



UNIVERSIDADE DO ALGARVE
INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHEIRA



ESTUDO DE PARÂMETROS ELÉCTRICOS
UTILIZADOS EM REDES DE ILUMINAÇÃO PÚBLICA

André Guy Paul Deltell

Mestrado em Engenharia Eléctrica e Electrónica
Especialização em Sistemas de Energia e Controlo

2010



UNIVERSIDADE DO ALGARVE
INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHEIRA



ESTUDO DE PARÂMETROS ELÉCTRICOS
UTILIZADOS EM REDES DE ILUMINAÇÃO PÚBLICA

André Guy Paul Deltell

Mestrado em Engenharia Eléctrica e Electrónica
Especialização em Sistemas de Energia e Controlo

Dissertação orientada pelo Doutor José Manuel Guerreiro Gonçalves

Membros do Júri:

Presidente: Doutor Isménio Lourenço Eusébio Martins
Instituto Superior de Engenharia da Universidade do Algarve

Vogais: Doutor Carlos Manuel Pereira Cabrita
Universidade da Beira Interior
Doutor José Manuel Guerreiro Gonçalves
Instituto Superior de Engenharia da Universidade do Algarve

2010

AGRADECIMENTOS

Estou profundamente grato a toda a gente que ajudou a tornar esta dissertação uma realidade. Muito particularmente ao meu orientador, o Prof. Doutor José Gonçalves, pela sua competência, pelo seu apoio e pela sua grande disponibilidade.

Permita-me que destaque mais algumas pessoas cujas contribuições foram particularmente importantes.

Em primeiro lugar gostaria de agradecer ao Prof. Doutor Isménio Martins, pela sua orientação no método dos elementos finitos que constituíram um dos alicerces desta dissertação. Gostaria também agradecer o Prof. Luís Oliveira pela sua ajuda na preparação das medições no terreno.

Quero também agradecer o Eng.º Manuel Renda, Chefe da Divisão de Electricidade da Câmara Municipal de Loulé, que me prestou um apoio fundamental sem o qual a realização deste trabalho não seria possível. Estou também grato ao Eng.º Sérgio Rego, colega e amigo, pelo seu contínuo apoio e companheirismo.

Um grande obrigado vai também para o Eng.º Joaquim de Sousa Marques, e o Sr. Jorge Gonçalves, ambos da firma MEC, que ajudaram na realização das medições no terreno. Neste contexto, também estou grato ao Eng.º Luís Pereira da firma Casa Ferreira, pela sua ajuda na utilização do analisador de rede. Agradeço ainda o Sr. Nuno Leal da EDP-Loulé, para ter facilitado a utilização dum troço da rede de Iluminação Pública.

Quero também agradecer o David Meeker que desenvolveu o programa *Finite Element Method Magnetics* utilizado neste trabalho. Agradeço também o Alexandre Pereira e o Carlos Poupá, autores do livro *Como Escrever uma Tese*.

Finalmente, agradeço muito a minha esposa Simone, os meus filhos – Céline e Émilien – e os meus sogros, pela paciência e constante apoio durante as noites, os fins-de-semana e as férias passados na redacção desta dissertação. Et un très grand merci à toute ma famille au Canada!

RESUMO

Os projectistas que elaboram projectos de iluminação pública, utilizam métodos de cálculos simplificados, nomeadamente na determinação dos parâmetros eléctricos das cargas, dos cabos e das quedas de tensão.

Neste trabalho foram utilizados métodos avançados (teóricos e de simulações numéricas por elementos finitos - FEMM) para determinar os parâmetros eléctricos, nomeadamente: impedância das luminárias com lâmpadas de vapor de sódio a alta pressão, impedância dos cabos com quatro condutores e uma bainha ferromagnética (indutâncias longitudinais e capacidades transversais). Algumas expressões apresentadas são inovadoras, tal como o efeito duma distorção trapezoidal dos condutores sobre a capacidade de serviço. Um modelo avançado de rede trifásica é apresentado, comparando os valores das correntes de neutro e das quedas de tensão com o modelo original simplificado.

Para corroborar alguns dos resultados teóricos e de simulações numéricas, este trabalho apresenta uma série de observações no terreno em situação real. Os valores originalmente calculados pelo projectista são comparados com as medições no terreno, e com os resultados teóricos e numéricos dos modelos avançados propostos. Baseado neste conjunto de comparações, recomendações finais são feitas aos projectistas.

PALAVRAS CHAVE

Método dos elementos finitos, FEMM, parâmetros eléctricos, impedância, cabo multicondutor, bainha metálica, cabo de baixa tensão, iluminação pública

ABSTRACT

Project engineers, who conceptualise public lighting projects, use simplified methods of calculation. This is particularly true when determining electrical parameters of loads, cable impedance and voltage droops.

Here, were used advanced methods of calculation (theoretical and numeric simulation using the finite element method – FEMM) for greater accuracy when determining electrical parameters, for example: load impedance of a high-pressure sodium-vapour lamp and ballast; cable impedance with four conductors and a ferromagnetic shield (longitudinal inductances and transversal capacitances). Some of the expressions presented in this text will not be found elsewhere, as they are innovative. One such expression is the effect of a trapezoidal distortion when related to service capacitance. An advanced model of a three-phase network is also presented, comparing the common conductor currents, as well as the voltage droops, along with a simplified original model.

In order to corroborate some of the theoretical results and numeric simulations, a series of real life situations were observed in the field. The original values calculated by the project engineer are compared to those taken in the field, along with the advanced theoretical and numeric results presented. Recommendations are made to project engineers, after a final comparison analysis.

KEY WORDS

Finite-element method, FEMM, electrical parameters, cable impedance, multiconductor shielded cable, low-power cable, public lighting



ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	iii
RESUMO	iv
PALAVRAS CHAVE	iv
SUMMARY	v
KEY WORDS	v
ÍNDICE	vi
LISTA DAS FIGURAS	xiii
LISTA DOS QUADROS E TABELAS	xviii
CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO	1
1.1. ENQUADRAMENTO	1
1.2. OBJECTIVOS	2
1.3. METODOLOGIA DO TRABALHO	2
1.4. ORGANIZAÇÃO DO TEXTO	3
1.4.1. <i>Capítulo 1 - Introdução</i>	3
1.4.2. <i>Capítulo 2 - Métodos de cálculo simplificados utilizados pelos projectistas</i>	3
1.4.3. <i>Capítulo 3 - Fontes de iluminação e modelo eléctrico das cargas</i>	4
1.4.4. <i>Capítulo 4 - Parâmetros eléctricos dos cabos e modelo avançado de rede trifásica</i>	4
1.4.5. <i>Capítulo 5 - Apresentação da metodologia experimental</i>	4
1.4.6. <i>Capítulo 6 - Resultados experimentais, análise e compilação</i>	5
1.4.7. <i>Capítulo 7 - Conclusões e desenvolvimentos futuros</i>	5
1.5. LIMITES DO TRABALHO APRESENTADO	5
CAPÍTULO 2. MÉTODOS DE CÁLCULOS SIMPLIFICADOS UTILIZADOS PELOS PROJECTISTAS	7
2.1. CONCEITOS GERAIS	7
2.1.1. <i>Tipos de redes de distribuição de energia eléctrica</i>	7
2.1.2. <i>Distribuidor de energia eléctrica</i>	8

2.2.	REDES DE ILUMINAÇÃO PÚBLICA	8
2.2.1.	<i>Características das redes de IP</i>	8
2.2.2.	<i>Protecções utilizadas das redes de IP</i>	10
2.2.3.	<i>Canalizações eléctricas utilizadas nas redes de IP</i>	12
2.3.	CÁLCULO DAS PROTECÇÕES E DAS CANALIZAÇÕES	13
2.3.1.	<i>Conceitos gerais</i>	13
2.3.2.	<i>Impedância da linha</i>	16
2.3.3.	<i>Impedância da carga</i>	19
2.3.4.	<i>Cálculo das correntes de serviço</i>	21
2.3.5.	<i>Cálculo das correntes de curto-circuito</i>	24
2.3.6.	<i>Cálculo das quedas de tensão</i>	25
2.3.7.	<i>Procedimento da escolha final das canalizações e das protecções</i>	26
2.4.	DADOS DE UM PROJECTO REALIZADO	27
CAPÍTULO 3. FONTES DE ILUMINAÇÃO E MODELO ELÉCTRICO DAS CARGAS		29
3.1.	APRESENTAÇÃO	29
3.2.	LÂMPADAS INCANDESCENTES	31
3.2.1.	<i>Princípio de funcionamento</i>	31
3.2.2.	<i>Lâmpada de tungsténio</i>	31
3.2.3.	<i>Lâmpadas de halogéneo</i>	32
3.3.	LÂMPADAS DE DESCARGA	32
3.3.1.	<i>Princípio geral de funcionamento</i>	32
3.3.2.	<i>Lâmpada de vapor de sódio a alta pressão (SAP)</i>	34
3.3.3.	<i>Lâmpada de vapor de sódio a baixa pressão</i>	34
3.3.4.	<i>Lâmpada de vapor de mercúrio</i>	35
3.3.5.	<i>Lâmpada de iodeto metálico</i>	35
3.3.6.	<i>Lâmpada fluorescente</i>	35
3.4.	OUTRAS TECNOLOGIAS	36
3.4.1.	<i>Luminárias com tecnologia a LEDs</i>	36
3.4.2.	<i>Lâmpada de indução magnética</i>	38
3.5.	MODELO ELÉCTRICO DUMA LUMINÁRIA COM LÂMPADA DE VAPOR DE SÓDIO A ALTA PRESSÃO (SAP)	39
3.5.1.	<i>Expressões da impedância e dos parâmetros eléctricos</i>	39

3.5.2.	<i>Cálculo dos parâmetros eléctricos duma luminária real</i>	43
3.5.3.	<i>Valores a utilizar nos cálculos e nas simulações</i>	47
CAPÍTULO 4.	PARÂMETROS ELÉCTRICOS DOS CABOS E MODELO AVANÇADO DE REDE TRIFÁSICA	49
4.1.	PARÂMETROS ELÉCTRICOS DOS CABOS	49
4.1.1.	<i>Diversidade das características eléctricas dos cabos a analisar</i>	49
4.1.2.	<i>Verificação utilizando o método dos elementos finitos com o FEMM</i>	50
4.1.3.	<i>Comprimento real dos cabos</i>	51
4.1.4.	<i>Resistência dos condutores</i>	53
4.1.5.	<i>Indutâncias</i>	54
4.1.6.	<i>Capacidades</i>	66
4.1.7.	<i>Impedância dos condutores - Compilação</i>	76
4.2.	MODELO AVANÇADO DE CÁLCULO DE REDE	77
4.2.1.	<i>Limitações do modelo simplificado</i>	77
4.2.2.	<i>Modelo analítico com cargas distribuídas</i>	79
4.2.3.	<i>Correntes de fase e de neutro</i>	84
4.2.4.	<i>Correntes que circulam na bainha</i>	86
4.2.5.	<i>Queda de tensão</i>	87
CAPÍTULO 5.	APRESENTAÇÃO DA METODOLOGIA EXPERIMENTAL	91
5.1.	OBJECTIVO	91
5.2.	LOCAL DAS MEDIÇÕES	92
5.2.1.	<i>Escolha do local</i>	92
5.2.2.	<i>Características técnicas do local e topologia</i>	92
5.3.	DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS A MEDIR E MÉTODOS DE MEDIÇÃO	94
5.3.1.	<i>Parâmetros a medir no local</i>	94
5.3.2.	<i>Métodos de medição da impedância dos cabos - Resistência eléctrica</i>	95
5.3.3.	<i>Métodos de medição da impedância dos cabos - Indutância longitudinal</i>	98
5.3.4.	<i>Métodos de medição da impedância dos cabos - Capacidade transversal</i>	101
5.3.5.	<i>Métodos de medição dos parâmetros eléctricos de funcionamento em carga</i>	102
5.4.	PROTOCOLO EXPERIMENTAL APLICADO NO TERRENO	107
5.4.1.	<i>Etapa 1 – Preparação do local</i>	109

5.4.2.	<i>Etapa 2 – Medição dum luminária única em tensão</i>	109
5.4.3.	<i>Etapa 3 – Medição das impedâncias dos condutores</i>	109
5.4.4.	<i>Etapa 4 – Recolocar a rede no seu estado original</i>	110
5.4.5.	<i>Etapa 5 – Condicionar os candeeiros E1 até E9</i>	110
5.4.6.	<i>Etapa 6 – Medição dum troço em tensão - Origem da alimentação</i>	110
5.4.7.	<i>Etapa 7 – Medição dum troço em tensão - Candeeiros individuais</i>	110
5.4.8.	<i>Etapa 8 – Recolocar a rede no seu estado original</i>	111
5.5.	PORMENORES TÉCNICOS E LOGÍSTICOS ADICIONAIS	111
5.5.1.	<i>Equipamentos de medição</i>	111
5.5.2.	<i>Condicionalismo do local e logística</i>	111
5.6.	LIMITES DAS MEDIÇÕES EXPERIMENTAIS	112
CAPÍTULO 6. RESULTADOS EXPERIMENTAIS, ANÁLISE E COMPILAÇÃO		115
_____		115
6.1.	PARÂMETROS ELÉCTRICOS INDIVIDUAIS	115
6.1.1.	<i>Cargas individuais</i>	115
6.1.2.	<i>Resistências eléctricas dos condutores</i>	117
6.1.3.	<i>Indutâncias dos condutores</i>	119
6.1.4.	<i>Capacidades dos condutores</i>	119
6.2.	RESULTADOS DAS MEDIÇÕES EM REDE	120
6.2.1.	<i>Valores previstos pelo projectista</i>	120
6.2.2.	<i>Medição das tensões</i>	120
6.2.3.	<i>Medições das quedas de tensão</i>	122
6.2.4.	<i>Medição do factor de potência</i>	122
6.2.5.	<i>Medição das correntes na origem do troço em análise</i>	123
6.2.6.	<i>Medições das correntes individuais</i>	125
6.3.	ANÁLISE DOS RESULTADOS	127
6.3.1.	<i>Impedância das luminárias</i>	127
6.3.2.	<i>Impedância dos condutores</i>	128
6.3.3.	<i>Correntes de fuga no condutor de terra</i>	129
6.4.	COMPILAÇÃO DOS PARÂMETROS ELÉCTRICOS DA REDE ANALISADA	129
6.4.1.	<i>Compilação</i>	129
6.4.2.	<i>Recomendações aos projectistas</i>	131

CAPÍTULO 7. CONCLUSÃO E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	133
7.1. PRINCIPAIS CONCLUSÕES	133
7.1.1. <i>Parâmetros eléctricos das cargas</i>	133
7.1.2. <i>Parâmetros eléctricos dos cabos</i>	133
7.1.3. <i>Análise de rede e medições no terreno</i>	134
7.2. CONTRIBUIÇÕES MAIS IMPORTANTES	135
7.3. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	136
BIBLIOGRAFIA	137
ANEXO A	A 1
A.1. APRESENTAÇÃO DO PROGRAMA <i>FEMM</i>	A 1
A.1.1. <i>FEMM</i>	A 1
A.1.2. <i>Matlab e Simulink</i>	A 3
A.1.3. <i>OctaveFEMM e Lua</i>	A 4
A.2. PROGRAMAS DE APOIO AO <i>FEMM</i>	A 4
A.2.1. <i>AutoCAD</i>	A 4
A.2.2. <i>Microsoft Excel</i>	A 7
A.3. UTILIZAÇÃO DO FEMM NOS CÁLCULOS DE INDUTÂNCIAS	A 9
A.3.1. <i>Método das quedas de tensão</i>	A 9
A.4. UTILIZAÇÃO DO FEMM NOS CÁLCULOS DE CAPACIDADES	A 15
A.4.1. <i>Método de Curto-circuito</i>	A 15
A.4.2. <i>Cabo de três condutores simétricos e uma bainha metálica</i>	A 18
A.4.3. <i>Cabo de quatro condutores simétricos e uma bainha metálica</i>	A 19
A.4.4. <i>Cabo de quatro condutores trapezoidais e uma bainha metálica</i>	A 20
ANEXO B	B 1
B.1. EXPRESSÕES DAS CAPACIDADES DE SERVIÇO C_S	B 1
B.1.1. <i>Capacidade de serviço (C_S) de um cabo de um condutor e uma bainha</i>	B 1
B.1.2. <i>Capacidade de serviço (C_S) de um cabo de dois condutores e uma bainha</i>	B 2
B.1.3. <i>Capacidade de serviço (C_S) de um cabo de três condutores e uma bainha</i>	B 3
B.1.4. <i>Capacidade de serviço (C_S) de um cabo de quatro condutores e uma bainha</i>	B 5
B.2. CAPACIDADE DE UM CABO DE TRÊS CONDUTORES E UMA BAINHA METÁLICA - MÉTODO DOS POTENCIAIS	B 13

<i>B.2.1. Expressões de base</i>	<i>B 13</i>
<i>B.2.2. Demonstração</i>	<i>B 15</i>
B.3. CAPACIDADE DE UM CABO DE QUATRO CONDUTORES E UMA BAINHA METÁLICA - MÉTODO DOS POTENCIAIS	B 23
<i>B.3.1. Expressões de base</i>	<i>B 23</i>
B.4. FOLHAS DE CÁLCULO EXCEL UTILIZADAS NAS SIMULAÇÕES	B 31
ANEXO C	C 1
ANEXO D	D 1
D.1. MEDIÇÕES PASSIVAS DOS CABOS SEM CARGAS	D 1
<i>D.1.1. Medidor de indutância</i>	<i>D 1</i>
<i>D.1.2. Multímetro</i>	<i>D 2</i>
<i>D.1.3. Wattímetro</i>	<i>D 2</i>
<i>D.1.4. Fonte de alimentação</i>	<i>D 2</i>
D.2. MEDIÇÕES ACTIVAS DA REDE EM FUNCIONAMENTO COM CARGAS	D 3
<i>D.2.1. Analisador de rede</i>	<i>D 3</i>

LISTA DAS FIGURAS

Figura 2.1: Sistema TN - Esquema eléctrico no caso duma rede de IP. _____	10
Figura 2.2: Sistema TN - Pormenores de ligação no candeeiro. _____	11
Figura 2.3: Reactância indutiva para cabos armados enterrados e $f = 60\text{Hz}$. Para 50 Hz, multiplicar por 5 / 6 - Fonte: SIEMENS, 1979, referenciada em [2-7, p. III-47]. _____	18
Figura 2.4: Exemplo de um esquema unifilar a utilizar nos cálculos do dimensionamento da rede de IP. _____	21
Figura 2.5: Circuito equivalente com carga concentrada no extremo da linha de IP. _____	22
Figura 3.1: Circuito duma luminária com lâmpada de descarga. _____	33
Figura 3.2: Fotografia duma lâmpada de vapor de sódio a alta pressão (SAP) de 250 W. ____	34
Figura 3.3: Circuito de alimentação de díodos em série. _____	37
Figura 3.4: Circuito de alimentação com díodos em paralelo, utilizando resistências equalizadoras. _____	37
Figura 3.5: Concepção original de luminária utilizando os WLEDs (Fotografia cortesia da SCHRÉDER). _____	38
Figura 3.6: Modelo eléctrico simplificado duma luminária com lâmpada SAP, balastro ferromagnético e circuito de arranque. _____	39
Figura 3.7: Fotografia dos circuitos internos duma luminária utilizada no terreno. _____	44
Figura 3.8: Gráfico dos valores do condensador de compensação necessários para obter um determinado factor de potência, em função do factor de potência original da luminária sem compensação. _____	45
Figura 4.1: Esquema equivalente em Π de um cabo com três parâmetros eléctricos: resistência R , indutância longitudinal L , e capacidade transversal C . _____	50
Figura 4.2: Fotografia de um cabo VAV 4x10 (de 10 mm^2 de secção com condutores ligeiramente torçados, com um determinado passo helicoidal). _____	51
Figura 4.3: Efeito helicoidal sobre o comprimento real dos condutores. _____	52
Figura 4.4: Linha monofásica com dois condutores paralelos. a) Disposição geométrica e parâmetros dimensionais; b) Circuito equivalente. _____	55

Figura 4.5: Indutâncias aparentes numa linha com três condutores (mais um condutor de retorno) com simetria triangular, utilizando simplificações nos cálculos. _____	57
Figura 4.6: Gráfico da indutância aparente dos condutores numa linha trifásica triangular, comparando os valores teóricos com as simulações do <i>FEMM</i> . _____	58
Figura 4.7: Cabo com quatro condutores numa simetria quadrada; condutores 1, 2 e 3 (fases), e condutor 4 (neutro). _____	58
Figura 4.8: Gráfico da indutância aparente dos condutores numa linha trifásica triangular, comparando os valores teóricos com as simulações do <i>FEMM</i> . _____	62
Figura 4.9: Comparação da densidade do fluxo magnético num cabo VAV 4x10 utilizando o <i>FEMM</i> : a) Sem bainha metálica; b) Com bainha metálica ferromagnética. _____	63
Figura 4.10: Conjunto de fotografias em corte de um mesmo cabo VAV 4x10, com diferentes geometrias de disposição dos condutores. _____	66
Figura 4.11: Características físicas de um cabo de três condutores, com bainha metálica, utilizadas para comparar os diversos métodos de cálculo das capacidades (exemplo numérico). _____	70
Figura 4.12: Gráfico das capacidades de serviço em função dos raios dos condutores, para um cabo de três condutores com bainha metálica, comparando os resultados dos diversos métodos de cálculo. _____	70
Figura 4.13: Características físicas de um cabo de quatro condutores com bainha metálica, utilizadas para comparar dois métodos de cálculo das capacidades (exemplo numérico). _____	71
Figura 4.14: Gráfico das capacidades de serviço em função dos raios dos condutores, para um cabo de quatro condutores com bainha metálica, comparando dois métodos de cálculo. _____	72
Figura 4.15: Circuitos equivalentes a utilizar no cálculo das capacidades de serviço C_{S1} e C_{S2} para condutores com geometria trapezoidal. _____	74
Figura 4.16: Gráfico das capacidades de serviço C_{S1} e C_{S2} para cabo VAV 4x10, com distorção trapezoidal. _____	75
Figura 4.17: Esquema equivalente de um condutor definido com dois parâmetros eléctricos: resistência R e indutância aparente longitudinal L . _____	76
Figura 4.18: Modelo simplificado de rede onde todas as cargas são equilibradas e colocadas no fim do troço. A corrente de neutro é considerada nula. _____	78
Figura 4.19: Situação real onde as cargas são distribuídas. As correntes parciais de neutro não são nulas e afectam os valores das quedas de tensão. _____	79
Figura 4.20: Rede trifásica com nove candeeiros. _____	81

Figura 4.21: Ligações entre a bainha e o condutor de neutro numa rede de IP. _____	86
Figura 4.22: Gráfico das variações das quedas de tensão - comparação entre o modelo com cargas concentradas e o modelo com cargas distribuídas. _____	89
Figura 5.1: Esquema simplificado da rede de IP da instalação existente utilizada para medições no terreno. _____	93
Figura 5.2: a) Distância física entre as extremidades do cabo a medir; b) Método de curto-circuito, em que se ligam as extremidades. _____	96
Figura 5.3: Método de curto-circuito, aplicado aos cabos a medir no terreno. _____	96
Figura 5.4: Esquema de ligações para medir as resistências R_X de dois condutores em série (curto-circuitados numa extremidade). _____	98
Figura 5.5: Esquema de ligações para medir as indutâncias de dois condutores curto-circuitados numa extremidade. _____	100
Figura 5.6: Medições das capacidades utilizando o método de curto-circuito. _____	101
Figura 5.7: Exemplo de esquema de ligações para medir as capacidades. _____	102
Figura 5.8: Fotografias da instalação utilizada em laboratório para medir os parâmetros eléctricos duma luminária nova. _____	103
Figura 5.9: Colocação das sondas de tensão e de corrente no armário de distribuição de alimentação. _____	105
Figura 5.10: Colocação das sondas de tensão e de corrente nos candeeiros. _____	106
Figura 5.11: Fotografias da instalação utilizada no terreno para medir os parâmetros eléctricos duma rede IP em funcionamento. _____	107
Figura 5.12: Etapas na preparação do local e nas medições experimentais. _____	108
Figura 6.1: Resultados experimentais das medições de luminárias individuais; a) Medições em laboratório; b) Medições no terreno. _____	116
Figura 6.2: Resultados experimentais das medições de tensão na fase 1, em função do tempo (medições efectuadas no armário de distribuição na origem do troço em análise): a) Escala normal; b) Escala ampliada para mostrar pormenores das variações de tensão. _____	121
Figura 6.3: Resultados experimentais das medições do factor de potencia da fase 1 (medições tomadas no armário de distribuição na origem do troço em análise). _____	123
Figura 6.4: Resultados experimentais das medições das correntes (medições tomadas no armário de distribuição na origem do troço em análise): a) Fase 1; b) Fase 2; c) Neutro; d) Bainha (escala ampliada). _____	124

Figura A.1: Divisão de um espaço em pequenos triângulos por zonas onde as grandezas são praticamente iguais.	A 2
Figura A.2: Definição do tamanho dos triângulos, utilizando a parâmetro <i>Mesh size</i> .	A 2
Figura A.3: Interações entre o <i>Simulink</i> , o <i>Matlab</i> e o <i>FEMM</i> .	A 3
Figura A.4: Janela que alerta da presença de elementos isolados no desenho importado no <i>FEMM</i> .	A 5
Figura A.5: Janela que alerta da presença de uma quantidade muito elevada de triângulos no <i>FEMM</i> .	A 6
Figura A.6: Situações problemáticas com <i>AutoCAD</i> , e as soluções propostas (Primeira parte).	A 6
Figura A.7: Situações problemáticas com <i>AutoCAD</i> , e as soluções propostas (Segunda parte).	A 7
Figura A.8: Janela que define o tipo de ficheiro .dxf no <i>AutoCAD</i> .	A 7
Figura A.9: Definição do passo de integração fixo no tempo.	A 8
Figura A.10: Janela de <i>Circuit Properties</i> que indica o valor da queda de tensão por condutor (<i>Voltage Drop</i>).	A 9
Figura A.11: Capacidades parciais num cabo de três condutores e uma bainha metálica.	A 16
Figura A.12: Método de curto-circuito para um cabo de três condutores e uma bainha.	A 17
Figura A.13: Método de curto-circuito para um cabo de três condutores simétricos e uma bainha metálica.	A 18
Figura A.14: Método de curto-circuito para um cabo de quatro condutores simétricos e uma bainha metálica.	A 19
Figura A.15: Método de curto-circuito para um cabo de quatro condutores trapezoidais e uma bainha metálica (Primeira parte).	A 20
Figura A.16: Método de curto-circuito para um cabo de quatro condutores trapezoidais e uma bainha metálica (Segunda parte).	A 21
Figura B.1: Capacidade de serviço de um cabo de um condutor e uma bainha.	B 1
Figura B.2: Capacidade de serviço de um cabo de dois condutores e uma bainha.	B 2
Figura B.3: Capacidade de serviço de um cabo de dois condutores e uma bainha (esquemas equivalentes).	B 2

Figura B.4: Capacidade de serviço de um cabo de três condutores e uma bainha.	_____	B 3
Figura B.5: Capacidade de serviço de um cabo de três condutores e uma bainha (esquemas equivalentes).	_____	B 4
Figura B.6: Capacidade de serviço de um cabo de quatro condutores e uma bainha (simetria quadrada).	_____	B 5
Figura B.7: Capacidade de serviço de um cabo de quatro condutores e uma bainha (simetria quadrada - esquemas equivalentes).	_____	B 6
Figura B.8: Transformação polígono - estrela de quatro ramos.	_____	B 7
Figura B.9: Capacidade de serviço de um cabo de quatro condutores com distorção trapezoidal e uma bainha.	_____	B 9
Figura B.10: Capacidade de serviço de um cabo de quatro condutores com distorção trapezoidal e uma bainha (esquemas equivalentes).	_____	B 10
Figura B.11: Cabo de três condutores e uma bainha metálica.	_____	B 13
Figura B.12: Cabo de três condutores e uma bainha (método das imagens).	_____	B 16
Figura B.13: Cabo de três condutores. Raio equivalente e distância equivalente entre o condutor 1 e os outros dois condutores.	_____	B 19
Figura B.14: Cabo de quatro condutores e uma bainha.	_____	B 23
Figura B.15: Cabo de quatro condutores e respectivas imagens.	_____	B 26

LISTA DOS QUADROS E TABELAS

Quadro 2.1 – Correntes nominais, convencionais de funcionamento e de curto-circuito para fusíveis gG, utilizados nas redes de IP. _____	12
Quadro 2.2 – Cabos utilizados nas redes subterrâneas de IP. _____	12
Quadro 2.3 – Resistividades dos cabos em serviço normal e em caso de curto-circuito. ____	17
Quadro 2.4 – Resistência óhmica para os cabos utilizados nas redes de IP. _____	17
Quadro 2.5 – Reactância indutiva para cabos subterrâneos, 400 V e $f = 50$ Hz. _____	18
Quadro 2.6 – Reactância indutiva para cabos subterrâneos, 400 V e $f = 50$ Hz. _____	19
Quadro 2.7 – Valores numéricos previstos pelo projectista. _____	27
Quadro 3.1 – Rendimento energético de algumas tecnologias de lâmpadas. _____	30
Quadro 3.2 – Valores dos parâmetros eléctricos indicados nas placas sinaléticas dos circuitos internos da luminária utilizada no terreno. _____	44
Quadro 3.3 – Valores dos parâmetros eléctricos calculados numa luminária. _____	46
Quadro 3.4 – Valores dos parâmetros eléctricos das luminárias a utilizar nas simulações. ____	47
Quadro 4.1 – Indutâncias para cabo VAV 4x10 sem e com bainha metálica ferromagnética. 65	
Quadro 4.2 – Capacidade de serviço para um, dois, três e quatro condutores, com bainha metálica, em função das capacidades individuais. _____	68
Quadro 4.3 – Capacidade de serviço para cabo de três condutores com bainha metálica. ____	69
Quadro 4.4 – Valores da capacidade de serviço para cabo VAV 4x10 (simetria ideal quadrada). _____	73
Quadro 4.5 – Valores das capacidades de serviço, para cabo VAV 4x10, com distorção trapezoidal, utilizando o <i>FEMM</i> . _____	74
Quadro 4.6 – Valores corrigidos médios da capacidade de serviço para cabo VAV 4x10 com distorção trapezoidal. _____	76
Quadro 4.7 – Valores numéricos dos parâmetros eléctricos dos condutores a utilizar em simulação, para cabo VAV 4x10. _____	77
Quadro 4.8 – Impedância para cabo VAV 4x10. _____	80

Quadro 4.9 – Correntes de fase e de neutro para cada segmento de uma rede de nove candeeiros.	85
Quadro 4.10 – Quedas de tensão - comparação numérica entre os diversos métodos de cálculo (com cargas concentradas).	88
Quadro 4.11 – Valores numéricos das quedas de tensão calculadas.	89
Quadro 5.1 – Medições das indutâncias e conjunto de expressões.	99
Quadro 5.2 – Valores numéricos das indutâncias aparentes por condutor, a comparar com os valores a medir no terreno para cabo VAV 4x10.	100
Quadro 6.1 – Valores numéricos das luminárias individuais, com lâmpadas de vapor de sódio a alta pressão (SAP).	117
Quadro 6.2 – Valores numéricos das resistências por condutor.	118
Quadro 6.3 – Valores numéricos das indutâncias por condutor de 300 m.	119
Quadro 6.4 – Valores numéricos previstos pelo projectista.	120
Quadro 6.5 – Medições das correntes por segmento, por condutor e por luminária individual.	125
Quadro 6.6 – Valores médios dos parâmetros eléctricos das luminárias do troço da rede em análise, com seis anos de idade.	127
Quadro 6.7 – Compilação dos parâmetros eléctricos da rede analisada.	130
Quadro A.1 – Definições das correntes nos "Circuits properties definitions".	A 10
Quadro A.2 – Exemplos de valores de correntes definidos nas simulações.	A 11
Quadro A.3 – Valores dos parâmetros e expressões a utilizar nas simulações.	A 13

Capítulo 1. INTRODUÇÃO

Historicamente, a primeira utilização da electricidade foi a iluminação das ruas e das habitações. Desde a primeira lâmpada eléctrica inventada pelo Americano Thomas Edison, a iluminação continua a ser uma das mais importantes aplicações da electricidade. Até ao ponto em que, em Portugal, a palavra "luz" é sinónimo de "electricidade"!

Para as Autarquias, as despesas de Iluminação Pública representam uma boa parte do seu orçamento eléctrico. Por exemplo, só no Concelho de Loulé (Algarve), são ligados mais de 35 000 pontos de luz de Iluminação Pública. Isto constitui um dos motivos na origem deste trabalho de dissertação.

1.1. ENQUADRAMENTO

As instalações de Iluminação Pública, tal como quaisquer instalações eléctricas, devem respeitar um conjunto de normas e regulamentos específicos. Para simplificar o trabalho, os projectistas utilizam regras de cálculo simplificadas disponíveis em muitas referências, tal como [1-1]. Essas regras permitem uma relativa simplicidade dos cálculos.

Contudo, as pesquisas preliminares, efectuadas pelo autor deste trabalho, confirmam que existem poucos estudos no terreno que confirmem os métodos de cálculo utilizados.

Por outro lado, em termos de análise, as redes de Iluminação Pública têm uma grande vantagem comparativamente às redes de Distribuição, pois, as cargas são conhecidas. Um projectista que elabora uma rede de Distribuição deve incluir factores estatísticos conhecidos

como "factores de simultaneidade". Como as cargas estão sempre presentes a 100 % nas redes de Iluminação Pública, o valor do factor de simultaneidade é de um. Isto facilita a análise, que este trabalho de dissertação se propõe efectuar, o que constitui um outro factor que estabelece a escolha do estudo das redes de Iluminação Pública.

Finalmente, o autor desta dissertação ocupa uma posição privilegiada de projectista e de fiscal de obras. Assim, tem acesso a uma grande quantidade de instalações de Iluminação Pública, onde as medições no terreno podem ser efectuadas.

1.2. OBJECTIVOS

O principal objectivo deste trabalho de dissertação é de analisar os métodos simplificados utilizados pelos projectistas na elaboração de projectos de Iluminação Pública, e comparar os valores obtidos com os valores calculados por métodos mais avançados.

Uma das conclusões dessas comparações será a de determinar e, eventualmente, alertar quais são os limites desses métodos simplificados. Os resultados preliminares das pesquisas que se efectuam, confirmam a quantidade muito limitada de estudos detalhados, no terreno, dos parâmetros eléctricos utilizados nas redes de Iluminação Pública.

Por esse motivo, propõe-se um conjunto de medições no terreno que, até agora, não foram efectuadas nem documentadas.

1.3. METODOLOGIA DO TRABALHO

A metodologia proposta é dividida em três grandes partes.

A primeira parte apresenta os métodos de cálculo simplificados, e utilizados pelos projectistas na concepção dum projecto eléctrico de Iluminação Pública.

A segunda parte é teórica, e apresenta diversos métodos avançados de cálculo dos parâmetros eléctricos, nomeadamente nas cargas (luminárias), nos cabos, e nas redes trifásicas. Os cálculos teóricos são confirmados por meio de métodos numéricos, utilizando a técnica dos elementos finitos.

A terceira parte consiste em medir, no terreno, os parâmetros eléctricos duma rede de Iluminação Pública existente. Esta parte apresenta a cuidadosa escolha dum local onde foram feitas as medições no terreno. Também são apresentados os protocolos experimentais, os resultados das medições e uma análise dos mesmos, comparando os resultados previstos com as medições realizadas.

1.4. ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

Resumindo, o texto da dissertação é dividido da forma que se apresenta seguidamente.

1.4.1. Capítulo 1 - Introdução

O Capítulo 1 constitui a introdução onde são expostos o enquadramento, os objectivos, a organização do texto, e os limites deste trabalho.

1.4.2. Capítulo 2 - Métodos de cálculo simplificados utilizados pelos projectistas

O Capítulo 2 apresenta os métodos de cálculo típicos, e simplificados, utilizados pelos projectistas, para a elaboração de projectos de redes de Iluminação Pública. Este capítulo inclui também as exigências técnicas impostas pelo Distribuidor.

1.4.3. Capítulo 3 - Fontes de iluminação e modelo eléctrico das cargas

O Capítulo 3 apresenta as tecnologias das fontes de iluminação utilizadas na Iluminação Pública. Existem hoje muitas tecnologias: lâmpadas incandescentes, fluorescentes, de descarga, de alta e de baixa pressão, de iodeto metálico e, recentemente, de tecnologia a LED. Considerando a utilização ainda generalizada das lâmpadas de vapor de sódio a alta pressão, uma análise mais pormenorizada deste tipo de iluminação será posteriormente apresentada.

1.4.4. Capítulo 4 - Parâmetros eléctricos dos cabos e modelo avançado de rede trifásica

O Capítulo 4 apresenta, em primeiro lugar, os parâmetros eléctricos dos cabos utilizados nas redes de Iluminação Pública. Este capítulo utiliza, demonstrações teóricas e por via de métodos numéricos com elementos finitos (FEMM), para determinar os principais parâmetros eléctricos dos cabos. As pesquisas preliminares que foram feitas para elaborar este plano de trabalho, confirmam a complexidade dos cálculos na determinação dos parâmetros eléctricos. Quase todos os estudos sobre os cabos aplicam-se geralmente à Média e à Alta Tensão. O estudo deste trabalho incide particularmente nos cabos de Baixa Tensão onde não existem grandes desenvolvimentos.

Em segundo lugar, o Capítulo 4 apresenta um modelo avançado de rede trifásica, tendo em vista uma modelização mais pormenorizada das correntes e das quedas de tensão.

1.4.5. Capítulo 5 - Apresentação da metodologia experimental

O Capítulo 5 apresenta o protocolo experimental das medições. Este capítulo está subdividido da seguinte forma:

- ◆ Apresentação da rede existente de Iluminação Pública que foi o objecto das medições;
- ◆ Apresentação dos cálculos originalmente utilizados na sua concepção;
- ◆ Determinação dos parâmetros que podem ser medidos no terreno;

- ◆ Apresentação do protocolo experimental (método de medição e colocação das sondas de corrente e de tensão);
- ◆ Medição dos parâmetros eléctricos.

Também são identificados, neste capítulo, os limites das medições. Assim, será importante sublinhar que as medições serão feitas no terreno, numa situação real. Esta escolha tem origem no facto de que a construção duma rede de Iluminação Pública, perfeitamente controlada em condições de laboratório, apresenta um custo proibitivo. Neste contexto, não é possível elaborar uma experiência totalmente controlada em laboratório. A solução proposta consiste em aproveitar uma instalação bem conhecida e típica, onde o controlo das variáveis permite acertar os resultados das medições. Essa instalação existe e é apresentada no Capítulo 5.

1.4.6. Capítulo 6 - Resultados experimentais, análise e compilação

O Capítulo 6 apresenta os resultados das medições efectuadas no terreno. Os resultados previstos desta parte da dissertação irão confirmar os métodos de cálculo. A análise permitirá comparar os resultados experimentais com os cálculos do projecto original.

1.4.7. Capítulo 7 - Conclusões e desenvolvimentos futuros

No Capítulo 7 tiram-se conclusões, onde os principais resultados são resumidos, em que as contribuições são expostas e as possibilidades de desenvolvimentos futuros são discutidas.

1.5. LIMITES DO TRABALHO APRESENTADO

Os limites desta dissertação são descritos nos parágrafos seguintes. Contudo, os limites descritos seguidamente, poderão ser pontos de partida de desenvolvimentos futuros baseados neste trabalho.

Estudo luminotécnico – Um aspecto fundamental da iluminação é, precisamente, de iluminar, ou seja, uma etapa essencial de qualquer projecto de iluminação consiste em determinar a quantidade de pontos de luz necessários para uma zona de intervenção. Neste contexto, existem regulamentos que exigem, por exemplo, um determinado nível de iluminação [1-2]. Contudo, este aspecto luminotécnico não foi discutido neste trabalho. Apenas os parâmetros eléctricos foram estudados e analisados.

Modelo simplificado de carga – O comportamento altamente não linear das lâmpadas de descarga e a sua complexidade de modelização, impede a elaboração dum modelo completo no contexto deste trabalho. Por esse motivo, apenas um modelo eléctrico simplificado duma luminária com lâmpadas de vapor de sódio a alta pressão (SAP) em regime permanente será apresentado e utilizado nos cálculos da rede de Iluminação Pública.

Medições no terreno vs medições no laboratório – Por razões económicas, não foi possível elaborar e realizar uma experiência totalmente controlada em laboratório, incluindo enterramento de cabos de referência, etc. Por este motivo, foram privilegiadas medições no terreno de instalações existentes. Assim, mesmo com um projecto perfeitamente executado, alguns parâmetros não foram acessíveis. Contudo, o local escolhido para efectuar as medições, permite obter resultados fiáveis nas melhores condições disponíveis.

Regimes transitórios – No contexto deste trabalho, não era realista analisar em pormenor os regimes transitórios. Os resultados obtidos são em regime permanente. Contudo, foi possível observar alguns fenómenos transitórios de longo prazo, tal como a estabilização duma lâmpada de descarga de vapor de sódio a alta pressão, que precisa de algum tempo para estabilizar e atingir as suas características optimizadas.

Capítulo 2. MÉTODOS DE CÁLCULOS SIMPLIFICADOS UTILIZADOS PELOS PROJECTISTAS

O Capítulo 2 apresenta os métodos de cálculo simplificados utilizados pelos projectistas na concepção de projecto de Iluminação Pública.

2.1. CONCEITOS GERAIS

2.1.1. Tipos de redes de distribuição de energia eléctrica

Existem diferentes tipos de redes de distribuição de energia eléctrica:

- ◆ Rede de Iluminação Pública (referida como IP)
- ◆ Rede de Baixa Tensão (referida como BT)
- ◆ Rede de Média Tensão (referida como MT)

As redes de Iluminação Pública (IP) englobam os circuitos eléctricos que fornecem energia eléctrica aos candeeiros utilizados para iluminar as vias rodoviárias (ruas, avenidas, auto-estradas, etc.). Por natureza, essas vias são públicas. Geralmente, o Distribuidor tem acordos específicos com os diversos Municípios e Câmaras Municipais para a manutenção e o pagamento dessa energia.

As redes de Baixa Tensão (BT) englobam os circuitos eléctricos que fornecem energia eléctrica aos utentes (moradias, edifícios, etc.), cujas tensões de serviço são 400/230 V. Cada

ponto de entrada (baixada) é equipado dum contador para facturar a energia fornecida ao utente.

As redes de Média Tensão (MT) englobam os circuitos eléctricos que fornecem energia eléctrica aos Postos de Transformação. As redes podem ser aéreas ou subterrâneas. No Algarve, as tensões de serviço são normalmente de 15 kV.

Dos três tipos de rede acima apresentados, só os circuitos de Iluminação Pública serão objecto deste trabalho.

2.1.2. Distribuidor de energia eléctrica

Nos últimos anos, o mercado da energia eléctrica foi liberalizado. A EDP-Distribuição não é a única entidade que pode fornecer energia eléctrica em Portugal. Contudo, a EDP (*Energia de Portugal*) tem ainda um papel regulador fundamental nas redes de distribuição de Baixa Tensão e nas redes de Iluminação Pública. Por essa razão, os documentos normativos publicados pela EDP estão ainda em vigor e são a base das exigências técnicas regulamentares a aplicar na concepção das redes de BT e de IP.

2.2. REDES DE ILUMINAÇÃO PÚBLICA

2.2.1. Características das redes de IP

A) CARACTERÍSTICAS GERAIS DAS REDES DE IP

Uma rede de Iluminação Pública é basicamente uma rede especializada de distribuição de energia eléctrica. As redes de iluminação pública têm as seguintes características gerais:

- ◆ Tensão de serviço: 400/230 V (trifásico) ou 230 V (monofásico);
- ◆ Frequência: 50 Hz;
- ◆ Distribuição: Aérea ou subterrânea.

Em regra, as luminárias das redes de IP utilizam uma tensão de serviço de 230 V monofásica.

As redes podem ser aéreas ou subterrâneas. As redes aéreas utilizam cabos onde coexistem rede de distribuição de BT e rede de IP. Por exemplo, o cabo aéreo LXS 4x50+16 tem cinco condutores: três condutores de 50 mm² são utilizados pela rede de BT, o condutor de 16 mm² é utilizado pela rede de IP, e um condutor de 50 mm² é utilizado como neutro e é comum às duas redes. Assim, no caso de rede aérea, a distribuição da IP é monofásica.

As redes subterrâneas de IP utilizam cabos trifásicos independentes da rede de BT. Os cabos LSVAV 4x16 (alumínio) e VAV 4x10 (cobre) são os mais comuns.

No contexto deste trabalho, apenas será analisada uma distribuição subterrânea, com cabos dedicados exclusivamente à IP.

B) CARACTERÍSTICAS ESPECIAIS DAS REDES DE IP

Para além das características convencionais da rede de distribuição, as redes de IP têm algumas particularidades, tal como:

- ◆ Funcionamento de noite (excepto em caso de manutenção);
- ◆ Comando centralizado por célula fotoelétrica no Posto de Transformação;
- ◆ Contador de energia centralizado no Posto de Transformação;
- ◆ Carga distribuída ao longo do percurso da canalização eléctrica;
- ◆ Carga constante e conhecida.

