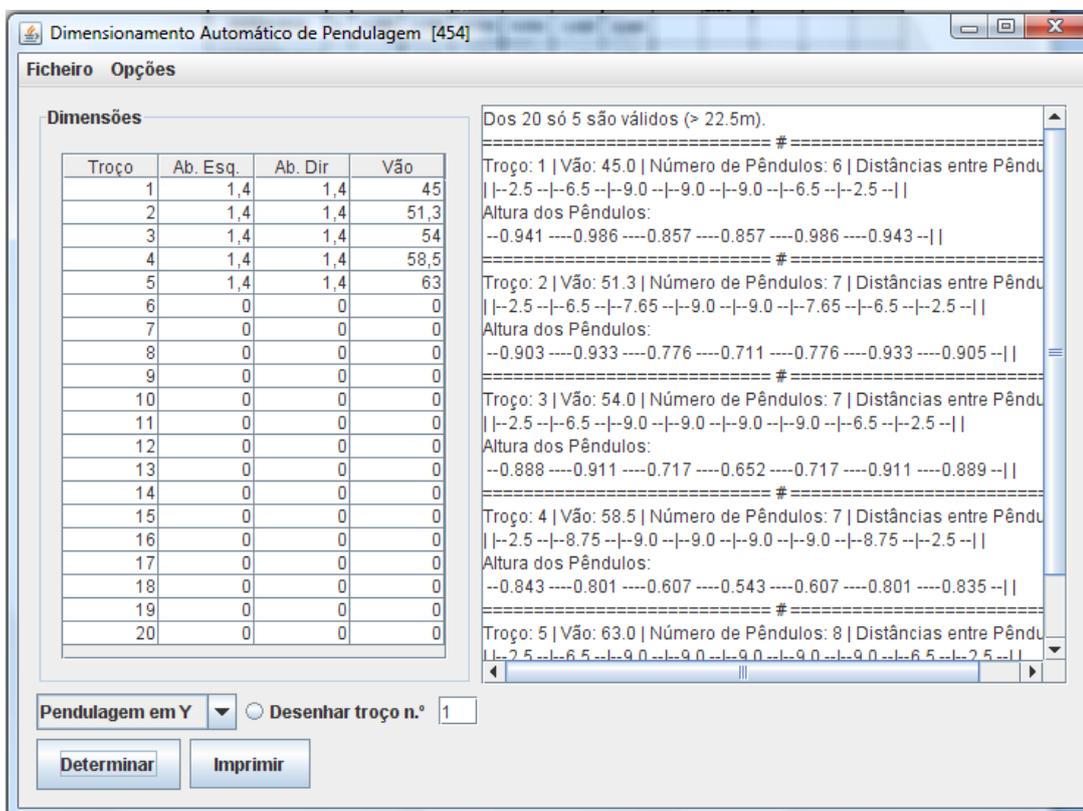


Figura 5.8 - Ensaio dos cinco vão com pendulagem em Y.

Diferença entre os valores tabelados e os parâmetros de saída é apresentada na Tabela 5.8.

Tabela 5.8 - Diferença absoluta entre dados do programa e dos projectos de pendulagem em Y.

		Comprimento dos Pêndulos (cm)							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Troços	1	1,1	0,4	0,7	0,7	0,6	1,3	-	-
	2	1,3	0,3	0,6	0,1	0,6	0,3	1,5	-
	3	0,8	0,1	0,3	0,2	0,3	0,9	0,1	-
	4	1,3	0,9	0,3	0,3	0,3	0,1	0,5	-
	5	0,4	0,5	0,3	0,2	0,2	0,3	0,5	0,5

5.2.3. Observação dos Resultados Obtidos

Após efectuada as simulações para ambas as topologias de pendulagem, e analisando as diferenças apresentadas nas Tabelas 5.7 e 5.8 conclui-se que os resultados são muito bons. No caso dos vãos normais verifica-se no pior caso um pêndulo com um erro de 5 mm, sendo que o valor médio da diferença absoluta é de 2,4 mm por pêndulo com um desvio padrão de 1,5 mm, o que é desprezável. Para a pendulagem em Y, o maior erro é da ordem de 1,5 cm. Este valor é considerável, em relação aos desvios anteriores, mas de igual modo desprezável tendo em consideração os 2 cm de precisão de corte dos pêndulos. O valor médio da diferença absoluta obtido foi de 5,4 mm por pêndulo com um desvio padrão de 3,8 mm. Valores considerados bastante bons face à precisão do corte.

6. CONCLUSÃO

Desde da primeira locomotiva eléctrica implementada em 1879, até aos dias de hoje, que a tracção eléctrica tem vindo a sofrer diversas inovações, acompanhando e contribuindo de igual modo para a evolução tecnológica e no melhoramento de condições sociais.

Relativamente aos objectos em estudo, quer as consolas fixadas em postes, quer os componentes da pendulagem da catenária, são projectados com grande detalhe em relatórios de montagem que indicam com precisão as dimensões de todas as peças envolventes para a sua armação. Contudo, nem sempre é possível respeitá-los com grande exactidão devido a inúmeras condicionantes não previstas no terreno. De forma a resolver rapidamente estas situações adversas, o presente trabalho resultou em duas aplicações informáticas, (uma para as consolas e outra para os pêndulos), que permitem proceder de forma simples e automática ao dimensionamento do objecto em questão, reformulando o projecto que não se enquadra como válido num determinado cenário.

A aplicação para calcular o dimensionamento das consolas, foi implementada de forma mais robusta possível, na medida que se pretende que a mesma seja compatível com todas as consolas nacionais identificadas no capítulo da fundamentação teórica. Assim, a aplicação tem a capacidade de dimensionar todos os tipos de montagens de consolas (A, B, C, D, e E), com os três tipos de isoladores (zona terrestre, zona marítima e sintéticos), com diferentes tipos de braço de chamada e, possibilita gerar relatórios para postes que podem conter uma, duas ou três consolas. Os dados resultantes do cálculo são apresentados no ecrã ou exportados para um documento electrónico em formato *pdf*.

A aplicação relativa ao cálculo da pendulagem, foi desenvolvida para determinar a distribuição e comprimento dos pêndulos ao longo de vários lanços. Admite três topologias de catenária (pendulagem em Y, vão normal de 9 m e 12 m) com aberturas nos postes diferentes. Tal como na primeira aplicação, os parâmetros de entrada são introduzidos numa janela intuitiva, e após o processamento do cálculo, os resultados são apresentados numa lista exhaustiva para o ecrã. É também gerado um relatório em *pdf*, onde é possível seleccionar os vários lanços.

Adicionalmente, ambas as aplicações têm a capacidade de gerar um desenho em duas dimensões baseado nos parâmetros de saída, o qual permite verificar visualmente os resultados obtidos. Para proteger a propriedade intelectual das aplicações limitou-se em ambas o número de execuções. Este só poderá ser renovado ou actualizado por uma outra terceira aplicação chave, acessível apenas ao responsável da equipa.

Analisando os resultados das aplicações, tendo em consideração os seus valores médios (e desvios padrão) das aferições efectuadas, e comparando-os com a actual precisão de corte, constata-se que os valores retornados por ambas as aplicações são bastantes satisfatórios. Neste sentido, o presente trabalho contribui de forma válida para o aumento da produtividade na implantação da catenária, no que se refere ao ajuste dos projectos de montagem do equipamento de suporte da catenária em sistemas de tracção eléctrica, às variantes encontradas no terreno.