Esta última característica permite calcular, com uma boa precisão, as correntes de serviço nas canalizações. O facto de que todas as cargas são ligadas em permanência, permite definir que o factor de simultaneidade será sempre igual a um (1,0). Por esta razão, as expressões não incluem especificamente este factor normalmente associado com as redes de BT.

2.2.2. Protecções utilizadas das redes de IP

A) REGIME DE NEUTRO

No seu modelo tipo da *Memória Descritiva e Justificativa* para projectos de infra-estruturas, a EDP-Distribuição especifica que "o sistema de terras adoptado será o de Terra pelo Neutro (TN)" [2-4, p. 5]. O sistema TN tem as seguintes características [2-9, p. 32]:

- ◆ O neutro está ligado directamente à terra de serviço;
- ◆ As massas são ligadas directamente ao neutro;
- ◆ A terra de neutro (de serviço) e a terra de protecção das massas (de protecção) constituem um sistema único.

Assim, "o princípio da ligação ao neutro é transformar todo o defeito de isolamento em curto-circuito monofásico fase/neutro" [2-7, p. V-46].

A Figura 2.1 e a Figura 2.2 apresentam esta configuração, no caso duma rede de IP.

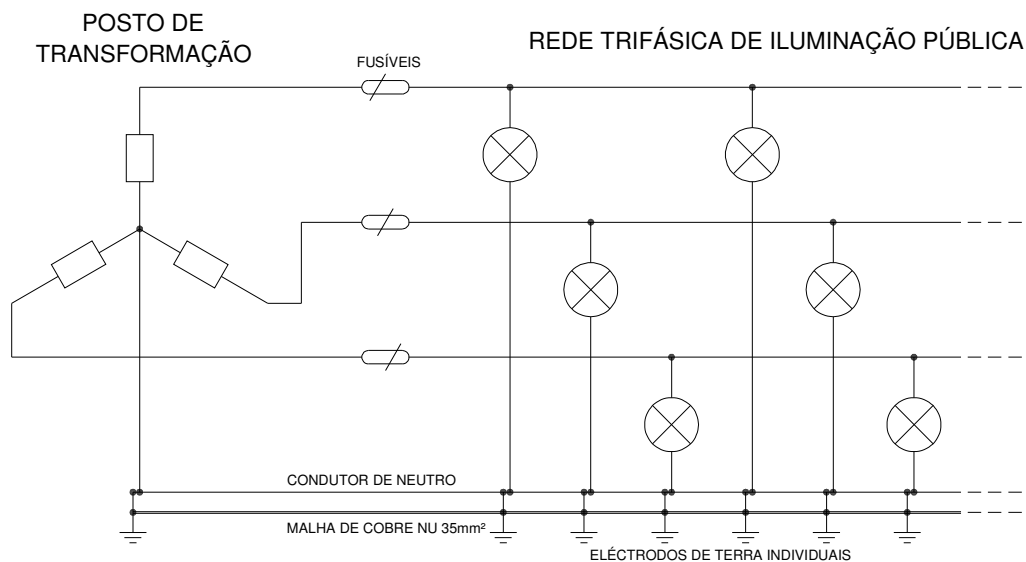


Figura 2.1: Sistema TN - Esquema eléctrico no caso duma rede de IP.

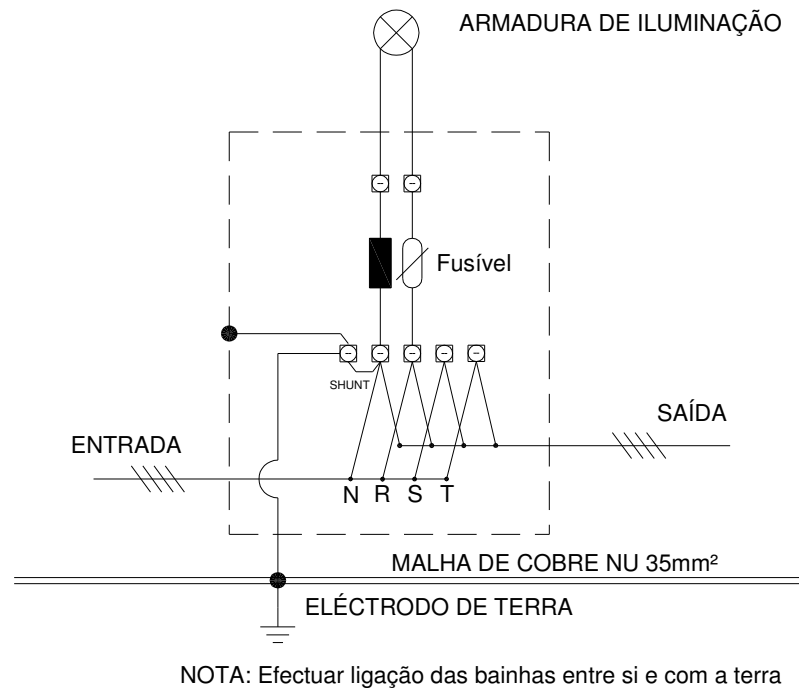


Figura 2.2: Sistema TN - Pormenores de ligação no candeeiro.

Uma malha de cobre nu de 35 mm^2 de secção acompanha muitas vezes a canalização. Isto permite melhorar sensivelmente o valor da resistência da terra. O documento normativo DRE-C11-040/N - "Guia técnico de terras" [2-3] descreve a colocação das terras.

B) PROTECÇÃO POR FUSÍVEIS

As protecções nas redes de distribuição utilizam fusíveis do tipo gG, conforme documento normativo da EDP, DMA-C63-201/N [2-2, parágrafo 6.2.1.1, p. 6]. De acordo com [2-10, p. 12], "os dispositivos gG podem garantir protecção simultânea contra curto-circuito e sobrecarga". O Quadro 2.1 apresenta os valores das correntes nominais, correntes convencionais de funcionamento e correntes de curto-circuito mínimo para fusíveis gG.

Quadro 2.1 – Correntes nominais, convencionais de funcionamento e de curto-circuito para fusíveis gG, utilizados nas redes de IP.

FUSÍVEIS gG		
Correntes nominais In ⁽¹⁾ [A]	Correntes convencionais de funcionamento If ⁽²⁾ [A]	Correntes de curto-circuito Icc(min) ⁽³⁾ [A]
16	28	65
20	35	85
25	44	110
32	51	150
40	64	190
50	80	250
63	101	320
80	128	425
100	160	580
125	200	715
160	256	950
200	320	1250
250	400	1650
315	504	2200
400	640	2840

⁽¹⁾ Quadro 13.1., artigo 128º do RSRDEEBT, Decreto-Regulamentar n.º94/84

⁽²⁾ Quadro 13.1., artigo 128º do RSRDEEBT, Decreto-Regulamentar n.º94/84

⁽³⁾ EDP, 2008b

2.2.3. Canalizações eléctricas utilizadas nas redes de IP

O Quadro 2.2 apresenta os cabos utilizados nas redes subterrâneas de IP.

Quadro 2.2 – Cabos utilizados nas redes subterrâneas de IP.

CABOS (com bainha metálica)	MATERIAL	SECÇÃO FASE	SECÇÃO NEUTRO	Iz ⁽¹⁾ Ao ar [A]	Iz ⁽²⁾ Enterrados [A]
VAV 4X10	Cobre (Cu)	10mm ²	10mm ²	65	80
LSVAV 4x16	Alumínio (Al)	16 mm ²	16 mm ²	70	90
LSVAV 4x35	Alumínio (Al)	35 mm ²	35 mm ²	105	130

Iz - Intensidade da corrente máxima admissível na canalização

⁽¹⁾ De acordo com os Quadros 3.4 e 3.10 do Decreto Regulamentar n.º 90/84

⁽²⁾ De acordo com os Quadros 3.5 e 3.9 do Decreto Regulamentar n.º 90/84

NOTA: Um cabo dentro dum tubo é considerado "ao ar".

Todos os cabos são equipados numa bainha metálica. As tensões de serviço são de 400/230 V.

2.3. CÁLCULO DAS PROTECÇÕES E DAS CANALIZAÇÕES

2.3.1. Conceitos gerais

A) SITUAÇÕES A CONSIDERAR

Na selecção das protecções e das canalizações eléctricas devem considerar as três situações seguintes:

- ◆ Protecções contra sobrecargas;
- ◆ Protecções contra curto-circuito;
- ◆ Limitar a queda de tensão.

As protecções e as canalizações são determinadas em função de parâmetros apresentados seguidamente.

B) FUNCIONAMENTO DAS PROTECÇÕES CONTRA SOBRECARGAS

De acordo com o artigo 128º do *Regulamento de Segurança de Redes de Distribuição de Energia Eléctrica em Baixa Tensão* [2-1, RSRDEEBT, Decreto-Regulamentar n.º94/84], as características de funcionamento dos aparelhos de protecção contra sobrecargas devem satisfazer simultaneamente as seguintes condições:

- ◆ a) $I_f \leq 1,45 I_z$
- ◆ b) $I_s \leq I_n \leq I_z$

em que:

I_n é a intensidade nominal do aparelho de protecção [A];

I_f é a intensidade de corrente convencional de funcionamento do aparelho de protecção [A];

I_z é a intensidade de corrente máximo admissível na canalização [A];

I_s é a intensidade de corrente de serviço da canalização [A].

As correntes I_n , I_f e I_z são determinadas em função de valores predefinidos (ver Quadro 2.1 e Quadro 2.2). Só a corrente I_s é baseada em fórmulas (ver Secção 2.3.4).

C) FUNCIONAMENTO DAS PROTECÇÕES CONTRA CURTO-CIRCUITOS

A determinação das protecções contra os curto-circuitos é baseada sobre dois conceitos fundamentais da física:

- ◆ O tempo de fadiga térmica dos cabos;
- ◆ O aumento da temperatura da canalização em curto-circuito.

De acordo com o primeiro conceito, os cabos podem suportar, sem danos consideráveis, durante um determinado tempo máximo à passagem da corrente de curto-circuito.

De acordo com o artigo 130º do RSRDEEBT [2-1], o tempo máximo é determinado através da expressão:

$$t = \left(k \cdot \frac{s}{I_{cc}} \right)^2 \quad (2.1)$$

em que:

t - Tempo de corte do aparelho de protecção, com o máximo de 5 segundos [s];

s - Secção do cabo [mm²];

I_{cc} - Corrente de curto-circuito [A];

k - Constante , cujo valor é, para canalização isolada a PVC: 115 para o cobre e 74 para o alumínio.

O tempo máximo de 5 s consiste numa margem de segurança, no qual os cabos não serão danificados pela passagem da corrente de curto-circuito.

De acordo com o segundo conceito, o aumento da temperatura aumenta também a resistividade do condutor em curto-circuito. Em condição de funcionamento normal, a temperatura considerada é de 20° C. Em caso de curto-circuito, o artigo 130°, comentário 7, do RSRDEEBT [2-1], especifica um factor de 1,5 para a temperatura média da duração do curto-circuito.

O Artigo 130° anteriormente referido utiliza a seguinte expressão para o cálculo da corrente de curto-circuito:

$$I_{cc} = \frac{0,95 \cdot U}{\rho_{ccF} \cdot \frac{l_F}{s_F} + \rho_{ccN} \cdot \frac{l_N}{s_N}} \quad (2.2)$$

em que:

I_{cc} - Corrente de curto-circuito [A];

U - Tensão de serviço (230 V em caso de fase-neutro ou 400 V no caso de fase-fase) [V];

ρ_{ccF} - Resistividade do condutor de fase em curto-circuito [$\Omega \times \text{mm}^2/\text{m}$];

ρ_{ccN} - Resistividade do condutor de neutro em curto-circuito [$\Omega \times \text{mm}^2/\text{m}$];

l_F - Comprimento do condutor de fase [m];

l_N - Comprimento do condutor de neutro [m];

s_F - Secção do condutor de fase [mm^2];

s_N - Secção do condutor de neutro [mm^2].

2.3.2. Impedância da linha

Deverá ser determinada a impedância da linha para calcular a corrente de serviço.

A) RESISTÊNCIA ÓHMICA DOS CONDUTORES

A resistência óhmica R dum cabo é calculada utilizando a resistividade ρ do material condutor (cobre ou alumínio) de acordo com a expressão seguinte:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{s} \quad (2.3)$$

em que:

R - Resistência óhmica do cabo [Ω];

ρ - Resistividade do material do condutor [$\Omega \times \text{mm}^2 / \text{m}$];

l - Comprimento do condutor [m];

s - Secção do condutor [mm^2].

Contudo, vimos que *o valor da resistividade é função da temperatura*. Em caso de curto-circuito, a resistividade aumenta dum factor de cerca de 1,5 (alínea C da Secção 2.3.1). Os valores das resistividades em serviço normal e em curto-circuito são apresentados no Quadro 2.3.

Quadro 2.3 – Resistividades dos cabos em serviço normal e em caso de curto-circuito.

MATERIAL	RESISTIVIDADE ρ POR CONDUTOR [$\Omega \times \text{mm}^2 / \text{m}$]	
	Serviço normal (ρ 20° C)	Curto-circuito ($1,5 \times \rho$ 20° C)
Cobre (Cu)	0,01723	0,026
Alumínio (Al)	0,028	0,042

Utilizando a expressão (2.3) e os valores do Quadro 2.1, podemos calcular a resistência óhmica para cada tipo de cabo utilizado nas redes de IP. Os resultados são apresentados no Quadro 2.4.

Deve notar-se que, de acordo com a expressão (2.2), o factor 0,95 deverá ser utilizado nos cálculos das correntes de curto-circuito, utilizando os valores de resistividade óhmica referidos no Quadro 2.4.

Quadro 2.4 – Resistência óhmica para os cabos utilizados nas redes de IP.

TIPO DE CABO	MATERIAL	SECÇÃO [mm^2]		RESISTÊNCIA ÓHMICA R POR CONDUTOR [Ω / m]	
		FASE	NEUTRO	Serviço normal	Curto-circuito
VAV 4x10	Cobre (Cu)	10	10	$1,73 \times 10^{-3}$	$2,60 \times 10^{-3}$
LSVAV 4x16	Alumínio (Al)	16	16	$1,74 \times 10^{-3}$	$2,61 \times 10^{-3}$
LSVAV 4x35	Alumínio (Al)	35	35	$0,79 \times 10^{-3}$	$1,19 \times 10^{-3}$

B) REACTÂNCIA INDUTIVA DOS CONDUTORES

Considerando que a reactância indutiva dos cabos é normalmente desprezável nas de redes de BT, os fabricantes de cabos não fornecem essa informação. Contudo, foi possível obter indirectamente este valor utilizando o gráfico da Figura 2.3.

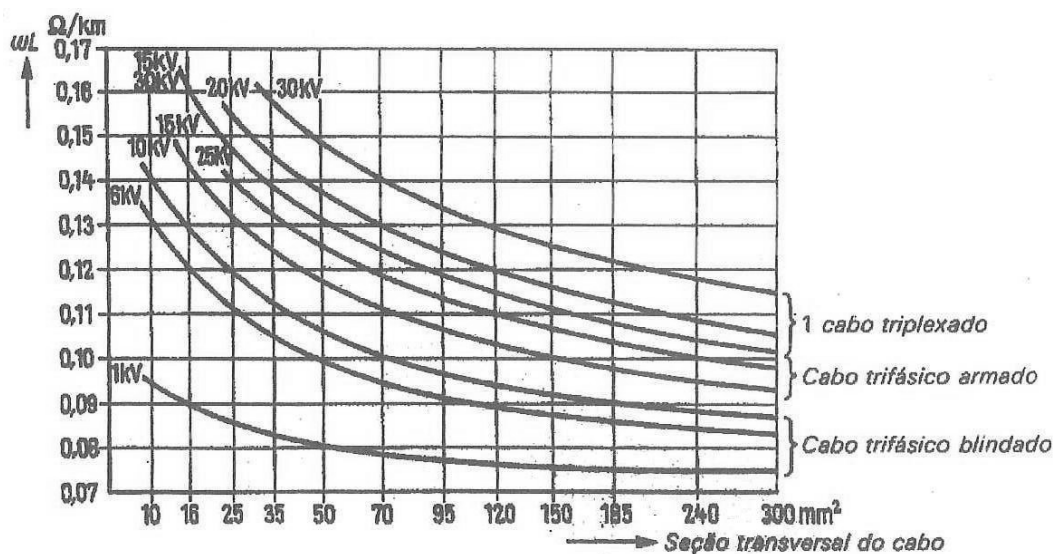


Figura 2.3: Reactância indutiva para cabos armados enterrados e $f = 60\text{Hz}$. Para 50 Hz, multiplicar por 5 / 6 - Fonte: SIEMENS, 1979, referenciada em [2-7, p. III-47].

Analisando este gráfico, é possível obter os valores aproximados das reactâncias para tensão de 400 V (0,4 kV). Os valores são fornecidos no Quadro 2.5.

Quadro 2.5 – Reactância indutiva para cabos subterrâneos, 400 V e $f = 50\text{ Hz}$.

TIPO DE CABO	SECÇÃO DO CABO	REACTÂNCIA INDUTIVA ωL [Ω/km]		
		1 kV a 60 Hz	0,4 kV a 60 Hz (Deduzida)	0,4 kV a 50 Hz
VAV 4x10	10 mm ²	0,095	0,09	0,075
LSVAV 4x16	16 mm ²	0,090	0,087	0,073
LSVAV 4x35	35 mm ²	0,083	0,08	0,067

C) IMPEDÂNCIA DA LINHA A UTILIZAR NOS CÁLCULOS

O valor da impedância por condutor é calculado, combinando os valores do Quadro 2.4 e do Quadro 2.5. O Quadro 2.6 apresenta os resultados.

Quadro 2.6 – Reactância indutiva para cabos subterrâneos, 400 V e $f = 50$ Hz.

TIPO DE CABO	RESISTÊNCIA ÓHMICA R POR CONDUTOR [Ω / km]		REACTÂNCIA INDUTIVA ωL [Ω / km]	$\frac{R}{\omega L}$	
	Normal	Curto-Circuito		Normal	Curto-circuito
VAV 4x10	1,73	2,60	0,075	23	35
LSVAV 4x16	1,74	2,61	0,073	24	36
LSVAV 4x35	0,79	1,19	0,067	12	18

Considerando que, em todos os casos, o valor da resistividade óhmica R é mais de dez vezes superior à reactância indutiva ωL , podemos concluir que, em regime permanente nas redes de IP, a reactância indutiva da canalização eléctrica é desprezável em relação à resistividade óhmica. Só o valor da resistência óhmica será utilizado nos cálculos, considerando duas situações:

- ◆ Regime em funcionamento normal, utilizando a expressão (2.3) e o Quadro 2.6;
- ◆ Regime em curto-circuito, utilizando a expressão (2.2) e o Quadro 2.6.

2.3.3. Impedância da carga

As luminárias utilizadas nas redes de IP utilizam lâmpadas de descarga com circuito de arranque via um balastro ferromagnético. Globalmente a carga é indutiva, com factor de potência $\cos\phi$ na ordem de 0,85.

As luminárias são especificadas em função da potência da lâmpada em watt [W]. Por essa razão, a impedância de carga é definida em função da potência da lâmpada e do factor de potência $\cos \varphi$.

Partindo de um sistema equilibrado, as potências estão relacionadas pela expressão (2.4):

$$\dot{S} = P + j \cdot Q \quad (2.4)$$

em que:

\dot{S} - Potência complexa por fase [VA];

P - Potência activa por fase [W] - este parâmetro corresponde à potência da lâmpada;

Q - Potência reactiva por fase [VAr]

Em função do ângulo de desfasagem φ , da expressão (2.4), vem:

$$\frac{P}{Q} = \frac{\cos \varphi}{\sin \varphi} \Rightarrow \dot{S} = P \cdot (1 + j \cdot \tan \varphi) \quad (2.5)$$

A impedância de carga pode ser definida pela expressão (2.6), ou seja:

$$\dot{Z} = \frac{U^2}{\dot{S}^*} \quad (2.6)$$

em que:

\dot{Z} - Impedância de carga complexa [Ω];

U - Módulo da tensão [V];

\dot{S}^* - Conjugado da potência complexa [VA].

Substituindo a expressão (2.5) em (2.6), obtém-se:

$$\dot{Z} = \frac{U^2}{P \cdot (1 - j \cdot \tan \varphi)} \quad (2.7)$$

$$\dot{Z} = \frac{U^2}{P} \cdot \cos^2 \varphi + j \cdot \frac{U^2}{P} \cdot \sin \varphi \cdot \cos \varphi \quad (2.8)$$

cujo valor em módulo, será:

$$|\dot{Z}| = Z = \frac{U^2}{P} \cdot \cos \varphi \quad (2.9)$$

O $\cos \varphi$ é também conhecido como o factor de potência.

2.3.4. Cálculo das correntes de serviço

No seu modelo tipo da *Memória Descritiva e Justificativa* para projectos de infra-estruturas, a EDP-Distribuição exige que seja aplicada a seguinte regra nos cálculos das redes de IP [2-4, p. 5):

Para o dimensionamento da rede de IP [Iluminação pública] considerar o total da carga em cada saída concentrada no extremo do circuito de IP.

A Figura 2.4 apresenta um exemplo de esquema unifilar com esta exigência.

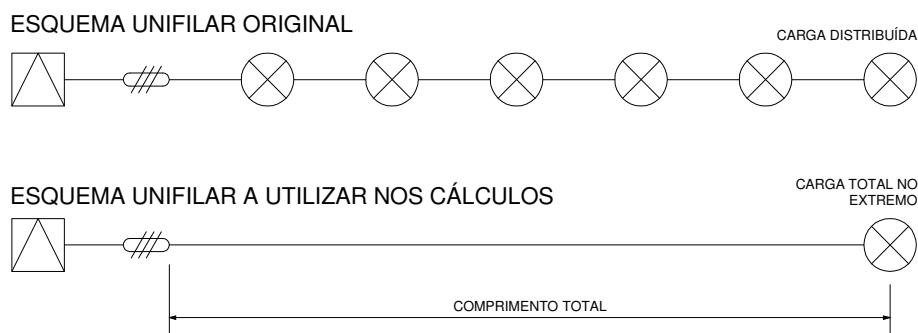


Figura 2.4: Exemplo de um esquema unifilar a utilizar nos cálculos do dimensionamento da rede de IP.

O circuito equivalente é apresentado na Figura 2.5.

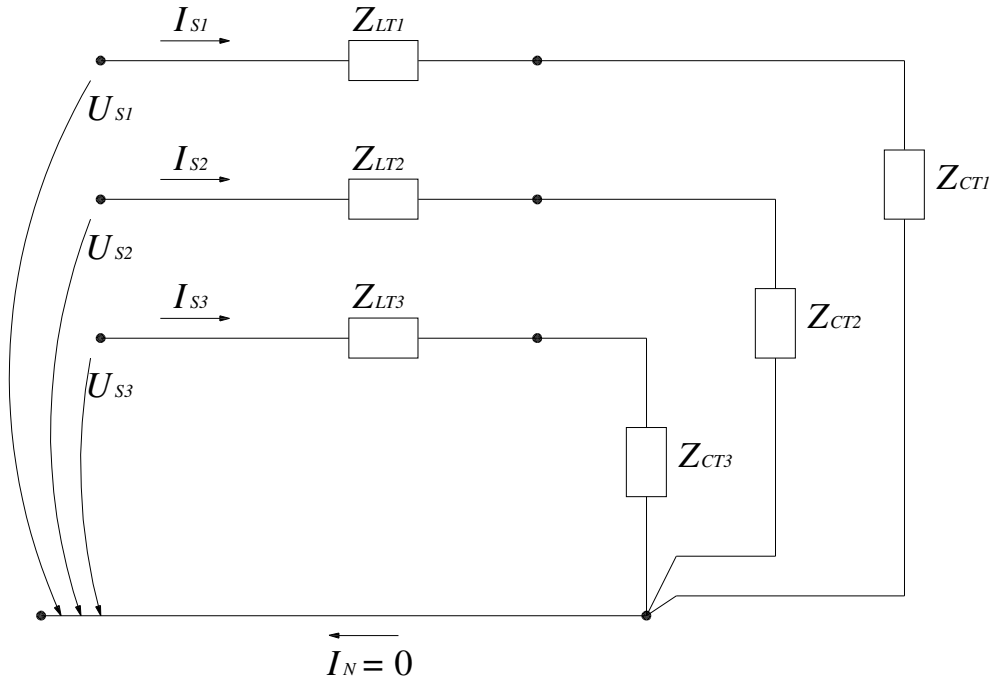


Figura 2.5: Circuito equivalente com carga concentrada no extremo da linha de IP.

em que:

Z_{LT1} , Z_{LT2} , e Z_{LT3} - Impedâncias aparentes dos condutores de fase 1, 2, e 3, respectivamente [Ω];

Z_{CT1} , Z_{CT2} , e Z_{CT3} - Impedâncias das cargas totais por fase 1, 2, e 3, respectivamente [Ω];

I_{S1} , I_{S2} , e I_{S3} - Correntes nas fases 1, 2, e 3, respectivamente [A];

$I_N \equiv I_4$ - Corrente de neutro [A];

U_{S1} , U_{S2} , e U_{S3} - Tensões simples entre fases 1, 2, e 3, e neutro, respectivamente [V].

Considerando uma rede trifásica equilibrada onde a corrente de neutro é nula, podem ser estabelecidas as igualdades referidas nas seguintes expressões:

$$I_N = 0 \quad (2.10)$$

$$U_{S1} = U_{S2} = U_{S3} = U_S \quad (2.11)$$

$$I_{S1} = I_{S2} = I_{S3} = I_S \quad (2.12)$$

e em módulo:

$$Z_{LT1} = Z_{LT2} = Z_{LT3} = Z_{LT} \quad (2.13)$$

$$Z_{CT1} = Z_{CT2} = Z_{CT3} = Z_{CT} \quad (2.14)$$

Nestas condições, a corrente de serviço, por fase, é calculada de acordo com a expressão (2.15):

$$I_S = \frac{U_S}{Z_{LT} + Z_{CT}} \quad (2.15)$$

em que:

I_S - Corrente de serviço [A];

U_S - Tensão de serviço simples [V];

Z_{LT} - Impedância do condutor por fase (comprimento total) [Ω];

Z_{CT} - Impedância da carga por fase [Ω].

Considerando uma corrente de neutro nula, o que origina nesse condutor uma queda de tensão nula, só tem interesse a impedância do condutor de fase.

Para o cálculo da impedância de linha Z_{LT} , e aplicando as conclusões da alínea C da Secção 2.3.2 sobre a impedância da linha em funcionamento normal, é possível utilizar a expressão (2.3) e substituir:

$$Z_{LT} \cong \rho \cdot \frac{l}{s} \quad (2.16)$$

Para o cálculo da impedância de carga Z_{CT} por fase, substituindo a expressão (2.9) em (2.14), obtém-se:

$$Z_{CT} = \frac{U_S^2}{P} \cdot \cos \varphi \quad (2.17)$$

Substituindo as expressões (2.16) e (2.17) em (2.18), obtém-se finalmente a corrente de serviço para uma fase:

$$I_s = \frac{U_s}{\rho \cdot \frac{l}{s} + \frac{U_S^2}{P} \cdot \cos \varphi} \quad (2.18)$$

2.3.5. Cálculo das correntes de curto-circuito

Utilizando a expressão regulamentar (2.2) e os valores da resistividade óhmica referidos no Quadro 2.6, é possível calcular directamente as correntes de curto-circuito.

Essa expressão é válida no caso do condutor de neutro ligado à terra. Esta situação é típica numa rede de IP onde cada candeeiro é ligado à terra.

Deve-se notar que essa expressão só permite calcular um valor aproximado da corrente de curto-circuito, uma vez que não está contemplada a impedância do transformador na origem da rede. Essa impedância diminui o valor da corrente de curto-circuito. O factor de 0,95 foi provavelmente introduzido em parte para ter em conta a impedância a montante do transformador.

2.3.6. Cálculo das quedas de tensão

O valor das quedas de tensão (qdt) não tem influência sobre as protecções a utilizar. As quedas de tensão são importantes para garantir uma tensão mínima no ponto de utilização. No caso das redes de IP, este valor é importante para garantir o arranque das lâmpadas, particularmente sensível à tensão que as alimentam.

Existem muitas fórmulas de cálculo para as quedas de tensão, com vários graus de precisão. Por exemplo, [2-9, p. 10] não considera as reactâncias dos condutores no cálculo da queda de tensão. A sua expressão simplificada, válida para rede trifásica equilibrada (corrente de neutro nula), é dada por:

$$\Delta U = I_s \cdot \rho \cdot \frac{l}{s} \cdot \cos \varphi \Rightarrow \Delta U (\%) = 100 \cdot \frac{\Delta U}{U_s} \quad (2.19)$$

em que:

I_s - Corrente de serviço [A];

U_s - Tensão de serviço simples [V];

ρ - Resistividade [$\Omega \times \text{mm}^2 / \text{m}$];

l - Comprimento do cabo [m];

s - Secção do cabo [mm^2];

$\cos \varphi$ - Factor de potência;

U - Queda de tensão [V];

$\Delta U (\%)$ - Queda de tensão em percentagem [%].

Existem outras expressões para calcular com mais precisão as quedas de tensão [2-8, p. 5-6]. Contudo, considerando que o factor de potência é relativamente elevado (normalmente da ordem de 0,85 ou superior para redes de IP), e considerando que a impedância de linha

corresponda à expressão (2.16), o grau de precisão da expressão (2.19) será suficiente para os cálculos.

As exigências do Distribuidor relativamente às quedas de tensão nas redes de IP são da ordem de 5 %, no máximo, nas zonas urbanas, e de 8 %, no máximo, nas zonas rurais.

2.3.7. Procedimento da escolha final das canalizações e das protecções

A referência [2-8, p. 10] sugere o seguinte procedimento para determinar as secções dos cabos e as protecções a utilizar:

- ◆ 1. Calcular a corrente de serviço I_s ;
- ◆ 2. Seleccionar a protecção que satisfaz $I_n > I_s$;
- ◆ 3. Escolher uma secção de cabo, de modo a que $I_z > I_n$;
- ◆ 4. Verificar que $I_f \leq 1,45 I_z$. Caso não se verifique, aumentar a secção e repetir a verificação;
- ◆ 5. Verificar as condições de curto-circuito. Caso não se verifiquem, aumentar a secção a repetir a verificação.

A mesma referência [2-8, p. 10] conclui que "esses passos garantem que é atingida uma solução admissível, sem alterar as hipóteses iniciais".

Considerando a necessidade de verificar a queda de tensão, podemos incluir um sexto passo:

- ◆ 6. Verificar a queda de tensão. Caso não se verifiquem, aumentar a secção e repetir a verificação.

2.4. DADOS DE UM PROJECTO REALIZADO

O autor dessa dissertação realizou um projecto de IP de acordo com os métodos simplificados de cálculo apresentados nesse capítulo. O Quadro 2.7 resume muito sucintamente os dados essenciais deste projecto. Os dados serão comparados com as medições no terreno, e com os métodos mais avançados de cálculo apresentados nos próximos capítulos.

Quadro 2.7 – Valores numéricos previstos pelo projectista.

Potência das cargas	$\cos \varphi$	Tensão nominal	Corrente de serviço por fase	Corrente de neutro	Queda de tensão ($l = 300$ m)
3 x 250 W por fase (rede equilibrada)	0,85	230 V	3,80 A	0,00 A	1,29 V (0,6 %)

Capítulo 3. FONTES DE ILUMINAÇÃO E MODELO ELÉCTRICO DAS CARGAS

O objectivo deste capítulo é de apresentar, dum forma qualitativa, as características eléctricas gerais das fontes de iluminação. A complexidade de modelização e do comportamento altamente não linear das lâmpadas de descarga impede a elaboração dum modelo completo no contexto deste trabalho. Contudo, é apresentado um modelo eléctrico suficientemente pormenorizado dum luminária com lâmpadas de vapor de sódio a alta pressão (SAP), e será posteriormente utilizado nos cálculos da rede de IP.

3.1. APRESENTAÇÃO

Existe uma grande diversidade de tecnologias que permitem produzir luz. A escolha dum tecnologia para as redes de Iluminação Pública depende de diversos factores:

- ◆ Fluxo luminoso produzido pela fonte luminosa, que permite determinar a quantidade de ponto de luz a instalar, em função do nível de iluminação requerido;
- ◆ Rendimento energético que permite determinar o consumo energético dos pontos de luz;
- ◆ Perdas internas;
- ◆ Vida útil das lâmpadas e dos componentes dos circuitos de alimentação e de arranque, que permite limitar os custos de manutenção das redes de IP.

Existem outros factores de natureza fotométrica, tal como o rendimento cromático da fonte luminosa, que determina a cor da luz produzida. Contudo, conforme discutido no Capítulo 1, a análise dos factores fotométricos ultrapassa os limites deste trabalho.

Mesmo se a fotometria não faz parte deste trabalho de dissertação, é importante saber que a quantidade de luz produzida por uma fonte luminosa é medida em lúmen [lm]. Esta grandeza corresponde ao fluxo luminoso emitido pela fonte luminosa. Consoante a tecnologia, o fluxo luminoso apresenta grandes variações em função da potência consumida. Por esse motivo, o rendimento energético é medido em lúmen por watt [lm/W]. Por exemplo, uma lâmpada incandescente de 60 W produz o mesmo fluxo luminoso que uma lâmpada fluorescente compacta de 11 W.

Assim, o rendimento energético é um factor muito importante na selecção duma tecnologia. O Quadro 3.1 apresenta o rendimento energético de algumas tecnologias que produzem iluminação:

Quadro 3.1 – Rendimento energético de algumas tecnologias de lâmpadas.

TECNOLOGIA	RENDIMENTO ENERGÉTICO (*) [lm/W]
Incandescente	12~15
Halogéneo	30
Vapor de mercúrio	65
Fluorescente	100
LEDs	≥ 100
Iodeto metálico	115
Vapor de sódio a alta pressão (SAP)	135
Vapor de sódio a baixa pressão	200

(*) Fonte: SCHRÉDER

A análise do Quadro 3.1 permite concluir que as lâmpadas de vapor de sódio a alta pressão (SAP) têm o rendimento energético muito bom. Isto explica, em parte, a sua utilização quase generalizada nas redes de IP.

As secções seguintes descrevem, sucintamente, as diversas tecnologias disponíveis para as redes de IP.

3.2. LÂMPADAS INCANDESCENTES

3.2.1. Princípio de funcionamento

A tecnologia das lâmpadas incandescentes é a mais antiga para produzir luz. Utiliza o princípio físico fundamental pelo qual um metal aquecido emite luz. Um filamento, tipicamente em tungsténio, é aquecido por uma corrente eléctrica. Para impedir a sua evaporação, o filamento é mantido no interior duma lâmpada cheia de gás inerte, sem oxigénio, e isolado do ar ambiente.

A produção deste tipo de lâmpadas é muito económica. Também, não precisa de circuitos especiais para funcionar: basta ligar à rede eléctrica. Contudo, o seu rendimento energético muito baixo faz com que esta tecnologia seja cada vez menos utilizada.

3.2.2. Lâmpada de tungsténio

Até recentemente, era o tipo de lâmpada mais utilizado nas habitações.

O metal aquecido é o tungsténio, e é mantido isolado do meio ambiente por intermédio duma lâmpada em vidro em atmosfera de azoto. A ausência de oxigénio impede ao filamento de vaporizar-se de imediato. Contudo, o metal evapora-se com o tempo e o filamento abre após um período de tempo relativamente curto. Isto explica a razão de que a vida útil deste tipo de lâmpadas é muito inferior às utilizadas noutras tecnologias. Para reduzir o encadeamento, o vidro é, por vezes, branqueado.

As lâmpadas de tungsténio têm um custo de produção inferior a qualquer outro tipo. Contudo, o seu rendimento energético é muito baixo. Por esse motivo, não são utilizadas nas redes de IP.

3.2.3. Lâmpadas de halogéneo

A lâmpada de halogéneo é uma variante das lâmpadas incandescentes. O filamento é de tungsténio, com gás composto de halogéneo e vidro em quartzo. Este conjunto de modificações faz com que os átomos de tungsténio evaporados voltem ao filamento após a sua viagem até ao vidro em quartzo. O resultado é uma vida útil mais longa, uma lâmpada mais pequena, um fluxo luminoso constante ao longo da vida útil da lâmpada, e uma cor mais branca. Alguns modelos (particularmente com reflector integrado) precisam duma tensão reduzida para funcionar.

Mas, tal como as lâmpadas de tungsténio, o rendimento energético muito baixo desta tecnologia, faz com que este tipo de lâmpadas não seja utilizado nas redes de IP.

3.3. LÂMPADAS DE DESCARGA

3.3.1. Princípio geral de funcionamento

As lâmpadas de descarga têm dois eléctrodos nas suas extremidades, entre os quais é colocada uma coluna de gás condutor ionizado que emite luz visível ou ultravioleta [3-1, p. 93]. Inicialmente, um circuito de arranque estabelece a condução do gás, e é desligado depois. Esta coluna de gás ionizado tem um comportamento complexo altamente não linear, em que, por exemplo, a corrente diminui com a tensão (resistência de característica negativa). Em corrente alternada, a limitação da corrente é assegurada por uma indutância (ou "balastro" ferromagnético) em série com a lâmpada. Este balastro faz com que a lâmpada funcione numa região estável da sua relação tensão-corrente [3-1, p. 98]. Na prática, foi determinado que,

para uma frequência da rede de 50 Hz, esta estabilidade é mantida quando a relação entre a tensão na lâmpada e a tensão da rede é de 0,5 [3-1, p. 99].

O balastro faz com que a carga global seja indutiva, com baixo factor de potência. Por esse motivo, é colocado em paralelo, com o circuito, um condensador de compensação, conforme se apresenta na Figura 3.1.

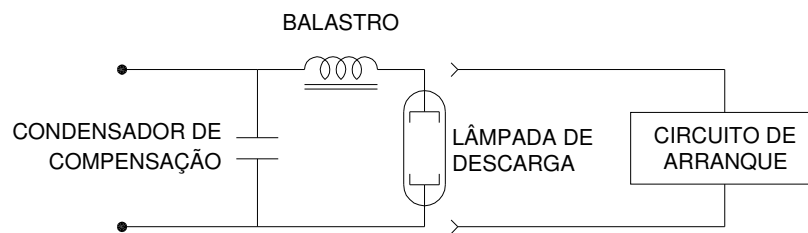


Figura 3.1: Circuito duma luminária com lâmpada de descarga.

As lâmpadas de descarga têm custos de produção superiores às lâmpadas incandescentes, e necessitam de circuitos adicionais para funcionar. Mas, mesmo assim, o rendimento energético e a vida útil das lâmpadas compensam. É o tipo de tecnologia mais utilizado nas redes de IP.

As lâmpadas de descarga cabem dentro duas categorias [3-2, p. 253]: 1) lâmpadas de descarga que emitem radiações visíveis; e 2) lâmpadas de descarga que emitem luz ultravioleta que iluminam os revestimentos fluorescentes que produzem uma luz visível. As lâmpadas de vapor de sódio e de mercúrio enquadram-se na primeira categoria, e as fluorescentes na segunda categoria. Assim, existem vários tipos de lâmpadas de descarga, nomeadamente:

- ◆ Vapor de sódio a alta pressão (SAP);
- ◆ Vapor de sódio a baixa pressão;
- ◆ Vapor de mercúrio;
- ◆ Iodeto metálico;
- ◆ Fluorescente.

Existem outros tipos de lâmpadas de descarga, tal como os tubos de néon utilizados nos painéis publicitários. Contudo, só foram considerados, nos parágrafos seguintes, os tipos de lâmpadas de descarga utilizados nas redes de IP.

3.3.2. Lâmpada de vapor de sódio a alta pressão (SAP)

As lâmpadas de vapor de sódio a alta pressão (SAP), são as lâmpadas mais utilizadas nas redes de IP. A Figura 3.2 apresenta uma lâmpada SAP típica.

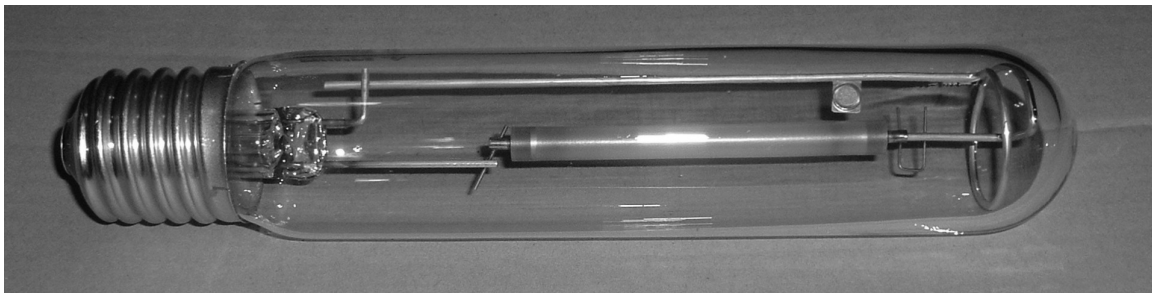


Figura 3.2: Fotografia duma lâmpada de vapor de sódio a alta pressão (SAP) de 250 W.

O pequeno tubo central (ou "queimador") contém o gás ionizado que emite luz. A lâmpada propriamente dita é transparente. O aumento de pressão permite alargar o espectro electromagnético [3-2, p. 280], e produzir uma luz de cor amarela menos monocromática e mais agradável.

A modelização detalhada duma simples lâmpada SAP é extremamente complexa ([3-5], [3-6], [3-7], [3-8]). Por este motivo, só o seu funcionamento em regime permanente é considerado no contexto deste trabalho. Um modelo eléctrico simplificado é apresentado na Secção 3.5.1.

3.3.3. Lâmpada de vapor de sódio a baixa pressão

As lâmpadas de vapor de sódio a baixa pressão têm o rendimento energético mais elevado (ver Quadro 3.1). Por razão das baixas pressões utilizadas, a produção deste tipo de lâmpadas é mais económica do que lâmpadas do tipo SAP. Contudo, essas lâmpadas têm uma cor amarela muito monocromática, pouco agradável, que embora utilizadas em vários países da Europa, o seu uso em Portugal é bastante reduzido.

3.3.4. Lâmpada de vapor de mercúrio

Antigamente, era o tipo de lâmpada mais utilizado nas redes de IP. Este tipo de lâmpada tem uma cor característica, muito fria, quase violeta, com muito mau rendimento cromático. O seu rendimento energético também é fraco. O funcionamento é muito semelhante às luminárias com lâmpadas SAP, mas necessita de eléctrodo auxiliar adicional para o arranque [3-1, p. 104]. Essas lâmpadas não são utilizadas nas novas instalações, e as instalações existentes, que utilizam esta tecnologia, são pouco a pouco substituídas por luminárias com lâmpadas SAP.

3.3.5. Lâmpada de iodeto metálico

Este tipo de lâmpada de descarga utiliza uma mistura de gás à base de iodeto metálico, que alarga o espectro electromagnético visível emitido. O resultado é uma fonte luminosa com uma cor branca muito agradável aos olhos (muito próxima da luz natural). Ainda pouco utilizado nas redes de IP, este tipo de iluminação é particularmente utilizado em zonas específicas, tal como praças, jardins públicos e arranjos exteriores pedonais com alta visibilidade pública. O autor deste trabalho fez um projecto com este tipo de iluminação, que pode ser visto na Rua Vasco da Gama em Quarteira, Algarve.

Recentemente, alguns modelos deste tipo de lâmpadas utilizam circuitos com balastos electrónicos, sem indutâncias em série. Isto permite reduzir as perdas internas e garante um factor de potência não inferior a 0,98 indutivo.

3.3.6. Lâmpada fluorescente

O gás ionizado emite uma luz ultravioleta que excita os revestimentos fluorescentes colocados no interior do tubo da lâmpada. Esta excitação emite uma luz visível. Com esta tecnologia, o fluxo luminoso é directamente proporcional à superfície coberta de substâncias fluorescentes. Considerando que o diâmetro dos tubos fluorescentes tem valor normalizado constante, isto implica que o fluxo luminoso é directamente proporcional ao comprimento dos mesmos. Esta tecnologia permite, com balastro electrónico, uma muito boa regulação do fluxo luminoso.

As lâmpadas fluorescentes são muito utilizadas na iluminação de zonas interiores, tal como os edifícios. Considerando a dificuldade de colocar uma armadura muito comprida no topo duma coluna de 8 m, 10 m ou 12 m de altura, a utilização das lâmpadas fluorescentes nas redes de IP é muito limitada. Alguns fabricantes oferecem modelos de armaduras com lâmpadas fluorescentes, mas a sua utilização é limitada aos parques de estacionamento e às zonas pedonais que necessitam de menos luz, comparativamente às redes viárias.

3.4. OUTRAS TECNOLOGIAS

3.4.1. Luminárias com tecnologia a LEDs

Recentemente, os fabricantes de luminárias fornecem no mercado um tipo de luminárias utilizando os LEDs como fonte luminosa. Os LEDs (*light emitting diode* na literatura Inglesa, ou díodo emissor de luz) são semicondutores que emitem luz quando atravessados por uma corrente contínua.

Até recentemente, não eram disponíveis LEDs com potência luminosa suficiente para uma utilização viária. Tudo mudou com a introdução de LEDs brancas (WLED na literatura Inglesa) para a retro-iluminação dos monitores dos computadores portáteis [3-3b]. Os desenvolvimentos rápidos que foram impulsionados pelo mercado dos portáteis, fazem com que os WLEDs emitam um fluxo luminoso que pode competir com as fontes de luz mais tradicionais, nomeadamente as lâmpadas de descarga.

Os LEDs e os WLEDs precisam duma fonte de corrente contínua para conduzir. Para além disso, os WLEDs precisam duma tensão invulgar de 4 V para acender [3-3b]. Um circuito típico de alimentação de díodo em série é esquematizado na Figura 3.3, em que:

I_{CC} - Corrente contínua [A];

V_{CC} - Tensão nos n díodos [V].

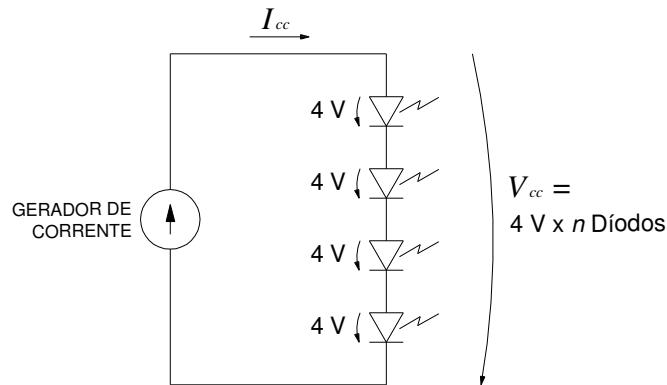


Figura 3.3: Circuito de alimentação de díodos em série.

Contudo, este tipo de circuito apresenta um problema, pois se um dos díodos queimar, toda a cadeia de díodos não pode acender. Para reduzir o impacte desta situação, uma solução consiste em colocar vários circuitos em paralelo (ver Figura 3.4). Contudo, deve-se notar que esta solução necessita de colocação de resistências equalizadoras R_e , para evitar um embalamento térmico [3-4, pp. 80-81].

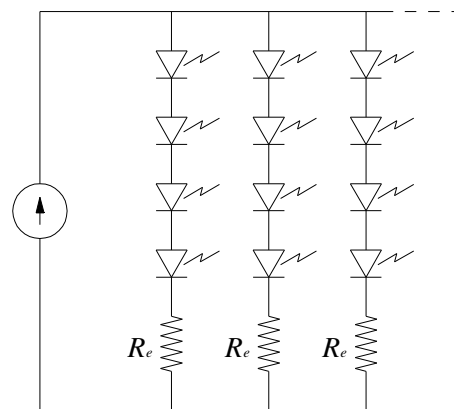


Figura 3.4: Circuito de alimentação com díodos em paralelo, utilizando resistências equalizadoras.

Felizmente para os fabricantes de luminárias para redes viárias, foram também desenvolvidos, em paralelo com os WLEDs, vários circuitos integrados especializados que permitem a gestão eficaz da alimentação dos WLEDs (tal como os controladores TPS61042 [3-3c] e TPS61195

[3-3a] da *Texas Instruments*). Assim, as fontes de alimentação são totalmente electrónicas, sem indutâncias, com um factor de potência não inferior a 0,98 indutivo.

Um dos aspectos interessante desta tecnologia, é que os WLEDs constituem uma fonte luminosa muito pequena, quase pontual. Este facto permite otimizar as ópticas, também de tamanho muito reduzido. Isto permite desenvolver formas exteriores de luminárias muito diferentes das fontes de iluminação convencionais, com lâmpada única, tal como a luminária *Perla* de marca SCHRÉDER (ver Figura 3.5).

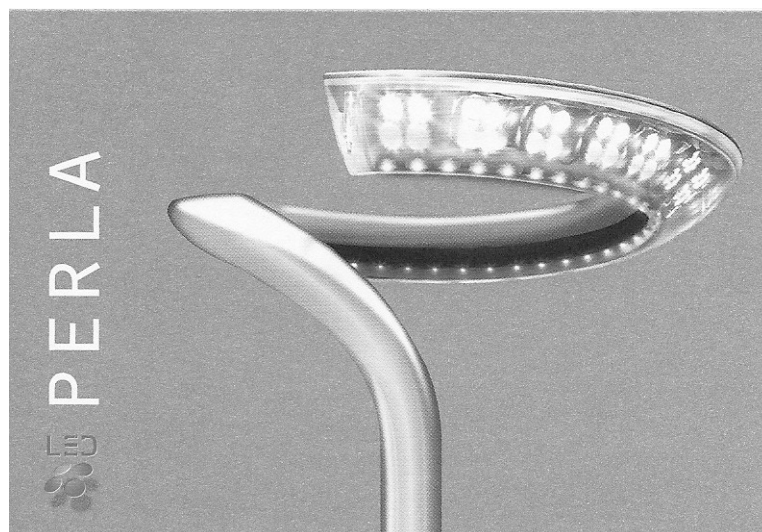


Figura 3.5: Concepção original de luminária utilizando os WLEDs (Fotografia cortesia da SCHRÉDER).

Ainda na sua infância, esta tecnologia será, sem dúvida, cada vez mais utilizada na concepção de luminárias destinadas às redes de IP.

3.4.2. Lâmpada de indução magnética

É uma lâmpada muito invulgar que utiliza um campo magnético para acender. Relativamente às redes de IP, não existem luminárias que utilizam esta tecnologia.

3.5. MODELO ELÉCTRICO DUMA LUMINÁRIA COM LÂMPADA DE VAPOR DE SÓDIO A ALTA PRESSÃO (SAP)

Esta secção estabelece, em primeiro lugar, um conjunto de expressões que permitem calcular os diversos parâmetros eléctricos duma luminária. Em segundo lugar, as mesmas expressões são utilizadas para calcular os parâmetros eléctricos duma luminária real, realizada no terreno.

3.5.1. Expressões da impedância e dos parâmetros eléctricos

A Secção 3.3.1 apresentou uma descrição do funcionamento de luminárias com lâmpadas de descarga, e balastro ferromagnético. O modelo desenvolvido, que a seguir se apresenta, é válido em modo permanente estabilizado, onde o circuito de arranque é desligado. Também, neste modo estabilizado, a lâmpada representa uma carga fixa, onde as fases de não linearidade da lâmpada já não representam variações significativas nos cálculos utilizados nas redes de IP.

A Figura 3.6 apresenta o circuito equivalente simplificado duma luminária com lâmpada SAP, balastro ferromagnético, e circuito de arranque (desligado após o arranque), em que:

R - Resistência equivalente da lâmpada (modo estabilizado) [Ω];

X_L - Reactância indutiva do balastro ferromagnético que limita a corrente [Ω];

X_C - Reactância capacitiva do condensador de compensação [Ω];

\dot{Z}_c - Impedância da luminária (carga) [Ω].

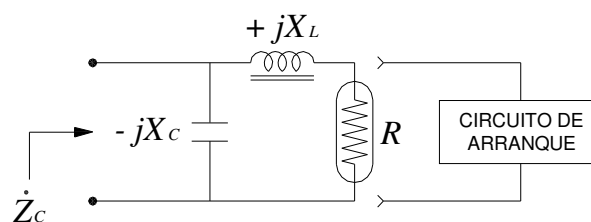


Figura 3.6: Modelo eléctrico simplificado duma luminária com lâmpada SAP, balastro ferromagnético e circuito de arranque.

O condensador de compensação serve para aumentar o factor de potência indutivo.

A impedância da carga \dot{Z}_C deste circuito, virá dada por:

$$\dot{Z}_C = \frac{X_C^2 \cdot R}{R^2 + (X_C - X_L)^2} + j \cdot \frac{X_C \cdot [X_L \cdot (X_C - X_L) - R^2]}{R^2 + (X_C - X_L)^2} \quad (3.1)$$

com:

$$X_C = \frac{1}{\omega \cdot C} \text{ } [\Omega], \quad X_L = \omega \cdot L \text{ } [\Omega], \quad \text{e} \quad \omega = 2\pi \cdot f \quad (3.2)$$

em que:

ω - Pulsação [rad/s];

f - Frequência [Hz];

L - Coeficiente de indução [H];

C - Capacidade [F].

Considerando que esta impedância é indutiva, ou seja, com a parte imaginária positiva (do tipo $a + j \cdot b$), as seguintes condições devem ser respeitadas:

$$X_L \cdot (X_C - X_L) > R^2 \quad (3.3)$$

$$X_C - X_L > 0 \Leftrightarrow X_C > X_L \quad (3.4)$$

Da expressão (3.1), o módulo da impedância é dado por:

$$|\dot{Z}_C| = \frac{X_C \cdot \sqrt{R^2 + X_L^2}}{\sqrt{R^2 + (X_C - X_L)^2}} \quad (3.5)$$

O módulo $|\dot{Z}_C|$ pode também ser calculado da seguinte forma [ver expressão (2.9), Capítulo 2]:

$$|\dot{Z}_c| = \frac{|\dot{U}_s|^2 \cdot \cos \varphi}{P_{CARGA}} \Leftrightarrow P_{CARGA} = \frac{|\dot{U}_s|^2 \cdot \cos \varphi}{|\dot{Z}_c|} \quad (3.6)$$

onde:

\dot{U}_s - Tensão simples de serviço [V];

P_{CARGA} - Potência activa total da luminária [W];

$\cos \varphi$ - Factor de potência da luminária com condensador de compensação [].

Se o fabricante indica a corrente de serviço $|\dot{I}_s|$ da luminária [A], o módulo $|\dot{Z}_c|$ pode também ser calculado da seguinte forma:

$$|\dot{Z}_c| = \frac{|\dot{U}_s|}{|\dot{I}_s|} \quad (3.7)$$

O factor de potência $\cos \varphi$ do circuito da luminária com o condensador de compensação pode ser determinado, sabendo-se que:

$$\dot{Z}_c = |\dot{Z}_c| \cdot \cos \varphi + j|\dot{Z}_c| \cdot \sin \varphi \quad (3.8)$$

e utilizando as expressões (3.1) e (3.5), virá:

$$\frac{X_C^2 \cdot R}{R^2 + (X_C - X_L)^2} = \frac{X_C \cdot \sqrt{R^2 + X_L^2}}{\sqrt{R^2 + (X_C - X_L)^2}} \cdot \cos \varphi \quad (3.9)$$

$$\cos \varphi = \frac{X_C \cdot R}{\sqrt{(R^2 + X_L^2) \cdot (R^2 + (X_C - X_L)^2)}} \quad (3.10)$$

Se o condensador de compensação é desligado do circuito da Figura 3.6, a impedância \dot{Z}_{c0} da carga sem condensador de compensação vale:

$$\dot{Z}_{c0} = R + jX_L \Rightarrow |\dot{Z}_{c0}| = \sqrt{R^2 + X_L^2} \quad (3.11)$$

Sabendo-se que:

$$\dot{Z}_{C0} = |\dot{Z}_{C0}| \cdot \cos \varphi_0 + j|\dot{Z}_{C0}| \cdot \sen \varphi_0 \quad (3.12)$$

o factor de potência $\cos \varphi_0$ da luminária, sem o condensador de compensação, vale:

$$\cos \varphi_0 = \frac{R}{\sqrt{R^2 + X_L^2}} \quad (3.13)$$

Da expressão (3.13), vem:

$$X_L = R \cdot \tan \varphi_0 \quad \text{e} \quad R = X_L \cdot \cotan \varphi_0 \quad (3.14)$$

Combinando a expressão (3.10) com (3.13), o factor de compensação k_c é definido pela expressão (3.15).

$$k_c = \frac{\cos \varphi}{\cos \varphi_0} = \left(\frac{X_C}{\sqrt{R^2 + (X_C - X_L)^2}} \right) \quad (3.15)$$

Combinando a expressão (3.5) do módulo de $|\dot{Z}_c|$ e a expressão (3.10), e após algumas simplificações, é estabelecida a seguinte relação:

$$\frac{|\dot{Z}_c|}{\cos \varphi} = \frac{(R^2 + X_L^2)}{R} \quad (3.16)$$

Combinando a expressão (3.16) com a relação $R = X_L \cdot \cotan \varphi_0$ [expressão (3.14)], virá:

$$X_L = \frac{|\dot{Z}_c|}{\cos \varphi} \cdot \sin \varphi_0 \cdot \cos \varphi_0 \quad (3.17)$$

Com o condensador de compensação desligado do circuito da Figura 3.6, a relação do divisor de tensão, entre a tensão $|\dot{U}_{LAMPADA}|$ da lâmpada e a tensão $|\dot{U}_s|$ de serviço, vale:

$$\frac{|\dot{U}_{LAMPADA}|}{|\dot{U}_s|} = \frac{R}{\sqrt{R^2 + X_L^2}} \quad (3.18)$$

o que corresponde ao $\cos \varphi_0$ da expressão (3.13).

A potência activa P_{CARGA} da luminária pode ser diferente da potência nominal $P_{LAMPADA}$ da lâmpada. Assim, as perdas valem:

$$P_{PERDAS} = P_{CARGA} - P_{LAMPADA} \Rightarrow P_{PERDAS} [\%] = \left(\frac{P_{CARGA}}{P_{LAMPADA}} - 1 \right) \cdot 100 [\%] \quad (3.19)$$

em que:

P_{PERDAS} - Potência activa das perdas na luminária [W];

P_{CARGA} - Potência activa total da luminária [W];

$P_{LAMPADA}$ - Potência nominal da lâmpada [W].

3.5.2. Cálculo dos parâmetros eléctricos duma luminária real

O conjunto de expressões estabelecido na secção anterior, permite calcular os diversos parâmetros eléctricos duma luminária real.

A fotografia da Figura 3.7 apresenta os circuitos eléctricos internos duma luminária. A luminária apresentada é do mesmo fabricante, modelo e potência, que as luminárias existentes no terreno, e serão analisadas nos Capítulos 5 e 6.

O Quadro 3.2 apresenta os valores indicados nas placas sinaléticas dos circuitos.

Os dados imprimidos nas placas sinaléticas são limitados. Por exemplo, não existem dados sobre o valor da reactância indutiva, nem sobre o valor do condensador de compensação. O circuito de arranque e o condensador de compensação são colocados numa caixa selada, sem possibilidade de desligar o condensador. Uma verdadeira "caixa negra".

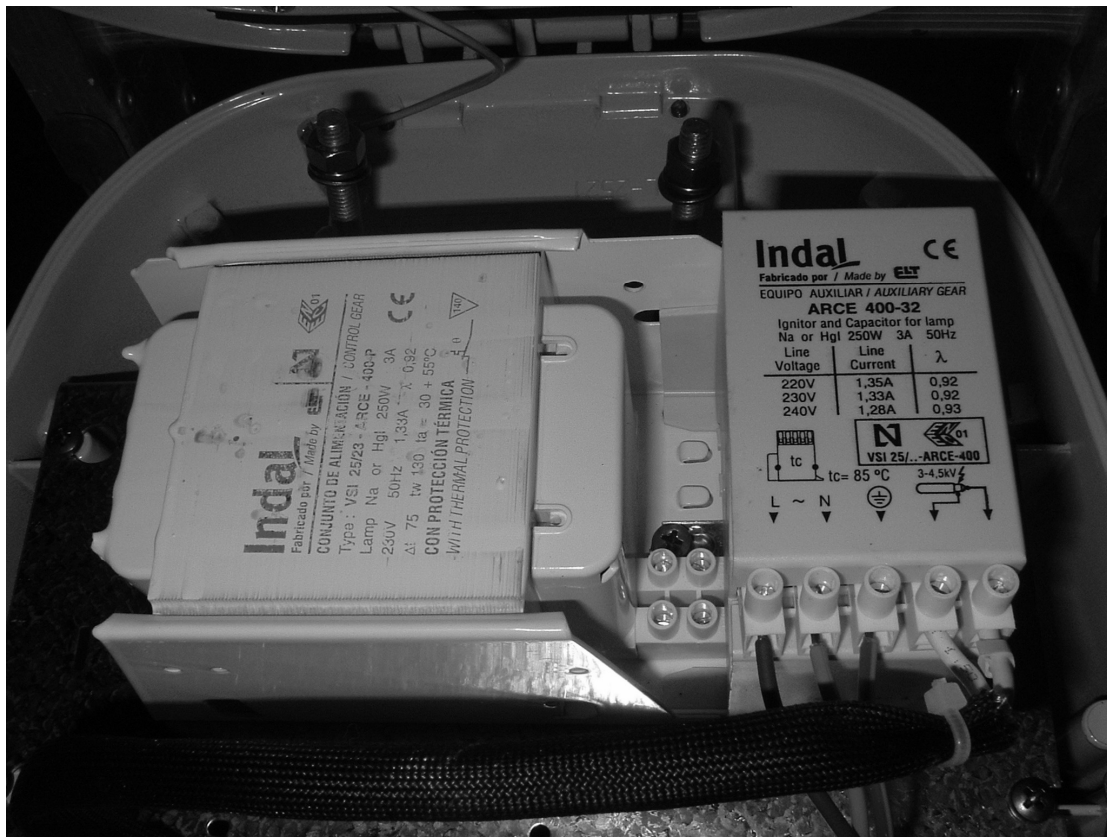


Figura 3.7: Fotografia dos circuitos internos duma luminária utilizada no terreno.

Quadro 3.2 – Valores dos parâmetros eléctricos indicados nas placas sinaléticas dos circuitos internos da luminária utilizada no terreno.

Parâmetro	Valor	Notas
f	50 Hz	Frequência da rede
$P_{LAMPADA}$	250 W	Potência activa nominal da lâmpada
$ \dot{U}_s $	230 V	Tensão simples de serviço
$ \dot{I}_s $	1,33 A	Corrente de serviço
$\cos \varphi$	0,92	Factor de potência com condensador de compensação

Na prática, e de acordo com a análise apresentada na Secção 3.3.1, a relação entre a tensão da lâmpada e a tensão da rede, em valores eficazes, deve ser de 0,5. De acordo com a expressão (3.13), esta relação de tensão corresponde ao $\cos \varphi_0$. Assim, considerando $\cos \varphi_0 = 0,5$, foi possível calcular os valores dos parâmetros eléctricos, utilizando as expressões estabelecidas previamente. O Quadro 3.3 apresenta os resultados dos cálculos.

Para ilustrar o efeito da variação do valor do $\cos \varphi_0$ sobre o condensador de compensação, foi estabelecido o gráfico da Figura 3.8. Este gráfico apresenta o valor do condensador de compensação necessário para obter um determinado factor de potência, em função do factor de potência da luminária sem condensador de compensação ($\cos \varphi_0$).

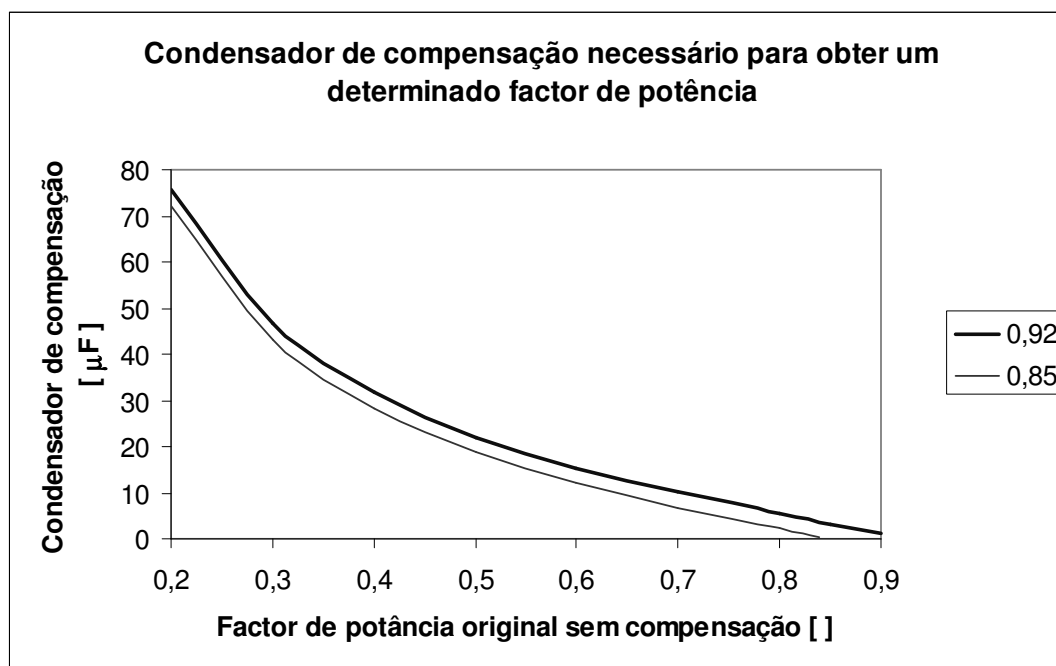


Figura 3.8: Gráfico dos valores do condensador de compensação necessários para obter um determinado factor de potência, em função do factor de potência original da luminária sem compensação.

Outro factor importante, identificado no Quadro 3.3, é que existem perdas na luminária. Na prática, o projectista utiliza normalmente as potências nominais das lâmpadas para o dimensionamento. No caso dessa luminária, poderá considerar-se um aumento de potência activa, na ordem de 12 %.

Quadro 3.3 – Valores dos parâmetros eléctricos calculados duma luminária.

Parâmetro	FORMULA	Expressão	Resultados
$f, \dot{U}_s , \dot{I}_s ,$ $\cos \varphi,$ $P_{LAMPADA}$	-	-	Quadro 3.2
$ \dot{Z}_C $	$ \dot{Z}_C = \frac{ \dot{U}_s }{ \dot{I}_s }$	(3.7)	172,9 Ω
P_{CARGA}	$P_{CARGA} = \frac{ \dot{U}_s ^2 \cdot \cos \varphi}{ \dot{Z}_C }$	(3.6)	281 W
P_{PERDAS}	$P_{PERDAS} = P_{CARGA} - P_{LAMPADA}$	(3.19)	31 W
$P_{PERDAS} [\%]$	$P_{PERDAS} [\%] = \left(\frac{P_{CARGA}}{P_{LAMPADA}} - 1 \right) \cdot 100$	(3.19)	12,4 %
$\cos \varphi_0$	-	-	0,5 (estimativo)
X_L	$X_L = \frac{ \dot{Z}_C }{\cos \varphi} \cdot \sin \varphi_0 \cdot \cos \varphi_0$	(3.17)	81,4 Ω
L	$L = \frac{X_L}{2\pi f}$	-	259,1 mH
R	$R = X_L \cdot \cotan \varphi_0$	(3.14)	47,0 Ω
X_C	$\frac{\cos \varphi}{\cos \varphi_0} = \left(\frac{X_C}{\sqrt{R^2 + (X_C - X_L)^2}} \right)$	(3.15)	143,9 Ω (Resolução numérica)
	com $X_L \cdot (X_C - X_L) > R^2$	(3.3)	
	e $X_C - X_L > 0 \Leftrightarrow X_C > X_L$	(3.4)	
C	$C = \frac{1}{2\pi f \cdot X_C}$	-	22,1 μF
\dot{Z}_C	$\dot{Z}_C = \dot{Z}_C \cdot \cos \varphi + j \dot{Z}_C \cdot \sin \varphi$	(3.8)	159,1 + j67,8 Ω

3.5.3. Valores a utilizar nos cálculos e nas simulações

Os valores apresentados no Quadro 3.3 foram calculados em função dos valores fornecidos pelo fabricante. Esses valores são ideais, mas não correspondem necessariamente à realidade. As medições feitas no terreno, e apresentadas nos Capítulos 5 e 6, irão confirmar este facto.

Contudo, considerado a necessidade de se definir valores numéricos para as simulações, foi estabelecido um conjunto de valores apresentados no Quadro 3.4. Os parâmetros mais importantes são: o factor de potência (definido a 0,85, tal como no projecto original), e as perdas que aumentam de 12,4 % a potência nominal.

Quadro 3.4 – Valores dos parâmetros eléctricos das luminárias a utilizar nas simulações.

Parâmetro	Formula / Descrição	Expressão	Valores a utilizar
f	Frequência da rede		50 Hz
$P_{LAMPADA}$	Potência nominal da lâmpada		250 W
P_{CARGA}	Potência da carga a utilizar nos cálculos		281 W
$ \dot{U}_s $	Tensão simples de serviço		230 V
$\cos \varphi$	Factor de potência da luminária com condensador de compensação		0,85
$ \dot{Z}_C $	$ \dot{Z}_C = \frac{ \dot{U}_s ^2 \cdot \cos \varphi}{P_{CARGA}}$	(3.6)	160,0 Ω
\dot{Z}_C	$\dot{Z}_C = \dot{Z}_C \cdot \cos \varphi + j \dot{Z}_C \cdot \sen \varphi$	(3.8)	136,1 + j 84,3 Ω
$ \dot{I}_s $	$ \dot{I}_s = \frac{ \dot{U}_s }{ \dot{Z}_C }$	(3.7)	1,44 A

Capítulo 4. PARÂMETROS ELÉCTRICOS DOS CABOS E MODELO AVANÇADO DE REDE TRIFÁSICA

Neste capítulo serão apresentados dois tópicos principais: os parâmetros eléctricos que caracterizam os cabos utilizados nas redes de IP, e um modelo avançado de cálculo de rede trifásica.

4.1. PARÂMETROS ELÉCTRICOS DOS CABOS

4.1.1. Diversidade das características eléctricas dos cabos a analisar

Os cabos podem ser caracterizados por três parâmetros eléctricos fundamentais:

- ◆ Resistência;
- ◆ Indutância;
- ◆ Capacidade.

O conjunto desses três parâmetros define a impedância do cabo. O esquema equivalente em Π (π), de um cabo com três parâmetros eléctricos, é apresentado na Figura 4.1 [4-7, p. 185].

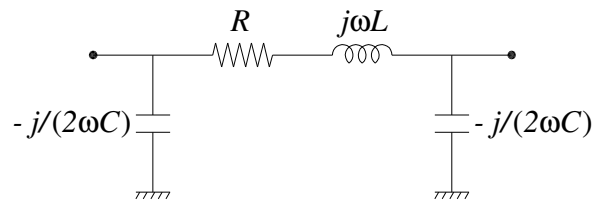


Figura 4.1: Esquema equivalente em Π de um cabo com três parâmetros eléctricos: resistência R , indutância longitudinal L , e capacidade transversal C .

O esquema apresentado na Figura 4.1 despreza as perdas no dieléctrico, que consistem nas condutâncias G em paralelo com as capacidades C . As perdas relativas à condutância transversal foram consideradas desprezáveis, admitindo as baixas tensões de serviço utilizadas nas redes de IP.

Os valores desses parâmetros eléctricos são determinados por uma série de factores, incluindo:

- ◆ Materiais dos condutores e dos isolamentos;
- ◆ Frequência da rede (efeito pelicular);
- ◆ Temperatura;
- ◆ Geometria física e espacial: comprimento, número de condutores, diâmetros, distâncias entre os elementos;
- ◆ Presença (ou não) duma bainha metálica;
- ◆ Observância das especificações na construção dos cabos.

Uma análise dessas características é elaborada nos parágrafos que a seguir se apresentam.

4.1.2. Verificação utilizando o método dos elementos finitos com o *FEMM*

Existem muitas referências que permitem calcular as características eléctricas dos cabos com três condutores ([4-7], [4-8], [4-10]). Contudo, não é o caso para os cabos de quatro condutores de baixa tensão que vulgarmente se encontram nas redes de IP. Assim, foi

necessário desenvolver expressões próprias para os cálculos dos mesmos. Para confirmar a validade das expressões desenvolvidas, foi utilizado o método dos elementos finitos (*FEMM*), pelo que os resultados das expressões apresentadas são comparados com os resultados obtidos por este método. Duma certa forma, o método dos elementos finitos foi utilizado como laboratório experimental virtual.

No contexto deste trabalho, foi utilizado um conjunto de programas conhecido por *FEMM* (*Finite Element Method Magnetics*). Desenvolvido por David Meeker, o *FEMM* é especificamente orientado para resolver problemas de natureza eléctrica e magnética. Relativamente à utilização do *FEMM* poderão ser consultadas as referências [4-1], [4-2], [4-3], [4-4] e [4-5].

Para utilizar com eficácia o programa *FEMM*, muitas preparações são necessárias. Para não sobrecarregar o texto, a metodologia desenvolvida para utilizar o *FEMM* está apresentada no Anexo A, que descreve, entre outros, o método de curto-circuito [4-9, p. 71], e que permite calcular os valores individuais dos parâmetros eléctricos de cada condutor. O método de curto-circuito será posteriormente utilizado, no terreno, para medir as características dos cabos.

4.1.3. Comprimento real dos cabos

Uma característica fundamental de um cabo é o seu comprimento. A Figura 4.2 apresenta uma fotografia de um cabo VAV 4x10 utilizado nas redes de IP. É possível observar que os condutores são ligeiramente torçados, duma forma helicoidal.

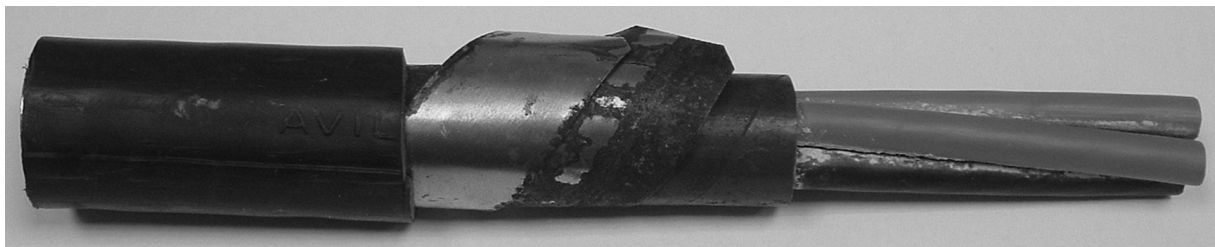


Figura 4.2: Fotografia de um cabo VAV 4x10 (de 10 mm² de secção com condutores ligeiramente torçados, com um determinado passo helicoidal).

A forma helicoidal faz com que o comprimento real dos condutores seja superior ao comprimento do cabo, conforme se ilustra na Figura 4.3. Baseado na Figura 4.3, o comprimento l_h corresponde a um "passo de hélice". Assim, o comprimento l_t do troço do condutor, em função do passo de hélice l_h do troço correspondente do cabo, é dado pela expressão (4.1).

$$l_h^2 + (\pi d)^2 = l_t^2 \Leftrightarrow l_t = \sqrt{l_h^2 + (\pi d)^2} \quad (4.1)$$

O aumento, em percentagem, do comprimento dos condutores, também conhecido como factor de majoração relativo ao passo de hélice (ou helicoidal) [4-10], é dado pela seguinte expressão:

$$\Delta l(\%) = \left(\frac{l_t}{l_h} - 1 \right) \cdot 100 \% \quad (4.2)$$

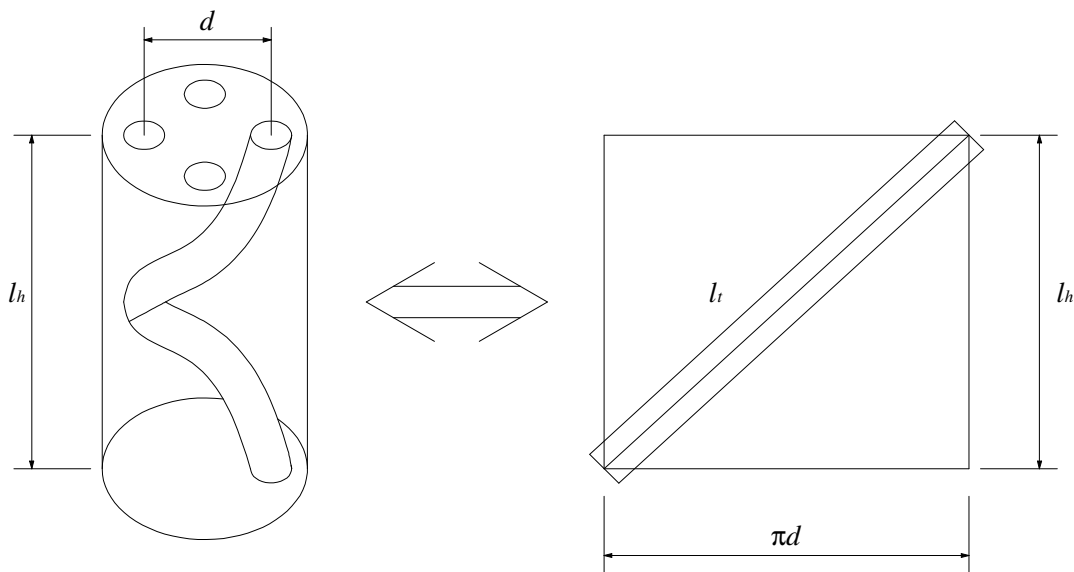


Figura 4.3: Efeito helicoidal sobre o comprimento real dos condutores.

Utilizando a expressão (4.2), o aumento, em percentagem, do comprimento dos condutores para um cabo do tipo VAV 4x10, da Figura 4.3, virá:

Comprimento do passo de hélice: $l_h = 340$ mm:

Distância entre dois condutores mais afastados: $d = 9,55$ mm:

$$\Rightarrow \Delta I(\%) = 0,4 \%$$

Assim, o projectista poderá considerar este aumento desprezável face ao cálculo da resistência, da capacidade e da indutância dos condutores.

4.1.4. Resistência dos condutores

O Quadro 2.4 (Capítulo 2) apresenta os valores de resistência de diferentes cabos, por unidade de comprimento. No caso do cabo VAV 4x10, a resistência, por unidade de comprimento, vale:

$$R = 1,723 \cdot 10^{-3} \text{ } [\Omega/\text{m}] \text{ a } 20^\circ \text{ C} \quad (4.3)$$

O valor da expressão (4.3) é válido para temperatura ambiente de 20° C . No caso de cabos enterrados, as variações de temperatura são reduzidas, e esse valor pode ser utilizado.

Outro fenómeno que pode afectar o valor da resistência de cada condutor, é o efeito de pele ou efeito pelicular. O efeito pelicular é um fenómeno electromagnético que, com frequência elevada, provoca uma maior densidade superficial de corrente na zona exterior dos condutores [4-11]. Praticamente, este efeito faz com que toda a corrente seja concentrada numa zona, de profundidade δ , à superfície do condutor. Com correntes alternadas, o efeito implica um aumento da resistência. Para uma frequência de 50 Hz, com condutor de cobre, a profundidade vale aproximadamente 8,5 mm [4-11]. Considerando que os condutores de um cabo VAV 4x10 têm uma secção de 10 mm^2 , cada condutor tem um raio de 1,78 mm, muito inferior à profundidade δ , pelo que o efeito de pele pode ser desprezável no cálculo da resistência desses condutores.

Existem também outros fenómenos que podem afectar a resistência, tal como o efeito de proximidade, que originam maiores forças electrodinâmicas, e maiores correntes de Foucault. Contudo, considerando os baixos valores das tensões, das correntes em jogo e das frequências

utilizadas nas redes de IP, esses fenómenos, e os seus impactes nas características dos cabos, podem ser consideradas desprezáveis.

4.1.5. Indutâncias

A) CONCEITOS BÁSICOS

Considere-se uma linha monofásica com dois condutores paralelos, e o seu circuito equivalente, conforme se ilustra na Figura 4.4, em que:

\dot{I}_1 Corrente que circula no condutor 1 [A], em grandezas complexas;

\dot{I}_2 Corrente que circula no condutor 2 [A], em grandezas complexas;

L_{11} Indutância própria do condutor 1 [H];

L_{22} Indutância própria do condutor 2 [H];

M_{12} Indutância mútua entre o condutor 1 e o condutor 2 [H];

M_{21} Indutância mútua entre o condutor 2 e o condutor 1 [H];

r Raio dos condutores [m];

D Distância entre os condutores [m];

l Comprimento unitário [m].

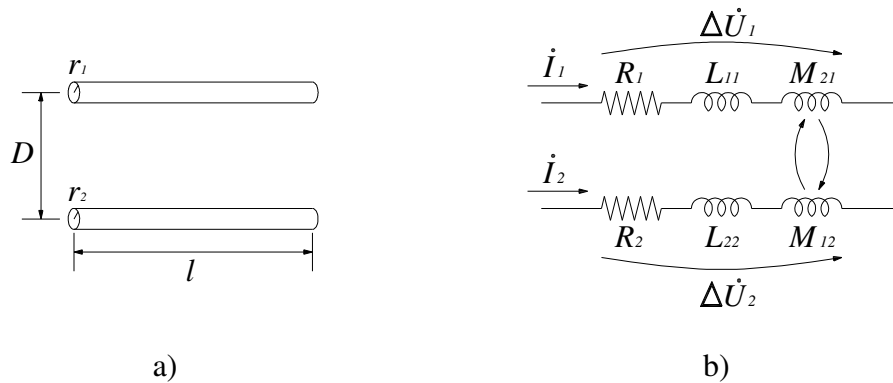


Figura 4.4: Linha monofásica com dois condutores paralelos. a) Disposição geométrica e parâmetros dimensionais; b) Circuito equivalente.

As indutâncias próprias L_{11} e L_{22} , e mútuas M_{12} (ou L_{12}) e M_{21} (ou L_{21}) valem respectivamente [4-7, p. 160]:

$$L_{11} = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \left[\frac{1}{4} + \ln\left(\frac{1}{r_1}\right) \right] \quad (4.4)$$

$$L_{22} = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \left[\frac{1}{4} + \ln\left(\frac{1}{r_2}\right) \right] \quad (4.5)$$

$$M_{12} = M_{21} = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \ln\left(\frac{1}{D}\right) \quad (4.6)$$

Considerando $\dot{I}_1 = -\dot{I}_2$, o circuito equivalente da Figura 4.4 b) permite determinar as quedas de tensão, ou seja:

$$\Delta\dot{U}_1 = R_1 \cdot \dot{I}_1 + j\omega L_{11} \cdot \dot{I}_1 + j\omega M_{21} \cdot \dot{I}_2 \Leftrightarrow \Delta\dot{U}_1 = R_1 \cdot \dot{I}_1 + j\omega \underbrace{(L_{11} - M_{21})}_{*} \cdot \dot{I}_1 \quad (4.7)$$

$$\Delta\dot{U}_2 = R_2 \cdot \dot{I}_2 + j\omega L_{22} \cdot \dot{I}_2 + j\omega M_{12} \cdot \dot{I}_1 \Leftrightarrow \Delta\dot{U}_2 = R_2 \cdot \dot{I}_2 + j\omega \underbrace{(L_{22} - M_{12})}_{*} \cdot \dot{I}_2 \quad (4.8)$$

* : Indutâncias aparentes

Considerando $r_1 = r_2 = r$, e $L_{22} = L_{11}$, utilizando as expressões (4.4), (4.5), (4.6), e os resultados da expressão (4.7), a indutância aparente, por condutor, vale finalmente:

$$L_{11} - M_{21} = L_{22} - M_{12} = L_1 \quad (4.9)$$

ou seja:

$$L_1 = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \left[\frac{1}{4} + \ln\left(\frac{D}{r}\right) \right] \quad (4.10)$$

Este exemplo simples pode ser generalizado para n condutores, considerando a seguinte expressão [4-7, p. 161]:

$$\Delta \dot{U}_i = R_i \cdot \dot{I}_i + j\omega L_{ii} \cdot \dot{I}_i + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n j\omega M_{ji} \cdot \dot{I}_j \quad (4.11)$$

A indutância aparente L_i , de qualquer condutor i , pode ser determinada pela impedância \dot{Z}_i , utilizando a expressão (4.12), pelo que virá:

$$\dot{Z}_i = \frac{\Delta \dot{U}_i}{\dot{I}_i} \Leftrightarrow \dot{Z}_i = R_i + j\omega L_i \Rightarrow L_i = \text{Im} \left\{ \frac{\dot{Z}_i}{\omega} \right\} \quad (4.12)$$

em que:

\dot{Z}_i - Impedância do condutor i [Ω], em grandezas complexas;

R_i - Resistência do condutor i [Ω];

L_i - Indutância aparente do condutor i [H];

$\omega = 2\pi \cdot f$ - Pulsação [rad/s], onde f é a frequência [Hz].

O método das quedas de tensão está na base da técnica utilizada pelo programa *FEMM* para determinar as indutâncias. Os pormenores deste método são indicados no Anexo A.

Consoante a geometria dos condutores, a expressão (4.12) pode tornar-se bastante complicada. Por esse motivo, são aplicadas simplificações que permitem obter expressões analíticas mais simples. Um exemplo clássico é o de uma linha aérea com três condutores em

triângulo (mais um condutor de retorno), conforme se indica na Figura 4.5 [4-8, p. 10], em que não é utilizado o método das imagens.

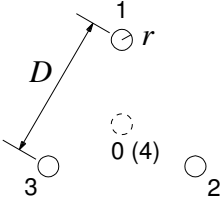
	<p><i>Simplificações:</i></p> $\dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3 = 0, \quad \dot{I}_0 = \dot{I}_4 = 0$ $M_{12} = M_{21} = M_{13} = M_{31} = M_{23} = M_{32}$ $L_{11} = L_{22} = L_{33}$
$\Delta \dot{U}_1 = R_1 \cdot \dot{I}_1 + j\omega(L_{11} - M_{21}) \cdot \dot{I}_1 \Rightarrow L_1 = L_{11} - M_{21}$ $\Delta \dot{U}_2 = R_2 \cdot \dot{I}_2 + j\omega(L_{22} - M_{12}) \cdot \dot{I}_2 \Rightarrow L_2 = L_{22} - M_{12}$ $\Delta \dot{U}_3 = R_3 \cdot \dot{I}_3 + j\omega(L_{33} - M_{31}) \cdot \dot{I}_3 \Rightarrow L_3 = L_{33} - M_{31}$ $L_1 = L_2 = L_3 = L \Rightarrow L = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \left[\frac{1}{4} + \ln\left(\frac{D}{r}\right) \right]$	

Figura 4.5: Indutâncias aparentes duma linha com três condutores (mais um condutor de retorno) com simetria triangular, utilizando simplificações nos cálculos.

Baseado na Figura 4.5, a Figura 4.6 apresenta os resultados dos cálculos das indutâncias da linha com três condutores. Os resultados teóricos são comparados com os obtidos com o *FEMM*. Os resultados confirmam a validade da metodologia numérica.

As simplificações apresentadas na Figura 4.5 são possíveis por razão da simetria entre os três condutores, e pelo facto de que o condutor de retorno está no centro com corrente nula. Essas simplificações são importantes e devem ser cuidadosamente analisadas, e compreendidas antes de serem aplicadas noutras situações diferentes.

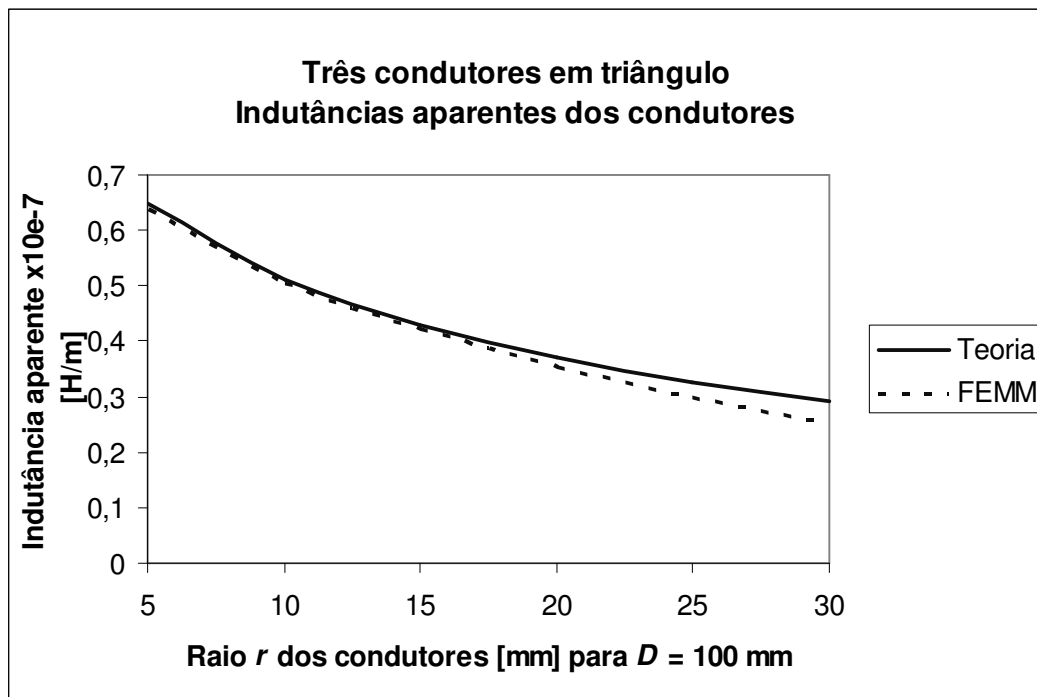


Figura 4.6: Gráfico da indutância aparente dos condutores numa linha trifásica triangular, comparando os valores teóricos com as simulações do *FEMM*.

B) INDUTÂNCIAS DE UM CABO COM QUATRO CONDUTORES - SIMETRIA QUADRADA

A Figura 4.7 apresenta um conjunto de quatro condutores (três fases e um neutro), numa simetria quadrada. Esta simetria encontra-se nos cabos utilizados nas redes de IP. Nesta situação, o condutor de neutro (condutor 4) não está centrado relativamente aos condutores de fase (1, 2 e 3). Assim, alguns condutores de fase estão mais afastados uns dos outros.