BIBLIOGRAFIA

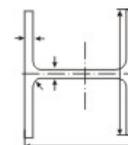
- [1] – Diapositivos de Apresentação Institucional – PromoRail Competência e Tecnologia ao Serviço da Modernização Ferroviária – Setembro 2006.
- [2] – RAILWAY TECHNICAL WEB PAGES, Electric Traction Power Supplies. Acedido a 07 de Setembro 2009 em: <http://www.railway-technical.com/etracp.shtml>.
- [3] – INSTITUTE OF CHEMISTRY THE HEBREW UNIVERSITY OF JERUSALEM, Hans Christian Ørsted. Acedido a 07 de Setembro 2009 em: <http://chem.ch.huji.ac.il/history/oersted.htm>.
- [4] – FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO, Introdução à Tracção Eléctrica. Acedido a 07 de Setembro 2009 em: <http://paginas.fe.up.pt/tre/Textos/TrE-1.pdf>.
- [5] – COLÉGIO WEB, Ernest Werner von Siemens, Sir. Acedido a 07 de Setembro 2009 em: <http://www.colegioweb.com.br/biografias/ernst-werner-von-siemens-sir>.
- [6] – ESVELD, Coenraad - Modern Railway Track, Second Edition, MRT-Productions, 2001. ISBN 90-800324-3-3.
- [7] – Diapositivos de Formação - Segurança Ferroviária para Técnicos, Fernave, SA Gabinete de Formação – Maio 2008.
- [8] – MARTINS, João - Diapositivos de Apontamentos da Unidade Curricular Tracção Eléctrica, Faculdade Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa – 2008/09.
- [9] – ANJOS, Carlos - A Catenária e as outras Instalações Fixas de Tracção Eléctrica, 1ª Edição Ferbritas, Empreendimentos Industriais e Comerciais, S.A., 2007. ISBN 978-989-20-0534-8 p. (63-78).
- [12] – MAYNAR, Manuel Melis e FERNANDEZ, Francisco Javier - Ferrocarriles Metropolitanos: Tranvías, Metros Ligeros y Metros Convencionales, 1ª Edição, Madrid 2008. ISBN 9788438003848. p. (32-38).

- [10] – SUBURBAN ELECTRIC RAILWAY ASSOCIATION, The History Zone. Acedido a 07 de Setembro 2009 em: <http://www.emus.co.uk/zone/southern/southern1.htm>.
- [11] – NATIONAL CORRIDORS, Destination Freedom. Acedido a 10 de Setembro 2009 em <http://www.nationalcorridors.org/df/df01082001.shtml>.
- [13] – ONLINEPUBS, Light Rail Without Wires. Acedido a 07 de Setembro 2009 em: http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/circulars/ec058/15_02_Swanson.pdf.
- [14] – HOWSTUFFWORKS, How Subways Work. Acedido a 07 de Setembro 2009 em: <http://science.howstuffworks.com/subway3.htm>.
- [15] – Desenho Oficial – Catenária (Consolas), Desenho n.º E-7540, REFER, Engenharia de Infra-estruturas – Janeiro 2003.
- [16] – KALLER, Roger e ALLENBACH Jean-Marc – Traction Électrique, 2ª Edição Presses Polytechniques et Universitaires Romandes (PPUR), Fevereiro 2008. ISBN 9782880746742. p.(182-191).
- [17] – Desenho Oficial – Catenária (Braços de Chamada para Consola), Desenho n.º E-6184, Caminhos de Ferro Portugueses, Direcção de Instalações Fixas.
- [18] – Desenho Oficial – Catenária S/Y (Distribuição da Pendulagem), Desenho n.º E-7179.
- [19] – Desenho Oficial – Catenária com Y (Distribuição da Pendulagem), Desenho n.º E-7180.
- [20] – LIDERA AÇO – Tabelas – Acedido em 25 de Setembro 2009 em: <http://www.lideracom.com.br/tabelas.htm>.
- [21] – La Curva Catenaria – Física con Ordenador - Acedido em 07 de Setembro 2009 em: http://www.educando.edu.do/sitios/PNC2005/recursos/recursos/Ciencias%20de%20la%20Naturaleza/Fisica/Fisica%20con%20ordenador%20II/solido/din_rotacion/catenaria/catenaria.htm.
- [22] – Instrução Técnica de Catenária – Quadros de Pendulagem para Catenária LP4 e LP5, – Edição N.º 11, REFER, Direcção Geral de Engenharia.

- [23] - BENET, J.; CUARTERO, F – A tool to calculate mechanical forces on railway catenary, Escuela Politécnica Superior, Univ. de Castilla-La Mancha.
- [24] – POETSCH, G.; EVANS J.; ROJHO, T. – Pantograph/Catenary Dynamics and Control, Vehicle System Dynamics (1997).
- [25] – ARIAS, Enrique; ALBERTO, Angelines – A mathematical model of the static pantograph/catenary interaction, International Journal of Computer Mathematics (2009).
- [26] – ELECTROPEDIA, Electric traction. Acedido em 07 de Setembro 2009 em:
<http://www.electropedia.org/iev/iev.nsf/display?openform&ievref=811-01-01>.
- [27] – BRINKSTER, “The Third Rail”. Acedido a 07 de Setembro 2009 em:
<http://www33.brinkster.com/iiii/inventions/3rdrail.asp>.

ANEXOS

ANEXO 1 – ESPECIFICAÇÕES DE VIGAS DO TIPO HE



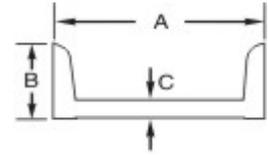
Designação	DIMENSÃO					Peso P kg/m	Seção S cm ²	lx cm ⁴	Características Mecânicas		
	h mm	b mm	a mm	e mm	r mm				rx cm	ly cm ⁴	ry cm
HE 100 A	96	100	5	8	12	16,7	21,2	349	4,06	134	2,51
B	100	100	6	10	12	20,4	26,0	450	4,16	167	2,53
M	120	106	12	20	12	41,8	53,2	1 143	4,63	399	2,74
HE 120 A	114	120	5	8	12	19,8	25,2	606	4,89	231	3,02
B	120	120	6,5	11	12	26,7	34,0	864	5,04	318	3,06
M	140	126	12,5	21	12	52,1	66,4	2 018	5,51	703	3,25
HE 140 A	133	140	5,5	8,5	12	24,7	31,4	1 033	5,73	389	3,52
B	140	140	7	12	12	33,7	43,0	1 509	5,93	550	3,58
M	160	146	13	22	12	63,2	80,6	3 291	6,39	1 144	3,77
HE 160 A	152	160	6	9	15	30,4	38,8	1 673	6,57	616	3,98
B	160	160	8	13	15	42,6	54,3	2 492	6,78	889	4,05
M	180	166	14	23	15	76,2	97,1	5 098	7,25	1 759	4,26
HE 180 A	171	180	6	9,5	15	35,5	45,3	2 510	7,45	925	4,52
B	180	180	8,5	14	15	51,2	65,3	3 831	7,66	1 363	4,57
M	200	186	14,5	24	15	88,9	113,3	7 483	8,13	2 580	4,77
HE 200 A	190	200	6,5	10	18	42,3	53,8	3 092	8,28	1 336	4,98
B	200	200	9	15	18	61,3	78,1	5 696	8,54	2 003	5,07
M	220	206	15	25	18	103	131,3	10 642	9,00	3 651	5,27

Designação	DIMENSÃO					Peso P kg/m	Seção S cm ²	lx cm ⁴	Características Mecânicas		
	h mm	b mm	a mm	e mm	r mm				rx cm	ly cm ⁴	ry cm
HE 220 A	210	220	7	11	18	50,5	64,3	5 410	0,17	1 955	5,51
B	220	220	9,5	16	18	71,5	91,0	8 091	9,43	2 843	5,59
M	240	226	15,5	26	18	117	149,4	14 605	9,89	5 012	5,79
HE 240 A	230	240	7,5	12	21	60,3	76,8	7 763	10,1	2 769	6,00
B	240	240	10	17	21	83,2	106,0	11 259	10,3	3 923	6,08
M	270	248	18	32	21	157	199,6	24 289	11,0	8 153	6,39
HE 260 A	250	260	7,5	12,5	24	68,2	86,8	10 455	11,0	3 668	6,50
B	260	260	10	17,5	24	93,0	118,4	14 919	11,2	5 135	6,58
M	290	268	18	32,5	24	172	219,6	31 307	11,9	10 449	6,90
HE 280 A	270	280	8	13	24	76,4	97,3	13 673	11,9	4 763	7,00
B	280	280	10,5	18	24	103	131,4	19 270	12,1	6 595	7,09
M	310	288	18,5	33	24	189	240,2	39 547	12,8	13 163	7,40
HE 300 A	290	300	8,5	14	27	88,3	112,5	18 263	12,7	6 310	7,49
B	300	300	11	19	27	117	149,1	25 166	13,0	8 563	7,58
C	320	305	16	29	27	177	225,1	40 951	13,5	13 736	7,81
M	340	310	21	39	27	238	303,1	59 201	14,0	19 403	8,00