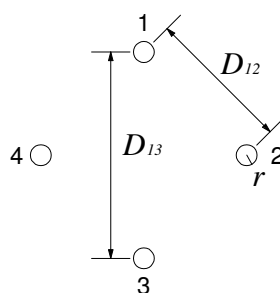


Figura 4.7: Cabo com quatro condutores numa simetria quadrada; condutores 1, 2 e 3 (fases), e condutor 4 (neutro).

Nesta geometria quadrada, existe a seguinte relação entre as distâncias D_{12} e D_{13} :

$$D_{13} = \sqrt{2} \cdot D_{12} \quad (4.13)$$

Utilizando a fórmula (4.11) generalizada, as quedas de tensão para cada condutor, em grandezas complexas, valem:

$$\text{Condutor 1: } \Delta \dot{U}_1 = R_1 \cdot \dot{I}_1 + j\omega L_{11} \cdot \dot{I}_1 + j\omega M_{21} \cdot \dot{I}_2 + j\omega M_{31} \cdot \dot{I}_3 + j\omega M_{41} \cdot \dot{I}_4 \quad (4.14)$$

$$\text{Condutor 2: } \Delta \dot{U}_2 = R_2 \cdot \dot{I}_2 + j\omega L_{22} \cdot \dot{I}_2 + j\omega M_{12} \cdot \dot{I}_1 + j\omega M_{32} \cdot \dot{I}_3 + j\omega M_{42} \cdot \dot{I}_4 \quad (4.15)$$

$$\text{Condutor 3: } \Delta \dot{U}_3 = R_3 \cdot \dot{I}_3 + j\omega L_{33} \cdot \dot{I}_3 + j\omega M_{13} \cdot \dot{I}_1 + j\omega M_{23} \cdot \dot{I}_2 + j\omega M_{43} \cdot \dot{I}_4 \quad (4.16)$$

$$\text{Condutor 4: } \Delta \dot{U}_4 = R_4 \cdot \dot{I}_4 + j\omega L_{44} \cdot \dot{I}_4 + j\omega M_{14} \cdot \dot{I}_1 + j\omega M_{24} \cdot \dot{I}_2 + j\omega M_{34} \cdot \dot{I}_3 \quad (4.17)$$

Considerando algumas simetrias, essas expressões podem ser reduzidas, utilizando as seguintes simplificações:

- ◆ Fases equilibradas com corrente de neutro nula, em grandezas complexas:

$$\dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3 = 0 \quad \text{e} \quad \dot{I}_4 = 0 \quad (4.18)$$

- ◆ Condutores idênticos:

$$L_{11} = L_{22} = L_{33} = L_{44} \quad \text{e} \quad R_1 = R_2 = R_3 = R_4 \quad (4.19)$$

- ◆ Distâncias iguais entre os condutores adjacentes:

$$M_{12} = M_{21} = M_{23} = M_{32} = M_{34} = M_{43} = M_{14} = M_{41} \quad (4.20)$$

- ◆ Distancias iguais entre os condutores opostos:

$$M_{13} = M_{31} = M_{24} = M_{42} \quad \text{mas} \quad M_{12} \neq M_{13} \quad (4.21)$$

Atendendo a (4.20), as expressões simplificadas das quedas de tensões valem assim, em grandezas complexas:

$$\Delta \dot{U}_1 = R_1 \cdot \dot{I}_1 + j\omega L_{11} \cdot \dot{I}_1 + j\omega M_{21} \cdot \dot{I}_2 + j\omega M_{31} \cdot \dot{I}_3 \quad (4.22)$$

$$\begin{aligned}\Delta\dot{U}_2 &= R_2 \cdot \dot{I}_2 + j\omega \cdot (L_{22} - M_{12}) \cdot \dot{I}_2 \Leftrightarrow \\ \Delta\dot{U}_2 &= R_2 \cdot \dot{I}_2 + j\omega \cdot (L_{11} - M_{21}) \cdot \dot{I}_2\end{aligned}\quad (4.23)$$

$$\begin{aligned}\Delta\dot{U}_3 &= R_3 \cdot \dot{I}_3 + j\omega L_{33} \cdot \dot{I}_3 + j\omega M_{13} \cdot \dot{I}_1 + j\omega M_{23} \cdot \dot{I}_2 \Leftrightarrow \\ \Delta\dot{U}_3 &= R_3 \cdot \dot{I}_3 + j\omega L_{11} \cdot \dot{I}_3 + j\omega M_{31} \cdot \dot{I}_1 + j\omega M_{21} \cdot \dot{I}_2\end{aligned}\quad (4.24)$$

$$\Delta\dot{U}_4 = j\omega \cdot (M_{24} - M_{14}) \cdot \dot{I}_2 \Leftrightarrow \Delta\dot{U}_4 = j\omega \cdot (M_{31} - M_{21}) \cdot \dot{I}_2 \quad (4.25)$$

onde:

$$L_{11} = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \left[\frac{1}{4} + \ln\left(\frac{1}{r}\right) \right], \text{ indutância própria de cada cabo} \quad (4.26)$$

$$M_{21} = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \ln\left(\frac{1}{D_{12}}\right), \text{ indutância mútua entre condutores adjacentes} \quad (4.27)$$

$$M_{31} = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \ln\left(\frac{1}{\sqrt{2} \cdot D_{12}}\right), \text{ indutância mútua entre condutores opostos} \quad (4.28)$$

Mesmo com simplificações, existe acoplamento entre fases, ou seja, a queda de tensão, em cada fase, não depende só da corrente nessa fase [ver expressões (4.22) a (4.25)]. Assim, de acordo com [4-7, p. 163], não é possível uma análise monofásica equivalente.

Em Média Tensão (MT) e Alta Tensão (AT), a solução consiste em utilizar uma linha trifásica transposta, onde as posições dos condutores de fase são trocadas em troços de igual espaçamento da rede. Esta solução não é aplicável no caso de cabos multicondutores, porque cada condutor é devidamente assinalado por uma cor distinta.

Contudo, no caso particular onde as correntes têm a mesma amplitude, é possível determinar as indutâncias aparentes L_1 , L_2 , e L_3 de cada condutor de fase 1, 2, e 3, respectivamente, com defasagens de 120° ($2\pi/3$ rad), conforme as seguintes relações:

$$\dot{I}_1 = 1, \quad \dot{I}_2 = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}, \quad \dot{I}_3 = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad \text{e} \quad \dot{I}_4 = 0 \quad (4.29)$$

Assim, utilizando a relação da impedância (4.12), as relações das quedas de tensão (4.22), (4.23) e (4.24), os valores das correntes equilibrados definidos em (4.29), e finalmente as

relações das indutâncias (4.26), (4.27), e (4.28), as indutâncias aparentes de cada condutor valem:

$$\dot{Z}_1 = \frac{\Delta \dot{U}_1}{\dot{I}_1}, \quad \dot{Z}_2 = \frac{\Delta \dot{U}_2}{\dot{I}_2} \quad \text{e} \quad \dot{Z}_3 = \frac{\Delta \dot{U}_3}{\dot{I}_3} \quad (4.30)$$

Pelo que:

Condutor 1- Sendo:

$$L_1 = \text{Im} \left\{ \frac{\dot{Z}_1}{\omega} \right\} \Rightarrow L_1 = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{1}{4} \cdot [4 \cdot \ln(D_{12}) - 4 \cdot \ln(r) + \ln(2) + 1]$$

virá:

$$L_1 = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \left[\ln \left(\frac{D_{12}}{r} \right) + \frac{1}{4} + \frac{1}{2} \ln(\sqrt{2}) \right] \quad (4.31)$$

Condutor 2- Sendo:

$$L_2 = \text{Im} \left\{ \frac{\dot{Z}_2}{\omega} \right\} \Rightarrow L_2 = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{1}{4} \cdot [4 \cdot \ln(D_{12}) - 4 \cdot \ln(r) + 1]$$

virá:

$$L_2 = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \left[\ln \left(\frac{D_{12}}{r} \right) + \frac{1}{4} \right] \quad (4.32)$$

Condutor 3- Sendo:

$$L_3 = \text{Im} \left\{ \frac{\dot{Z}_3}{\omega} \right\} \Rightarrow L_3 = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{1}{4} \cdot [4 \cdot \ln(D_{12}) - 4 \cdot \ln(r) + \ln(2) + 1]$$

virá:

$$L_3 = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \left[\ln \left(\frac{D_{12}}{r} \right) + \frac{1}{4} + \frac{1}{2} \ln(\sqrt{2}) \right] \quad (4.33)$$

Nota 1: O condutor 4 não está dimensionado porque \dot{I}_4 (corrente de neutro) é considerada nula.

Nota 2: Essas expressões são válidas só com corrente de neutro nula e correntes de fase equilibradas, conforme relações definidas em (4.29).

É interessante observar que a diferença é constante entre a indutância aparente do condutor 1 e a indutância aparente do condutor 2. Esta diferença vale:

$$L_1 - L_2 = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \left[\frac{1}{2} \cdot \ln(\sqrt{2}) \right] \cong 0,34657 \cdot 10^{-7} \text{ [H/m]} \text{ (constante)} \quad (4.34)$$

O factor $\sqrt{2}$ foi introduzido por razão da simetria quadrada entre as distâncias D_{12} e D_{13} . [ver expressão (4.13)]. O condutor 2 (mais afastado do condutor de neutro) tem uma indutância aparente inferior à dos condutores 1 e 3.

A Figura 4.8 apresenta os resultados dos cálculos teóricos e de simulação. Os resultados foram obtidos por intermédio das quedas de tensão e das impedâncias, com as correntes de alimentação definidas em (4.29).

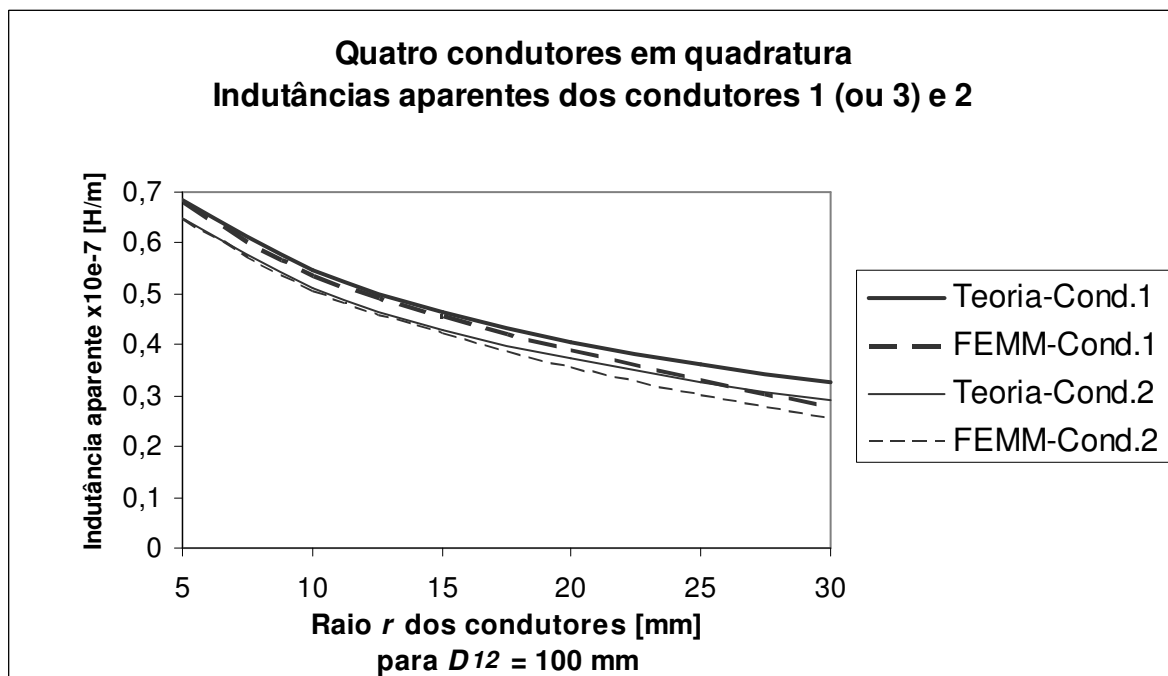


Figura 4.8: Gráfico da indutância aparente dos condutores numa linha trifásica triangular, comparando os valores teóricos com as simulações do *FEMM*.

A Figura 4.8 permite confirmar que a diferença entre a indutância aparente do condutor 1 (ou 3) e a indutância aparente do condutor 2 é constante. Também, da Figura 4.8, permite-se concluir que os valores teóricos e de simulação são muito semelhantes.

C) INDUTÂNCIAS DO CABO VAV 4x10

Os condutores do cabo VAV 4x10 têm uma simetria quadrada. As fórmulas apresentadas na alínea B) da Secção 4.1.5 podem ser utilizadas. Contudo, existe uma diferença notável: a presença duma bainha metálica ferromagnética. Esta bainha faz com que uma boa parte do fluxo magnético esteja concentrada na bainha, em que se pode concluir que, perante as correntes apresentadas na expressão (4.29), e de acordo com [4-12, p. 53], a presença da bainha metálica aumenta o valor da indutância aparente, conforme se ilustra na Figura 4.9, utilizando o *FEMM*.

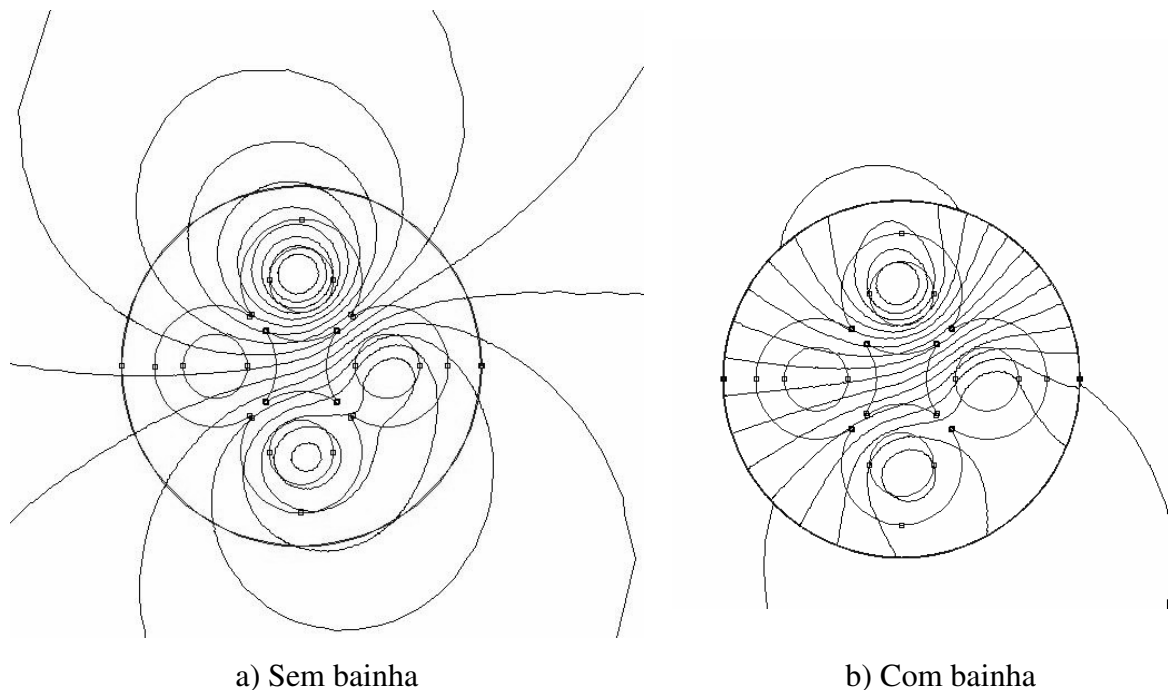


Figura 4.9: Comparação da densidade do fluxo magnético num cabo VAV 4x10 utilizando o *FEMM*: a) Sem bainha metálica; b) Com bainha metálica ferromagnética.

As fórmulas apresentadas para condutores paralelos [expressões (4.4) e (4.6)] não se aplicam para condutores cilíndricos, tal como uma bainha. Por este motivo, só as simulações numéricas foram utilizadas para determinar os valores das indutâncias com bainha metálica. Nesta situação, [4-7, p. 176] se recomenda a utilização do método de cálculo por elementos finitos. Os resultados anteriores confirmam a fiabilidade dos cálculos com o método dos elementos finitos, tal como as referências [4-13], [4-14] e [4-15]. O Quadro 4.1 apresenta os resultados desses cálculos.

Os resultados do Quadro 4.1 confirmam que a presença da bainha metálica aumenta a indutância aparente, em virtude de diminuir o coeficiente de indução mútua. Para cabo sem bainha metálica, a indutância aparente L_2 é inferior à L_1 e L_3 porque a sua distância média geométrica em relação aos outros dois condutores, 1 e 3, é a menor.

É importante observar, no Quadro 4.1, que as indutâncias próprias e mútuas são muito diferentes entre a teoria e o *FEMM*, mas que os resultados do cálculo das indutâncias aparentes são muito semelhantes. Neste contexto, [4-7, p. 160] esclarece que as expressões das indutâncias próprias e mútuas devem ser utilizadas em conjunto, pois as expressões (4.26), (4.27) e (4.28) devem ser subtraídas, duas a duas, para tornar a função logaritmo adimensional.

Quadro 4.1 – Indutâncias para cabo VAV 4x10 sem e com bainha metálica ferromagnética.

Indutâncias próprias L e mútuas M		Sem Bainha		Com Bainha
		Teoria	FEMM	FEMM
Indutância própria de cada condutor	L_{11}	$1,316 \times 10^{-6}$ H/m	$0,914 \times 10^{-6}$ H/m	$2,36 \times 10^{-6}$ H/m
Indutância mútua entre condutores mais próximos entre si	M_{21}	$1,000 \times 10^{-6}$ H/m	$0,599 \times 10^{-6}$ H/m	$2,00 \times 10^{-6}$ H/m
Indutância mútua entre condutores mais afastados entre si	M_{31}	$0,930 \times 10^{-6}$ H/m	$0,530 \times 10^{-6}$ H/m	$1,90 \times 10^{-6}$ H/m
Indutância própria da bainha	L_{55}	-	-	$0,93 \times 10^{-6}$ H/m
Indutância mútua entre um condutor e a bainha	M_{51}	-	-	$1,22 \times 10^{-6}$ H/m
Indutâncias aparentes de cada condutor de fase				
Fase 1	L_1	$3,51 \times 10^{-7}$ H/m	$3,42 \times 10^{-7}$ H/m	$4,12 \times 10^{-7}$ H/m
Fase 2	L_2	$3,16 \times 10^{-7}$ H/m	$3,14 \times 10^{-7}$ H/m	$4,12 \times 10^{-7}$ H/m
Fase 3	L_3	$3,51 \times 10^{-7}$ H/m	$3,43 \times 10^{-7}$ H/m	$4,11 \times 10^{-7}$ H/m

D) EFEITO DUMA DISTORÇÃO TRAPEZOIDAL SOBRE AS INDUTÂNCIAS

Até agora, as demonstrações apresentaram situações idealizadas, onde os condutores são colocados numa geometria quadrada, perfeitamente simétrica. Contudo, por vezes, a realidade é bem diferente.

As fotografias da Figura 4.10 apresentam vistas em corte de um mesmo cabo VAV 4x10, em diferentes posições. Assim, é possível observar que os condutores não estão sempre colocados numa geometria quadrada, pois existe uma determinada distorção na localização dos mesmos.

Os cabos mantêm-se juntos, mas a disposição pode ser quadrada e, por vezes, pode ser trapezoidal.

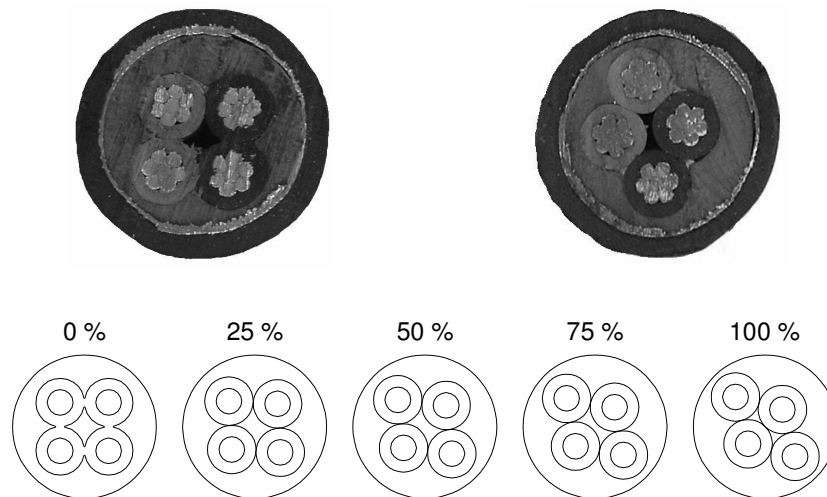


Figura 4.10: Conjunto de fotografias em corte de um mesmo cabo VAV 4x10, com diferentes geometrias de disposição dos condutores.

Assim, por vezes, alguns cabos estão mais próximos da bainha, e outros cabos estão mais próximos uns dos outros.

No caso dum cabo VAV 4x10 (armado com bainha metálica), as simulações confirmam que as variações de indutância, causadas pela distorção trapezoidal, são mínimas e podem ser desprezáveis (no pior caso, com distorção de 100 %, as variações médias são inferiores a 3 %). Contudo, considerando a geometria diferente, a constante identificada em (4.34) não é aplicável.

4.1.6. Capacidades

A) CAPACIDADE DE SERVIÇO

A capacidade de serviço pode ser definida como a capacidade equivalente dum cabo eléctrico visto numa fase [4-10], que, na prática, corresponde ao valor a utilizar para caracterizar a capacidade dos condutores por fase. O Quadro 4.2 apresenta as expressões a utilizar para

determinar o valor desta capacidade de serviço C_S , em função das capacidades individuais, para cabos com bainha metálica (tal como o cabo VAV 4x10).

Os parâmetros do Quadro 4.2 são definidos da seguinte forma:

C_{10} - Capacidade parcial entre o condutor e a bainha [F/m];

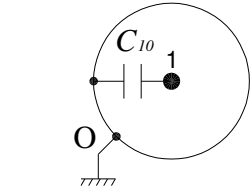

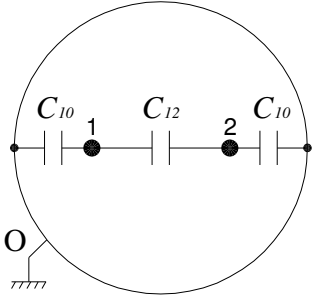
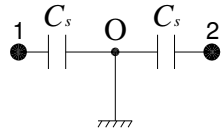
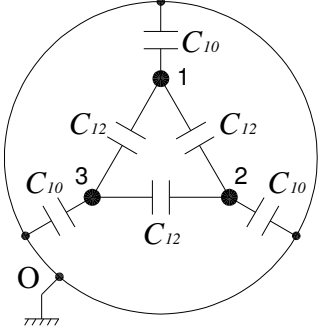
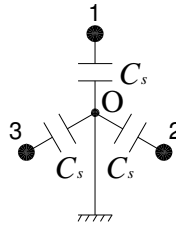
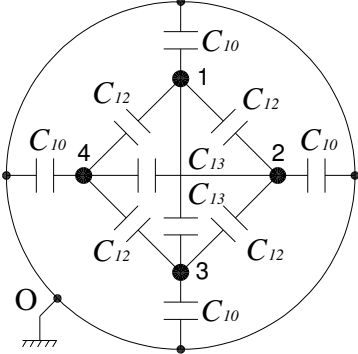
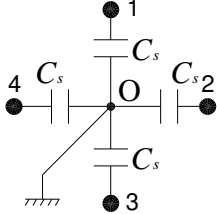
C_{12} e C_{13} - Capacidades parciais entre condutores interiores mais próximos e mais afastados, respectivamente [F/m].

O Anexo B apresenta pormenores que demonstram as expressões relativas às capacidades dos cabos eléctricos apresentados no Quadro 4.2. No caso da expressão da capacidade de serviço para quatro condutores, a expressão apresentada foi desenvolvida de raiz, considerando que não foi encontrada nenhuma publicação sobre esse assunto.

B) CAPACIDADE DE SERVIÇO DE CABO DE TRÊS CONDUTORES

Antes de determinar o valor da capacidade para cabo com quatro condutores, é importante utilizar as expressões com três condutores, apresentadas em diferentes publicações ([4-16], [4-8], e [4-17]), e comparar com as fórmulas desenvolvidas no contexto deste trabalho, e com o programa *FEMM*.

Quadro 4.2 – Capacidade de serviço para um, dois, três e quatro condutores, com bainha metálica, em função das capacidades individuais.

N.º de Condutores	Configuração	Circuito Equivalente	Capacidade de Serviço C_s
1			$C_s = C_{10}$
2			$C_s = C_{10} + 2 \cdot C_{12}$
3			$C_s = C_{10} + 3 \cdot C_{12}$
4			$C_s = C_{10} + 2 \cdot (C_{12} + C_{13})$

O Quadro 4.3 apresenta as diversas expressões utilizadas na determinação da capacidade de serviço para três condutores com bainha metálica.

Quadro 4.3 – Capacidade de serviço para cabo de três condutores com bainha metálica.

Expressões [F/m]	Referências
$C_s = \frac{0,111 \cdot 10^{-9}}{\ln \left[\frac{d_1^2 (3 \cdot R^2 - d_1^2)^3}{r^2 (27R^6 - d_1^6)} \right]}$	[4-16]
$C_s = \frac{0,111 \cdot 10^{-9}}{\ln \left[\frac{3d^2 (R^2 - d^2)^3}{r^2 (R^6 - d^6)} \right]}$	[4-8]
$C_s = \frac{4\pi\epsilon_0}{\ln \left[\frac{3d^2 (R^2 - d^2)^3}{r^2 (R^6 + d^6)} \right]}$ <p>com $4\pi\epsilon_0 \cong 0,111 \cdot 10^{-9}$ H/m</p>	[4-17]
$C_s =$ (Ver demonstração no Anexo B)	Anexo B Método dos potenciais

Utilizando as características físicas de um cabo de três condutores com bainha metálica, apresentadas na Figura 4.11, foi obtido o gráfico da Figura 4.12.

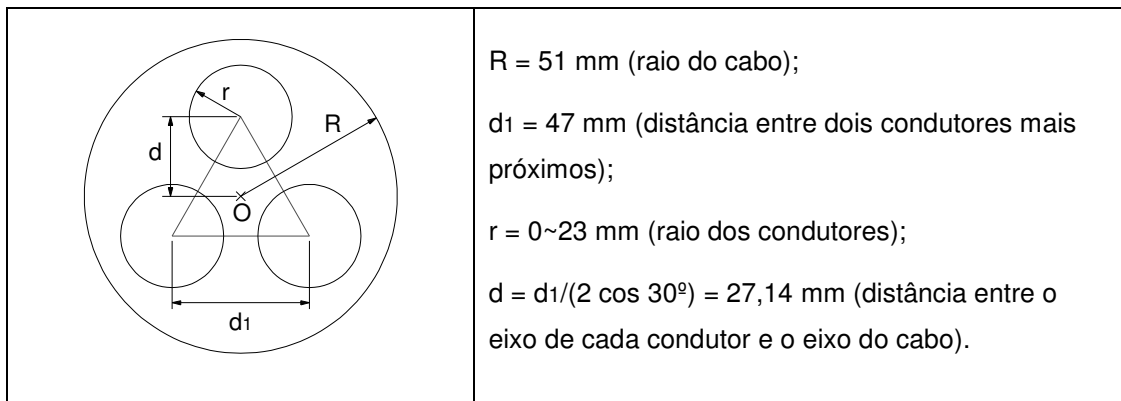


Figura 4.11: Características físicas de um cabo de três condutores, com bainha metálica, utilizadas para comparar os diversos métodos de cálculo das capacidades (exemplo numérico).

O gráfico apresentado na Figura 4.12 representa a capacidade de serviço em função dos raios dos condutores, para diversos métodos de cálculo.

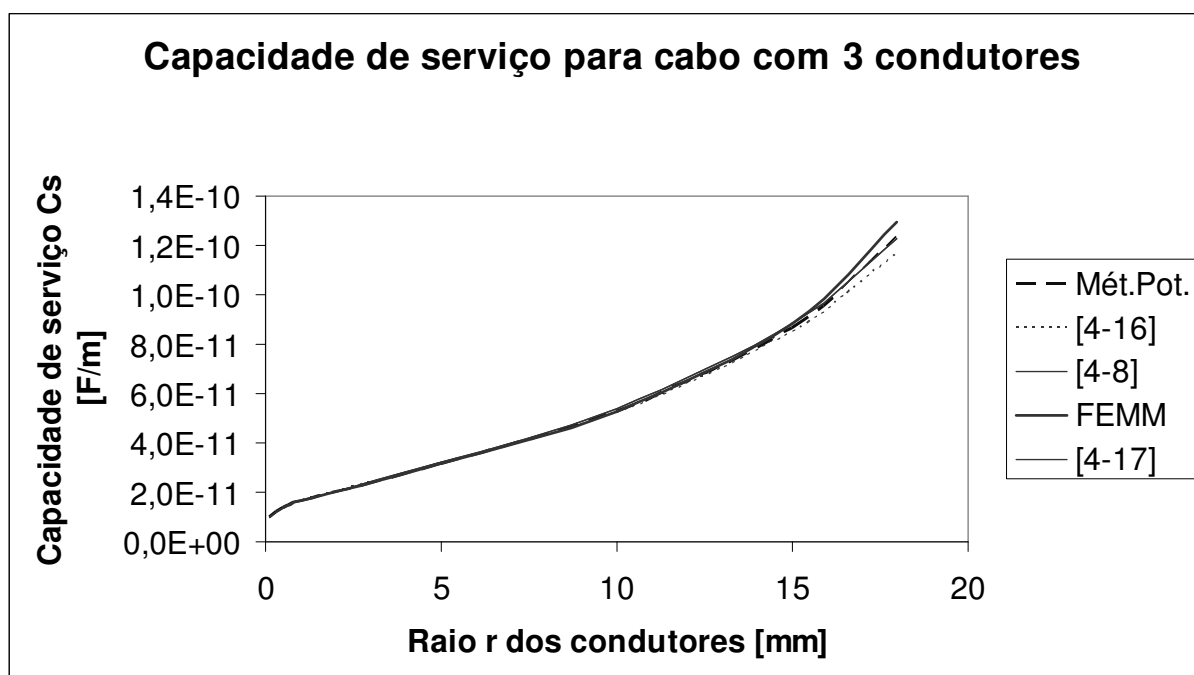


Figura 4.12: Gráfico das capacidades de serviço em função dos raios dos condutores, para um cabo de três condutores com bainha metálica, comparando os resultados dos diversos métodos de cálculo.

Os pormenores de cálculo, utilizando o método dos potenciais, são apresentados no Anexo B. Contudo, este método não permite obter uma expressão simples, de fácil manuseamento.

Na prática, por razão da espessura do isolamento, o raio dos condutores é limitado, e os condutores nunca podem aproximar-se muito da bainha ou mesmo dos outros condutores. Assim, as divergências dos valores, observadas na Figura 4.12, para raios maiores, face ao raio R do cabo, não são relevantes na prática.

Portanto, numa forma geral, obtêm-se resultados muito semelhantes, qualquer que seja o método.

C) CAPACIDADE DE SERVIÇO DE CABO DE QUATRO CONDUTORES

Utilizando o método dos potenciais, na determinação das capacidades para cabos com três condutores, foi desenvolvida uma expressão para cabos de quatro condutores. Os pormenores da demonstração são apresentados no Anexo B.

Utilizando as características físicas de um cabo de quatro condutores, apresentadas na Figura 4.13, foi obtido o gráfico da Figura 4.14.

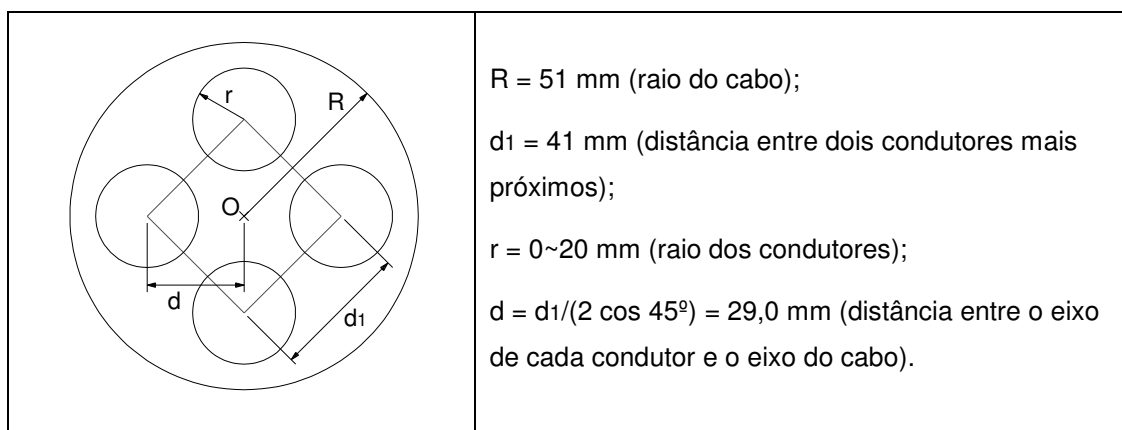


Figura 4.13: Características físicas de um cabo de quatro condutores com bainha metálica, utilizadas para comparar dois métodos de cálculo das capacidades (exemplo numérico).

O gráfico da Figura 4.14 apresenta a capacidade de serviço em função dos raios dos condutores, para dois métodos de cálculo: método dos potenciais e método numérico *FEMM*, em que o erro máximo entre os dois métodos é aproximadamente de 25 %, quando os condutores possuem raios mais elevados (situados junto à bainha).

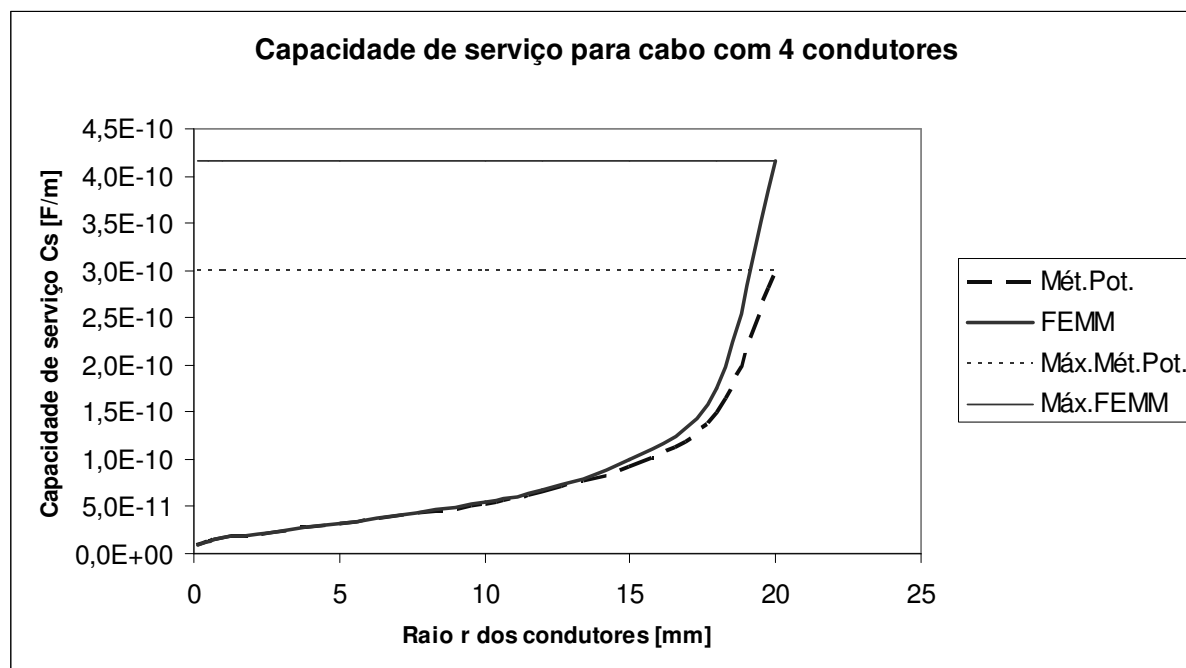


Figura 4.14: Gráfico das capacidades de serviço em função dos raios dos condutores, para um cabo de quatro condutores com bainha metálica, comparando dois métodos de cálculo.

Os pormenores de cálculo, utilizando o método dos potenciais, são apresentados no Anexo B. Contudo, este método não permite obter uma fórmula simples, de fácil manuseamento. Uma vez que não foi encontrado em literatura sobre o tema de cabos de quatro condutores e bainha, só o método desenvolvido no contexto deste trabalho é comparado com o *FEMM*.

Os modelos apresentados na Figura 4.14 não apresentam bons resultados na proximidade da bainha porque no método dos raios equivalentes, o seu valor toma dimensões que ultrapassa facilmente as fronteiras da bainha, de que resultam soluções complexas. No entanto apresenta resultados muito aproximados do *FEMM* para condutores de pequeno raio. Assim, optou-se por utilizar o método das cargas filiformes nos condutores, considerando-as fixas, ou seja, a

sua influência umas das outras, que já apresentam resultados muito mais aproximados para raios de condutores não muito grandes (ver Figura 4.14), e cuja demonstração se encontra no Anexo B. Contudo, considerando que, por razão da espessura do isolamento, o raio dos condutores é limitado e nunca pode aproximar-se muito da bainha ou dos outros condutores, as divergências dos valores observados na Figura 4.14, para raios maiores, não são muito relevantes na prática.

D) CAPACIDADE DE SERVIÇO PARA CABO VAV 4x10

Utilizando os métodos de cálculo da capacidade para quatro condutores, o Quadro 4.4 apresenta valores da capacidade de serviço para o cabo VAV 4x10.

Quadro 4.4 – Valores da capacidade de serviço para cabo VAV 4x10 (simetria ideal quadrada).

Parâmetros	Método dos Potenciais	FEMM
Raio da bainha : $R = 10$ mm Raio dos condutores : $r = 1,784$ mm Distância entre dois condutores mais próximos : $d_1 = 6,75$ mm	$1,375 \times 10^{-10}$ F/m	$1,352 \times 10^{-10}$ F/m

Assim, por observação do Quadro 4.4, a variação de valores, entre o *FEMM* e o método dos potenciais, é inferior a 2 %.

E) EFEITO DUMA DISTORÇÃO TRAPEZOIDAL SOBRE A CAPACIDADE DE SERVIÇO

A distorção trapezoidal apresentada na Figura 4.10 faz com que a capacidade de serviço não seja igual para cada condutor, conforme se indica na Figura 4.15.

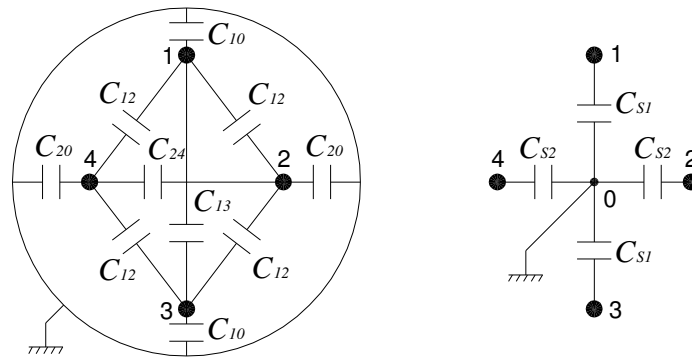


Figura 4.15: Circuitos equivalentes a utilizar no cálculo das capacidades de serviço C_{S1} e C_{S2} para condutores com geometria trapezoidal.

Da Figura 4.15, as capacidades de serviço, em F/m, são dadas por:

$$\text{Condutores 1 e 3 : } C_{S1} = C_{10} + 2 \cdot (C_{12} + C_{13}) \quad (4.35)$$

$$\text{Condutores 2 e 4 : } C_{S2} = C_{20} + 2 \cdot (C_{12} + C_{24}) \quad (4.36)$$

As expressões das capacidades de serviço (4.35) e (4.36) são demonstradas no Anexo B. Utilizando o *FEMM*, foi possível obter os valores apresentados no Quadro 4.5.

Quadro 4.5 – Valores das capacidades de serviço, para cabo VAV 4x10, com distorção trapezoidal, utilizando o *FEMM*.

Capacidades de Serviço	Distorção Trapezoidal para Cabo VAV 4x10			
	0 % ($C_{S1} = C_{S2} = C_S$)	50 %	100 %	Varição 0 %~100 %
C_{S1}	1,35 x 10 ⁻¹⁰ F/m	1,41 x 10 ⁻¹⁰ F/m	1,50 x 10 ⁻¹⁰ F/m	11 %
C_{S2}		1,34 x 10 ⁻¹⁰ F/m	1,52 x 10 ⁻¹⁰ F/m	12 %

Os valores obtidos demonstram que a distorção trapezoidal afecta as capacidades de serviço. Contudo, esta distorção não é constante nem linear, conforme se ilustra no gráfico da Figura 4.16.

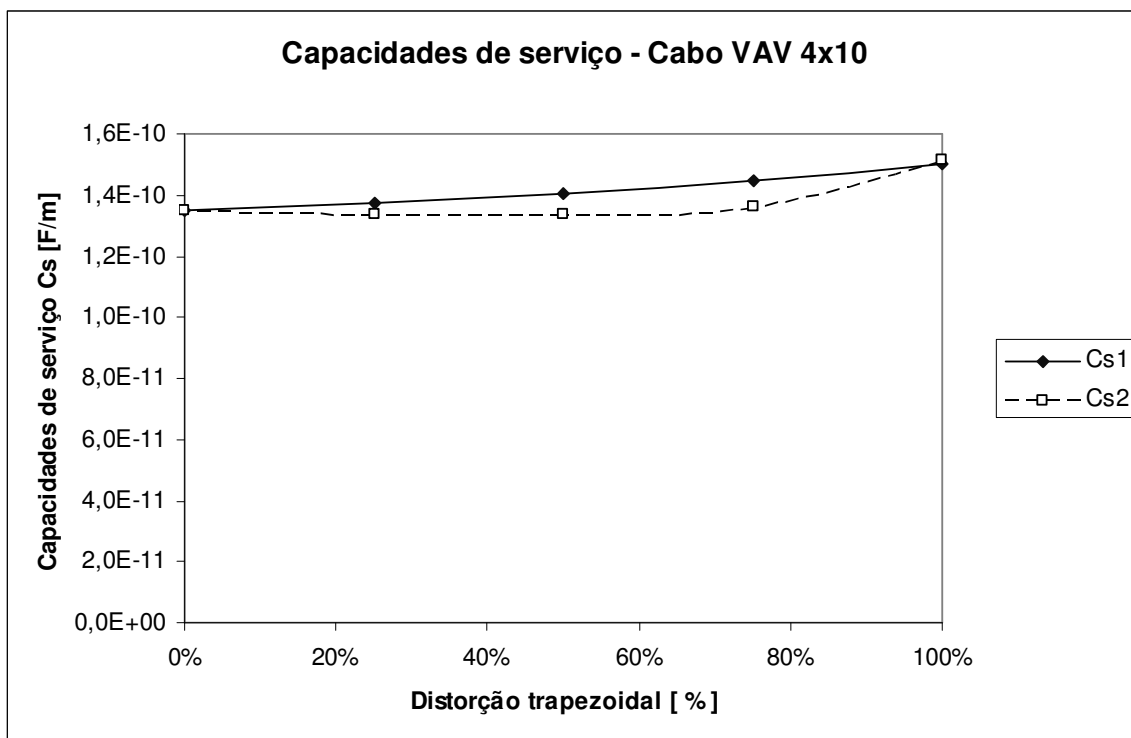


Figura 4.16: Gráfico das capacidades de serviço C_{S1} e C_{S2} para cabo VAV 4x10, com distorção trapezoidal.

A distorção varia de 0 % (quadrado) a 100 % máximo (trapezoidal), ao longo do comprimento do cabo. Também, as duas capacidades de serviço não são iguais, e não variam igualmente. Isto significa que, numa forma geral, a construção dos cabos faz com que a capacidade de serviço aumente, em média, de 5 %, comparativamente a uma simetria ideal quadrada (ver Quadro 4.4). Assim, considerando esta observação, os valores mais realistas da capacidade de serviço a utilizar, são apresentados no Quadro 4.6.

Quadro 4.6 – Valores corrigidos médios da capacidade de serviço para cabo VAV 4x10 com distorção trapezoidal.

Capacidade de serviço para cabo VAV 4x10 Sem distorção trapezoidal	Capacidade de serviço para cabo VAV 4x10 Com distorção trapezoidal
$1,35 \times 10^{-10}$ F/m	$1,42 \times 10^{-10}$ F/m

Resumindo, a distorção trapezoidal, encontrada nos cabos VAV 4x10, aumenta de 5 % o valor da capacidade de serviço dos condutores, que se deve ter em consideração no dimensionamento das capacidades de serviço equivalentes, considerando $C_{S1} = C_{S2} = 1,05 \times C_s$ (geométrica ideal quadrada).

4.1.7. Impedância dos condutores - Compilação

Os resultados apresentados nos parágrafos anteriores permitem agora determinar os valores numéricos das impedâncias dos condutores a utilizar nas simulações. O Quadro 4.7 apresenta uma compilação dos valores estabelecidos para o cabo VAV 4x10.