Designação	DIMENSÃO					Peso P kg/m	Seção S cm ²	Características Mecânicas			
	h mm	b mm	a mm	e mm	r mm			I _x cm ⁴	r _x cm	I _y cm ⁴	r _y cm
HE 320 A	310	300	9	15,5	27	97,6	124,4	22 928	13,6	6 985	7,49
B	320	300	11,5	20,5	27	127	161,3	30 823	13,8	9 239	7,57
M	359	309	21	40	27	245	312,0	68 135	14,8	19 709	7,95
HE 340 A	330	300	9,5	16,5	27	105	133,5	27 693	14,4	7 436	7,46
B	340	300	12	21,5	27	134	170,9	36 656	14,6	9 690	7,53
M	377	309	21	40	27	248	315,8	76 372	15,6	19 711	7,90
HE 360 A	350	300	10	17,5	27	112	142,8	33 090	15,2	7 887	7,43
B	360	300	12,5	22,5	27	142	180,6	43 193	15,5	10 141	7,49
M	395	308	21	40	27	250	318,8	84 867	16,3	19 522	7,83
HE 400 A	390	300	11	19	27	125	159,0	45 069	16,8	8 564	7,34
B	400	300	13,5	24	27	155	197,8	57 680	17,1	10 819	7,40
M	432	307	21	40	27	256	325,8	104 119	17,9	19 335	7,70
HE 450 A	440	300	11,5	21	27	140	178,0	63 722	18,9	9 465	7,29
B	450	300	14	26	27	171	218,0	79 887	19,1	11 721	7,33
M	478	307	21	40	27	263	335,4	131 484	19,8	19 339	7,59
HE 500 A	490	300	12	23	27	155	197,5	86 975	21,0	10 367	7,24
B	500	300	14,5	28	27	187	238,6	107 176	21,2	12 624	7,27
M	524	306	21	40	27	270	344,3	161 929	21,7	19 155	7,46
HE 550 A	540	300	12,5	24	27	166	211,8	111 932	23,0	10 819	7,15
B	550	300	15	29	27	199	254,1	136 691	23,2	13 077	7,17
M	572	306	21	40	27	278	354,4	197 984	23,6	19 158	7,35
HE 600 A	590	300	13	25	27	178	226,5	141 208	25,0	11 271	7,05
B	600	300	15,5	30	27	212	270,0	171 041	25,2	13 530	7,08
M	620	305	21	40	27	285	368,7	237 447	25,6	18 975	7,22

[20]

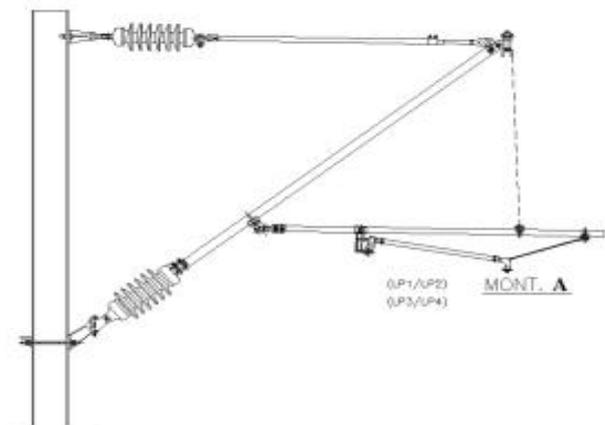
ANEXO 2 – ESPECIFICAÇÕES DE VIGAS DO TIPO U



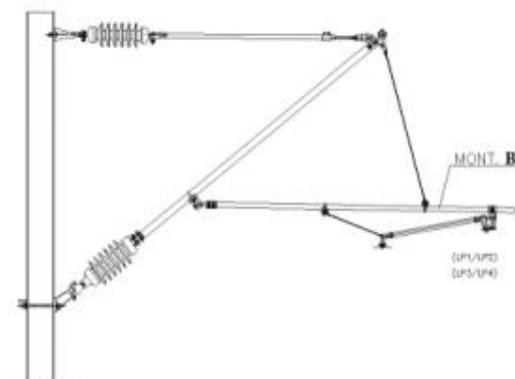
Tamanho Nominal		Altura (A)		Pêso		Largura das Abas (B)		Largura da Alma (C)	
mm	pol.	mm	pol.	kg/m	lb/pé	mm	pol.	mm	pol.
76,20 x 38,10	3 x 1-1/2	76,20	3	6,10	4,10	35,81	1,410	4,32	0,170
				7,44	5,00	38,05	1,498	6,55	0,258
				8,93	6,00	40,54	1,596	9,04	0,356
101,60 x 41,28	4 x 1-5/8	101,60	4	8,04	5,40	40,13	1,580	4,57	0,180
				9,30	6,25	41,83	1,647	6,27	0,247
				10,79	7,25	43,69	1,720	8,13	0,320
152,40 x 50,80	6 x 2	152,40	6	12,20	8,20	48,77	1,920	5,08	0,200
				15,63	10,50	51,66	2,034	7,98	0,314
				19,35	13,00	54,79	2,157	11,10	0,437
				23,07	15,50	57,89	2,279	14,20	0,559
203,20 x 57,15	8 x 2-1/4	203,20	8	17,11	11,50	57,40	2,260	5,59	0,220
				20,46	13,75	59,51	2,343	7,70	0,303
				24,18	16,25	61,85	2,435	10,03	0,395
				27,90	18,75	64,19	2,527	12,37	0,487
				31,62	21,25	66,52	2,619	14,71	0,579
254,00 x 66,68	10 x 2-5/8	254,00	10	22,77	15,3	66,04	2,600	6,10	0,240
				29,76	20,0	69,57	2,739	9,63	0,379
				37,20	25,0	73,30	2,886	13,36	0,526
				44,65	30,0	77,04	3,033	17,09	0,673
				52,09	35,0	80,77	3,180	20,83	0,820
304,80 x 76,20	12 x 3	304,80	12	30,81	20,7	74,68	2,940	7,11	0,280
				37,20	25,0	77,39	3,047	9,83	0,387
				44,65	30,0	80,52	3,170	12,95	0,510
				52,09	35,0	83,62	3,292	16,05	0,632
				59,53	40,0	86,74	3,415	19,18	0,755
381,00 x 85,73	15 x 3-3/8	381,00	15	50,45	33,9	86,36	3,400	10,16	0,400
				52,09	35,0	86,92	3,422	10,72	0,422
				59,53	40,0	89,41	3,520	13,21	0,520
				66,97	45,0	91,90	3,618	15,70	0,618
				74,41	50,0	94,39	3,716	18,19	0,716
				81,85	55,0	96,88	3,814	20,68	0,814

[20]

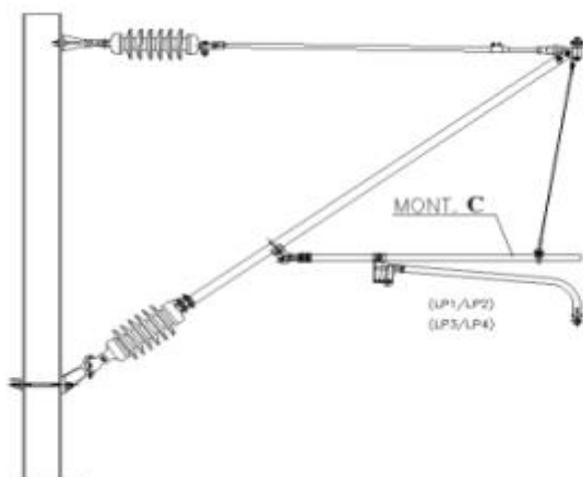
ANEXO 3 – MONTAGENS DE CONSOLA (A A E)



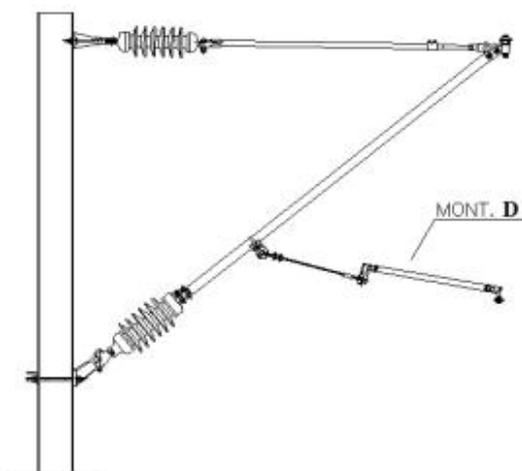
Montagem A



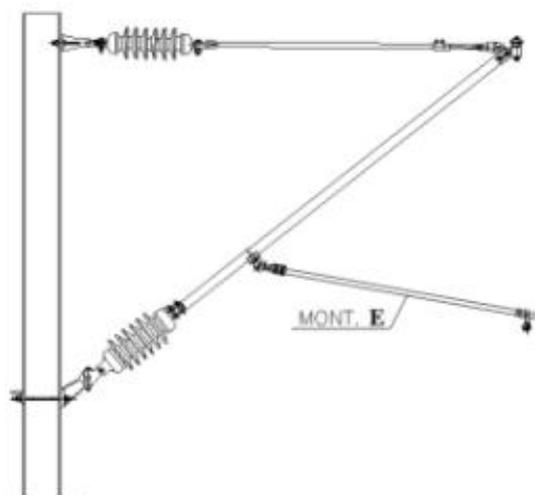
Montagem B



Montagem C

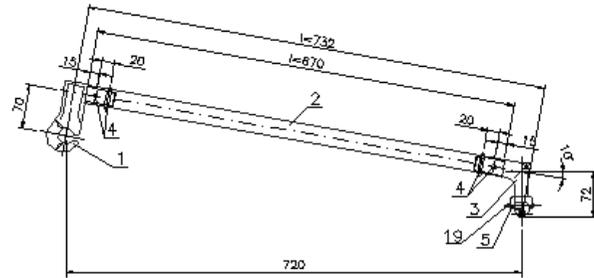


Montagem D

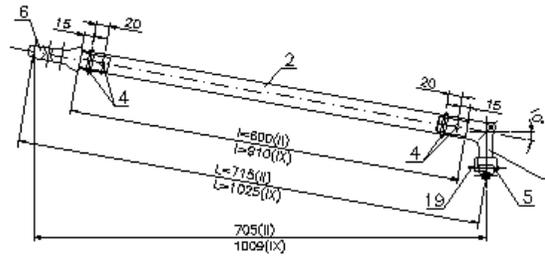


Montagem E

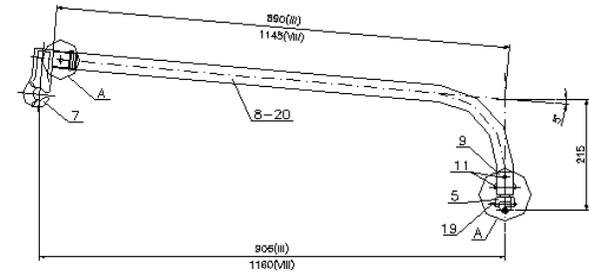
ANEXO 4 – BRAÇOS DE CHAMADA (I A XI)



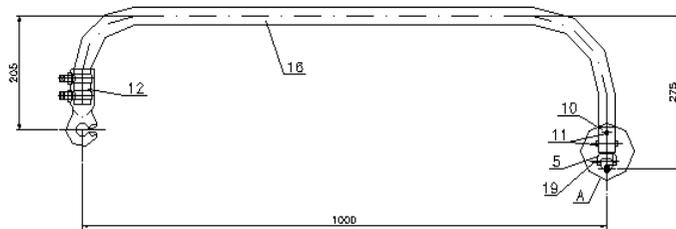
I - Braço Normal – (Duralinox).



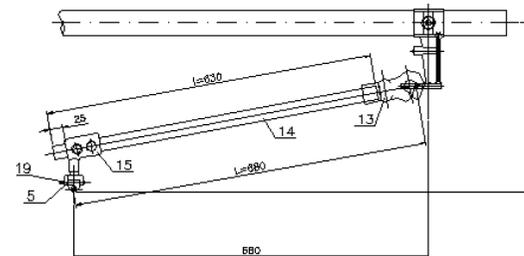
II – Braço para Consola Aberta Reduzida Normal;
IX – Braço para Consola Aberta Reduzida Alongado.



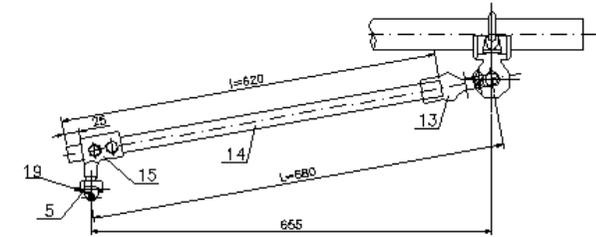
III – Braço Curvo – S.L.A. (Duralinox);
VIII – Braço Curvo Alongado - S.L.A. (Duralinox).



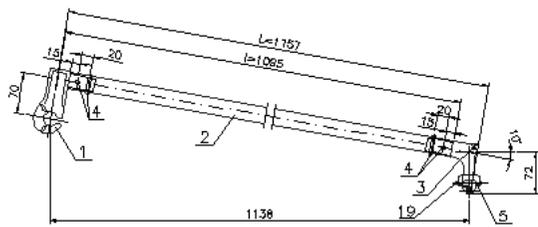
IV – Braço Curvo – S.L.A (Aço).



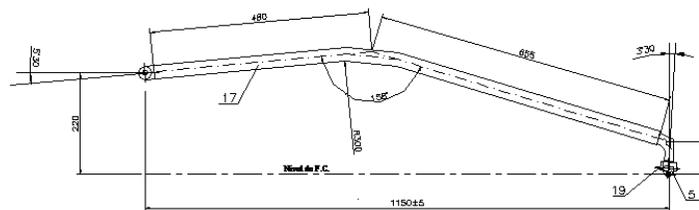
V – Braço Normal – L.S (Aço).



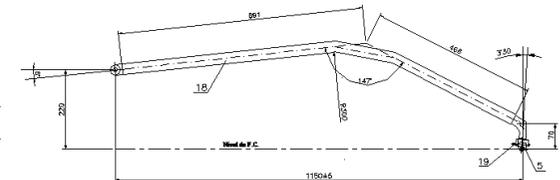
VI – Braço para Consola Aberta Reduzida – (Aço).



VII – Braço Alongado – (Duralinox).