Considerando que a reactância capacitiva transversal é da ordem de 10^9 vezes superior à resistência do condutor, este parâmetro é considerado desprezável e não foi incluído na expressão da impedância do condutor. Assim, passam a existir apenas dois parâmetros eléctricos para caracterizar os condutores, conforme se apresenta na Figura 4.17.



Figura 4.17: Esquema equivalente de um condutor definido com dois parâmetros eléctricos: resistência R e indutância aparente longitudinal L .

Quadro 4.7 – Valores numéricos dos parâmetros eléctricos dos condutores a utilizar em simulação, para cabo VAV 4x10.

Descrição	Símbolo / Expressão	Valor a utilizar	Referência
Frequência	f	50 Hz	-
Resistividade do Cobre a 20° C	ρ_{Cu}	0,01723 $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$	Quadro 2.3
Resistência	R	$1,723 \times 10^{-3} \Omega/\text{m}$	(4.3)
Indutância aparente longitudinal	L	$4,12 \times 10^{-7} \text{ H/m}$	Quadro 4.1
Reactância indutiva	$X_L = 2\pi f \cdot L$	$129,4 \times 10^{-6} \Omega/\text{m}$	-
Capacidade de serviço transversal	C	$1,42 \times 10^{-10} \text{ F/m}$	Quadro 4.6
Reactância capacitiva	$X_C = \frac{1}{2\pi f \cdot C}$	$22,4 \times 10^6 \Omega/\text{m}$	-
Impedância do condutor	$\dot{Z}_L = R + j\omega L$	$1,723 + j0,129 \text{ m}\Omega/\text{m}$	-

4.2. MODELO AVANÇADO DE CÁLCULO DE REDE

4.2.1. Limitações do modelo simplificado

O Capítulo 2 apresentou um modelo de rede simplificado onde todas as cargas são concentradas no fim do troço, conforme se ilustra na Figura 4.18, em que:

Z_{LT1} , Z_{LT2} , e Z_{LT3} - Impedâncias aparentes dos condutores de fase 1, 2, e 3, respectivamente [Ω];

Z_{CT1} , Z_{CT2} , e Z_{CT3} - Impedâncias das cargas totais por fase 1, 2, e 3, respectivamente [Ω];

$I_{S1}, I_{S2},$ e I_{S3} - Correntes nas fases 1, 2, e 3, respectivamente [A];

$I_N \equiv I_4$ - Corrente de neutro [A];

$U_{S1}, U_{S2},$ e U_{S3} - Tensões simples entre fases 1, 2, e 3, e neutro, respectivamente [V].

Isto permite simplificar bastante os cálculos das correntes e das quedas de tensão. Contudo, este modelo simplificado não permite calcular as quedas de tensão individuais nem as correntes de neutro (por vezes, consideradas nulas).

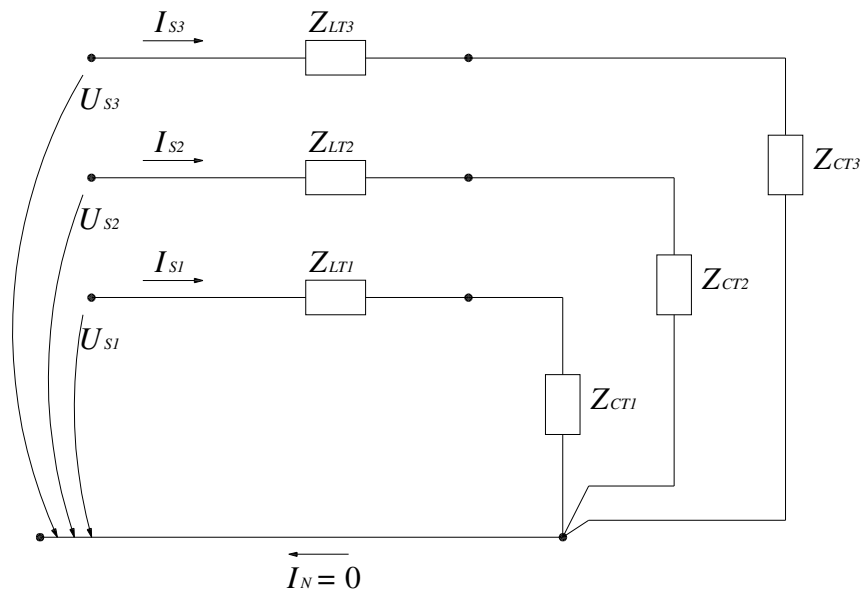


Figura 4.18: Modelo simplificado de rede onde todas as cargas são equilibradas e colocadas no fim do trecho. A corrente de neutro é considerada nula.

Na realidade, as cargas são distribuídas ao longo da canalização, ou cabo principal, conforme se ilustra na Figura 4.19, em que:

Z_L - Impedância aparente do condutor, por fase e por segmento, entre luminárias [Ω];

Z_C - Impedância de cada luminária (carga) [Ω];

Z_N - Impedância aparente do condutor de neutro, por segmento, entre luminárias [Ω];

I - Corrente parcial variável em cada segmento do condutor de neutro [A].

Nesta situação, as correntes de neutro não são nulas porque, em cada segmento da rede, as cargas não são equilibradas. Assim, considerando que cada condutor de neutro tem a sua própria impedância, qualquer corrente de neutro afecta os valores das quedas de tensão.

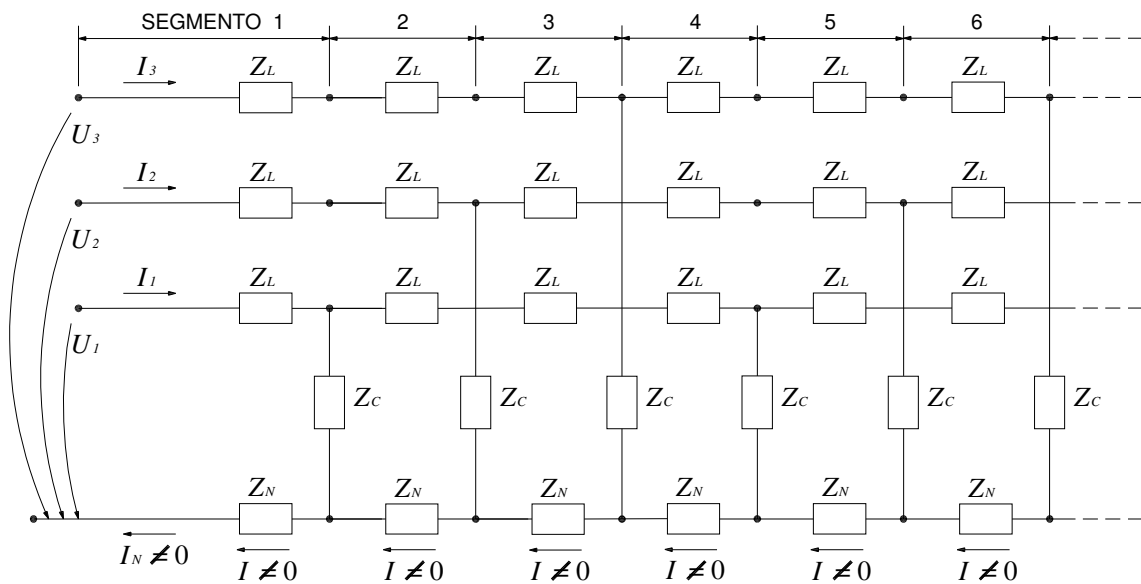


Figura 4.19: Situação real onde as cargas são distribuídas. As correntes parciais de neutro não são nulas e afectam os valores das quedas de tensão.

4.2.2. Modelo analítico com cargas distribuídas

O método habitual de resolução dos circuitos de uma rede trifásica, consiste em o reduzi-los a esquemas equivalentes monofásicos, utilizando modelos em T ou em Π [4-7, p. 184]. Desta forma, é possível deduzir um conjunto de matrizes de fácil tratamento. Contudo, este método não é adaptado à situação descrita anteriormente (ver Figura 4.19), onde as correntes de neutro não são nulas, mas são dependentes das correntes que circulam nas outras fases. Não é possível uma análise monofásica equivalente. Só um modelo analítico mais ampliado permite ultrapassar esta situação.

A situação é ainda mais complicada pelo facto de que, conforme demonstrada na Secção 4.1.5-B), existe acoplamento entre fases nos cálculos das indutâncias. Teoricamente, é necessário calcular individualmente cada indutância aparente em função das correntes de fases e de neutro, para determinar a impedância real do condutor. Situação que implica muitos cálculos iterativos. Para tentar evitar esses cálculos complexos, o Quadro 4.8 apresenta os valores numéricos da impedância do cabo VAV 4x10. Os valores estão baseados no Quadro 4.1 (indutância aparente), e na expressão (4.3) (resistência).

Quadro 4.8 – Impedância para cabo VAV 4x10.

Impedância \dot{Z}_L de cada condutor	Resistência R de cada condutor	Indutância aparente L de cada condutor	Reactância ωL a 50 Hz	Relação $\frac{R}{\omega L}$
$\dot{Z}_L = R + j\omega L$	$1,72 \times 10^{-3} \text{ } [\Omega/\text{m}]$	$4,12 \times 10^{-7} \text{ } [\text{H}/\text{m}]$	$1,29 \times 10^{-4} \text{ } [\Omega/\text{m}]$	13,3

Considerando que a relação entre a resistência e a reactância da linha é superior a 10, as variações de indutâncias causadas pela influência dos outros condutores de fases têm pouco impacte nos cálculos. Por este motivo, o modelo de rede apresentado considera um valor fixo de indutância aparente.

A Figura 4.20 apresenta uma rede trifásica com nove candeeiros. Esta situação não foi escolhida arbitrariamente, pois corresponde às condições no terreno que serão analisadas no Capítulo 5.

Em grandezas complexas, os parâmetros são os seguintes:

\dot{Z}_L - Impedância do condutor de fase $[\Omega]$;

\dot{Z}_N - Impedância do condutor de neutro $[\Omega]$;

\dot{Z}_C - Impedância da carga $[\Omega]$;

$\dot{U}_1, \dot{U}_2, \dot{U}_3$ - Tensão simples de cada fase na origem da rede $[\text{V}]$.

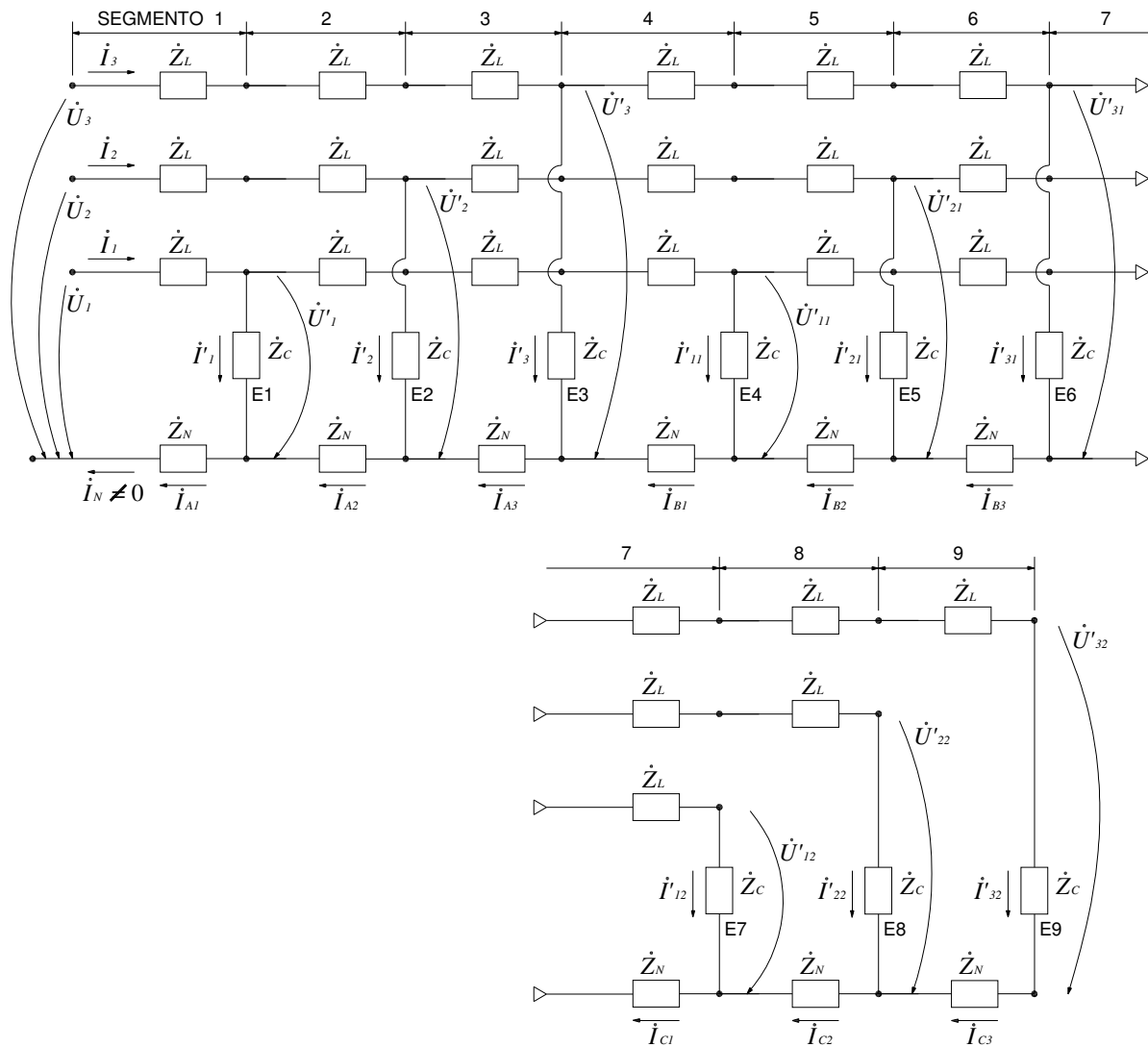


Figura 4.20: Rede trifásica com nove candeeiros.

O método analítico implica a resolução simultânea de muitas equações. Da Figura 4.20, utilizando as leis dos nós e das malhas, podem-se escrever as seguintes relações:

Lei dos nós:

$$\dot{I}_1 = \dot{I}'_1 + \dot{I}'_{11} + \dot{I}'_{12} \quad (4.37)$$

$$\dot{I}_2 = \dot{I}'_2 + \dot{I}'_{21} + \dot{I}'_{22} \quad (4.38)$$

$$\dot{I}_3 = \dot{I}'_3 + \dot{I}'_{31} + \dot{I}'_{32} \quad (4.39)$$

$$\dot{I}_{C3} = \dot{I}'_{32} \quad (4.40)$$

$$\dot{I}_{C2} = \dot{I}'_{22} + \dot{I}_{C3} \Leftrightarrow \dot{I}_{C2} = \dot{I}'_{22} + \dot{I}'_{32} \quad (4.41)$$

$$\dot{I}_{C1} = \dot{I}'_{12} + \dot{I}_{C2} \Leftrightarrow \dot{I}_{C1} = \dot{I}'_{12} + \dot{I}'_{22} + \dot{I}'_{32} \quad (4.42)$$

$$\dot{I}_{B3} = \dot{I}'_{31} + \dot{I}_{C1} \Leftrightarrow \dot{I}_{B3} = \dot{I}'_{31} + \dot{I}'_{12} + \dot{I}'_{22} + \dot{I}'_{32} \quad (4.43)$$

$$\dot{I}_{B2} = \dot{I}'_{21} + \dot{I}_{B3} \Leftrightarrow \dot{I}_{B2} = \dot{I}'_{21} + \dot{I}'_{31} + \dot{I}'_{12} + \dot{I}'_{22} + \dot{I}'_{32} \quad (4.44)$$

$$\dot{I}_{B1} = \dot{I}'_{11} + \dot{I}_{B2} \Leftrightarrow \dot{I}_{B1} = \dot{I}'_{11} + \dot{I}'_{21} + \dot{I}'_{31} + \dot{I}'_{12} + \dot{I}'_{22} + \dot{I}'_{32} \quad (4.45)$$

$$\dot{I}_{A3} = \dot{I}'_3 + \dot{I}_{B1} \Leftrightarrow \dot{I}_{A3} = \dot{I}'_3 + \dot{I}'_{11} + \dot{I}'_{21} + \dot{I}'_{31} + \dot{I}'_{12} + \dot{I}'_{22} + \dot{I}'_{32} \quad (4.46)$$

$$\dot{I}_{A2} = \dot{I}'_2 + \dot{I}_{A3} \Leftrightarrow \dot{I}_{A2} = \dot{I}'_2 + \dot{I}'_3 + \dot{I}'_{11} + \dot{I}'_{21} + \dot{I}'_{31} + \dot{I}'_{12} + \dot{I}'_{22} + \dot{I}'_{32} \quad (4.47)$$

$$\dot{I}_{A1} = \dot{I}'_1 + \dot{I}_{A2} \Leftrightarrow \dot{I}_{A1} = \dot{I}'_1 + \dot{I}'_2 + \dot{I}'_3 + \dot{I}'_{11} + \dot{I}'_{21} + \dot{I}'_{31} + \dot{I}'_{12} + \dot{I}'_{22} + \dot{I}'_{32} \quad (4.48)$$

Lei das malhas:

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_1 \cdot \dot{Z}_L + \dot{I}'_1 \cdot \dot{Z}_C + \dot{I}_{A1} \cdot \dot{Z}_N \quad (4.49)$$

$$\dot{U}_2 = \dot{I}_2 \cdot 2 \cdot \dot{Z}_L + \dot{I}'_2 \cdot \dot{Z}_C + \dot{I}_{A2} \cdot \dot{Z}_N + \dot{I}_{A1} \cdot \dot{Z}_N \quad (4.50)$$

$$\dot{U}_3 = \dot{I}_3 \cdot 3 \cdot \dot{Z}_L + \dot{I}'_3 \cdot \dot{Z}_C + \dot{I}_{A3} \cdot \dot{Z}_N + \dot{I}_{A2} \cdot \dot{Z}_N + \dot{I}_{A1} \cdot \dot{Z}_N \quad (4.51)$$

$$\dot{U}'_1 = \dot{I}'_1 \cdot \dot{Z}_C \Leftrightarrow \dot{I}'_1 \cdot \dot{Z}_C = (\dot{I}_1 - \dot{I}'_1) \cdot 3 \cdot \dot{Z}_L + \dot{I}'_{11} \cdot \dot{Z}_C + \dot{I}_{B1} \cdot \dot{Z}_N + \dot{I}_{A3} \cdot \dot{Z}_N + \dot{I}_{A2} \cdot \dot{Z}_N \quad (4.52)$$

$$\dot{U}'_2 = \dot{I}'_2 \cdot \dot{Z}_C \Leftrightarrow \dot{I}'_2 \cdot \dot{Z}_C = (\dot{I}_2 - \dot{I}'_2) \cdot 3 \cdot \dot{Z}_L + \dot{I}'_{21} \cdot \dot{Z}_C + \dot{I}_{B2} \cdot \dot{Z}_N + \dot{I}_{B1} \cdot \dot{Z}_N + \dot{I}_{A3} \cdot \dot{Z}_N \quad (4.53)$$

$$\dot{U}'_3 = \dot{I}'_3 \cdot \dot{Z}_C \Leftrightarrow \dot{I}'_3 \cdot \dot{Z}_C = (\dot{I}_3 - \dot{I}'_3) \cdot 3 \cdot \dot{Z}_L + \dot{I}'_{31} \cdot \dot{Z}_C + \dot{I}_{B3} \cdot \dot{Z}_N + \dot{I}_{B2} \cdot \dot{Z}_N + \dot{I}_{B1} \cdot \dot{Z}_N \quad (4.54)$$

$$\dot{U}'_{11} = \dot{I}'_{11} \cdot \dot{Z}_C \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow \dot{I}'_{11} \cdot \dot{Z}_C = (\dot{I}_1 - \dot{I}'_1 - \dot{I}'_{11}) \cdot 3 \cdot \dot{Z}_L + \dot{I}'_{12} \cdot \dot{Z}_C + \dot{I}_{C1} \cdot \dot{Z}_N + \dot{I}_{B3} \cdot \dot{Z}_N + \dot{I}_{B2} \cdot \dot{Z}_N \quad (4.55)$$

$$\begin{aligned} \dot{U}'_{21} &= \dot{I}'_{21} \cdot \dot{Z}_C \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow \dot{I}'_{21} \cdot \dot{Z}_C &= (\dot{I}_2 - \dot{I}'_2 - \dot{I}'_{21}) \cdot 3 \cdot \dot{Z}_L + \dot{I}'_{22} \cdot \dot{Z}_C + \dot{I}_{C2} \cdot \dot{Z}_N + \dot{I}_{C1} \cdot \dot{Z}_N + \dot{I}_{B3} \cdot \dot{Z}_N \end{aligned} \quad (4.56)$$

$$\begin{aligned} \dot{U}'_{31} &= \dot{I}'_{31} \cdot \dot{Z}_C \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow \dot{I}'_{31} \cdot \dot{Z}_C &= (\dot{I}_3 - \dot{I}'_3 - \dot{I}'_{31}) \cdot 3 \cdot \dot{Z}_L + \dot{I}'_{32} \cdot \dot{Z}_C + \dot{I}_{C3} \cdot \dot{Z}_N + \dot{I}_{C2} \cdot \dot{Z}_N + \dot{I}_{C1} \cdot \dot{Z}_N \end{aligned} \quad (4.57)$$

Após algumas manipulações algébricas, este conjunto de equações pode ser apresentado numa forma matricial, ou seja:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}'_1 \\ \dot{U}'_2 \\ \dot{U}'_3 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = M \cdot \begin{bmatrix} \dot{I}'_1 \\ \dot{I}'_2 \\ \dot{I}'_3 \\ \dot{I}'_{11} \\ \dot{I}'_{21} \\ \dot{I}'_{31} \\ \dot{I}'_{12} \\ \dot{I}'_{22} \\ \dot{I}'_{32} \end{bmatrix} \Leftrightarrow \begin{bmatrix} \dot{I}'_1 \\ \dot{I}'_2 \\ \dot{I}'_3 \\ \dot{I}'_{11} \\ \dot{I}'_{21} \\ \dot{I}'_{31} \\ \dot{I}'_{12} \\ \dot{I}'_{22} \\ \dot{I}'_{32} \end{bmatrix} = M^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \dot{U}'_1 \\ \dot{U}'_2 \\ \dot{U}'_3 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.58)$$

onde M vale:

$$M = \begin{bmatrix} \dot{Z}_C + \dot{Z}_L + \dot{Z}_N & \dot{Z}_N & \dot{Z}_N & \dot{Z}_L + \dot{Z}_N & \dot{Z}_N \\ \dot{Z}_N & \dot{Z}_C + 2\dot{Z}_L + 2\dot{Z}_N & 2\dot{Z}_N & 2\dot{Z}_N & 2\dot{Z}_L + 2\dot{Z}_N \\ \dot{Z}_N & 2\dot{Z}_N & \dot{Z}_C + 3\dot{Z}_L + 3\dot{Z}_N & 3\dot{Z}_N & 3\dot{Z}_N \\ 0 & 0 & -\dot{Z}_C & \dot{Z}_N & 2\dot{Z}_N \\ 0 & -\dot{Z}_C & \dot{Z}_N & 2\dot{Z}_N & \dot{Z}_C + 3\dot{Z}_L + 3\dot{Z}_N \\ -\dot{Z}_C & \dot{Z}_N & 2\dot{Z}_N & \dot{Z}_C + 3\dot{Z}_L + 3\dot{Z}_N & 3\dot{Z}_N \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\dot{Z}_C \\ 0 & 0 & 0 & -\dot{Z}_C & \dot{Z}_N \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{Z}_N & \dot{Z}_L + \dot{Z}_N & \dot{Z}_N & \dot{Z}_N \\ 2\dot{Z}_N & 2\dot{Z}_N & 2\dot{Z}_L + 2\dot{Z}_N & 2\dot{Z}_N \\ 3\dot{Z}_L + 3\dot{Z}_N & 3\dot{Z}_N & 3\dot{Z}_N & 3\dot{Z}_L + 3\dot{Z}_N \\ \dot{Z}_C + 3\dot{Z}_L + 3\dot{Z}_N & 3\dot{Z}_N & 3\dot{Z}_N & 3\dot{Z}_L + 3\dot{Z}_N \\ 3\dot{Z}_N & 3\dot{Z}_N & 3\dot{Z}_L + 3\dot{Z}_N & 3\dot{Z}_N \\ 3\dot{Z}_N & 3\dot{Z}_L + 3\dot{Z}_N & 3\dot{Z}_N & 3\dot{Z}_N \\ -\dot{Z}_C & \dot{Z}_N & 2\dot{Z}_N & \dot{Z}_C + 3\dot{Z}_L + 3\dot{Z}_N \\ \dot{Z}_N & 2\dot{Z}_N & \dot{Z}_C + 3\dot{Z}_L + 3\dot{Z}_N & 3\dot{Z}_N \\ 2\dot{Z}_N & \dot{Z}_C + 3\dot{Z}_L + 3\dot{Z}_N & 3\dot{Z}_N & 3\dot{Z}_N \end{bmatrix} \quad (4.59)$$

A matriz inversa M^{-1} , com fórmulas analíticas, pode ser determinada utilizando o *Matlab*. Contudo esta solução não tem um carácter prático, considerando a complexidade das expressões analíticas obtidas. O método prático é calcular M com valores numéricos dos parâmetros \dot{Z}_L , \dot{Z}_N , \dot{Z}_C , e inverter numericamente o resultado para obter M^{-1} .

Utilizando o mesmo método, foram desenvolvidos os sistemas de equações para redes de 18, 27 e 36 candeeiros (ver os pormenores no Anexo C).

4.2.3. Correntes de fase e de neutro

No modelo simplificado com cargas concentradas, as correntes de neutro são consideradas nulas. No modelo com cargas distribuídas, é possível calcular individualmente as correntes de neutro que circulam em cada segmento da rede.

O Quadro 4.9 apresenta os valores das correntes de fase e de neutro para cada segmento da rede de nove candeeiros.

Quadro 4.9 – Correntes de fase e de neutro para cada segmento de uma rede de nove candeeiros.

Segmento (*)	Corrente da fase 1	Corrente da fase 2	Corrente da fase 3	Corrente de neutro
1	4,20 A	4,18 A	4,17 A	0,01 A
2	2,81 A	4,18 A	4,17 A	1,40 A
3	2,81 A	2,79 A	4,17 A	1,38 A
4	2,81 A	2,79 A	2,78 A	0,02
5	1,42 A	2,79 A	2,78 A	1,40 A
6	1,42 A	1,40 A	2,78 A	1,38 A
7	1,42 A	1,40 A	1,39 A	0,02
8	0,00 A	1,40 A	1,39 A	1,40 A
9	0,00 A	0,00 A	1,39 A	1,39 A

(*) O comprimento total dos nove segmentos é de 300 m

Esses resultados permitem observar que apenas os segmentos 1, 4 e 7 têm corrente de neutro quase nulo, o que corresponde à uma rede aproximadamente equilibrada. Nos outros segmentos, a rede não está equilibrada.

4.2.4. Correntes que circulam na bainha

Numa rede de IP, a bainha e o condutor de neutro estão ligados, entre si em cada candeeiro, conforme se ilustra na Figura 4.21. [Regime de Neutro TN (Terra pelo Neutro), ver Secção 2.2.2, Capítulo 2]

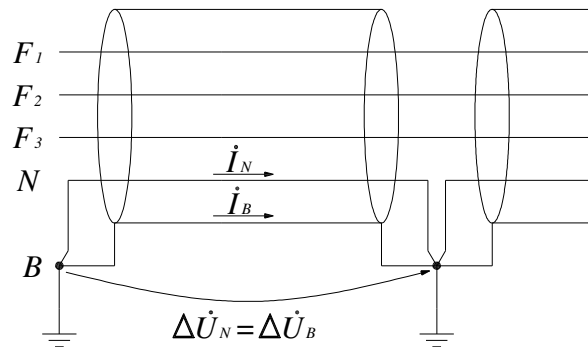


Figura 4.21: Ligações entre a bainha e o condutor de neutro numa rede de IP.

Na Figura 4.21, em que F_1 , F_2 e F_3 representam os condutores de fase, N o condutor de neutro, e B a bainha metálica, observa-se que a queda de tensão do condutor de neutro ΔU_N e a queda de tensão da bainha ΔU_B são iguais. Dessa igualdade, derivam as seguintes relações:

$$\Delta U_B = \Delta U_N \Rightarrow \dot{Z}_B \cdot \dot{I}_B = \dot{Z}_N \cdot \dot{I}_N \Rightarrow \frac{|\dot{I}_N|}{|\dot{I}_B|} = \frac{|\dot{Z}_B|}{|\dot{Z}_N|} \approx \frac{R_B}{R_N} \text{ (constante)} \quad (4.60)$$

Da expressão (4.60), é possível concluir que a relação entre a corrente $|\dot{I}_N|$ do condutor de neutro e a corrente $|\dot{I}_B|$ que circula na bainha é constante. Esta relação corresponde aproximadamente à relação entre a resistência R_B da bainha e a resistência R_N do condutor de neutro. As medições no terreno irão confirmar essa relação.

Contudo, do ponto de vista de simulação, as correntes que circulam na bainha foram consideradas desprezáveis.

4.2.5. Queda de tensão

A) SIMPLIFICAÇÕES DAS EXPRESSÕES UTILIZADAS NO CÁLCULO DAS QUEDAS DE TENSÃO

O cálculo das quedas de tensão é baseado em simplificações teóricas que assumem alguns parâmetros desprezáveis. Antes de se apresentarem os resultados das simulações, é importante discutir dessas simplificações.

A expressão (2.19) do Capítulo 2, utilizada nos cálculos simplificados do projectista [reproduzida em (4.61)], considera desprezável a reactância do condutor. Outro parâmetro de simplificação, é que o factor de potência $\cos\varphi$ utilizado, é o mesmo que o factor de potência da carga, sem contabilizar o possível efeito do condutor sobre este valor.

$$\Delta U = \rho \cdot \frac{l}{s} \cdot \cos\varphi \cdot I_s \Rightarrow \Delta U(\%) = \frac{100}{U_s} \left(\rho \cdot \frac{l}{s} \cdot \cos\varphi \right) \cdot I_s \quad (4.61)$$

Na sua ficha técnica [4-18], a CERTIEL apresenta uma expressão mais avançada de queda de tensão, onde a reactância ωL do condutor é considerada [expressão (4.62)]. Contudo, o factor de potência utilizado é somente o $\cos\varphi$ da carga.

$$\Delta U(\%) = \frac{100}{U_s} \left(\rho \cdot \frac{l}{s} \cdot \cos\varphi + \omega L \cdot \sin\varphi \right) \cdot I_s \quad (4.62)$$

Nota: As redes de IP não estão integradas na jurisdição da CERTIEL. A expressão (4.62) é apresentada e utilizada num contexto puramente teórico.

Por meio de diversos diagramas vectoriais, a referência [4-19, p. 158] demonstra a existência dos erros introduzidos pelas simplificações, mas considera-se os seus efeitos desprezáveis na maioria das situações. Contudo, a mesma referência [4-19, p. 158] apresenta a expressão exacta (4.63) da queda de tensão, que é dada por:

$$\Delta U = |\dot{U}_s| - |\dot{U}_c| \Rightarrow \Delta U(\%) = 100 \cdot \left(1 - \frac{|\dot{U}_s| - |\dot{U}_c|}{|\dot{U}_s|} \right) \quad (4.63)$$

em que:

ΔU - Queda de tensão [V];

$\Delta U(\%)$ - Queda de tensão em percentagem [%];

$|\dot{U}_s|$ - Amplitude da tensão simples na origem [V];

$|\dot{U}_c|$ - Amplitude da tensão simples na carga [V].

A expressão (4.63) é baseada na definição da própria queda de tensão, onde a queda de tensão ΔU é a diferença entre a amplitude das tensões simples na origem $|\dot{U}_s|$ e na carga $|\dot{U}_c|$.

O Quadro 4.10 apresenta resultados de simulações com os três métodos de cálculo. Nessas simulações, todas as cargas estão concentradas na extremidade do troço, respectivamente para 9 e 36 candeeiros, numa rede trifásica equilibrada. Os valores numéricos utilizados nas simulações foram tirados do Quadro 4.7 para os condutores, e do Quadro 3.4 para as cargas.

Quadro 4.10 – Quedas de tensão - comparação numérica entre os diversos métodos de cálculo (com cargas concentradas).

Candeeiros		Comprimento dos cabos	Quedas de tensão (*) (cargas concentradas)		
			Método simplificado (2.19) (*)	CERTIEL (4.62)	Exacta (4.63)
Total	Por fase				
9	3	300 m	1,88 V (0,8 %)	1,88 V (0,8 %)	2,0 V (0,9 %)
36	12	1200 m	26,2 V (11,3 %)	26,2 V (11,3 %)	28,3 V (12,3 %)

(*) Os cálculos deste quadro foram feitos com carga de 281 W.

A análise dos resultados apresentados no Quadro 4.10 demonstra que, em situações normais, em que a queda de tensão é inferior a 5 %, as diferenças entre os métodos são desprezáveis. Contudo, para manter o rigor teórico, a expressão exacta (4.63) será utilizada nas simulações que a seguir se apresentam.

B) RESULTADOS DOS CÁLCULOS DAS QUEDAS DE TENSÃO

O cálculo das quedas de tensão, apresentado no Capítulo 2, é baseado num modelo simplificado, onde todas as cargas são concentradas no fim do troço (conforme se ilustra na Figura 4.18). Aplicando a mesma definição, mas utilizando o modelo analítico, é possível comparar os resultados, conforme se ilustra no gráfico da Figura 4.22. Os valores numéricos são apresentados no Quadro 4.11.

Quadro 4.11 – Valores numéricos das quedas de tensão calculadas.

Cargas	Número de candeeiros			
	9	18	27	36
Concentrada	1,60 V (0,7 %)	6,32 V (2,7 %)	13,9 V (6,0 %)	23,9 V (10,4 %)
Distribuída	1,35 V (0,6 %)	4,26 V (1,9 %)	8,67 V (3,8 %)	14,5 V (6,3 %)

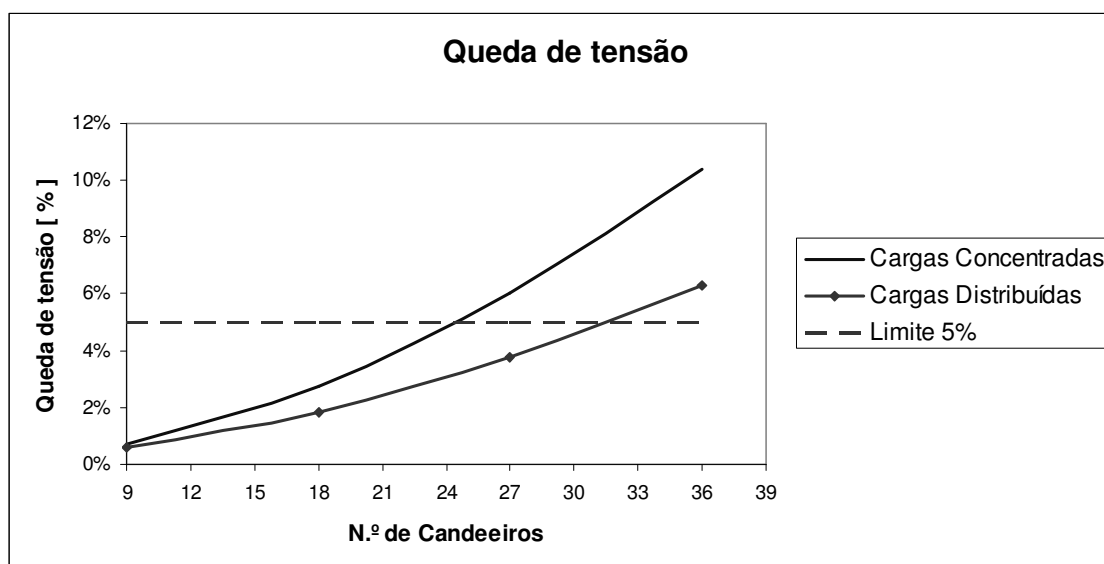


Figura 4.22: Gráfico das variações das quedas de tensão - comparação entre o modelo com cargas concentradas e o modelo com cargas distribuídas.

Os resultados apresentados na Figura 4.22 foram baseados nos valores numéricos tirados do Quadro 4.7 para os condutores, do Quadro 3.4 para as cargas, e da expressão (4.63) para a queda de tensão exacta.

Tecnicamente, considerando um limite máximo de 5 % de queda de tensão (ver Capítulo 2), o gráfico da Figura 4.22 permite concluir que o número máximo de candeeiros não poderá ultrapassar 24 para o modelo com cargas concentradas. O mesmo gráfico permite concluir também que o número máximo de candeeiros não poderá ultrapassar 32 para o modelo com cargas distribuídas. Para o projectista, este resultado significa que o método simplificado (com cargas concentradas) é bastante conservador, o que constitui uma segurança. De facto, considerando que não é possível controlar todas as variáveis em situação real, a utilização do método com cargas concentradas é mais segura.

Considerando que cada rede de IP tem características próprias, não é possível generalizar quantitativamente as diferenças entre o modelo com cargas concentradas e o modelo com cargas distribuídas. Só é possível concluir que o modelo simplificado com cargas concentradas permite obter valores de queda de tensão superiores, que constitui um muito bom índice de segurança.

Capítulo 5. APRESENTAÇÃO DA METODOLOGIA EXPERIMENTAL

5.1. OBJECTIVO

O objectivo deste capítulo é de descrever a metodologia experimental utilizada para obter os valores medidos no terreno.

Considerando a necessidade de limitar os custos (cabos enterrados em vala, armaduras, etc.), não era realista elaborar uma experiência totalmente controlada em laboratório. Por esse motivo, a intenção foi utilizar uma instalação existente, bem conhecida, e efectuar medições por intermédio de equipamentos portáteis.

A metodologia elaborada é constituída pelos seguintes passos:

- ◆ 1º Identificar uma instalação existente de IP que foi bem concebida, bem documentada e bem executada, onde será possível obter medições fiáveis;
- ◆ 2º Definir, por intermédio de equações e esquemas, os métodos para medir os parâmetros eléctricos, incluindo a localização das diversas sondas, aparelhos de medição e fontes de alimentação;
- ◆ 3º Elaborar um protocolo experimental que defina as etapas para a preparação do local, as medições a tomar no terreno e os aparelhos a utilizar;
- ◆ 4º Efectuar as medições no terreno, de acordo com o protocolo definido;

- ◆ 5º Apresentar e analisar os valores obtidos para confirmar, ou infirmar, a validade dos cálculos originalmente utilizados na elaboração do projecto.

Os passos 1º, 2º, 3º e 4º serão apresentados neste capítulo. O passo 5º será apresentado no Capítulo 6.

5.2. LOCAL DAS MEDIÇÕES

5.2.1. Escolha do local

Considerando a necessidade de medir os parâmetros no terreno, o local escolhido deve ter as seguintes características:

- ◆ 1) Projecto original bem concebido e bem documentado;
- ◆ 2) Execução controlada;
- ◆ 3) Possibilidade de colocar facilmente sondas e aparelhos de medição;
- ◆ 4) Equipamentos instalados de IP normalizados.

O autor deste trabalho realizou um projecto que reúne todos esses requisitos. O projecto original foi aprovado pelo Distribuidor EDP (ponto 1). O autor foi também fiscal de obras na altura da execução do referido projecto (ponto 2). A rede instalada é equipada de armários de distribuição, que facilita a colocação de equipamentos de medição (ponto 3). Os cabos, candeeiros e armaduras instalados, são do tipo normalizado pelo Distribuidor (ponto 4).

5.2.2. Características técnicas do local e topologia

A Figura 5.1 apresenta o esquema simplificado da rede de IP do local escolhido para as medições.

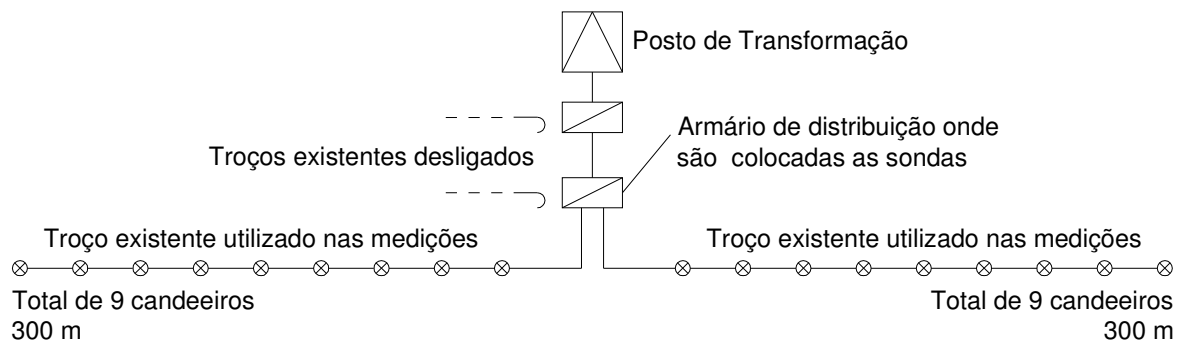


Figura 5.1: Esquema simplificado da rede de IP da instalação existente utilizada para medições no terreno.

A topologia da rede existente tem as seguintes características:

- ◆ 1) Cargas trifásicas equilibradas (total de 9 candeeiros por troço, 3 candeeiros por fase);
- ◆ 2) Troços sem derivações;
- ◆ 3) Armários de distribuição que permitem isolar os troços a medir, e colocar as sondas e os aparelhos de medição;
- ◆ 4) Presença de dois troços idênticos para facilitar e diversificar as medições.

A existência de dois troços idênticos permite aproveitar ao máximo o tempo disponível para as medições.

Outras características são as seguintes:

- ◆ 1) Alimentação trifásica enterrada;
- ◆ 2) Sistema de terra TN, com neutro à terra e massas ao neutro (ver Capítulo 2);
- ◆ 3) Malha de cobre nu que interliga os eléctrodos de terra entre eles;
- ◆ 4) Alimentação dos candeeiros por cabo de cobre de 10 mm^2 de secção, com três condutores de fase mais um condutor de neutro, protegidos por bainha metálica (cabo normalizado do tipo VAV 4x10);

- ◆ 5) Cabos de cobre que permitem um fácil manuseamento dos condutores;
- ◆ 6) Base dos candeeiros com 30 cm de diâmetro que permite um fácil acesso aos cabos e à platine interior;
- ◆ 7) Armaduras de iluminação idênticas entre si, do mesmo fabricante, com lâmpadas de vapor de sódio a alta pressão com potência de 250 W e tensão nominal $U_n = 230$ V;
- ◆ 8) Instalação realizada pelo mesmo instalador, na mesma altura e estabilizada com alguns anos de idade (execução em 2004).

Considerando as características do local escolhido, foi elaborado um protocolo indicado nas secções que a seguir se apresentam.

5.3. DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS A MEDIR E MÉTODOS DE MEDIÇÃO

5.3.1. Parâmetros a medir no local

As medições devem permitir obter dois grupos de valores.

A) PARÂMETROS PASSIVOS DOS CABOS – Medir os seguintes parâmetros relacionados com os cabos:

- ◆ 1) Impedância dos cabos - Resistência eléctrica;
- ◆ 2) Impedância dos cabos - Indutância aparente longitudinal;
- ◆ 3) Impedância dos cabos - Capacidade de serviço transversal.

Considerando que a resistividade dos cabos é função da temperatura (ver Capítulo 2), um parâmetro adicional será medido:

- ◆ 4) Temperatura do solo por intermédio duma sonda de temperatura.

Relativamente às medições das capacidades do cabo, os cálculos teóricos apresentados no Capítulo 4 demonstram valores muito baixos, muito inferiores às precisões dos equipamentos de medição utilizados. É provável que, no terreno, não seja possível medir facilmente as capacidades.

B) PARÂMETROS ACTIVOS DE FUNCIONAMENTO – Medir os seguintes parâmetros relacionados com o funcionamento normal da rede com cargas ligadas:

- ◆ 1) Correntes nas fases e no neutro [A];
- ◆ 2) Corrente residual na bainha [A];
- ◆ 3) Queda de tensão [V];
- ◆ 4) Factor de potência [];
- ◆ 5) Resistência da terra [Ω].

Contudo, por motivo de segurança, e dos riscos envolvidos, não serão feitas medições em caso de curto-circuito à tensão nominal.

5.3.2. Métodos de medição da impedância dos cabos - Resistência eléctrica

A Figura 5.2-a) esquematiza a situação no terreno, onde a distância entre as extremidades dos cabos a medir, é de 300 m. Este condicionalismo não permite medir directamente um troço unifilar individual, porque obrigaria a utilizar sondas com cabos de medição também de 300 m. A única forma de obter os valores individuais, é de utilizar o método de curto-circuito. Este método está esquematizado na Figura 5.2-b).