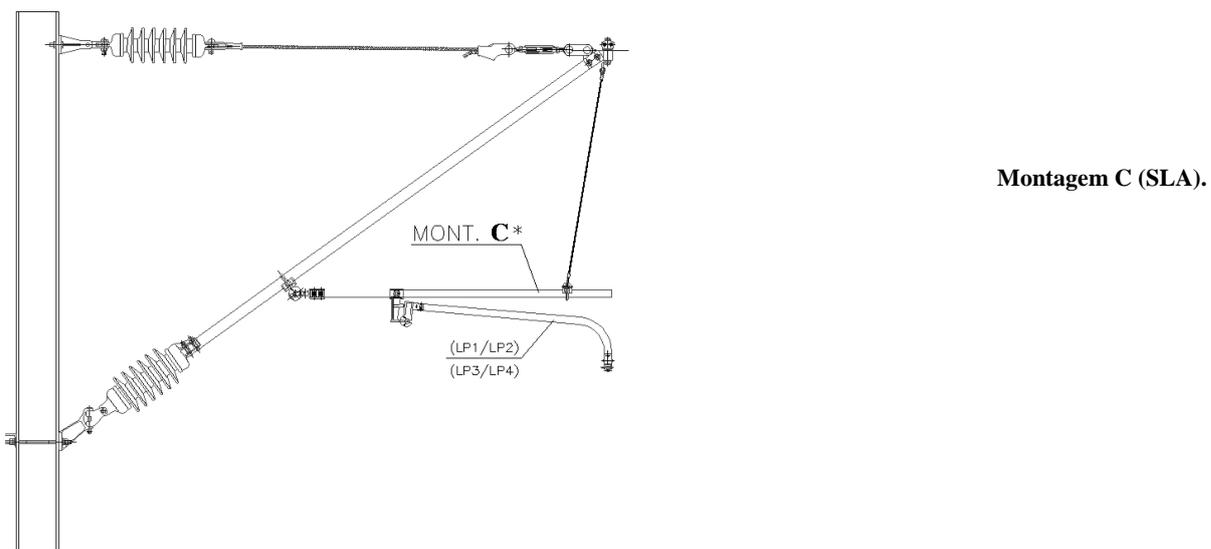
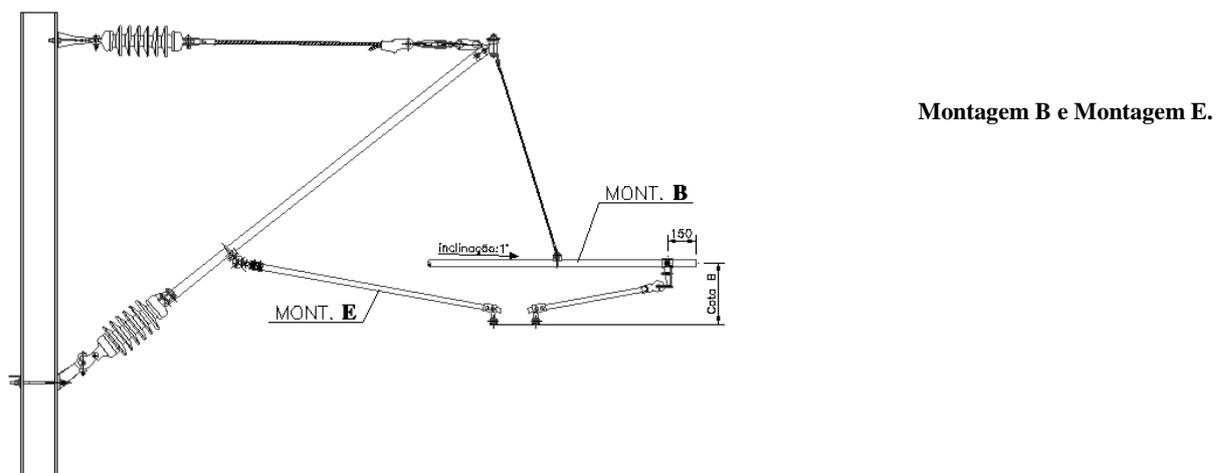
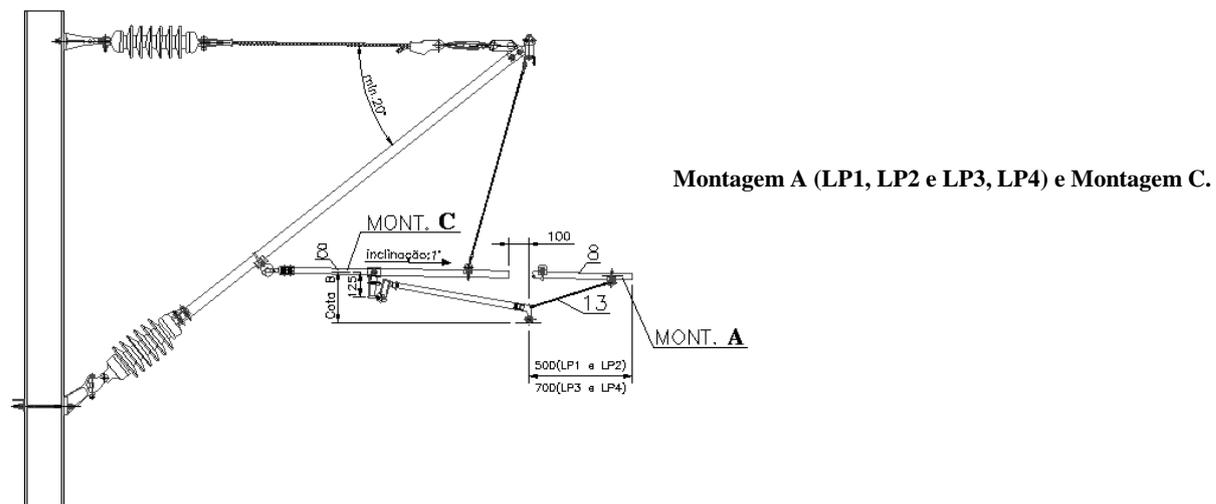


X – Braço de Chamada (Cat. LP5).



XI – Braço de Chamada – S.L.A (Cat. LP5). [17]

ANEXO 5 – PORMENOR DA COTA L NAS MONTAGENS A, B, C, E



ANEXO 6 – RELATÓRIO GERADO NO CÁLCULO DA CONSOLA

PROMORAÍL	Linha de Sintra (Luz)	xxx	12
------------------	-----------------------	-----	----

Poste: 54-56 Zona: ZONA TERRESTRE	Implantação (i): 2.2 Escala: 0.0 (90.0°)
--------------------------------------	---

Consola Montagem A			
Tirante - Fixação: E-6179-[I] Tubo: Desenho I-[I] TL: 3.031 TC/TT: 3.03		Consola - Fixação: E-6161-[I-A] Tubo: Teste-[200] KL: 3.379 K3/K4: 3.179	
Antibalançante: Pêndulo: Braço de Chamada: I - Braço Normal (Duralinox) Antivento: Montagem Y:		L= 2.746	
Cotas			
H= 5.6	S= 0.056	D= 0.35	E= 1.4
F= 0.1	A= 1.8	C= 0.852	B= 0.2

Consola Montagem B			
Tirante - Fixação: E-6179-[I] Tubo: Desenho I-[I] TL: 3.078 TC/TT: 3.077		Consola - Fixação: E-6161-[I-A] Tubo: Teste-[200] KL: 3.476 K3/K4: 3.276	
Antibalançante: Pêndulo: Braço de Chamada: I - Braço Normal (Duralinox) Antivento: Montagem Y:		L= 3.179	
Cotas			
H= 5.6	S= 0.35	D= 0.35	E= 1.4
F= 0.1	A= 1.8	C= 0.892	B= 0.2

Outros Equipamentos
Conjunto de Segurança : (E-6178)-[A] Suspensão CDT : (E-6177)-[TE]

Características do Poste		
Tipo: Maciço 0Ne Espia: Maciço 2Ae	Viga: 300 A Altura: 9.60 Furação: PAT (X = 5.0)	Niv: -0.75 Cf: 0.0 (90.0°)

ANEXO 7 – DISTRIBUIÇÃO DA PENDULAGEM

MONTAGEM	Nº PÊNULO	VAOS		MONTAGEM	Nº PÊNULO	VAOS	
		ESPECIAIS	NORMALIZ			ESPECIAIS	NORMALIZ
		b				b	
<p>83 > a > 54</p>	8	$\frac{a-45}{2}$	63 58,5 9,00 6,75	<p>36 > a > 27</p>	5	$\frac{a-18}{2}$	36 11,5 9,00 6,75
<p>54 > a > 45</p>	7	$\frac{a-36}{2}$	54 49,5 9,00 6,75	<p>27 > a > 22,5</p>	4	$\frac{a-18}{2}$	27 22,5 9,00 4,50
<p>45 > a > 36</p>	6	$\frac{a-27}{2}$	45 40,5 9,00 6,75				
CATENÁRIA S/Y (ABERTURA NORMAL) DISTRIBUIÇÃO DA PENDULAGEM						61054 8.2.1	

Catenária sem Y (Vão Normal 9m) [18].

MONTAGEM	Nº PÊNULO	VAOS
		a e b
<p>63 > a > 54</p>	6	$\frac{a-6}{5}$ a = 63,00 b = 11,40 a = 58,50 b = 10,50
<p>54 > a > 42</p>	5	$\frac{a-6}{4}$ a = 54,00 b = 12,00 a = 49,50 b = 10,875 a = 45,00 b = 9,75
<p>42 > a > 30</p>	4	$\frac{a-6}{3}$ a = 40,50 b = 11,50 a = 36,00 b = 10,00 a = 31,50 b = 8,50
<p>30 > a > 22,5</p>	3	$\frac{a-6}{2}$ a = 27,00 b = 10,50 a = 22,50 b = 8,25
CATENÁRIA DE ABERTURA REDUZIDA DISTRIBUIÇÃO DA PENDULAGEM		E-0001/74 8.2.5

Catenária sem Y (Vão Normal 12m) [18].