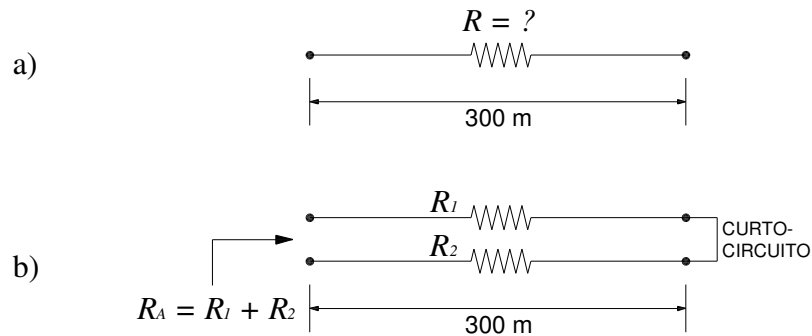


Figura 5.2: a) Distância física entre as extremidades do cabo a medir; b) Método de curto-circuito, em que se ligam as extremidades.

Na realidade, os cabos a medir têm quatro condutores e uma bainha, em paralelo com um condutor de terra de cobre nu, enterrado, de 35 mm^2 de secção, conforme se indica na Figura 5.3.

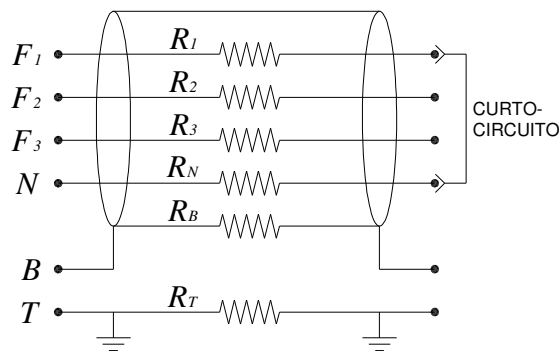


Figura 5.3: Método de curto-circuito, aplicado aos cabos a medir no terreno.

Utilizando várias medições em curto-circuito, é possível obter um conjunto de resultados que permitem calcular os valores individuais de cada troço unifilar. Considerando a Figura 5.3, obtém-se o seguinte conjunto de equações:

$$\text{Curto-circuito entre } F_1 \text{ e } N : R_A = R_1 + R_N \quad (5.1)$$

$$\text{Curto-circuito entre } F_2 \text{ e } N : R_B = R_2 + R_N \quad (5.2)$$

$$\text{Curto-circuito entre } F_3 \text{ e } N : R_C = R_3 + R_N \quad (5.3)$$

$$\text{Curto-circuito entre } B \text{ e } N : R_D = R_B + R_N \quad (5.4)$$

$$\text{Curto-circuito entre } T \text{ e } N : R_E = R_T + R_N \quad (5.5)$$

$$\text{Curto-circuito entre } F_1 \text{ e } F_2 : R_F = R_1 + R_2 \quad (5.6)$$

em que:

F_1, F_2 e F_3 - Condutores de fase 1, 2 e 3, respectivamente;

N - Condutor de neutro;

B - Condutor da bainha;

T - Condutor de terra;

R_1, R_2 e R_3 - Resistências dos condutores de fase F_1, F_2 e F_3 , respectivamente [Ω];

R_N - Resistência do condutor de neutro [Ω];

R_B - Resistência da bainha [Ω];

R_T - Resistência do condutor de terra [Ω].

O conjunto de equações (5.1), (5.2), (5.3), (5.4), (5.5) e (5.6) pode ser representado numa forma matricial, por:

$$\begin{bmatrix} R_A \\ R_B \\ R_C \\ R_D \\ R_E \\ R_F \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ R_3 \\ R_N \\ R_B \\ R_T \end{bmatrix} \quad (5.7)$$

A inversão da matriz permite obter directamente os valores individuais das resistências de cada troço unifilar. Assim, utilizando os resultados das medições em curto-circuito, virá:

$$\begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ R_3 \\ R_N \\ R_B \\ R_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/2 & -1/2 & 0 & 0 & 0 & 1/2 \\ -1/2 & 1/2 & 0 & 0 & 0 & 1/2 \\ -1/2 & -1/2 & 1 & 0 & 0 & 1/2 \\ 1/2 & 1/2 & 0 & 0 & 0 & -1/2 \\ -1/2 & -1/2 & 0 & 1 & 0 & 1/2 \\ -1/2 & -1/2 & 0 & 0 & 1 & 1/2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R_A \\ R_B \\ R_C \\ R_D \\ R_E \\ R_F \end{bmatrix} \quad (5.8)$$

O esquema da Figura 5.4 apresenta as ligações a utilizar no terreno para medição das resistências. Utilizando uma fonte de corrente contínua, a corrente é mantida num valor de 3 A, que permite aquecer o cabo tal como uma utilização em situação de carga normal.

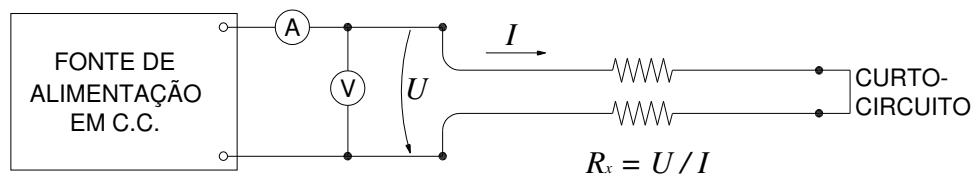


Figura 5.4: Esquema de ligações para medir as resistências R_x de dois condutores em série (curto-circuitados numa extremidade).

5.3.3. Métodos de medição da impedância dos cabos - Indutância longitudinal

Cada condutor é caracterizado por uma indutância própria e várias indutâncias mútuas, dependendo do número de condutores do cabo (ver Capítulo 4). Mesmo com algumas simplificações e igualdades, um cabo com quatro condutores (geometria quadrada) e uma bainha metálica tem cinco diferentes indutâncias: duas próprias (L_{11} e L_{bainha}), e três mútuas (M_{12} , M_{13} , e $M_{1-bainha}$). Isto implica que são necessárias cinco equações para determinar cada indutância. Após muitas tentativas de construir uma matriz tal como a expressão (5.7), pelo método de curto-circuito, não foi encontrada uma matriz com solução (o determinante era sempre zero). Assim, o método de curto-circuito não permite determinar todas as indutâncias.

O compromisso escolhido foi constituído por um conjunto de três medições, com três expressões, conforme se indica no Quadro 5.1.

Quadro 5.1 – Medições das indutâncias e conjunto de expressões.

Grupo	Correntes nos condutores	Expressões
A		<p><u>Curto-circuito entre os condutores das Fases 1 e 2:</u></p> $\Delta\dot{U}_1 = R_1 \cdot \dot{I}_1 + j\omega L_{11} \cdot \dot{I}_1 + j\omega M_{21} \cdot \dot{I}_2$ $\Delta\dot{U}_2 = R_2 \cdot \dot{I}_2 + j\omega L_{22} \cdot \dot{I}_2 + j\omega M_{12} \cdot \dot{I}_1,$ <p>com $L_{11} = L_{22}$ e $M_{12} = M_{21}$</p> $\Rightarrow \Delta\dot{U}_1 - \Delta\dot{U}_2 = (R_1 + R_2) \cdot \dot{I}_1 + j\omega(2L_{11} - 2M_{21}) \cdot \dot{I}_1,$ <p>com $\dot{I}_2 = -\dot{I}_1 \Rightarrow \boxed{L_A = 2L_{11} - 2M_{21}}$</p>
B		<p><u>Curto-circuito entre os condutores das Fases 1 e 3:</u></p> $\Delta\dot{U}_1 = R_1 \cdot \dot{I}_1 + j\omega L_{11} \cdot \dot{I}_1 + j\omega M_{31} \cdot \dot{I}_3$ $\Delta\dot{U}_3 = R_3 \cdot \dot{I}_3 + j\omega L_{33} \cdot \dot{I}_3 + j\omega M_{13} \cdot \dot{I}_1,$ <p>com $L_{11} = L_{33}$ e $M_{13} = M_{31}$</p> $\Rightarrow \Delta\dot{U}_1 - \Delta\dot{U}_3 = (R_1 + R_3) \cdot \dot{I}_1 + j\omega(2L_{11} - 2M_{31}) \cdot \dot{I}_1,$ <p>com $\dot{I}_3 = -\dot{I}_1 \Rightarrow \boxed{L_B = 2L_{11} - 2M_{31}}$</p>
C		<p><u>Curto-circuito entre o condutor da Fases 1 e a Bainha:</u></p> $\Delta\dot{U}_1 = R_1 \cdot \dot{I}_1 + j\omega L_{11} \cdot \dot{I}_1 + j\omega M_{51} \cdot \dot{I}_5$ $\Delta\dot{U}_5 = R_5 \cdot \dot{I}_5 + j\omega L_{55} \cdot \dot{I}_5 + j\omega M_{15} \cdot \dot{I}_1,$ <p>com $L_{11} \neq L_{55}$ e $M_{15} = M_{51}$</p> $\Rightarrow \Delta\dot{U}_1 - \Delta\dot{U}_5 = (R_1 + R_5) \cdot \dot{I}_1 + j\omega(L_{11} + L_{55} - 2M_{51}) \cdot \dot{I}_1,$ <p>com $\dot{I}_5 = -\dot{I}_1 \Rightarrow \boxed{L_C = L_{11} + L_{55} - 2M_{51}}$</p>
		Corrente no sentido do observador para o plano do papel
		Corrente no sentido do plano do papel para o observador
	$\dot{I}_1, \dot{I}_2, \dot{I}_3, \dot{I}_4, \dot{I}_5$	Representam as correntes nas fases 1, 2, e 3, a corrente de neutro, e a corrente na bainha, respectivamente.

O método só permite medir os coeficientes de indução aparentes L_A , L_B e L_C , pois os valores individuais das cinco indutâncias não podem ser medidos directamente. Contudo, utilizando os valores individuais das indutâncias próprias e mútuas determinados no Capítulo 4, Quadro 4.1, e o conjunto de expressões do Quadro 5.1, é possível confirmar as medições com os valores do Quadro 5.2.

Quadro 5.2 – Valores numéricos das indutâncias aparentes por condutor, a comparar com os valores a medir no terreno para cabo VAV 4x10.

Curto-circuitos	Medições ($I = 300\text{m}$)	Teoria Sem bainha	FEMM Sem bainha	FEMM Com bainha
L_A : Condutor 1 - Condutor 2	(A medir no terreno)	189,8 μH	189,3 μH	217,2 μH
L_B : Condutor 1 - Condutor 3	(A medir no terreno)	231,4 μH	230,7	275,4 μH
L_C : Condutor 1 - Bainha	(A medir no terreno)	-	-	254,2 μH

O Quadro 5.2 será a base de comparação dos resultados teóricos com os resultados experimentais.

Relativamente ao método propriamente dito de medições das indutâncias, existem várias possibilidades. Um dos métodos mais conhecidos é a ponte Maxwell-Wein [5-1]. O fabricante do aparelho de medição utilizado nestes testes, utiliza este método (ver Anexo D). O esquema muito simplificado da Figura 5.5 apresenta as ligações a utilizar no terreno para as medições das indutâncias, em que L_X representa a indutância aparente relativa a um par de condutores.

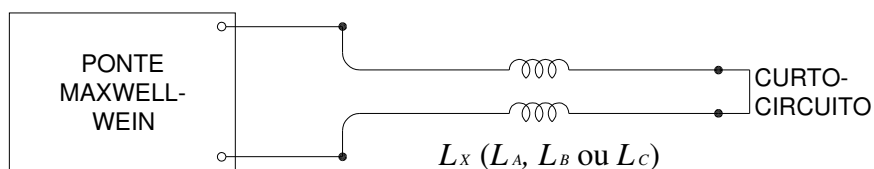


Figura 5.5: Esquema de ligações para medir as indutâncias de dois condutores curto-circuitados numa extremidade.

5.3.4. Métodos de medição da impedância dos cabos - Capacidade transversal

Contrariamente às indutâncias, o método de curto-circuito funciona para as capacidades. A Figura 5.6 apresenta as diversas medições em curtos-circuitos, necessárias para determinar as capacidades parciais individuais C_{10} (entre cada condutor e a bainha), C_{12} (entre dois condutores internos mais próximos) e C_{13} (entre dois condutores internos mais afastados).

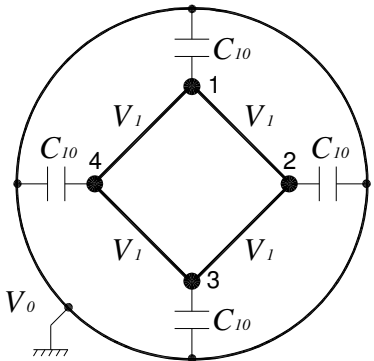
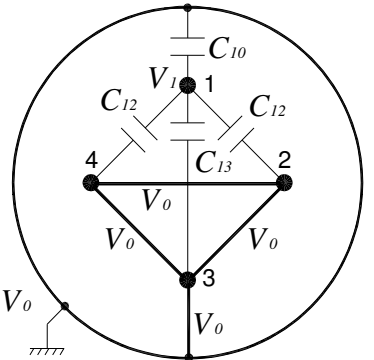
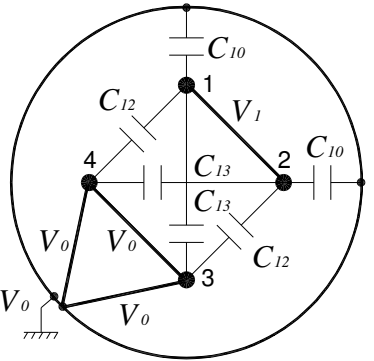
	<p><u>CC1</u>- Curto-circuito entre os três condutores de fase e o neutro (V_1)</p> <p><u>CC2</u>- Curto-circuito com apenas a bainha (V_0)</p> $C_A = 4 \cdot C_{10}$
	<p><u>CC1</u>- Curto-circuito com apenas o condutor de fase 1 (V_1)</p> <p><u>CC2</u>- Curto-circuito entre os condutores das fases 2 e 3, o condutor de neutro, e a bainha (V_0)</p> $C_B = C_{10} + 2 \cdot C_{12} + C_{13}$
	<p><u>CC1</u>- Curto-circuito entre os condutores de fase 1 e 2 (V_1)</p> <p><u>CC2</u>- Curto-circuito entre o condutor da fase 3, o condutor de neutro e a bainha (V_0)</p> $C_C = 2 \cdot C_{10} + 2 \cdot C_{12} + 2 \cdot C_{13}$

Figura 5.6: Medições das capacidades utilizando o método de curto-circuito.

De acordo com a Figura 5.6, são necessárias três medições: C_A , C_B , e C_C . Os valores das capacidades parciais C_{10} , C_{12} , e C_{13} , são calculados utilizando a matriz (5.9).

$$\begin{bmatrix} C_A \\ C_B \\ C_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \\ 2 & 2 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} C_{10} \\ C_{12} \\ C_{13} \end{bmatrix} \Leftrightarrow \begin{bmatrix} C_{10} \\ C_{12} \\ C_{13} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/4 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1/2 \\ -1/4 & -1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} C_A \\ C_B \\ C_C \end{bmatrix} \quad (5.9)$$

O Anexo B apresenta a demonstração dessas expressões.

Relativamente ao método propriamente dito de medição das capacidades, existem várias possibilidades. Um dos métodos mais conhecidos é a ponte Maxwell-Wein [5-1]. O fabricante do aparelho de medição utilizado nestes testes, utiliza este método (ver Anexo D). O esquema muito simplificado da Figura 5.7 apresenta as ligações a utilizar no terreno para as medições das capacidades, em que C_x representa a capacidade a medir entre 2 conjuntos de curto-circuitos, de acordo com a Figura 5.6.

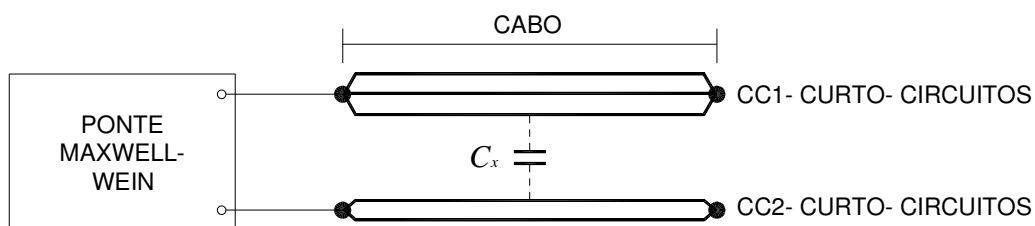


Figura 5.7: Exemplo de esquema de ligações para medir as capacidades.

5.3.5. Métodos de medição dos parâmetros eléctricos de funcionamento em carga

A) Medições em laboratório numa luminária em funcionamento

Foi possível obter, do fabricante, uma luminária nova idêntica às luminárias existentes no local. As fotografias da Figura 5.8 apresentam a instalação utilizada nas medições em laboratório (ver também a Secção 3.5.2, Capítulo 3).



Figura 5.8: Fotografias da instalação utilizada em laboratório para medir os parâmetros eléctricos duma luminária nova.

Utilizando a instalação em laboratório indicada na Figura 5.8, foi possível obter os seguintes parâmetros em tempo real:

- ◆ Corrente de serviço;
- ◆ Potência activa;
- ◆ Factor de potência.

B) Medições no local das cargas em rede

Numa rede de IP, as cargas utilizadas, ou seja, as armaduras de iluminação ligadas à rede, não têm características eléctricas lineares (ver Capítulo 3). Isto implica, no tempo, uma mudança dos parâmetros eléctricos na rede. Assim, as medições dos parâmetros eléctricos em carga são muito mais complexas que as medições dos parâmetros passivos dos cabos. Por esse motivo, um analisador de rede sofisticado foi escolhido para medir os parâmetros em tempo real, possibilitando uma posterior análise. Este aparelho permite ligar simultaneamente várias sondas de tensão e de corrente, possibilitando analisar um conjunto de características na rede trifásica.

A presença de armários de distribuição na rede de IP, em análise, facilita muito a colocação das sondas, particularmente as sondas de corrente que necessitem dum condutor isolado acessível. A Figura 5.9 apresenta o esquema onde as sondas foram colocadas no armário de IP.

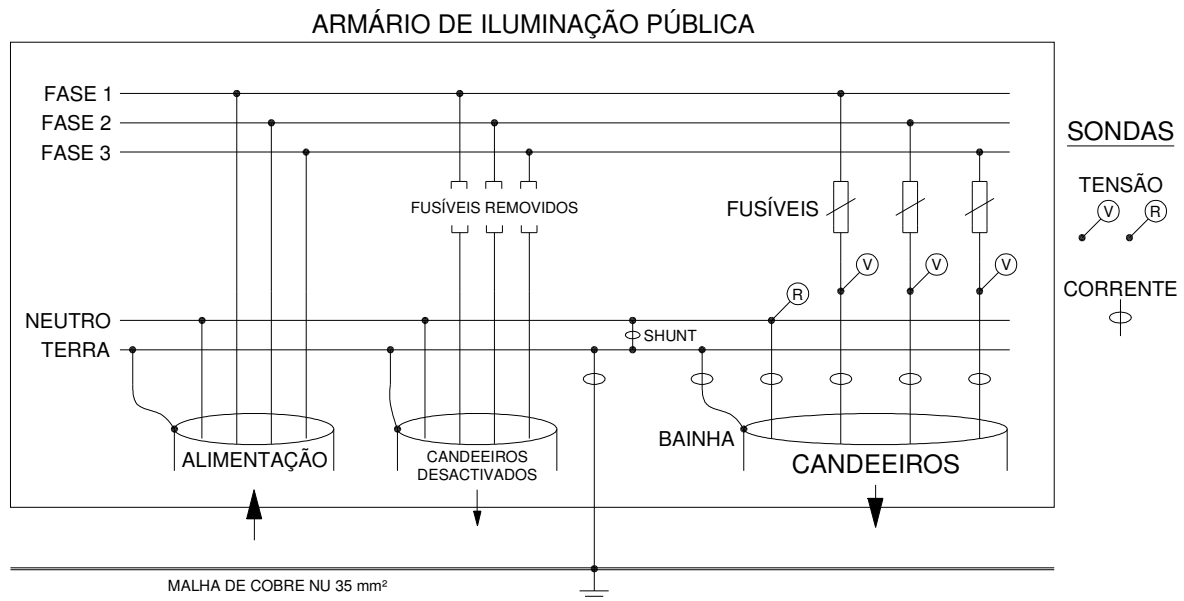


Figura 5.9: Colocação das sondas de tensão e de corrente no armário de distribuição de alimentação.

A Figura 5.10 apresenta o esquema onde as sondas foram colocadas nos candeeiros, em que:

I_C - Corrente da luminária (carga) [A];

I_{E1} , I_{E2} , I_{E3} - Correntes de fase 1, 2, e 3, respectivamente (entrada) [A];

I_{S1} , I_{S2} , I_{S3} - Correntes de fase 1, 2, e 3, respectivamente (saída) [A];

I_{EN} - Corrente de neutro (entrada) [A];

I_{SN} - Corrente de neutro (saída) [A];

I_{EB} - Corrente da bainha (entrada) [A];

I_{SB} - Corrente da bainha (saída) [A];

I_T - Corrente no condutor de terra (onde não foi possível colocar sondas) [A];

V_1 , V_2 , V_3 - Tensões simples de fase 1, 2 e 3, respectivamente [V].

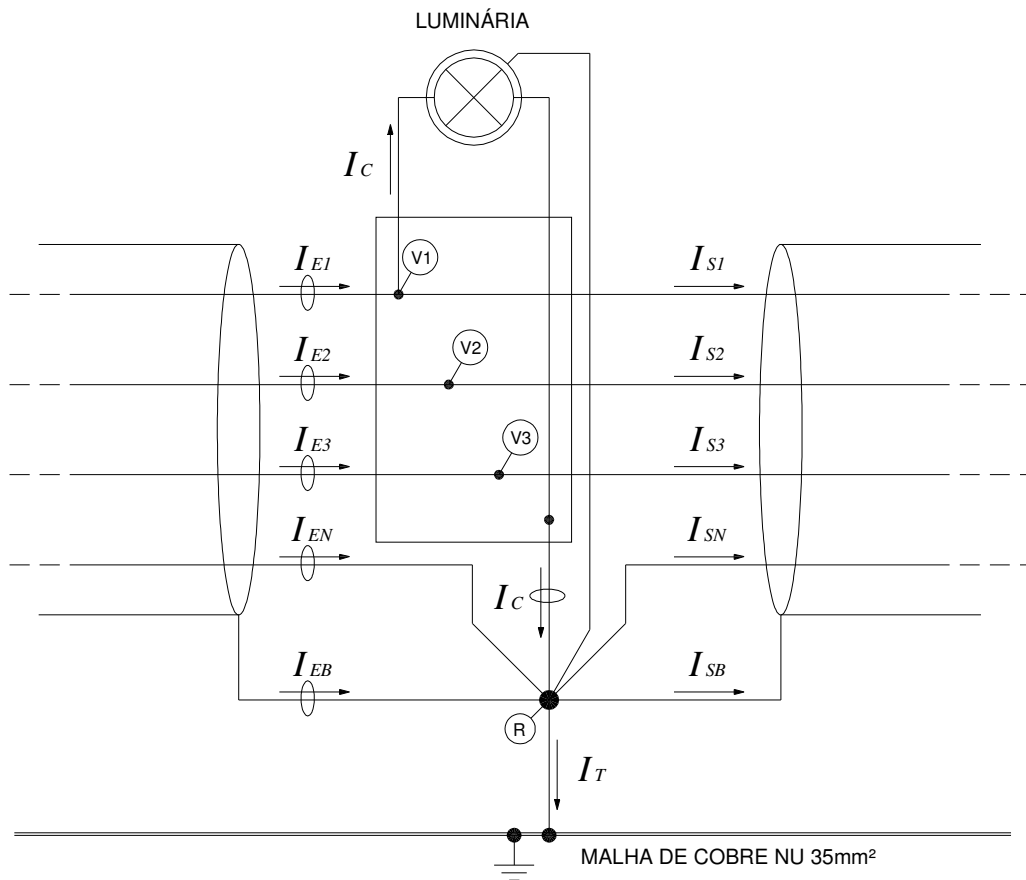


Figura 5.10: Colocação das sondas de tensão e de corrente nos candeeiros.

As fotografias da Figura 5.11 apresentam a instalação utilizada nas medições no terreno, incluindo a colocação de sondas.



Figura 5.11: Fotografias da instalação utilizada no terreno para medir os parâmetros eléctricos duma rede IP em funcionamento.

5.4. PROTOCOLO EXPERIMENTAL APLICADO NO TERRENO

Baseado nas secções anteriores, um protocolo experimental foi elaborado. A Figura 5.12 apresenta as principais etapas na obtenção dos valores das medições no terreno.

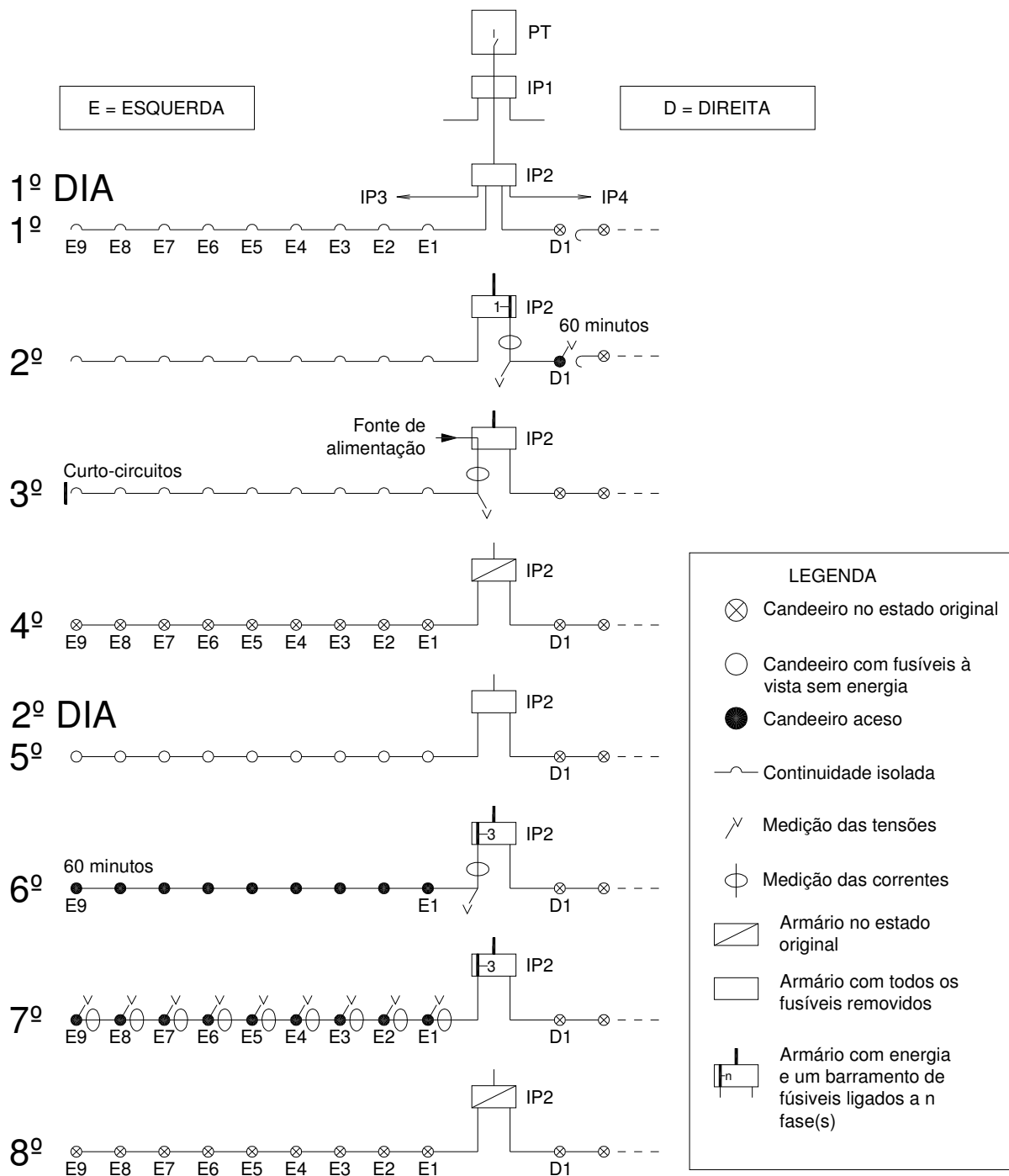


Figura 5.12: Etapas na preparação do local e nas medições experimentais.

Os parágrafos seguintes descrevem os pormenores dessas etapas.

5.4.1. Etapa 1 – Preparação do local

Considerando a necessidade de controlar as condições experimentais, é essencial isolar os troços em análise do resto da rede existente de IP. Esta etapa consiste em isolar os troços desde o Posto de Transformação até ao último candeeiro a analisar.

Esta etapa prepara também os dois troços em análise (D-DIREITO e E-ESQUERDO) para facilitar as medições.

O troço D-DIREITO é condicionado para as medições numa luminária isolada (D1).

O troço E-ESQUERDO é condicionado para facilitar as medições dos parâmetros passivos dos cabos, utilizando o método de curto-circuito. As cargas das luminárias E1 até E9 são desligadas do cabo de alimentação (ver Figura 5.12), mas a continuidade é mantida para simular um troço contínuo de cabo de cerca de 300 m. Os condutores das fases são identificados para evitar qualquer troca de fase.

Nesta etapa, os troços a analisar não estão em tensão.

5.4.2. Etapa 2 – Medição numa luminária única em tensão

O candeeiro D1 (ver Figura 5.12) é ligado à rede de alimentação por um período de 60 minutos. Os parâmetros eléctricos são medidos em tempo real.

O troço D-DIREITO está em tensão.

O troço E-ESQUERDO (não em tensão) é preparado para a próxima etapa.

5.4.3. Etapa 3 – Medição das impedâncias dos condutores

Esta etapa mede as impedâncias dos condutores, utilizando o método de curto-circuito.

O candeeiro D1 (ver Figura 5.12) é recolocado no seu estado original.

5.4.4. Etapa 4 – Recolocar a rede no seu estado original

Recolocar, no seu estado original, antes de anoitecer, a rede de IP afectada pelas medições.

Fim do primeiro dia de medições.

5.4.5. Etapa 5 – Condicionar os candeeiros E1 até E9

No segundo dia de medições, o troço em análise é novamente isolado do resto da rede de IP existente.

O troço D-DIREITO não é utilizado, e não precisa de ser condicionado.

O troço E-ESQUERDO é condicionado para facilitar a medição dos parâmetros activos de funcionamento em carga, tal como a corrente na bainha, as correntes de cada candeeiro, etc. Os candeeiros E1 até E9 são ligados à rede (ver Figura 5.12), mas com os fusíveis e ligadores à vista, para facilitar a colocação das sondas de tensão e de corrente.

Nesta etapa, os troços a analisar não estão em tensão.

5.4.6. Etapa 6 – Medição dum troço em tensão - Origem da alimentação

O troço E-ESQUERDO está em tensão com todas as luminárias ligadas. Os diversos parâmetros são medidos no armário de distribuição. As medições são feitas por um período de 60 minutos, mas a alimentação não está desligada no fim deste período.

O troço E-ESQUERDO está em tensão.

O troço D-DIREITO não é utilizado, e não está em tensão.

5.4.7. Etapa 7 – Medição dum troço em tensão - Candeeiros individuais

Com os candeeiros ainda ligados à rede de alimentação, medir os parâmetros individuais dos candeeiros E1 até E9 (ver Figura 5.12).

O troço E-ESQUERDO está em tensão.

O troço D-DIREITO não é utilizado, e não está em tensão.

5.4.8. Etapa 8 – Recolocar a rede no seu estado original

Recolocar, no seu estado original, antes anoitecer, a rede de IP afectada pelas medições.

Fim do segundo dia de medições e fim das medições.

5.5. PORMENORES TÉCNICOS E LOGÍSTICOS ADICIONAIS

5.5.1. Equipamentos de medição

O equipamento de medição mais sofisticado foi um analisador de rede, equipado de sondas de alta sensibilidade que permitem as medições e as gravações em tempo real dos parâmetros previstos na Secção 5.3.1.

Considerando a necessidade de medir os parâmetros no terreno, os aparelhos de medição deveriam ser do tipo portátil, tal como o analisador de rede. Infelizmente, alguns equipamentos disponíveis não eram portáteis, tal como as fontes de alimentação. Isso complicou as medições e a segurança no local.

O Anexo D apresenta as especificações técnicas dos aparelhos utilizados nas medições.

5.5.2. Condicionalismo do local e logística

Na prática, existiam muitas restrições na realização desta experiência, nomeadamente:

- ◆ Por razão de segurança rodoviária, não foi possível desactivar os candeeiros durante a noite, pois as medições foram efectuadas durante o dia;

- ◆ Por motivo requerido pelo Distribuidor EDP, e também por razão de segurança, toda a rede afectada pelas medições foi recolocada no seu estado original antes de anoitecer;
- ◆ Por razão de custos (aparelhos e mão de obra), as medições foram feitas só em dois dias.

Conforme apresentado na Secção 5.2.2, o facto de se utilizarem dois troços idênticos, permitiu-se otimizar a utilização dos recursos humanos e de materiais disponíveis. As medições foram efectuadas em Junho, para aproveitar a duração da luz do Sol ao máximo.

O autor foi apoiado por uma equipa de electricistas autorizados pelo Distribuidor EDP. O próprio Distribuidor EDP, que foi obviamente informado dessas medições e apresentou uma colaboração bastante intensa.

Contudo, essas restrições não impediam a realização das medições, conforme o protocolo apresentado na Secção 5.4.

5.6. LIMITES DAS MEDIÇÕES EXPERIMENTAIS

No início deste capítulo, foi indicado que, por razão de custos, não era realista elaborar uma experiência totalmente controlada em laboratório. As medições, em condições reais no terreno, implicam um conjunto de limitações inerentes.

Medições inacessíveis de alguns parâmetros eléctricos – Por razão prática (e também de custos) não foi possível medir todos os parâmetros eléctricos. Por exemplo, a corrente que circula na malha de cobre nu, enterrada e em paralelo com o cabo, não podia ser medida por falta de acessibilidade prática. Também, o número limitado de sondas que podem ser utilizadas simultaneamente no analisador de rede, não permitiu todas as medições.

Contudo, todos os esforços foram feitos para limitar essas restrições durante as medições.

Medições com a luz do Sol – Por razão de segurança, as medições foram efectuadas durante o dia. Isto teve duas consequências:

1ª Consequência: Não foi possível medir a intensidade da iluminação emitida pelas luminárias, nem determinar quando as luminárias atingem a estabilidade luminosa. Só o comportamento eléctrico pode ser medido.

2ª Consequência: O Sol aquece as luminárias. O comportamento térmico das luminárias durante o dia é diferente do comportamento durante a noite. Isto pode afectar as medições em tempo real; contudo, é pouco provável que o comportamento em regime permanente seja afectado, mas, infelizmente, não foi possível avaliar quantitativamente o impacte deste factor.

Instalação existente – Por motivo de custos, o troço da rede de iluminação a analisar não foi modificado, à excepção dos condicionalismos exigidos pela colocação das sondas. Assim, as luminárias não foram substituídas, nem sequer as lâmpadas já existentes.

Capítulo 6. RESULTADOS EXPERIMENTAIS, ANÁLISE E COMPILAÇÃO

Este capítulo apresenta os resultados das medições no terreno. Os valores experimentais são comparados com os valores teóricos e de simulação, e são posteriormente analisados. No fim, é apresentada uma compilação dos resultados numéricos.

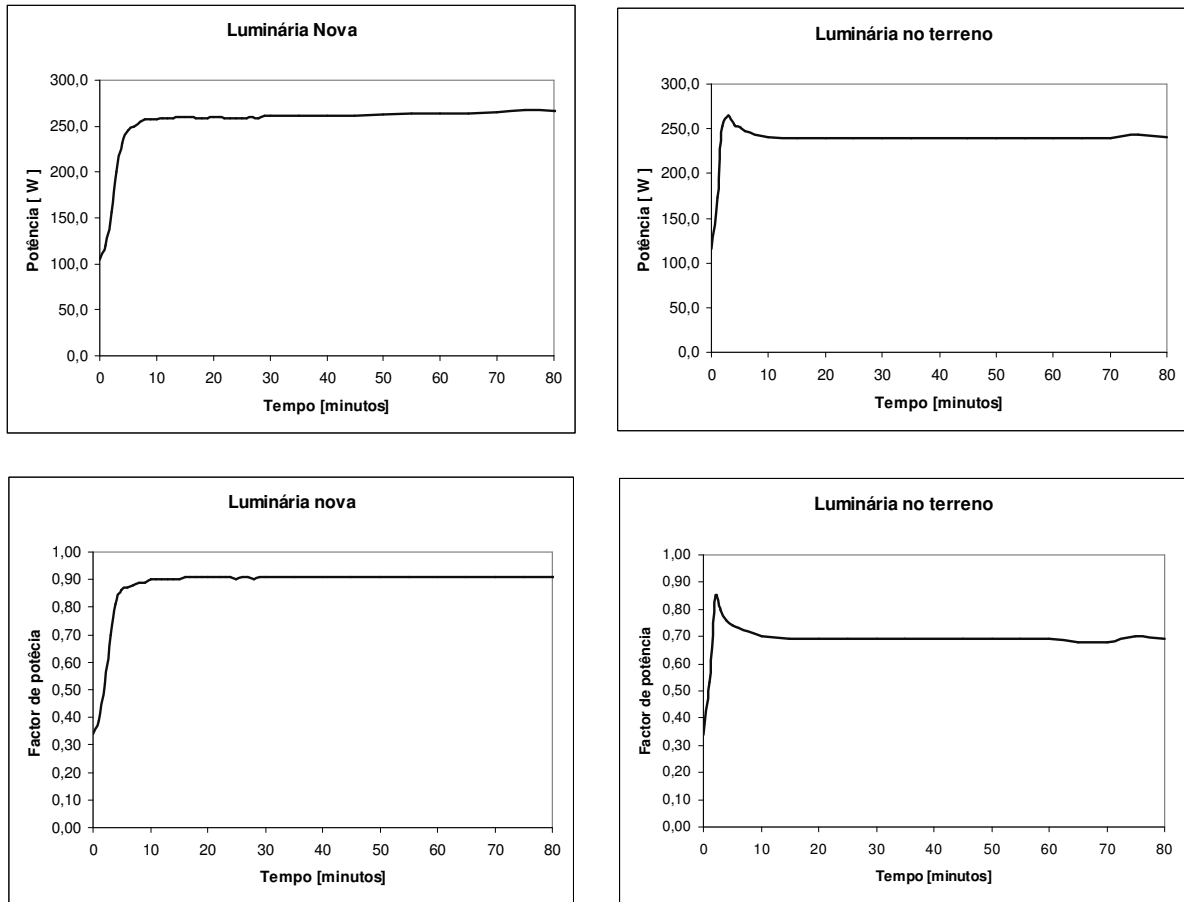
6.1. PARÂMETROS ELÉCTRICOS INDIVIDUAIS

6.1.1. Cargas individuais

As cargas são constituídas por luminárias. Os parâmetros eléctricos das luminárias foram medidos em duas condições diferentes: em laboratório e no terreno. A Figura 6.1 apresenta, lado a lado, os resultados das duas medições.

As medições em laboratório podem ser consideradas ideais, uma vez que a luminária era nova, com lâmpada também nova, e em condições praticamente nocturnas (abrigado do Sol).

As medições no terreno foram feitas com luminárias de 6 anos de idade (incluindo os circuitos de arranque e os condensadores de compensação), com lâmpadas com mais de 1500 horas de utilização, e em condição de dia (exposto ao Sol).



a) Laboratório

b) Terreno

Figura 6.1: Resultados experimentais das medições de luminárias individuais;
a) Medições em laboratório; b) Medições no terreno.

O Quadro 6.1 apresenta os valores numéricos obtidos após 60 minutos de funcionamento, comparando com os valores fornecidos pelo fabricante das luminárias.

Do Quadro 6.1, é possível concluir que o factor de potência duma luminária com alguma idade é muito mais baixo do que o previsto, com corrente de serviço mais elevada, e com menor potência.

Quadro 6.1 – Valores numéricos das luminárias individuais, com lâmpadas de vapor de sódio a alta pressão (SAP).

Parâmetros	Fabricante	Laboratório	Terreno
Lâmpada	250 W	250 W Nova	250 W ≈1500 horas
Luminária	-	Nova	6 anos
Período de estabilização	-	60 minutos	60 minutos
U_n : Tensão simples nominal	230 V	230 V (*)	230 V (*)
I : Corrente de serviço	1,33 A	1,27 A	1,51 A
$\cos \varphi$: Factor de potência	0,92	0,91	0,69
P : Potência activa	281,4 W	265,8 W	239,6 W

(*) Tendo em vista facilitar a comparação entre os parâmetros, os valores das tensões foram rectificadas para serem iguais; utilizando uma regressão linear simples, os valores das correntes foram rectificadas da mesma forma.

6.1.2. Resistências eléctricas dos condutores

O Quadro 6.2 apresenta os valores das seis medições obtidos para resolver a matriz (5.8), utilizando o método de curto-circuito apresentado no Capítulo 5. O mesmo quadro apresenta os valores calculados das resistências por condutor, comparando-os com os valores teóricos.

A secção da bainha vale aproximadamente:

$$s_{BAINHA} \cong (\text{espessura da bainha}) \cdot (\text{circunferência da bainha}) \quad (6.1)$$

$$s_{BAINHA} \cong (0,5 \text{ mm}) \times (2\pi \times 10 \text{ mm}) \approx 31 \text{ mm}^2 \quad (6.2)$$

Quadro 6.2 – Valores numéricos das resistências por condutor.

Medições em curto-circuito		Valores das resistências por condutor			
Curto-circuitos	Resistência ($l = 300\text{m}$)	Condutor	Secção mm^2	Resistência medida ($l = 300\text{m}$)	Resistência teórica ($l = 300\text{m}$)
R_A : Condutor 1 - Neutro	1,0146 Ω	1	10 Cobre	R_1 : 0,50815 Ω	0,5169 Ω
R_B : Condutor 2 - Neutro	1,0133 Ω	2	10 Cobre	R_2 : 0,50685 Ω	0,5169 Ω
R_C : Condutor 3 - Neutro	1,0156 Ω	3	10 Cobre	R_3 : 0,50915 Ω	0,5169 Ω
R_D : Condutor de Neutro - Bainha	5,2956 Ω	Neutro	10 Cobre	R_N : 0,50645 Ω	0,5169 Ω
R_E : Condutor de Neutro - Terra	0,5551 Ω	Bainha	31 Aço	R_B : 4,78915 Ω	-
R_F : Condutor 1 - Condutor 2	1,0150 Ω	Terra	35 Cobre	R_T : 0,04865 Ω	0,1477 Ω

Considerando uma temperatura medida do solo de aproximadamente 19° C, os valores teóricos são bastante semelhantes, com excepção do valor da resistência do condutor de terra. Este valor é mais de três vezes inferior ao valor teórico previsto. Esta diferença deve-se ao facto de que o condutor de terra é nu, sem isolamento, e está em contacto com a terra, sendo, por isso, a sua resistência reduzida.

O valor da resistência da bainha não foi determinado teoricamente, mas só experimentalmente. O valor da resistividade ρ_{BAINHA} do material da bainha pode ser determinado da seguinte forma [ver expressão (2.3), Capítulo 2]:

$$R_{BAINHA} = \rho_{BAINHA} \cdot \frac{l}{S_{BAINHA}} \Leftrightarrow \rho_{BAINHA} = \frac{R_{BAINHA} \cdot S_{BAINHA}}{l} \quad (6.3)$$

$$\rho_{BAINHA} = \frac{4,789 \cdot 31}{300} \approx 0,49 \text{ } \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m} \quad (6.4)$$

6.1.3. Indutâncias dos condutores

O Quadro 6.3 apresenta os valores obtidos das três medições, utilizando o método de curto-circuito apresentado no Capítulo 5 para as indutâncias. O mesmo quadro apresenta os valores calculados das indutâncias baseados na teoria e no *FEMM* (ver Quadro 5.2).

Quadro 6.3 – Valores numéricos das indutâncias por condutor de 300 m.

Medições		Teoria Sem bainha		FEMM Sem bainha		FEMM Com bainha	
Curto-circuitos	Indutância ($l = 300$ m)	[μ H]	[%]	[μ H]	[%]	[μ H]	[%]
L_A : Condutor 1 - Condutor 2	181,1 μ H	189,8	+4,8	189,3	+4,5	217,2	+19,9
L_B : Condutor 1 - Condutor 3	229,2 μ H	231,4	+1,0	230,7	+0,7	275,4	+20,2
L_C : Condutor 1 - Bainha	289,6 μ H	-	-	-	-	254,2	-12,2
L_D : Condutor 1 - Terra	(Sem resultado)	-	-	-	-	-	-

Os resultados sugerem que as indutâncias medidas no terreno não são influenciadas pela presença da bainha. Assim, as diferenças entre as indutâncias medidas e os valores previstos sem bainha ($< 5\%$) são muito inferiores comparativamente aos valores previstos com bainha ($> 15\%$). Muitos factores podem explicar essa divergência com a teoria, tal como o facto que o cabo seja enterrado, a sua proximidade com o condutor de cobre nu, e a possibilidade que o cabo seja danificado. Por esses motivos, é difícil concluir sobre o efeito real da bainha. Contudo, as medições apresentam valores relativamente próximos dos valores previstos.