MONTAGEM		Nº PÊND	a e b
<p>40.5 > a > 36</p>	<p>3.00</p> <p>3.00</p> <p>0.50 6.75 b 9.00 b 6.75</p> <p>a</p>	4	$\frac{a-22.5}{2}$
		1	a = 40.50 b = 9.00
<p>36 > a > 31.5</p>	<p>3.00</p> <p>3.00</p> <p>0.50 b 9.00 9.00 b 0.50</p> <p>a</p>	3	$\frac{a-18.5}{2}$
		1	a = 36.00 b = 9.00
<p>31.5 > a > 27</p>	<p>0.30</p> <p>0.30</p> <p>0.50 6.75 b b 6.75</p> <p>a</p>	3	$\frac{a-13.5}{2}$
		1	a = 31.50 b = 9.00
<p>n = 27 { Nº de Pêndulos = 2 + 1; Alast: 0.50 + 9.00 + 9.00 + 8.50 }</p>			
<p>CATENÁRIA c/Y de 6m (vãos < 40,5)</p> <p>- DISTRIBUIÇÃO DA PENDULAGEM -</p>		<p>41118</p> <p>8.2.3</p>	

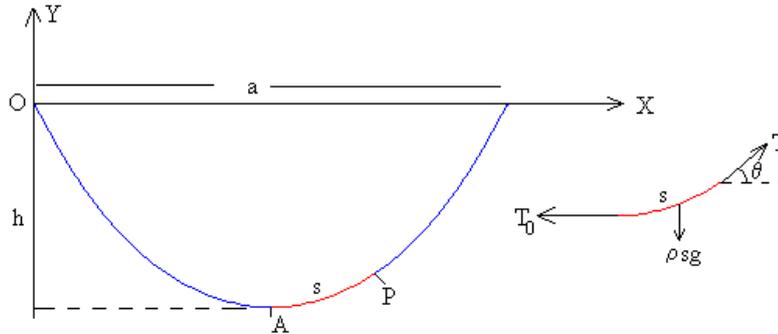
Catenária com Y – 6 m [19]

MONTAGEM		Nº Pênd	Vãos a + b	MONTAGEM		Nº Pênd	Vãos a + b
<p>63 > a > 58.5</p>	<p>6.00</p> <p>6.00</p> <p>2.50 6.50 b 9.00 9.00 9.00 b 6.50 2.50</p> <p>a</p>	6	$\frac{a-45}{2}$ a = 63.00 b = 9.00	<p>49.5 > a > 45</p>	<p>6.00</p> <p>6.00</p> <p>2.50 8.75 b 9.00 b 8.75 2.50</p> <p>a</p>	4	$\frac{a-21.5}{2}$ a = 49.5 b = 9.00
<p>54 > a > 49.5</p>	<p>6.00</p> <p>6.00</p> <p>2.50 6.50 b 9.00 9.00 b 6.50 2.50</p> <p>a</p>	5	$\frac{a-36}{2}$ a = 54.00 b = 9.00	<p>CATENÁRIA COM Y DE 12m (vãos < 40.5)</p>		<p>41118</p> <p>8.2.2</p>	

Catenária com Y – 12 m [19]

ANEXO 8 – CATENÁRIA SIMÉTRICA (DEMONSTRAÇÃO)

Considera-se um cabo de comprimento L preso por seus dois extremos situados à mesma altura com uma distância a um do outro. Seja ρ a densidade do cabo (massa por unidade de comprimento).



Observando a porção s do cabo, que tem como extremo mais baixo o ponto A , verifica-se a existência de três forças:

Peso – $\rho s g$;

Tensão horizontal do lado esquerdo da porção do cabo, junto ao ponto A – T_0 ;

Tensão exercida do lado direito da porção, junto ao ponto – T .

Sabendo que o cabo se encontra fisicamente em repouso, a condição de equilíbrio permite escrever:

$$T \cos \theta = T_0$$

$$T \sin \theta = \rho s g$$

Portanto:

$$\tan \theta = \frac{dy}{dx} = \frac{\rho s g}{T_0}$$

Derivando em ordem a x e tendo em conta que o comprimento do arco diferencial $ds^2 = dx^2 + dy^2$:

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{\rho s g}{T_0} \frac{ds}{dx}$$

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{\rho s g}{T_0} \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2}$$

Integrando esta equação; tendo em conta que para $x = \frac{a}{2}$, no ponto mais baixo da curva (no ponto A), a sua derivada $\frac{dy}{dx}$ é nula; e substituindo $\frac{dy}{dx} = v$:

$$\int_A^P \frac{dv}{\sqrt{1+v^2}} = \int_{\frac{a}{2}}^x \frac{\rho g}{T_0} dx$$

$$\arg \sinh(v) = \frac{\rho g}{2T_0} (2x - a)$$

$$v = \frac{dy}{dx} = \sinh\left(\frac{\rho g}{2T_0} (2x - a)\right)$$

Integrando novamente, com a condição de que para $x = \frac{a}{2}$, $y = h$, altura da flecha:

$$y + h = \frac{T_0}{\rho g} \cosh\left(\frac{\rho g}{2T_0} (2x - a)\right) - \frac{T_0}{\rho g}$$

Como a catenária é simétrica para $x = a$, $y = 0$, a flecha fica a valer:

$$h = \frac{T_0}{\rho g} \cosh\left(\frac{\rho g a}{2T_0}\right) - \frac{T_0}{\rho g}$$

Finalmente, a equação da catenária é descrita por:

$$y = \frac{T_0}{\rho g} \left[\cosh\left(\frac{\rho g}{2T_0} (2x - a)\right) - \cosh\left(\frac{\rho g a}{2T_0}\right) \right]$$

Em que o comprimento do cabo é dado pelo integral da porção s:

$$L = \int_0^a ds = \int_0^a \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} dx = \int_0^a \cosh\left(\frac{\rho g}{2T_0} (2x - a)\right) dx$$

$$L = \frac{2T_0}{\rho g} \sinh\left(\frac{\rho g a}{2T_0}\right)$$

Para efeitos de simplificação, considera-se:

$$\gamma = \frac{\rho g}{2T_0}$$

Obtendo-se as equações do comprimento do cabo L , da flecha h e da catenária y , respectivamente:

$$L = \frac{1}{\gamma} \sinh(\gamma a)$$

$$h = \frac{1}{2\gamma} [\cosh(\gamma a) - 1]$$

$$y = \frac{1}{2\gamma} [\cosh(\gamma(2x - a)) - \cosh(\gamma a)]$$

[21]

ANEXO 9 – RELATÓRIO GERADO NO CÁLCULO DA PENDULAGEM

PROMORAÍL	Relatório de Pendulagem: 3 vãos; Tipo: Vãos Normais 9m.
------------------	--

Troço n.º 1	Vão: 54.0			Abert. Esquerda:1.0			Abert. Direita:1.0	
Pêndulos:	1	2	3	4	5	6	7	
Distâncias:	2.25	6.75	9.0	9.0	9.0	9.0	6.75	2.25
Comprimento L:	0.915	0.774	0.655	0.616	0.655	0.774	0.915	
Comprimento I:	0.855	0.714	0.595	0.556	0.595	0.714	0.855	

Troço n.º 2	Vão: 55.0			Abert. Esquerda:1.3			Abert. Direita:1.3		
Pêndulos:	1	2	3	4	5	6	7	8	
Distâncias:	2.25	6.75	5.0	9.0	9.0	9.0	5.0	6.75	2.25
Comprimento L:	1.213	1.067	0.988	0.908	0.908	0.988	1.067	1.213	
Comprimento I:	1.153	1.007	0.928	0.848	0.848	0.928	1.007	1.153	

Troço n.º 3	Vão: 34.0			Abert. Esquerda:1.4		Abert. Direita:1.0	
Pêndulos:	1	2	3	4	5		
Distâncias:	2.25	6.75	8.0	8.0	6.75	2.25	
Comprimento L:	1.319	1.185	1.068	0.996	0.971		
Comprimento I:	1.259	1.125	1.008	0.936	0.911		

ANEXO 10 – PROJECTOS DE CONSOLAS UTILIZADOS NA AFERIÇÃO

Projecto de Referência da Simulação 1

LOUSADO - NINE		FOLHA Nº.	
POSTE: 33-06		ZONA TERRESTRE	
REVISÃO B JUNHO 03		i=2,20	ESC=0,00
<u>EQUIPAMENTO DA CONSOLA MONT. B</u>			<i>cme</i> TELAS FINAIS
TIRANTE:	FIXAÇÃO:	(E-6179)- (I)	
	TUBO:	(E-6181)- (TC)	TL=3,08 TT=2,22
CONSOLA:	FIXAÇÃO:	(E-6161)- (I-A)	
	30 x 38:	(E-6182)- (TA)	KL=3,52 K3=3,05
ANTIB. E BRAÇO DE CHAMADA:			
	24 x 32	(E-6183)- (A)	L=2,79
	ANTIVENTO	(E-6187)- (a)	
	BRAÇO DE CHAM.	(E-6184)- (I)	
	PENDULO ANTIB.	(E-6188)- (I)	
COTAS:			
	H=4,84	S=0,20	D=0,20
	F=0,21	A=2,01	C=1,31
<u>OUTROS EQUIPAMENTOS</u>			
CONJUNTO DE SEGURANÇA	(E-6178)-	(A)	
SUSPENSÃO CDT	(E-6177)-	(TL)	
MONTAGEM DO Y	(C-1605)-	(a)	
AMARRAÇÃO	(C-160)-	(CS)	(H=6,45)
SUPORTE FIX.	(E-6190)-	(IA)	
MONT. ESPIA	(E-6189)-	(A)	(H1 / 9,15)
HE200A /8,80 / AT (x=500)		Cf=	3
MAÇICO:	1Nea	Niv=	-0,90
MAÇICO ESPIA:	1Ae	Niv=	-0,90

Projecto de Referência da Simulação 2

LOUSADO - NINE		FOLHA N°.	
POSTE: 33-13		ZONA TERRESTRE	
REVISÃO B JUNHO 03		i=2,20	ESC=0,00
<u>EQUIPAMENTO DA CONSOLA MONT. A</u>			cme TELAS FINAIS
TIRANTE:	FIXAÇÃO:	(E-6179)- (I)	
	TUBO:	(E-6181)- (TC)	TL=2,70 TT=1,84
CONSOLA:	FIXAÇÃO:	(E-6161)- (I-A)	
	30 x 38:	(E-6182)- (TA)	KL=2,91 K3=2,44
ANTIB. E BRAÇO DE CHAMADA:			
	24 x 32	(E-6183)- (A)	L=2,17
	ANTIVENTO	(E-6187)- (a)	
	BRAÇO DE CHAM.	(E-6184)- (I)	
	PENDULO ANTIB.	(E-6188)- (I)	
COTAS:			
	H=4,91	S=-0,20	D=-0,20 E=0,80
	F=0,32	A=1,54	C=1,12
<u>OUTROS EQUIPAMENTOS</u>			
CONJUNTO DE SEGURANÇA	(E-6178)- (A)		
SUSPENSÃO CDT	(E-6177)- (TL)		
MONTAGEM DO Y	(C-1605)- (a)		
HE180A / 8,40 / NT		Cf=	3
MAÇICO:	0Nea	Niv=	-0,90

Projecto de Referência da Simulação 3

LOUSADO - NINE		FOLHA Nº.	
POSTE: 33-16		ZONA TERRESTRE	
REVISÃO B	JUNHO 03	i=2,20	ESC=0,00
<u>EQUIPAMENTO DA CONSOLA MONT. A</u>			<i>cme</i> TELAS FINAIS
TIRANTE:	FIXAÇÃO:	(E-6179)- (I)	
	TUBO:	(E-6181)- (TC)	TL=2,68 TT=1,82
CONSOLA:	FIXAÇÃO:	(E-6161)- (I-A)	
	30 x 38:	(E-6182)- (TA)	KL=3,17 K3=2,70
ANTIB. E BRAÇO DE CHAMADA:			
	24 x 32	(E-6183)- (A)	L=2,17
	ANTIVENTO	(E-6187)- (a)	
	BRAÇO DE CHAM.	(E-6184)- (I)	
	PENDULO ANTIB.	(E-6188)- (I)	
COTAS:			
	H=5,07	S=-0,20	D=-0,20 E=1,40
	F=0,38	A=2,18	C=1,12
<u>OUTROS EQUIPAMENTOS</u>			
CONJUNTO DE SEGURANÇA	(E-6178)-	(A)	
SUSPENSÃO CDT	(E-6177)-	(TL)	
MONTAGEM DO Y	(C-1605)-	(a)	
HE180A / 9,20 / NT		Cf=	3
MAÇICO:	0Nea	Niv=	-0,90

Projecto de Referência da Simulação 4

LOUSADO - NINE		FOLHA N°.	
POSTE: 33-17		ZONA TERRESTRE	
REVISÃO B JUNHO 03		i=2,20	ESC=0,05
EQUIPAMENTO DA CONSOLA MONT. A			cme TELAS FINAIS
TIRANTE:	FIXAÇÃO:	(E-6179)- (I)	
	TUBO:	(E-6181)- (TC)	TL=2,84 TT=1,98
CONSOLA:	FIXAÇÃO:	(E-6161)- (I-A)	
	30 x 38:	(E-6182)- (TA)	KL=3,27 K3=2,80
ANTIB. E BRAÇO DE CHAMADA:			
	24 x 32	(E-6183)- (A)	L=2,26
	ANTIVENTO	(E-6187)- (a)	
	BRAÇO DE CHAM.	(E-6184)- (I)	
	PENDULO ANTIB.	(E-6188)- (I)	
COTAS:			
	H=5,22	S=-0,05	D=-0,20 E=1,40
	F=0,23	A=2,03	C=1,17
OUTROS EQUIPAMENTOS			
CONJUNTO DE SEGURANÇA	(E-6178)- (A)		
SUSPENSÃO CDT	(E-6177)- (TL)		
MONTAGEM DO Y	(C-1605)- (a)		
HE180A / 9,20 / NT		Cf=	6
MAÇICO:	1Nea	Niv=	-0,90

Projecto de Referência da Simulação 5

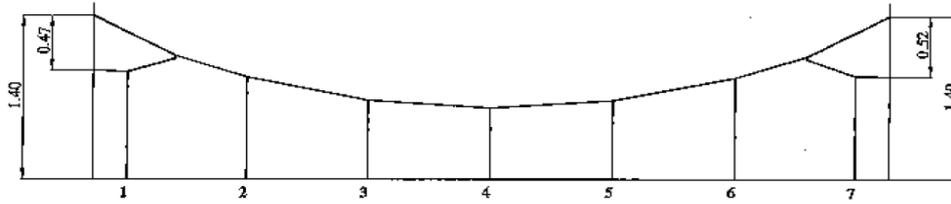
LOUSADO - NINE		FOLHA Nº.	
POSTE: 33-18		ZONA TERRESTRE	
REVISÃO B JUNHO 03		i=2,20	ESC=0,05
EQUIPAMENTO DA CONSOLA MONT. B			cme TELAS FINAIS
TIRANTE:	FIXAÇÃO: (E-6179)- (I)		
	TUBO: (E-6181)- (TC)	TL=2,95	TT=2,09
CONSOLA:	FIXAÇÃO: (E-6161)- (I-A)		
	40 x 49: (E-6182)- (TB)	KL=3,39	K4=2,83
ANTIB. E BRAÇO DE CHAMADA:			
	34 x 42 (E-6183)- (B)	L=2,70	
	ANTIVENTO (E-6187)- (b)		
	BRAÇO DE CHAM. (E-6184)- (I)		
	PENDULO ANTIB. (E-6188)- (I)		
COTAS:			
	H=5,22	S=0,05	D=0,20
	F=0,23	A=2,03	C=1,26
OUTROS EQUIPAMENTOS			
CONJUNTO DE SEGURANÇA	(E-6178)- (A)		
SUSPENSÃO CDT	(E-6177)- (TL)		
MONTAGEM DO Y	(C-1605)- (a)		
HE180A / 9,20 / NT		Cf=	0
MAÇICO:	0Nea	Niv=	-0,90

ANEXO 11 – PROJECTOS DE PENDULAGEM UTILIZADOS NA AFERIÇÃO

Vãos Normais (sem Y)