6.1.4. Capacidades dos condutores

Os valores previstos das capacidades eram muito inferiores à precisão dos equipamentos utilizados. No terreno, foi confirmado este facto porque não foi possível obter qualquer resultado do valor das capacidades.

6.2. RESULTADOS DAS MEDIÇÕES EM REDE

6.2.1. Valores previstos pelo projectista

Utilizando os valores do projecto original aprovado pelo Distribuidor (ver Capítulo 2), o Quadro 2.7 apresenta os resultados que serão utilizados como valores padrões na comparação com os resultados experimentais.

Quadro 6.4 – Valores numéricos previstos pelo projectista.

Potência das cargas	$\cos \varphi$	Tensão nominal	Corrente de serviço por fase	Corrente de neutro	Queda de tensão ($l = 300$ m)
3 x 250 W por fase	0,85	230 V	3,80 A	0,00 A	1,29 V (0,6 %)

6.2.2. Medição das tensões

A Figura 6.2 apresenta o gráfico da tensão da fase 1 na origem do troço em análise, em função do tempo.

A Figura 6.2 permite concluir dois factos importantes:

1º Facto: O contactor do Posto de Transformação, controlado por célula fotoelétrica e que alimenta a rede de IP, está em perfeito estado de funcionamento: não há qualquer defeito, transitório parasita, contactos temporários ou "*bouncing*", etc. Este facto permite analisar com segurança os dados medidos, sabendo-se que não foram introduzidos transitórios artificiais.

2º Facto: A tensão não é constante. Uma análise pormenorizada dessas variações [ver Figura 6.2-b)] revela que a tensão varia constantemente entre 232 V e, pelo menos, 236 V, mesmo após um período de estabilização de 20 minutos. Esta amplitude é superior à ordem de grandeza das quedas de tensão previstas. A consequência dessa observação é que não será

possível obter medições fiáveis das quedas de tensão. As perturbações têm origem a montante do Posto de Transformação. Mesmo com todas as medidas tomadas para manter isolado o troço da rede de IP em análise, as perturbações foram inevitáveis.

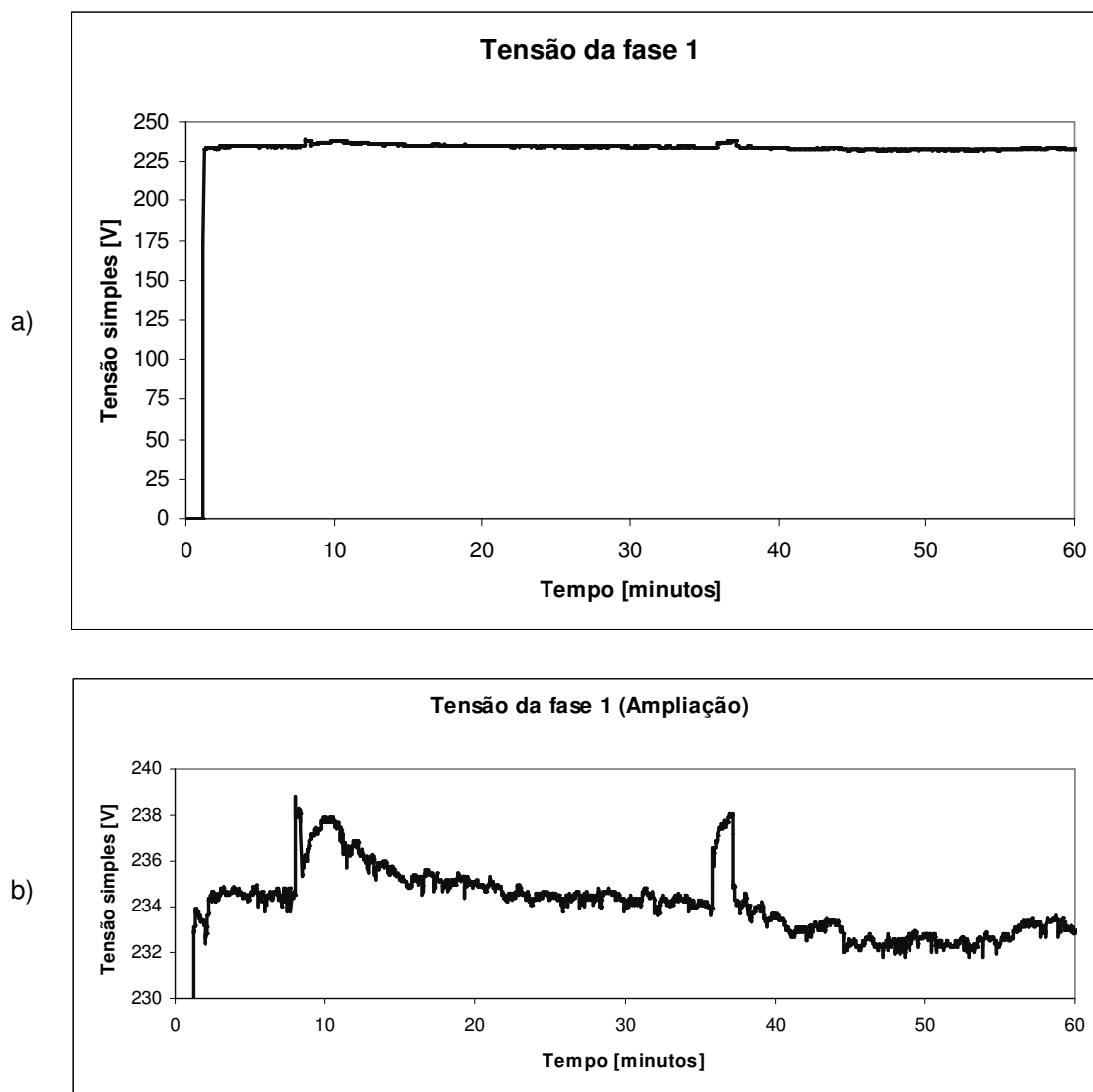


Figura 6.2: Resultados experimentais das medições de tensão na fase 1, em função do tempo (medições efectuadas no armário de distribuição na origem do troço em análise): a) Escala normal; b) Escala ampliada para mostrar pormenores das variações de tensão.

6.2.3. Medições das quedas de tensão

Por definição, as quedas de tensão necessitam de duas medições: a) amplitude da tensão na origem; e b) amplitude da tensão na carga [ver Capítulo 4, expressão (4.63)]. A diferença entre as duas medições define a queda de tensão. Considerando que a tensão na origem flutua (ver Figura 6.2), essas duas grandezas devem ser medidas simultaneamente, pois existe uma distância de 300 m entre a origem do troço em análise e a última luminária. Medir simultaneamente as duas grandezas, implica colocar as duas sondas num intervalo de 300 m entre si. Nesta situação, os próprios cabos das sondas servem de "antenas compridas", que são sujeitas a interferências parasitas que influenciam as medições. Na prática, não foi possível medir simultaneamente essas duas grandezas. Em conclusão, as variações de tensão observadas na origem do troço em análise, impediram a realização de medições das quedas de tensão.

6.2.4. Medição do factor de potência

A Figura 6.3 apresenta o gráfico do factor de potência da fase 1 na origem do troço em análise, em função do tempo.

A Figura 6.3 sugere as seguintes observações:

1ª Observação: A curva é muito semelhante à da Figura 6.1-b) (luminária individual), onde existe um pico durante o arranque;

2ª Observação: O período de estabilização é de 20 minutos;

3ª Observação: O valor médio do factor de potência (após 20 minutos de funcionamento e estabilização) é de 0,76 indutivo. Este valor é superior ao valor da luminária individual previamente medido (0,69 indutivo - ver Quadro 6.1). Este facto sugere que existem grandes variações entre as luminárias, tal como a idade das lâmpadas (em horas), e o valor real do condensador de compensação.

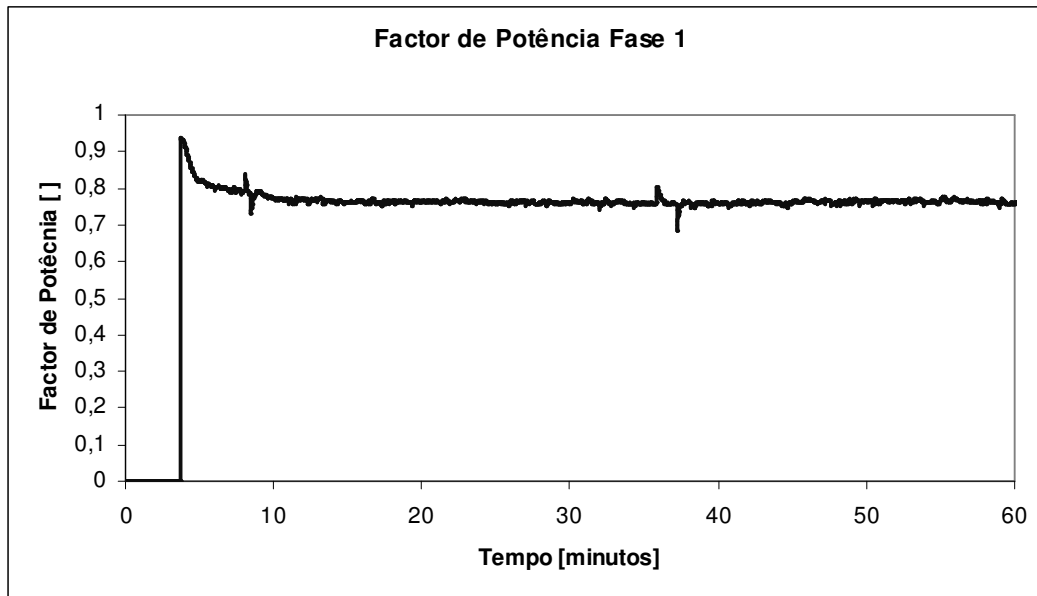


Figura 6.3: Resultados experimentais das medições do factor de potencia da fase 1 (medições tomadas no armário de distribuição na origem do troço em análise).

6.2.5. Medição das correntes na origem do troço em análise

A Figura 6.4 apresenta o gráfico das diversas correntes na origem do troço em análise, em função do tempo. A corrente na fase 3 não foi medida, porque o analisador de rede utilizado tem só quatro entradas disponíveis para medir correntes em tempo real (ver Capítulo 5 e Anexo D).

A Figura 6.4 sugere as seguintes observações:

1ª Observação: As curvas são muito semelhantes às da Figura 6.1-b) (luminária individual), onde existe um pico durante o arranque;

2ª Observação: A corrente de neutro não é nula (cerca de 1,9 A): a rede trifásica não é equilibrada. Esta observação é coerente com o facto de que as curvas da fase 1 e da fase 2 não são de iguais amplitudes;

3ª Observação: A corrente na bainha é fraca, mas não nula: o seu valor é cerca de 15 vezes menor do que a corrente de neutro.

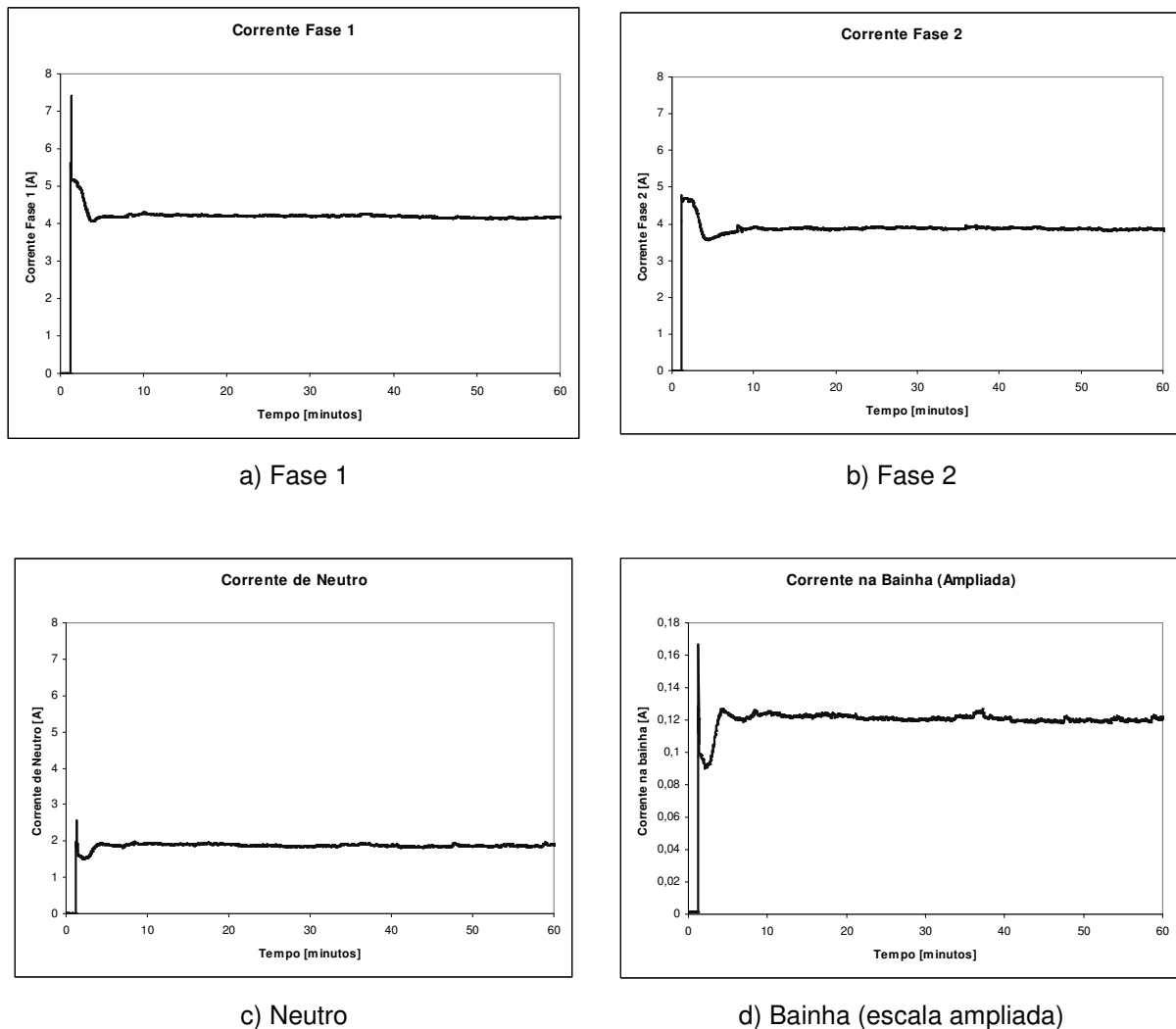


Figura 6.4: Resultados experimentais das medições das correntes (medições tomadas no armário de distribuição na origem do troço em análise): a) Fase 1; b) Fase 2; c) Neutro; d) Bainha (escala ampliada).

6.2.6. Medições das correntes individuais

O Quadro 6.5 apresenta os resultados das medições das correntes por segmento, por condutor e por luminária individual. O esquema utilizado é o indicado na Figura 4.20.

Quadro 6.5 – Medições das correntes por segmento, por condutor e por luminária individual.

Segmento/ Luminária		Correntes nos condutores [A]				
		Fase 1	Fase 2	Fase 3	Neutro	Bainha
1	Armário - E1	4,20	3,85	(3,68)	1,90	0,12
	E1	1,49	-	-	-	-
2	E1 - E2	2,67	3,86	(3,68)	1,63	0,10
	E2	-	1,35	-	-	-
3	E2 - E3	2,67	2,50	(3,68)	1,47	0,09
	E3			1,35	-	-
4	E3 - E4	2,67	(2,50)	2,33	1,13	0,07
	E4	(1,42)	-	-	-	-
5	E4 - E5	(1,25)	(2,50)	(2,33)	X	X
	E5	-	(1,21)	-	-	-
6	E5 - E6	(1,25)	(1,29)	(2,33)	X	X
	E6	-	-	(0,85)	-	-
7	E6 - E7	(1,25)	(1,29)	(1,48)	X	X
	E7	1,25	-	-	-	-
8	E7 - E8	0,00	1,29	(1,48)	0,73	0,05
	E8	-	1,28	-	-	-
9	E8 - E9	0,00	0,00	1,48	0,59	0,04
	E9	-	-	1,48	-	-

Nota 1: Os valores das correntes entre parênteses () foram deduzidos a partir dos valores das outras correntes;

Nota 2: A letra **X** indica que as medições não foram feitas (Segmentos 5, 6 e 7, entre os candeeiros E4 e E7).

Uma análise dos resultados apresentados no Quadro 6.5 sugere as seguintes observações:

1ª Observação: Considerando que as tensões nas fases variam constantemente (ver Figura 6.2), os valores das correntes apresentados são valores médios;

2ª Observação: As cargas individuais (luminárias) apresentam uma grande diversidade de valores das correntes: entre 0,85 A e 1,49 A; isto significa que a impedância de cada luminária é muito diferente;

3ª Observação: Existem correntes de fuga entre o condutor de neutro e a malha de cobre nu, conforme a diferença de valores entre a corrente da luminária E9 e a corrente de retorno no neutro (1,48 A e 0,59 A, respectivamente); ambos os valores deveriam ser iguais (1,48 A), mas a diferença é desviada através da malha de cobre nu;

4ª Observação: A relação entre a corrente de neutro e a corrente da bainha é quase constante (média de **15**); esta observação é coerente com o facto de que o condutor de neutro e a bainha estão ligados em paralelo: a queda de tensão é a mesma, mas as correntes são divididas em função inversa das resistências individuais. De acordo com os valores das resistências apresentadas no Quadro 6.2, esta relação deveria ser de: $4,79 \Omega / 0,51 \Omega = 9,4$, valor inferior à medição, utilizando as correntes [ver expressão (4.60)].

Considerando as observações acima expostas, é muito difícil comparar os resultados do Quadro 6.5 com os resultados previstos no Quadro 4.9 na análise da rede (Capítulo 4). Qualitativamente, existe correlação entre os valores do Quadro 4.9 e do Quadro 6.5, mas os valores individuais divergem bastante. A diferença principal deve-se ao facto de que cada luminária apresenta uma impedância diferente, pois não existe uniformidade. Essas variações são importantes e impedem uma análise comparativa exacta.

Foi confirmado de que a corrente de neutro não é nula.

Também, as medições confirmam que existem correntes de fuga no condutor da malha de cobre nu, mas os resultados são aleatórios e de difícil análise.

6.3. ANÁLISE DOS RESULTADOS

6.3.1. Impedância das luminárias

As medições confirmam que existem muitas variações de impedância das luminárias. A idade da lâmpada (em horas de utilização), e a idade do condensador de compensação (em anos) são as causas mais prováveis dessas variações. Essas variações afectam o factor de potência, a corrente de serviço e a potência activa. O Quadro 6.6 apresenta os valores médios dos parâmetros eléctricos das luminárias do troço em análise, com seis anos de idade (valores tirados da análise numérica da Figura 6.3 e da Figura 6.4).

Quadro 6.6 – Valores médios dos parâmetros eléctricos das luminárias do troço da rede em análise, com seis anos de idade.

Origem	Tensão	Corrente de serviço por fase (3 luminárias)	cos φ	Queda de tensão
Medições	234 V	4,20 A	0,76	-
Medições corrigidas	230 V	4,13 A	0,76	-
Projecto original	230 V	3,80 A	0,85	1,29 V (0,6 %)

Comparando os valores do Quadro 6.6 com os valores do Quadro 2.7 do projecto original, o factor de potência é muito menor. Esses valores médios não apresentam as correntes de arranque que, em alguns casos, podem ultrapassar 50 % da corrente de serviço [ver Figura 6.4-a)].

6.3.2. Impedância dos condutores

A) RESISTÊNCIAS

As resistências dos condutores de fase e de neutro estão de acordo com a teoria. Isto significa que as ligações de repiquetagem nas diversas portinholas dos candeeiros, podem ser desprezáveis. Esta conclusão é válida para cabo com condutores de cobre, tal como o VAV 4x10.

Os valores das correntes que circulam no condutor de neutro e na bainha, sugerem que a resistência eléctrica da bainha é da ordem de 15 vezes superior à resistência do condutor de neutro. Este valor é superior ao valor de 9,6 medido com o método de curto-circuito. A explicação mais plausível desta diferença é que o isolamento do cabo enterrado é danificado em alguns pontos e que a bainha está em contacto com o solo. Esta fuga pode explicar um valor inferior da resistência, medido com o método de curto-circuito. Por motivo de dificuldade no terreno, não foi possível medir todos os segmentos do troço da rede em análise. Assim, existe uma zona desconhecida, entre os candeeiros E4 e E7 (segmentos 5, 6 e 7 - ver Figura 4.20), onde não existem dados de medições. É possível que o isolamento esteja danificado nessa zona.

No caso do condutor da malha de cobre nu enterrado, a resistência medida é de três vezes inferior à obtida por cálculo teórico. Sabendo-se que este condutor está em contacto com a terra e ligado aos eléctrodos, este resultado não é surpreendente.

B) INDUTÂNCIAS

Os limites do método de curto-circuito, utilizado nas medições das indutâncias, impedem uma análise profunda desses parâmetros. Assim, os primeiros resultados sugerem que a bainha não tenha influência nos valores das indutâncias dos condutores. Isto é difícil de explicar, considerando a teoria desenvolvida. Sabendo-se que existe a possibilidade de que o cabo esteja danificado, pode-se explicar este resultado. Outra explicação plausível é que o tipo de terreno em torno do cabo é importante. O facto de que o cabo está enterrado, com um cabo de cobre nu, lado a lado, pode explicar este resultado. Existe aqui a necessidade de desenvolvimentos teóricos adicionais que ultrapassam os limites deste trabalho, cujos

resultados teóricos mais aprofundados podem ser observados em [6-1], com as fórmulas empíricas de Carson e Pollaczek.

6.3.3. Correntes de fuga no condutor de terra

O condutor de neutro, a bainha e o condutor de terra são ligados em paralelo. Este facto permite a circulação de corrente de fuga no condutor de terra. As medições confirmam a existência dessas correntes. Contudo, as variações locais do solo, dos eléctrodos, e da corrosão do cabo de cobre nu enterrado, fazem com que a resistência efectiva do cabo de terra, que permitiriam calcular essas correntes, é bastante variável. No troço em análise, a resistência efectiva do condutor de cobre nu, é cerca de três vezes inferior à resistência do mesmo cabo isolado. Noutro local, com condições diferentes, este valor poderia ser diferente.

6.4. COMPILAÇÃO DOS PARÂMETROS ELÉCTRICOS DA REDE ANALISADA

6.4.1. Compilação

O Quadro 6.7 apresenta uma compilação dos parâmetros eléctricos que foram calculados e medidos.

Quadro 6.7 – Compilação dos parâmetros eléctricos da rede analisada.

Parâmetros	Projecto (Simplificado)	Métodos avançados	Medições no terreno
Número de fases	3	3	3
Tensão simples de serviço	230 V	230 V	230 V (*)
Tipo de cabo enterrado	VAV 4x10	VAV 4x10	VAV 4x10
Comprimento total do troço	300 m	300 m	300 m
Quantidade total de lâmpadas no troço	9	9	9
Quantidade total de lâmpadas por fase	3	3	3
Tipo de lâmpada e potência	250 W SAP	250 W SAP	250 W SAP
Factor de potência ($\cos \varphi$)	0,85	0,85	0,91 nova 0,76 média 0,69
Potência activa por luminária	250 W	281 W	266 W individual 240 W média
Potência activa por fase	750 W	843 W	722 W
Corrente de serviço por fase	3,80 A	4,27 A	4,13 A
Corrente de arranque	+ 0 %	+ 0 %	+15 % (~+50 %)
Corrente de neutro	0 A	1,4 A máx.	1,9 A máx.
Queda de tensão (300 m)	1,29 V (0,6 %)	2,0 V (0,9 %)	-
Impedância da linha (300 m)	$510 + j 0 \text{ m}\Omega$	$510 + j 38,8 \text{ m}\Omega$	-
Impedância duma luminária	$152,9 + j 94,8 \Omega$	$136,0 + j 84,5 \Omega$	-

(*) Os valores foram corrigidos para uma tensão de 230 V, utilizando uma regressão linear simples.

6.4.2. Recomendações aos projectistas

O conjunto de resultados e observações apresentado nos últimos capítulos, permite estabelecer algumas recomendações aos projectistas que elaboram projectos de IP.

A) CARGAS

Após alguns anos de funcionamento, as luminárias (cargas) apresentam variações individuais importantes. O factor de potência original de 0,91 indutivo, passa para 0,76 em média. Também, as luminárias apresentam perdas da ordem de 12 %, que devem ser adicionadas à potência nominal [W] das lâmpadas. As luminárias apresentam correntes de arranque que ultrapassa até 50 % a corrente de serviço. Contudo, considerando a brevidade dos picos, é razoável admitir um valor de 15 % acima da corrente de serviço. Assim:

- ◆ Perdas activas [W]: +12 % do valor da potência nominal da lâmpada;
- ◆ Factor de potência []: 0,76;ind.;
- ◆ Corrente de arranque é 15 % acima do valor da corrente de serviço.

B) IMPEDÂNCIAS DOS CONDUTORES

Para o cabo VAV 4x10, as reactâncias capacitivas transversais (capacidades) são desprezáveis. As reactâncias indutivas longitudinais (indutâncias aparentes) também são desprezáveis, considerando que esses valores são cerca de 13 vezes inferiores aos das resistências eléctricas dos mesmos condutores.

Os valores teóricos das resistências eléctricas dos condutores são muito próximos das medições no terreno, mesmo após alguns anos de funcionamento. Assim, as resistências das ligações de repiquetagem nos candeeiros podem ser desprezáveis. Contudo, para cabos de alumínio, a situação pode ser diferente devido ao facto de que o óxido de alumínio é isolante. Por esse motivo, é aconselhável que seja aplicada uma camada de massa neutra nas ligações para limitar o efeito da corrosão. Assim:

- ◆ A impedância dos condutores pode ser considerada exclusivamente resistiva, e calculada de acordo com as fórmulas padrões;

- ◆ É aconselhável especificar no projecto a colocação duma camada de massa neutra nas ligações com cabos de alumínio (tal como o LSVAV 4x16).

C) QUEDAS DE TENSÃO

As simulações e as medições no terreno confirmam que a rede trifásica de IP nunca é equilibrada. As variações individuais das cargas impedem uma avaliação rigorosa das quedas de tensão. O método de cálculo simplificado que corresponde à colocação de todas as cargas em fim de troço, permite obter resultados por excesso, isto é, com uma maior margem de segurança. Assim:

- ◆ Calculam-se as quedas de tensão com todas as cargas concentradas na extremidade do troço (conforme as exigências do Distribuidor EDP).

Capítulo 7. CONCLUSÃO E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Este último capítulo apresenta as principais conclusões, identifica as contribuições mais importantes, e sugere alguns desenvolvimentos futuros.

7.1. PRINCIPAIS CONCLUSÕES

7.1.1. Parâmetros eléctricos das cargas

As medições em laboratório e no terreno confirmam que o factor de potência das cargas, com alguns anos de idade, é muito inferior ao factor de potência duma luminária nova (0,69 e 0,91 respectivamente). As mesmas medições confirmam que os valores dos parâmetros eléctricos das luminárias individuais variam bastante. Essas variações fazem com que os projectistas devem prever uma boa margem de segurança na determinação dos parâmetros eléctricos utilizados, e nos métodos de cálculo escolhidos. As luminárias, que utilizam lâmpadas de vapor de sódio a alta pressão com balastro ferromagnético, têm cerca de 12 % de perdas. Essas perdas activas devem ser adicionadas ao valor da potência nominal da lâmpada.

7.1.2. Parâmetros eléctricos dos cabos

Os cálculos teóricos das indutâncias e das capacidades estão muito de acordo com os resultados obtidos pelo método dos elementos finitos. Contudo, as divergências são crescentes

à medida que o raio dos condutores aumenta e que a distância entre os mesmos diminui. Na prática, por razão da espessura do isolamento que limita as distâncias mínimas entre os condutores, essas diferenças não são significativas.

Uma distorção trapezoidal dos condutores aumenta em cerca de 5 % a capacidade de serviço, mas não afecta significativamente as indutâncias.

Numa tentativa de descobrir uma expressão simples das capacidades para cabo de quatro condutores com bainha metálica, foi desenvolvida uma demonstração utilizando o método dos potenciais, em que a complexidade das expressões e a necessidade de recorrer a resoluções numéricas, faz com que a utilidade prática desta demonstração seja limitada. Neste caso, o método dos elementos finitos apresenta uma metodologia mais prática.

No caso do cabo do tipo VAV 4x10, os resultados permitem concluir que o valor da resistência de cada condutor é de cerca de 13 vezes superior ao valor da respectiva reactância indutiva longitudinal (indutância aparente). Por outro lado, o valor da reactância capacitiva transversal (capacidade de serviço) é de cerca de 10^9 superior ao valor da respectiva resistência. Por esse motivo, a reactância capacitiva transversal pode ser desprezável no modelo da impedância do cabo.

7.1.3. Análise de rede e medições no terreno

Foi evidenciado o facto de que os modelos de cálculo com cargas concentradas na extremidade do troço aumentam artificialmente os valores das quedas de tensão, comparativamente ao modelo com cargas distribuídas. Contudo, esta margem de segurança compensa pelo facto de que existem grandes variações dos parâmetros eléctricos das cargas individuais. Por esse motivo, é aconselhável manter a metodologia de cálculo com cargas concentradas na extremidade do troço, pois assegura uma boa margem de segurança.

Não foi possível medir as quedas de tensão no terreno, devido ao facto das tensões de serviço flutuarem bastante, pelo que não foi possível medir simultaneamente todas as diversas tensões da rede. Contudo, foi confirmada a existência de correntes nos condutores de neutro e nas bainhas metálicas. A relação de amplitude entre a corrente de neutro e a corrente na bainha é

constante, conforme o previsto, porque as extremidades de ambos, a bainha e o condutor de neutro, são ligadas entre si. A relação prevista era de 9,4, mas a relação medida foi cerca de 15. Esta diferença pode ser argumentada, considerando a possibilidade de que o cabo esteja parcialmente danificado.

Os valores das resistências dos condutores estão de acordo com as previsões teóricas. Isto permite deduzir que as perdas devidas às ligações de repiquetagem entre os candeeiros, podem ser desprezáveis para condutores de cobre (tal como o cabo VAV 4x10).

Os resultados experimentais sugerem que os valores das indutâncias aparentes dos condutores são poucos influenciados pela presença da bainha metálica. Considerando a possibilidade de que o cabo esteja danificado, serão necessárias mais pesquisas para confirmar esta observação.

A metodologia de curto-circuitos funciona correctamente para medir as resistências e as capacidades de serviço, mas fornece resultados limitados no caso das indutâncias aparentes.

7.2. CONTRIBUIÇÕES MAIS IMPORTANTES

A principal contribuição deste trabalho foi uma análise pormenorizada dos parâmetros eléctricos do cabo com quatro condutores e uma bainha metálica. Por exemplo, foi desenvolvida uma nova expressão da capacidade de serviço para este tipo de cabo, e foi analisado o impacte duma distorção trapezoidal dos condutores sobre as capacidades.

Uma consequência indirecta desta análise é que foi desenvolvida uma metodologia pormenorizada que permite calcular os parâmetros eléctricos dos cabos, com o método por elementos finitos, utilizando o programa *FEMM*.

Outra contribuição importante foi a recolha de dados no terreno, utilizando uma rede de Iluminação Pública existente. Neste contexto, foi desenvolvido um método que utiliza um conjunto de curto-circuitos para medir os parâmetros eléctricos dos cabos. Este método é muito bem adaptado às medições das resistências e das capacidades de serviço, mas fornece resultados limitados no caso das indutâncias aparentes.

Finalmente, as recomendações apresentadas aos projectistas permitem elaborar projectos de redes de Iluminação Pública com um maior conhecimento dos parâmetros eléctricos em jogo, e possibilita a tomada de decisões mais correctas na escolha dos métodos de cálculo a utilizar.

7.3. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

O presente trabalho abre uma porta a diversas áreas de pesquisa.

Existe a necessidade de se estudar outros tipos de cabos tal como o cabo de alumínio LSVAV 4x16, não só do ponto de vista teórico, mas também da sua implementação no terreno. Também, existe a necessidade de se estudar a influência do terreno na vizinhança do cabo multicondutor blindado, em baixa tensão.

Também foi identificada a necessidade de se efectuarem medições simultaneamente em diversos pontos duma rede (por exemplo, para medir as quedas de tensão). Um tal sistema de medições simultâneas deve prever um modo de comunicação para sincronizar as medições, e permitir uma posterior análise dos respectivos dados recolhidos em tempo real.

Uma importante limitação deste trabalho foi o facto de se utilizar uma instalação existente de rede de Iluminação Pública, em vez duma rede nova controlada em condição de laboratório. Por esse motivo, seria interessante elaborar uma experiência totalmente controlada, com cabos enterrados e luminárias, onde todos os parâmetros eléctricos pudessem ser medidos. Contudo, os custos desta operação poderiam ser um grande obstáculo na sua realização.

As descrições pormenorizadas, apresentadas neste trabalho, permitem desenvolver algoritmos de cálculo e aplicações informáticas específicas, no contexto de facilitar o trabalho dos projectistas.

Os regimes transitórios não foram estudados neste trabalho, mas poderão ser o objecto de pesquisas específicas no futuro.

Bibliografia

- [1-1] PINTO, Luís Manuel Vilela (1996) – **MGCALC**. Porto: Edição Merlin Gerin Portugal, 2ª ed.
- [1-2] Portaria n.º 454/2001 de 5 de Maio – **Anexo I – Definição dos Tipos "Correntes" de Focos Luminosos a Utilizar no Município**. Lisboa: Diário da Republica - I Série B.
- [2-1] Decreto-Regulamentar n.º 90/84 de 26 de Dezembro – **Regulamento de Segurança de Redes de Distribuição de Energia Eléctrica em Baixa Tensão (RSRDEEBT)**.
- [2-2] EDP (2006) – **DMA-C63-201/N - Aparelhagem de BT - Fusíveis de BT - Características e Ensaios**. Lisboa : EDP Distribuição - Energia, S.A., 2ª edição, 2006.
- [2-3] EDP (2007) – **DRE-C11-040/N - Guia Técnico de Terras**. Lisboa : EDP Distribuição - Energia, S.A., 2ª edição, 2007.
- [2-4] EDP (2008a) – **Memória Descritiva e Justificativa (modelo tipo)**. Faro : EDP Distribuição - Energia, S.A., 2008.
- [2-5] EDP (2008b) – **Comprimentos Máximos Admissíveis dos Cabos**. Faro : EDP Distribuição - Energia, S.A., 2008.
- [2-6] EDP (2008c) – **Cálculo da RBT de Serviço Público**. Faro : EDP Distribuição - Energia, S.A., 2008.

- [2-7] GONÇALVES, José Manuel Guerreiro (2005-2006) – **Comando e Protecção de Sistemas de Energia Eléctrica: Roteiro da Disciplina**. Faro : Universidade do Algarve – Escola Superior de Tecnologia, 2005-2006.
- [2-8] MATOS, Manuel António (1996) – **Noções de Dimensionamento de Canalizações Eléctricas - Apontamentos para as Disciplinas de Instalações Eléctricas**. FEUP, 1996.
- [2-9] PINTO, M. Vilela (1998) – **Técnicas e Tecnologias em Instalações Eléctricas**. Lisboa : CERTIEL, 1998.
- [2-10] SOUTO, Wesley de Almeida (2004) – **Curso Técnico de Electromecânica - Apostila de Comandos Eléctricos (Compilado - 1)**. Bahia : Centro Federal de Educação da Bahia, 2004.
- [3-1] CARDOSO, Rogério P. (1979) - **Luminotécnia Fundamental**. Lisboa: Ed. Dinalivro.
- [3-2] VASQUEZ, D. José Ramírez (1986). **Luminotecnia**. Barcelona: Ed. CEAC, S.A. ISBN 84-329-6011-X
- [3-3a] Texas Instruments (2010) – **TPS61195 WLED Driver for LCD Backlighting With PWM and SMBus Control Interface**. Texas Instruments. Ref.^a: SLVSA07 –MAY 2010. <http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/tps61195.pdf>
- [3-3b] HADDEN, Will (2007) – **Driving a WLED Does Not Always Require 4V**. Texas Instruments – Power Management - *Analog Applications Journal* 4Q 2007. Ref.^a: SLYT284. <http://focus.ti.com/lit/an/slyt284/slyt284.pdf>
- [3-3c] DAY, Michael (2004) – **LED-Driver Considerations**. Texas Instruments – Power Management - *Analog Applications Journal* 1Q 2004. Ref.^a: SLYT084. <http://focus.ti.com/lit/an/slyt084/slyt084.pdf>

- [3-4] SILVA, José Fernando Alves da (1998) – **Electrónica Industrial**. Lisboa : Fundação Calouste Gulbenkian – Serviço de Educação. ISBN 972-31-0801-1.
- [3-5] FLORY, Isaac Lynnwood IV (2008) – *High-Intensity Discharge Industrial Lighting Design Strategies for the Minimization of Energy Usage and Life-Cycle Cost - Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in Electrical Engineering*. Arlington, Virginia: Virginia Polytechnic Institute and State University.
- [3-6] VILELA, João A. Jr.; PERIN, Arnaldo J. *Modelo para Simulação das Características das Lâmpadas de Vapor de Sódio de Alta Pressão*. Florianópolis (Brasil): INEP – Instituto de Electrónica de Potência, Universidade Federal de Santa Catarina.
- [3-7] ANDREOLI, André L.; COURRY, Denis V.; OLESKOVICZ, Mário; SERNI, Paulo J. A.; CAGNON, José ngelo. – *Análise Comportamental de Lâmpada de Descarga e sua Relação com a Qualidade da Energia*. São-Paulo (Brasil): Universidade de São Paulo.
- [3-8] CARVALHO, Ricardo – *Modelo de uma Lâmpada HID em PSIM e Simulink*. Porto: Universidade do Porto.
- [4-1] RIBEIRO, José Manuel Encarnação (2008) – **Tutorial: Utilização do FEMM com Matlab – Disciplina: Simulação de Máquinas e Accionamentos**. Faro : Universidade do Algarve – Escola Superior de Tecnologia, 2008.
- [4-2] MEEKER, David (2009) – **Finite Element Method Magnetics –Version 4.2 – User’s Manual**. <http://www.femm.info>, 2009.
- [4-3] MEEKER, David (2006) – **FEMM 4.2 Electrostatics Tutorial**. www.femm.info, 2006.

- [4-4] MEEKER, David (2006) – **FEMM 4.2 Magnetostatics Tutorial**.
www.femm.info, 2006.
- [4-5] IERUSALIMSKY, Roberto; FIGUEIREDO, Luiz Henrique de;
WALDEMAR, Celes (2000) – **Reference Manual of the Programming
Language Lua 4.0**. Rio de Janeiro : TECGRAF-PUC-RIO Computer
Science Department, 2000.
- [4-6] KAMEN, Edward W. e Bonnie S. HECK. – **Fundamentals of Signals and
Systems Using Matlab**. Prentice Hall. 1997.
- [4-7] PAIVA, José Pedro Sucena (2007) – **Redes de Energia Eléctrica**. Lisboa :
Instituto Superior Técnico – IST Press, 2007 (2ª ed.). ISBN 978-972-
8469-66-5.
- [4-8] WELLAUER, M (1973). – **Introdução à Técnica das Altas Tensões**. São-
Paulo (Brasil): Ed. Universidade de São Paulo, Editora Polígono.
(Tradução de Dmetri Ivanoff)
- [4-9] NASAR, Syed A. (1990) – **Schaum's Outline of Theory and Problems of
Electric Power Systems**. Singapore: McGraw-Hill Co. - International
Edition. ISBN 0-07-045917-7.
- [4-10] MORERA, Domingo (1991). **Apontamento da Disciplina de "Fontes e
Transmissão de Energia Eléctrica"**. Lisboa: IST - Instituto Superior
Técnico - Universidade Técnica de Lisboa.
- [4-11] DUCLUZAUX, André (1977) – **Cahier Technique Schneider Electric N.º 83
- Pertes Supplémentaires dans les Conducteurs pour Forte Intensité
par Effet de Peau et de Proximité**. Grenoble: Schneider Electric -
Direction Scientifique et Technique - Service Communication Technique.
- [4-12] CABELTE (2009) – **Manual dos Cabos Eléctricos de Baixa Tensão**. Lisboa :
CABELTE, 2009.

- [4-13] GUSTAVSEN, Bjorn; BRUASET, Are; BREMNES, Jarle J.; HASSELL, Arild (2009) – *A Finite-Element Approach for Calculating Electrical parameters of Umbilical Cables*. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 24, No. 4, October 2009.
- [4-14] ANDREOU, Georgios T.; LABRIDIS, Dimitri P. – *Electrical Parameters of Low-Voltage Power Distribution Cables Used for Power-Line Communications*. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 22, No. 2, April 2007.
- [4-15] CRISTIANA, S.; FELIZIANI, M. – *A Finite Element Technique for Multiconductor Cable Parameters Calculation*. IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 25, No. 4, July 1989.
- [4-16] SIEMENS (1979) – **Correntes de Curto-Circuitos em Redes Trifásicas**. E.U.P., Câmara Brasileira do Livro, SP, 1979.
- [4-17] NUNES, Roberto dos Santos (2007) – **Cálculo de Parâmetros de Cabos Subterrâneos para Redes de Distribuição - Dissertação para Obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Electrotécnica e de Computadores**. Lisboa: IST - Instituto Superior Técnico - Universidade Técnica de Lisboa.
- [4-18] CERTIEL (2009) – **Ficha Técnica 29 - Cálculo do Comprimento Máximo, em Metros dos Condutores das Entradas das Instalações Individuais, em Função da Corrente de Serviço e das Secções Normalizadas dos Condutores e Cabos**. Lisboa: Certiel Plus (Setembro 2009).
- [4-19] SOARES, Constantino Vital Sopa (2006) – **Instalações Eléctricas de Baixa Tensão - Projecto, Execução e Exploração - Origem e Interpretação das RTIEBT - 1ª Edição e Principais Diferenças Face ao "749/74"**. Lisboa: Co-edição DGEG - Direcção Geral de Energia e Geologia, e CERTIEL. ISBN 978-972-95180-6-5.

- [4-20] GONÇALVES, José Manuel Guerreiro (2002-2003) – **Análise e Controlo de Sistemas de Energia Eléctricas: Roteiro da Disciplina**. Faro : Universidade do Algarve – Escola Superior de Tecnologia, 2002-2003.
- [5-1] SZYPER, Michael (1999) – **The Measurement, Instrumentation and Sensors Handbook on CD-ROM – Chapter 50. Inductance Measurement**. CRC Press LLC 1999. eBook ISBN: 978-0-415-87617-9. <http://www.engnetbase.com>
- [6-1] PAPAGIANNIS, G. K.; TSIAMITROS, D. A.; ANDREOU, G. T. LABRIDIS, D. P.; DOKOPOULOS, P. S. (2003) – "*Earth Return Path Impedances of Underground Cables for the Multi-layer Case - A Finite Element Approach.*" 2003 IEEE Bologna Power Tech Conference, June 23th-26th, Bologna, Italy.

Referências adicionais:

- [7-1] PEREIRA, Alexandre; POUPA, Carlos (2004) – **Como Escrever uma Tese, Monografia ou Livro Científico Usando o Word**. Lisboa : Edições Sílabo, 2004. ISBN 972-618-350-2.

Anexo A

UTILIZAÇÃO DO PROGRAMA *FEMM* NO CÁLCULO DE INDUTÂNCIAS E DE CAPACIDADES

Este anexo descreve a utilização do programa de elementos finitos *FEMM*. Este anexo completa o Capítulo 4.

A.1. APRESENTAÇÃO DO PROGRAMA *FEMM*

A.1.1. *FEMM*

FEMM é o acrónimo para *Finite Element Method Magnetics*. Este conjunto de programas foi desenvolvido por David Meeker e está disponível gratuitamente no site www.femm.info. O *FEMM* foi especificamente desenvolvido para resolver problemas de natureza eléctrica e magnética.

A ideia por trás do método por elementos finitos é de dividir o espaço em zonas mais pequenas onde os campos e outras variáveis podem ser considerados constantes. Isto permite reduzir a complexidade da resolução das equações diferenciais, embora este método necessite de muitos cálculos repetitivos. Assim, em vez de utilizar poucas equações complexas, o método de elementos finitos utiliza muitas equações simples.

A Figura 4.1 mostra um exemplo da divisão do espaço em pequenos triângulos (chama-se reticulado ou *mesh* na documentação inglesa).

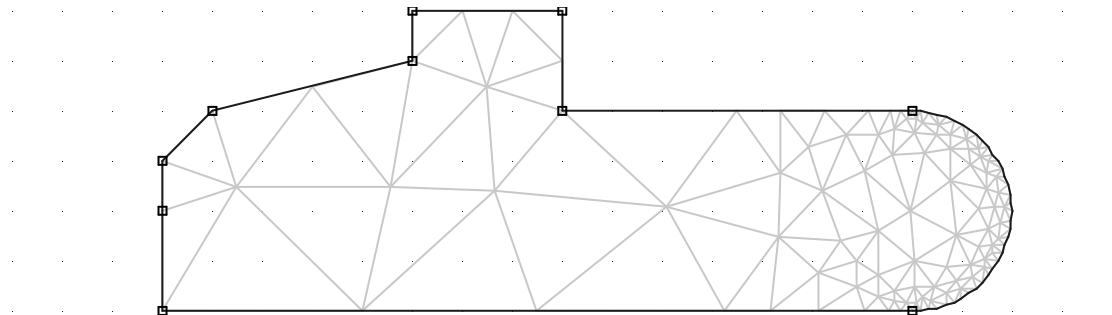


Figura A.1: Divisão de um espaço em pequenos triângulos por zonas onde as grandezas são praticamente iguais.