N9 27m	numero dos pendulos											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	distancia entre pendulos (m)	2,250	6,750	9,000	6,750	2,250						
	comprimento dos pendulos (m)	L	1,561	1,535	1,535	1,561						L
	I	1,50	1,47	1,47	1,50						I	
N7 36m	numero dos pendulos											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	distancia entre pendulos (m)	2,250	6,750	9,000	9,000	6,750	2,250					
	comprimento dos pendulos (m)	L	1,547	1,484	1,454	1,484	1,547					L
	I	1,48	1,42	1,39	1,42	1,48					I	
N4 49,50m	numero dos pendulos											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	distancia entre pendulos (m)	2,250	6,750	6,750	9,000	9,000	6,750	6,750	2,250			
	comprimento dos pendulos (m)	L	1,527	1,405	1,326	1,288	1,326	1,405	1,527			L
	I	1,46	1,34	1,26	1,22	1,26	1,34	1,46			I	
N3 54m	numero dos pendulos											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	distancia entre pendulos (m)	2,250	6,750	9,000	9,000	9,000	9,000	6,750	2,250			
	comprimento dos pendulos (m)	L	1,520	1,379	1,260	1,221	1,260	1,379	1,520			L
	I	1,46	1,31	1,20	1,16	1,20	1,31	1,46			I	
S62-1 62m	numero dos pendulos											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	distancia entre pendulos (m)	2,250	6,750	8,500	9,000	9,000	9,000	8,500	6,750	2,250		
	comprimento dos pendulos (m)	L	1,508	1,331	1,176	1,092	1,092	1,176	1,331	1,508		L
	I	1,44	1,27	1,11	1,03	1,03	1,11	1,27	1,44		I	

Pendulagem em Y



VAO = 45.00 m

PENDULOS	No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
DIST/EIXOS	L	0.985	1.051	0.918	0.916	1.045	0.985					
COMPRIMENTOS	i	0.93	0.99	0.85	0.85	0.98	0.93					
DISTRIBUICAO		2.50	6.50	9.00	9.00	9.00	6.50	2.50				

VAO = 51.30 m

PENDULOS	No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
DIST/EIXOS	L	0.925	0.993	0.835	0.771	0.837	0.996	0.942				
COMPRIMENTOS	i	0.89	0.93	0.77	0.71	0.77	0.93	0.89				
DISTRIBUICAO		2.50	6.50	7.650	9.00	9.00	7.650	6.50	2.50			

VAO = 54.00 m

PENDULOS	No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
DIST/EIXOS	L	0.938	0.979	0.783	0.719	0.784	0.980	0.946				
COMPRIMENTOS	i	0.88	0.91	0.72	0.65	0.72	0.92	0.89				
DISTRIBUICAO		2.50	6.50	9.00	9.00	9.00	9.00	6.50	2.50			

VAO = 58.50 m

PENDULOS	No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
DIST/EIXOS	L	0.920	0.874	0.677	0.610	0.673	0.868	0.885				
COMPRIMENTOS	i	0.83	0.81	0.61	0.54	0.61	0.80	0.83				
DISTRIBUICAO		2.50	8.75	9.00	9.00	9.00	9.00	8.75	2.50			

VAO = 63.00 m

PENDULOS	No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
DIST/EIXOS	L	0.861	0.902	0.642	0.513	0.514	0.645	0.907	0.901			
COMPRIMENTOS	i	0.83	0.84	0.58	0.45	0.45	0.58	0.84	0.83			
DISTRIBUICAO		2.50	6.50	9.00	9.00	9.00	9.00	9.00	6.50	2.50		

ANEXO 12 – RELATÓRIOS DA AFERIÇÃO

Vãos Normais

PROMORAÍL	"Obra"	"Tipo"	"N.º"
------------------	--------	--------	-------

Lanço: 1/2	Vão: 27.0		Abert. Esquerda:1.6		Abert. Direita:1.6	
Pêndulos:	1	2	3	4		
Distâncias:	2.25	6.75	9.0	6.75	2.25	
Comprimento L:	1.561	1.535	1.535	1.561		
Comprimento I:	1.496	1.47	1.47	1.496		

Lanço: 2/3	Vão: 36.0		Abert. Esquerda:1.6		Abert. Direita:1.6	
Pêndulos:	1	2	3	4	5	
Distâncias:	2.25	6.75	9.0	9.0	6.75	2.25
Comprimento L:	1.547	1.484	1.454	1.484	1.547	
Comprimento I:	1.482	1.419	1.389	1.419	1.482	

Lanço: 3/4	Vão: 49.5		Abert. Esquerda:1.6		Abert. Direita:1.6			
Pêndulos:	1	2	3	4	5	6	7	
Distâncias:	2.25	6.75	6.75	9.0	9.0	6.75	6.75	2.25
Comprimento L:	1.527	1.405	1.326	1.288	1.326	1.405	1.527	
Comprimento I:	1.462	1.34	1.261	1.223	1.261	1.34	1.462	

Lanço: 4/5	Vão: 54.0		Abert. Esquerda:1.6		Abert. Direita:1.6		
Pêndulos:	1	2	3	4	5	6	7
Distâncias:	2.25	6.75	9.0	9.0	9.0	6.75	2.25
Comprimento L:	1.52	1.379	1.26	1.221	1.26	1.379	1.52
Comprimento I:	1.455	1.314	1.195	1.156	1.195	1.314	1.455

Lanço: 5/6	Vão: 62.0		Abert. Esquerda:1.6		Abert. Direita:1.6				
Pêndulos:	1	2	3	4	5	6	7	8	
Distâncias:	2.25	6.75	8.5	9.0	9.0	9.0	8.5	6.75	2.25
Comprimento L:	1.508	1.332	1.176	1.093	1.093	1.176	1.332	1.508	
Comprimento I:	1.443	1.267	1.111	1.028	1.028	1.111	1.267	1.443	

Pendulagem em Y

PROMORAÍL	"Obra"	"Tipo"	"N.º"
------------------	--------	--------	-------

Lanço: 1/2	Vão: 45.0			Abert. Esquerda:1.4		Abert. Direita:1.4	
Pêndulos:	1	2	3	4	5	6	
Distâncias:	2.5	6.5	9.0	9.0	9.0	6.5	2.5
Comprimento L:	1.006	1.051	0.922	0.922	1.051	1.008	
Comprimento I:	0.941	0.986	0.857	0.857	0.986	0.943	

Lanço: 2/3	Vão: 51.3			Abert. Esquerda:1.4		Abert. Direita:1.4		
Pêndulos:	1	2	3	4	5	6	7	
Distâncias:	2.5	6.5	7.65	9.0	9.0	7.65	6.5	2.5
Comprimento L:	0.968	0.998	0.841	0.776	0.841	0.998	0.97	
Comprimento I:	0.903	0.933	0.776	0.711	0.776	0.933	0.905	

Lanço: 3/4	Vão: 54.0			Abert. Esquerda:1.4		Abert. Direita:1.4		
Pêndulos:	1	2	3	4	5	6	7	
Distâncias:	2.5	6.5	9.0	9.0	9.0	9.0	6.5	2.5
Comprimento L:	0.953	0.976	0.782	0.717	0.782	0.976	0.954	
Comprimento I:	0.888	0.911	0.717	0.652	0.717	0.911	0.889	

Lanço: 4/5	Vão: 58.5			Abert. Esquerda:1.4		Abert. Direita:1.4		
Pêndulos:	1	2	3	4	5	6	7	
Distâncias:	2.5	8.75	9.0	9.0	9.0	9.0	8.75	2.5
Comprimento L:	0.908	0.866	0.672	0.608	0.672	0.866	0.9	
Comprimento I:	0.843	0.801	0.607	0.543	0.607	0.801	0.835	

Lanço: 5/6	Vão: 63.0			Abert. Esquerda:1.4		Abert. Direita:1.4			
Pêndulos:	1	2	3	4	5	6	7	8	
Distâncias:	2.5	6.5	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	6.5	2.5
Comprimento L:	0.899	0.9	0.642	0.513	0.513	0.642	0.9	0.9	
Comprimento I:	0.834	0.835	0.577	0.448	0.448	0.577	0.835	0.835	