Contudo, este tipo de programa é reconhecido pela sua lentidão, particularmente no caso de geometria complexa e com uma grande quantidade de superfícies a calcular. Por este motivo, o parâmetro *Mesh size* no programa *FEMM* é particularmente crítico. Deve ser definido caso a caso, conforme a Figura A.2.

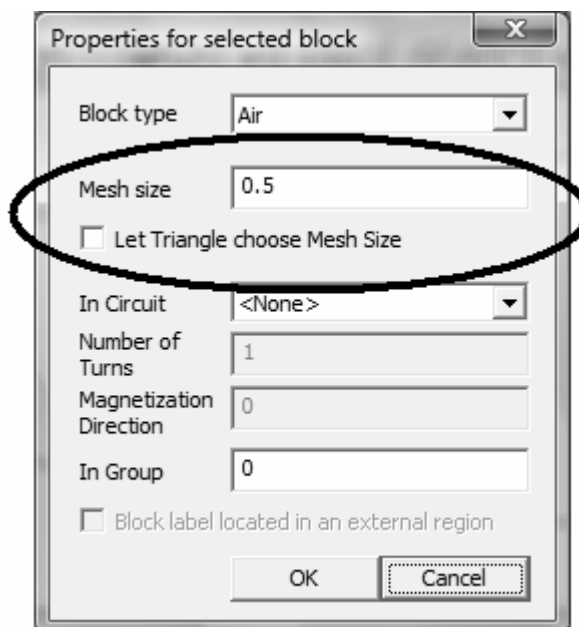


Figura A.2: Definição do tamanho dos triângulos, utilizando a parâmetro *Mesh size*.

O programa *FEMM* é limitado à análise a duas dimensões. Permite contudo uma pseudo análise a 3-dimensões no caso de geometrias com simetria axial (revolução em torno dum eixo) e no caso de geometrias longitudinais (do tipo cabo com comprimento infinito). No contexto deste trabalho será utilizada a geometria plana com 1000 mm de profundidade.

Outra limitação deste programa é que o *FEMM* foi desenvolvido para situações estáticas ou em regime permanente. Não foi desenvolvido para análise ou simulação de regimes transitórios.

Relativamente à utilização do *FEMM* poderão ser consultadas as referências [4-1], [4-2], [4-3], e [4-4].

A.1.2. Matlab e Simulink

Os programas *Matlab* e *Simulink* não precisam de apresentação. Os dois programas são universalmente utilizados nas universidades para a simulação de quase todos os fenómenos conhecidos.

Existem funções especiais do *Simulink* (S-Functions), programadas em ficheiros *m-file* do *Matlab* que permitem o diálogo entre o *Simulink* e o *Matlab*. Em conjunto com as funções do *OctaveFEMM*, os ficheiros *m-file* permitem o diálogo entre o *Matlab* e o *FEMM*. Essas interacções estão esquematizadas na Figura A.3.

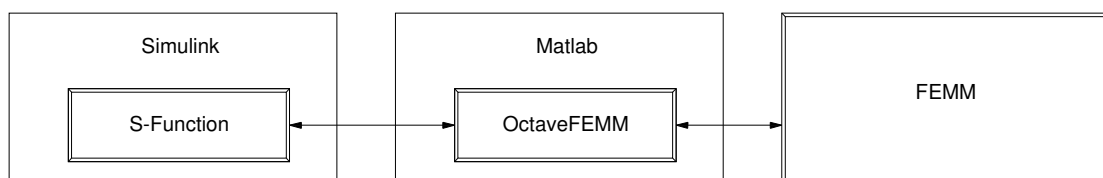


Figura A.3: Interacções entre o *Simulink*, o *Matlab* e o *FEMM*.

Existem inúmeras referências relativamente à utilização do *Matlab* e do *Simulink* [4-6]. Contudo, considerando o grau de especialização de algumas funções utilizadas, o mais útil é o Help dos próprios *Matlab* e *Simulink*.

A.1.3. OctaveFEMM e Lua

O *OctaveFEMM* consiste num conjunto de funções especiais do *Matlab* que permite o diálogo entre o *Matlab* e o *FEMM*. O *OctaveFEMM* é automaticamente instalado com o *FEMM*. As funções especiais permitem alterar os parâmetros, efectuar cálculos e ler os resultados no *FEMM*. Permitem, também, modificar a geometria do problema em análise. Uma apresentação pormenorizada dessas funções está disponível em [4-1] e [4-2].

O *Lua* é uma linguagem de programação que permite o desenvolvimento de *scripts*, ou seja, que permite uma interacção com o programa *FEMM* [4-5]. Tal como o *OctaveFEMM*, existe no *Lua* um conjunto de funções especiais que comanda o *FEMM*, mas sem necessitar do *Matlab*. A linguagem de programação *Lua* no *FEMM* pode ser comparada aos *macros* no *Excel*.

A.2. PROGRAMAS DE APOIO AO *FEMM*

A.2.1. AutoCAD

No programa *FEMM*, existem funções que permitem desenhar. Contudo, essas funções são básicas e limitadas. No caso de geometrias mais complexas, um programa de desenho pode ser essencial. O *FEMM* permite a importação (e exportação) de desenhos em formato DXF. Este formato é reconhecido por quase todos os programas de desenho técnico, incluindo o *AutoCAD*.

O programa *AutoCAD* é muito utilizado pelos engenheiros, arquitectos e projectistas para desenhos técnicos. Por exemplo, o autor do presente trabalho utiliza o *AutoCAD* para

elaboração de projectos electrotécnicos. O *AutoCAD*, na sua forma nativa, tem o seu próprio formato (DWG), mas permite exportar (e importar) ficheiros em formato DXF.

Contudo, o *FEMM* tem algumas restrições na importação de desenhos em formato DXF. Os parágrafos seguintes descrevem essas restrições.

1. Dividir os elementos do desenho em componentes simples – No *AutoCAD* existem muitas formas geométricas predefinidas, tal como polígonos, círculos, elipses, etc. No caso dos polígonos (quadrados, rectângulos, etc.), o *FEMM* consegue importar os desenhos mas tem dificuldade em traduzir as arestas dos mesmos. O resultado é o aparecimento de elementos isolados que impedem a utilização dos desenhos importados, conforme a mensagem apresentada na Figura A.4.

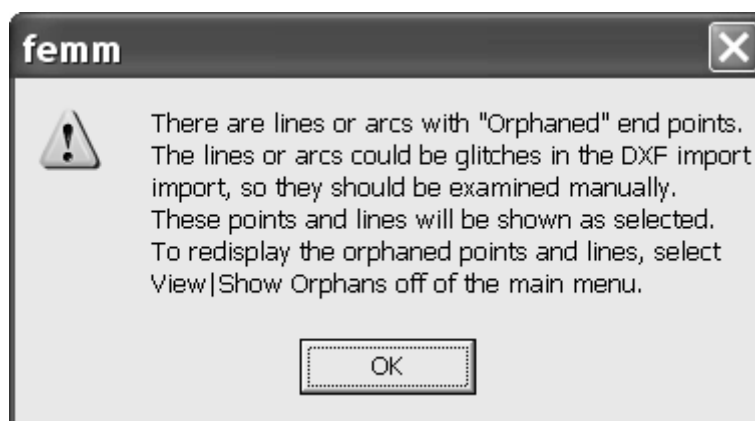


Figura A.4: Janela que alerta da presença de elementos isolados no desenho importado no *FEMM*.

A solução consiste em seleccionar todos os elementos do desenho em *AutoCAD* e dividir os mesmos, utilizando o comando EXPLODE do *AutoCAD*. Desta forma, cada polígono é dividido em elementos básicos (arestas) facilmente descodificados pelo *FEMM*. Pelo mesmo motivo, cada bloco utilizado no *AutoCAD* deve também ser dividido.

No caso dos círculos, arcos (de círculos) e elipses, não existem problemas. Contudo, as elipses serão divididas pelo *FEMM* em pequenos troços rectilíneos.

2. Modificar as zonas tangenciais – O programa *AutoCAD* é reconhecido pela sua grande precisão em qualquer escala. Isto pode ser um problema no caso de zonas com curvas

tangenciais. A razão é que o programa *FEMM* deve colocar uma rede de triângulos (*mesh*) que divide o desenho em pequenos elementos. No caso das zonas tangenciais, o número de triângulos ultrapassa a capacidade do programa, conforme a mensagem apresentada na Figura A.5.

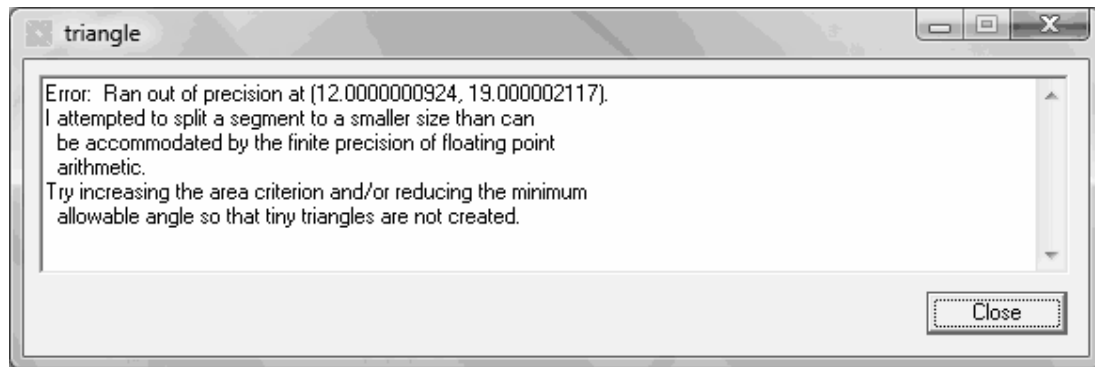


Figura A.5: Janela que alerta da presença de uma quantidade muito elevada de triângulos no *FEMM*.

A única forma de ultrapassar este problema é modificar ligeiramente o desenho para remover as zonas tangenciais. A Figura A.6 e a Figura A.7 apresentam situações problemáticas, assim como as soluções sugeridas.

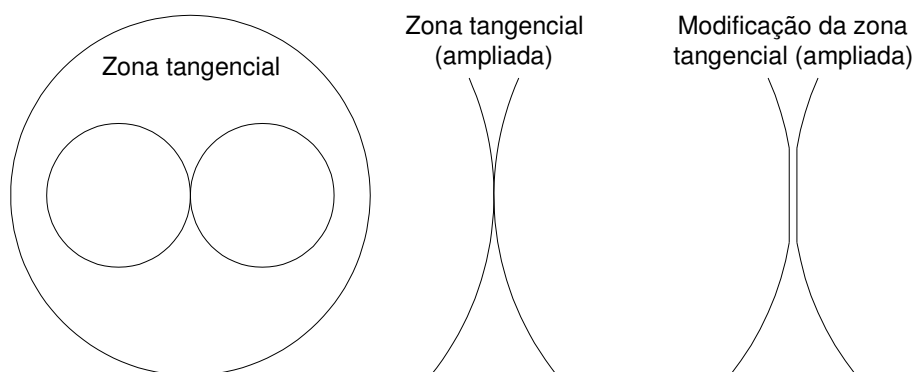


Figura A.6: Situações problemáticas com *AutoCAD*, e as soluções propostas (Primeira parte).

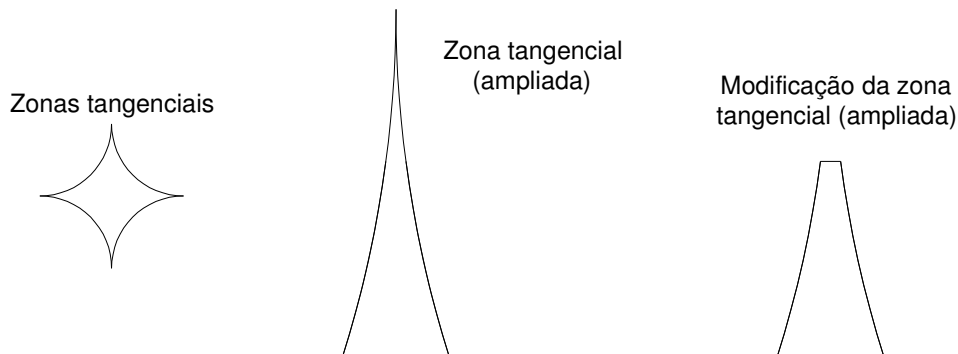


Figura A.7: Situações problemáticas com *AutoCAD*, e as soluções propostas (Segunda parte).

3. Guardar em formato DXF R12 – No programa *AutoCAD*, os ficheiros de desenho devem ser guardados em formato *DXF Release 12 (DXF R12)*, conforme a Figura A.8.

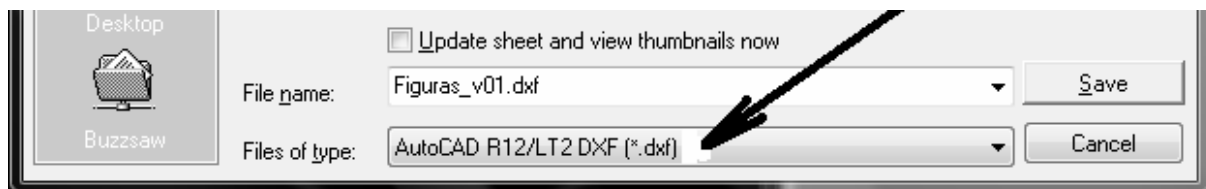


Figura A.8: Janela que define o tipo de ficheiro .dxf no *AutoCAD*.

O programa *AutoCAD* existe em duas versões principais: *AutoCAD* e *AutoCAD LT*. Quaisquer dessas versões podem guardar os ficheiros em formato DXF R12.

A.2.2. Microsoft Excel

Os programas de simulação produzem uma grande quantidade de dados. O *Matlab*, o *Simulink* e o *FEMM* não são exceções. Cada um desses programas tem funções gráficas que permitem apresentar os resultados numa forma visual para facilitar uma análise posterior. Contudo, alguns resultados precisam de processamentos posteriores adicionais e

independentes. Por este motivo, o programa de folha de cálculo *Excel* da Microsoft poderá ser útil para a realização de pós-processamentos.

1. O *Excel* no contexto do *Matlab* e do *Simulink* – Existem funções no *Matlab* que permitem importar e exportar dados directamente do *Excel*. Por exemplo, as seguintes funções m-file são utilizadas:

```
% Caso não existe ficheiro Excel:  
warning off MATLAB:xlswrite:AddSheet;
```

e

```
% Escrever o conteúdo do vector array de duas colunas  
% na segunda linha (A2) do ficheiro Excel 'Bobina01_E_v03.xls'  
% numa folha chamada 'Resultados':  
xlswrite('Bobina01_E_v03.xls',array, 'Resultados', 'A2');
```

Para facilitar a análise no *Excel*, é importante definir um passo de integração fixo no tempo, no menu Simulation > Configuration parameters... do *Simulink*, conforme a Figura A.9.

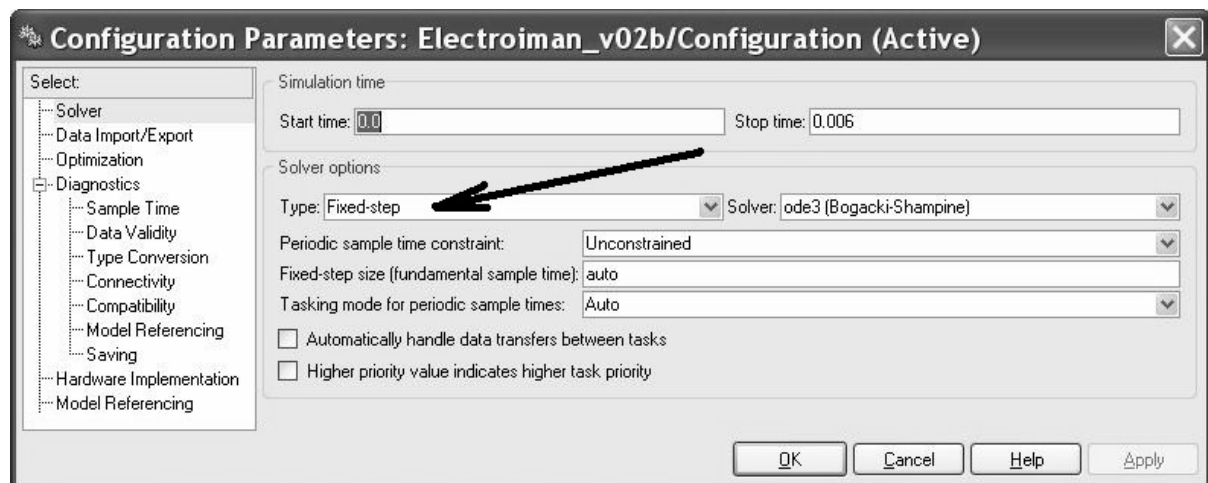


Figura A.9: Definição do passo de integração fixo no tempo.

Para obter mais informação, utilizar as palavras-chave "*spreadsheet*" e "*Excel*" no Help do *Matlab*.

2. O *Excel* no contexto do programa *FEMM* – O programa *FEMM* não permite importar nem exportar directamente em formato *Excel*. Os dados devem ser transferidos um a um,

utilizando funções especializadas do *Matlab*. Por exemplo, a seguinte linha *m-file* permite guardar os dados do vector "array" no ficheiro "Bobina01_E_n03a.xls" do *Excel*:

```
xlswrite('Bobina01_E_v03a.xls',array, 'Resultados', 'A2');
```

Nota: Antes iniciar a simulação no *Simulink*, é essencial fechar o ficheiro *Excel* onde os resultados serão gravados.

A.3. UTILIZAÇÃO DO FEMM NOS CÁLCULOS DE INDUTÂNCIAS

A.3.1. Método das quedas de tensão

Utilizando o *FEMM*, o método mais fiável de determinar as indutâncias é por intermédio das quedas de tensão nos condutores individuais (ver Capítulo 4). Os valores das quedas de tensão (*Voltage Drop*) são obtidos, por condutor, directamente no menu Circuit Property do *FEMM*, conforme se apresenta na Figura A.10.

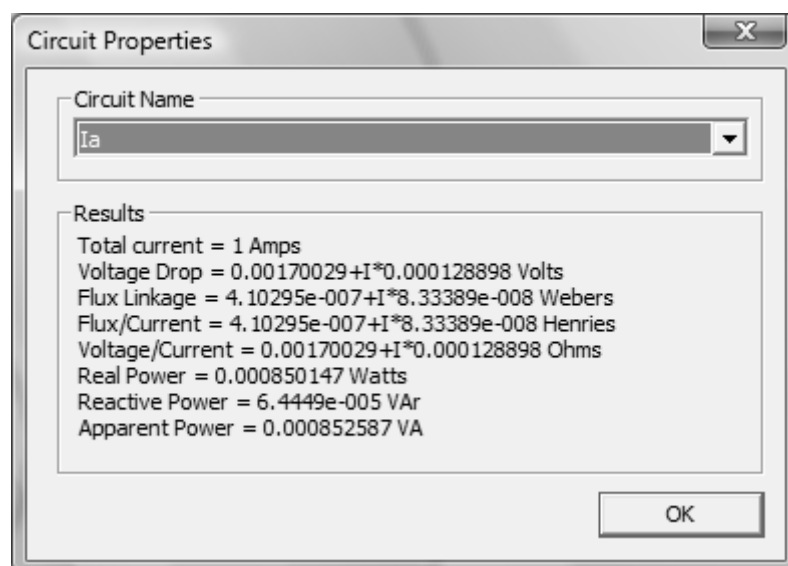


Figura A.10: Janela de Circuit Properties que indica o valor da queda de tensão por condutor (*Voltage Drop*).

Contudo, esta simplicidade deve ser cuidadosamente preparada, conforme as etapas que a seguir se apresentam.

1º Definição dos parâmetros:

Para além de definir a geometria dos condutores (utilizando o *AutoCAD*) e o material (ar, cobre, aço ferromagnético), é muito importante definir um conjunto de correntes de alimentação (chamados "Circuits properties definitions"), conforme se apresenta no Quadro A.1.

Quadro A.1 – Definições das correntes nos "Circuits properties definitions".

Nome	Valor [A]	Descrição
I1	1	Condutor em análise
I0	0	Outro condutor em análise
Ia	1	Fase 1 duma alimentação trifásica equilibrada
Ib	$-0.5 + I \cdot 0.866$	Fase 2 duma alimentação trifásica equilibrada
Ic	$-0.5 - I \cdot 0.866$	Fase 3 duma alimentação trifásica equilibrada
Ic1	0	Corrente no Condutor 1 (se não em análise)
Ic2	0	Corrente no Condutor 2 (se não em análise)
Ic3	0	Corrente no Condutor 3 (se não em análise)
Ic4	0	Corrente no Condutor 4 (se não em análise)
Ic5	0	Corrente no Condutor 5 (e não em análise)

Nota 1: As simulações devem ser feitas com a frequência da rede (50 Hz).

Nota 2: Os valores apresentados foram definidos para um máximo de 5 condutores por cabo (3 de fases, 1 de neutro, e 1 de bainha).

O conjunto de correntes apresentado no Quadro A.1 permite uma grande flexibilidade nas simulações.

2º Simulações por par de condutores:

As simulações são feitas por par de condutores, conforme o exemplo apresentado no Quadro A.2. As correntes I_1 e I_0 representam respectivamente as correntes do primeiro e do segundo condutor dum par de condutores em análise.

Quadro A.2 – Exemplos de valores de correntes definidos nas simulações.

Condutor	1ª Simulação		2ª Simulação		3ª Simulação		4ª Simulação	
	Corrente	Valor	Corrente	Valor	Corrente	Valor	Corrente	Valor
1-Fase 1	I_1^*	1 A	I_1^*	1 A	I_1^*	1 A	I_0^*	0 A
2-Fase 2	I_0^*	0 A	I_{c2}	0 A	I_{c2}	0 A	I_{c2}	0 A
3-Fase 3	I_{c3}	0 A	I_0^*	0 A	I_{c3}	0 A	I_{c3}	0 A
4-Neutro	I_{c4}	0 A	I_{c4}	0 A	I_{c4}	0 A	I_{c4}	0 A
5-Bainha	I_{c5}	0 A	I_{c5}	0 A	I_0^*	0 A	I_1^*	1 A
Resultados	L_{11} - Indutância própria cond. 1 M_{21} - Indutância mútua entre cond. 1 e 2		M_{31} - Indutância mútua entre cond. 1 e 3		M_{51} - Indutância mútua entre cond. 1 e bainha		L_{55} - Indutância própria da bainha	

* Par de condutores em análise.

É importante observar que cada condutor tem a sua própria corrente identificada, mesmo para valores iguais, para permitir obter as quedas de tensões individuais de cada condutor.

No caso do exemplo da 1ª Simulação apresentado no Quadro A.2, onde $I_1 \equiv I_1 = 1 \text{ A}$ e $I_2 \equiv I_0 = 0 \text{ A}$, a queda de tensão, medida no troço de circuito relativo à corrente I_1 (ver Figura A.10), permite-se determinar a indutância própria do primeiro condutor em análise, sendo:

$$M_{ij} = M_{ji}, i, j = 1, 2, 3, 4, 5, \text{ e } i \neq j$$

$$\Delta\dot{U}_1 = R_1 \cdot \dot{I}_1 + j\omega L_{11} \cdot \dot{I}_1 + j\omega M_{21} \cdot \dot{I}_2 \Rightarrow \Delta\dot{U}_1 = R_1 \cdot \dot{I}_1 + j\omega L_{11} \cdot \dot{I}_1 \Rightarrow \frac{\Delta\dot{U}_1}{\dot{I}_1 \equiv 1} = R_1 + j\omega L_{11}$$

A indutância própria virá:

$$L_{11} = \frac{1}{\omega} \cdot \text{Im} \left\{ \frac{\Delta\dot{U}_1}{1} \right\} \quad (\text{A.1})$$

em que:

$\Delta\dot{U}_1$ - Queda de tensão no primeiro condutor em análise, medida em I1 [V];

$\dot{I}_1 \equiv I1 = 1$ A - Corrente no primeiro condutor em análise [A];

$\dot{I}_2 \equiv I0 = 0$ A - Corrente no segundo condutor em análise [A];

L_{11} - Indutância própria do primeiro condutor [H/m];

M_{21} - Indutância mútua entre o primeiro condutor e o segundo condutor em análise [H/m];

$\omega = 2\pi f$ - Pulsação, onde f é a frequência [Hz].

Ainda em relação aos dados indicados no Quadro A.2, a queda de tensão, medida em I0 (na mesma simulação), permite determinar a indutância mútua entre o primeiro condutor e o segundo condutor em análise, sendo:

$$\Delta\dot{U}_2 = R_2 \cdot \dot{I}_2 + j\omega L_{22} \cdot \dot{I}_2 + j\omega M_{21} \cdot \dot{I}_1 \Rightarrow \Delta\dot{U}_2 = j\omega M_{21} \cdot \dot{I}_1 \Rightarrow \frac{\Delta\dot{U}_2}{\dot{I}_1 \equiv 1} = j\omega M_{21}$$

A indutância mútua virá:

$$M_{21} = \frac{1}{\omega} \cdot \text{Im} \left\{ \frac{\Delta\dot{U}_2}{1} \right\} \quad (\text{A.2})$$

em que:

$\Delta\dot{U}_2$ - Queda de tensão no segundo condutor em análise, medida em 10 [V];

$\dot{I}_1 \equiv I1 = 1$ A - Corrente no primeiro condutor do par de condutores em análise [A];

$\dot{I}_2 \equiv I0 = 0$ A - Corrente no segundo condutor do par de condutores em análise [A];

L_{11} - Indutância própria do primeiro condutor [H/m];

M_{21} - Indutância mútua entre o primeiro condutor e o segundo condutor em análise [H/m];

$\omega = 2\pi f$ - Pulsação, onde f é a frequência [Hz].

O processo é repetido para cada par de condutores definido no Quadro A.2. São necessárias quatro simulações para obter um conjunto de cinco valores de indutâncias próprias e mútuas, conforme Quadro A.3.

Quadro A.3 – Valores dos parâmetros e expressões a utilizar nas simulações.

1ª Simulação	2ª Simulação	3ª Simulação	4ª Simulação
$I1 = 1$ A $I2 = 0$ A	$I1 = 1$ A $I3 = 0$ A	$I1 = 1$ A $I5 = 0$ A	$I1 = 0$ A $I5 = 1$ A
$L_{11} = \frac{1}{\omega} \cdot \text{Im} \left\{ \frac{\Delta\dot{U}_1}{1} \right\}$ $M_{21} = \frac{1}{\omega} \cdot \text{Im} \left\{ \frac{\Delta\dot{U}_2}{1} \right\}$	$M_{13} = \frac{1}{\omega} \cdot \text{Im} \left\{ \frac{\Delta\dot{U}_3}{1} \right\}$	$M_{15} = \frac{1}{\omega} \cdot \text{Im} \left\{ \frac{\Delta\dot{U}_5}{1} \right\}$	$L_{55} = \frac{1}{\omega} \cdot \text{Im} \left\{ \frac{\Delta\dot{U}_5}{1} \right\}$

3º Cálculos de indutâncias aparentes:

Utilizando os valores das indutâncias próprias e mútuas obtidas na etapa anterior, é possível calcular agora as indutâncias aparentes L_1 , L_2 , e L_3 dos condutores de fase 1, 2, e 3, respectivamente.

As quedas de tensão para cada condutor podem ser determinadas pelas seguintes expressões:

Condutor 1:

$$\Delta \dot{U}_1 = R_1 \cdot \dot{I}_1 + j\omega L_{11} \cdot \dot{I}_1 + j\omega M_{21} \cdot \dot{I}_2 + j\omega M_{31} \cdot \dot{I}_3 + j\omega M_{41} \cdot \dot{I}_4 + j\omega M_{51} \cdot \dot{I}_5$$

Condutor 2:

$$\Delta \dot{U}_2 = R_2 \cdot \dot{I}_2 + j\omega L_{22} \cdot \dot{I}_2 + j\omega M_{12} \cdot \dot{I}_1 + j\omega M_{32} \cdot \dot{I}_3 + j\omega M_{42} \cdot \dot{I}_4 + j\omega M_{52} \cdot \dot{I}_5$$

Condutor 3:

$$\Delta \dot{U}_3 = R_3 \cdot \dot{I}_3 + j\omega L_{33} \cdot \dot{I}_3 + j\omega M_{13} \cdot \dot{I}_1 + j\omega M_{23} \cdot \dot{I}_2 + j\omega M_{43} \cdot \dot{I}_4 + j\omega M_{53} \cdot \dot{I}_5$$

Condutor 4:

$$\Delta \dot{U}_4 = R_4 \cdot \dot{I}_4 + j\omega L_{44} \cdot \dot{I}_4 + j\omega M_{14} \cdot \dot{I}_1 + j\omega M_{24} \cdot \dot{I}_2 + j\omega M_{34} \cdot \dot{I}_3 + j\omega M_{54} \cdot \dot{I}_5$$

Condutor 5:

$$\Delta \dot{U}_5 = R_5 \cdot \dot{I}_5 + j\omega L_{55} \cdot \dot{I}_5 + j\omega M_{14} \cdot \dot{I}_1 + j\omega M_{24} \cdot \dot{I}_2 + j\omega M_{34} \cdot \dot{I}_3 + j\omega M_{45} \cdot \dot{I}_4$$

No caso de um cabo VAV 4x10, e considerando a geometria dos seus condutores, são utilizadas as seguintes igualdades simplificativas:

$$L_{11} = L_{22} = L_{33} = L_{44}$$

$$M_{12} = M_{21} = M_{23} = M_{32} = M_{14} = M_{41} = M_{34} = M_{43}$$

$$M_{13} = M_{31} = M_{24} = M_{42}$$

$$M_{51} = M_{15} = M_{52} = M_{25} = M_{53} = M_{35} = M_{54} = M_{45}$$

mas $L_{11} \neq L_{55}$, $M_{12} \neq M_{13}$ e $M_{12} \neq M_{15}$

Utilizando as seguintes correntes (rede equilibrada):

$$\dot{I}_1 = 1, \quad \dot{I}_2 = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}, \quad \dot{I}_3 = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}, \quad \dot{I}_4 \text{ (neutro)} = 0, \text{ e } \dot{I}_5 \text{ (bainha)} = 0$$

as indutâncias aparentes de cada condutor de fase são finalmente determinadas da seguinte forma:

$$L_1 = \frac{1}{\omega} \cdot \text{Im} \left\{ \frac{\Delta \dot{U}_1}{\dot{I}_1} \right\}, \quad L_2 = \frac{1}{\omega} \cdot \text{Im} \left\{ \frac{\Delta \dot{U}_2}{\dot{I}_2} \right\}, \quad L_3 = \frac{1}{\omega} \cdot \text{Im} \left\{ \frac{\Delta \dot{U}_3}{\dot{I}_3} \right\}$$

4º Simulações com alimentação trifásica:

A simulação com alimentação em correntes trifásicas permite confirmar os resultados dos cálculos obtidos na etapa anterior.

A.4. UTILIZAÇÃO DO FEMM NOS CÁLCULOS DE CAPACIDADES

A.4.1. Método de Curto-circuito

As fórmulas fundamentais de electromagnetismo estabelecem uma relação entre a capacidade e a energia eléctrica, conforme a expressão (A.3).

$$W_{elec} = \frac{1}{2} CV^2 \Leftrightarrow C = \frac{2 \cdot W_{elec}}{V^2} \quad (\text{A.3})$$

em que:

W_{elec} : Energia eléctrica armazenada [J];

C : Capacidade [F];

V (ou U) : Diferença de potencial [V].

O *FEMM* permite calcular a energia eléctrica global armazenada num cabo. Utilizando esta relação com a energia eléctrica, é possível calcular a capacidade.

Contudo, num cabo com múltiplos condutores, existem diferentes capacidades, conforme a Figura A.11.

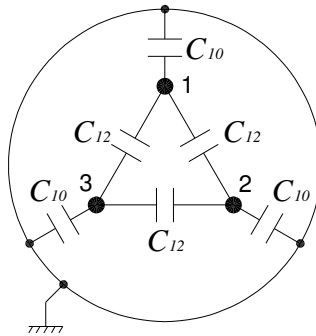
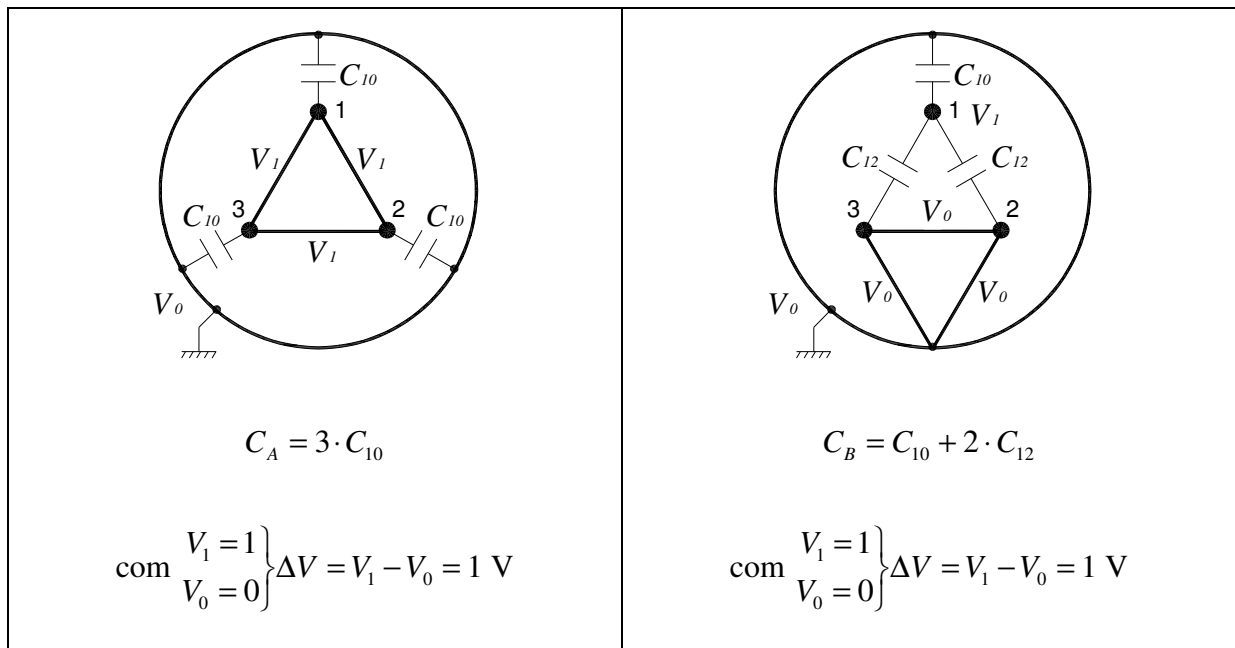


Figura A.11: Capacidades parciais num cabo de três condutores e uma bainha metálica.

Assim, um cabo de três condutores e uma bainha metálica tem dois valores distintos de capacidades (C_{10} e C_{12}). Para determinar o valor de cada capacidade individual, precisa-se de utilizar o *método de curto-circuito*, em conjunto com o *FEMM*. A ideia deste método é ligar diferentemente, entre eles (curto-circuitar), um conjunto de condutores, de forma a estabelecer um sistema de equações que permite, posteriormente, determinar o valor de cada capacidade individual.

Assim, no caso de um cabo de três condutores e uma bainha metálica, é possível estabelecer as seguintes relações.



Nota: A escolha de $V_1 = 1 \text{ V}$ e $V_0 = 0 \text{ V}$ facilita o cálculo da capacidade porque $1^2 = 1$ [ver (A.3)].

Figura A.12: Método de curto-circuito para um cabo de três condutores e uma bainha.

Duma forma matricial, as relações valem:

$$\begin{bmatrix} C_A \\ C_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3 & 0 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} C_{10} \\ C_{12} \end{bmatrix} \Leftrightarrow \begin{bmatrix} C_{10} \\ C_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3 & 0 \\ 1 & 2 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} C_A \\ C_B \end{bmatrix} \Leftrightarrow \begin{bmatrix} C_{10} \\ C_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/3 & 0 \\ -1/6 & 1/2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} C_A \\ C_B \end{bmatrix} \quad (\text{A.4})$$

o que permite calcular os valores individuais de cada capacidade.

Na aplicação deste método, os passos são os seguintes:

- 1º Desenhar o cabo, utilizando o *AutoCAD*, e importar para o *FEMM*;
- 2º Estabelecer o sistema de equações, utilizando o método de curto-circuito [ver (A.4)];
- 3º Calcular, utilizando o *FEMM*, a energia eléctrica global armazenada no interior do cabo para cada situação (no caso de um cabo de três condutores, são necessárias duas simulações); as simulações são feitas em modo electrostático (0 Hz);
- 4º Calcular cada capacidade global (C_A , C_B , ...) [ver (A.4)], utilizando a relação da energia eléctrica [ver (4.35)];

5º Determinar os valores de cada capacidade, utilizando o sistema de equações estabelecido no 2º passo.

A.4.2. Cabo de três condutores simétricos e uma bainha metálica

A Figura A.13 apresenta um conjunto de situações no caso de um cabo de três condutores, com distribuição simétrica. Duas simulações são necessárias para determinar C_{10} e C_{12} .

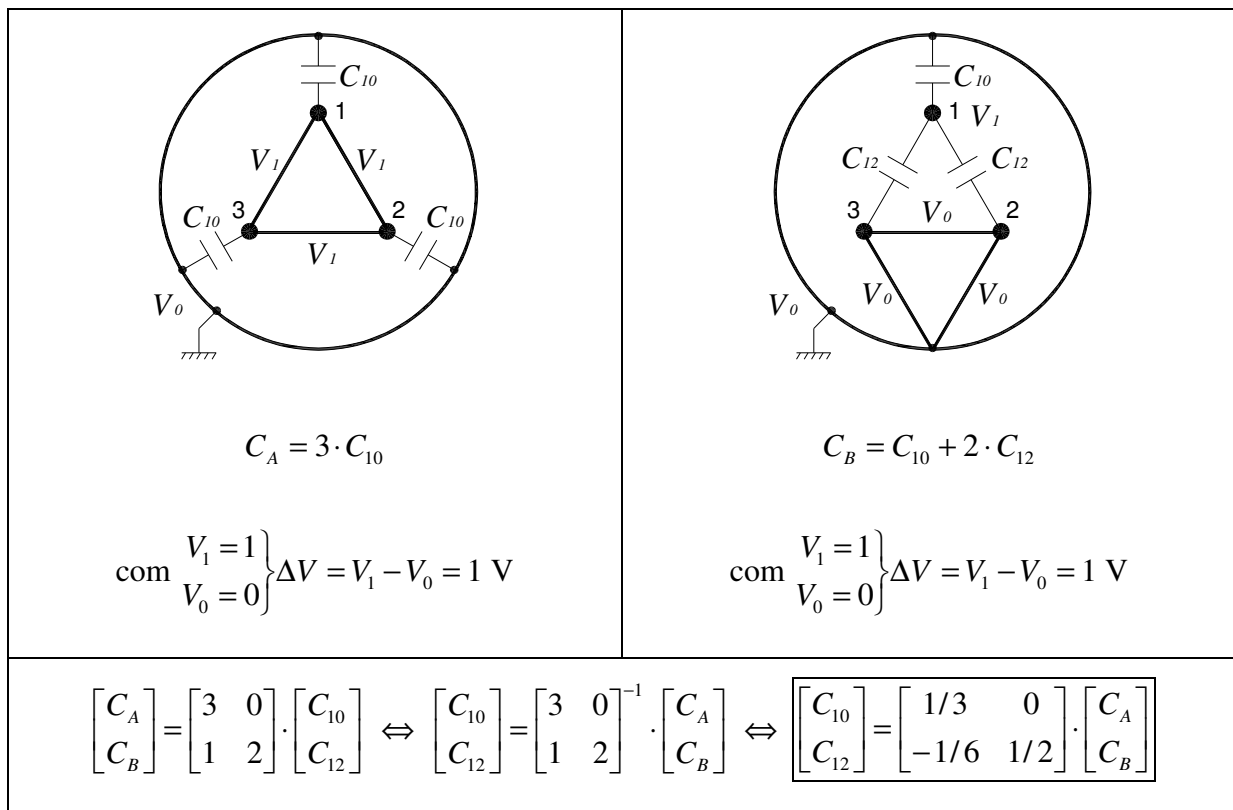


Figura A.13: Método de curto-circuito para um cabo de três condutores simétricos e uma bainha metálica.

A.4.3. Cabo de quatro condutores simétricos e uma bainha metálica

A Figura A.14 apresenta um conjunto de situação no caso de um cabo de quatro condutores e uma bainha metálica, com distribuição simétrica. Três simulações são necessárias para determinar C_{10} , C_{12} e C_{13} .

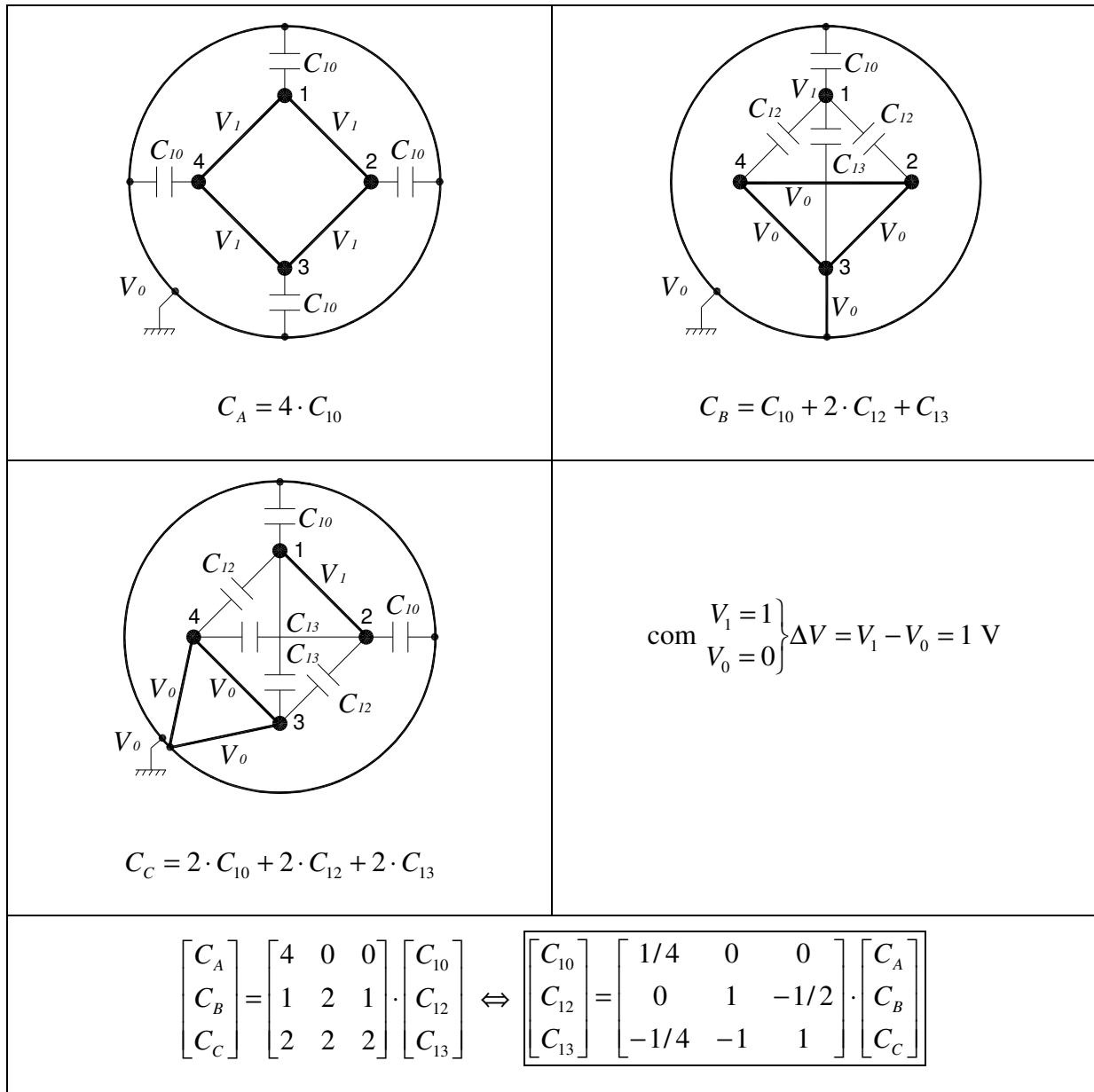


Figura A.14: Método de curto-circuito para um cabo de quatro condutores simétricos e uma bainha metálica.

A.4.4. Cabo de quatro condutores trapezoidais e uma bainha metálica

A Figura A.15 e a Figura A.16 apresentam um conjunto de situações no caso de um cabo de quatro condutores e uma bainha metálica, com distribuição trapezoidal. Cinco simulações são necessárias para determinar C_{10} , C_{20} , C_{12} , C_{13} e C_{24} .

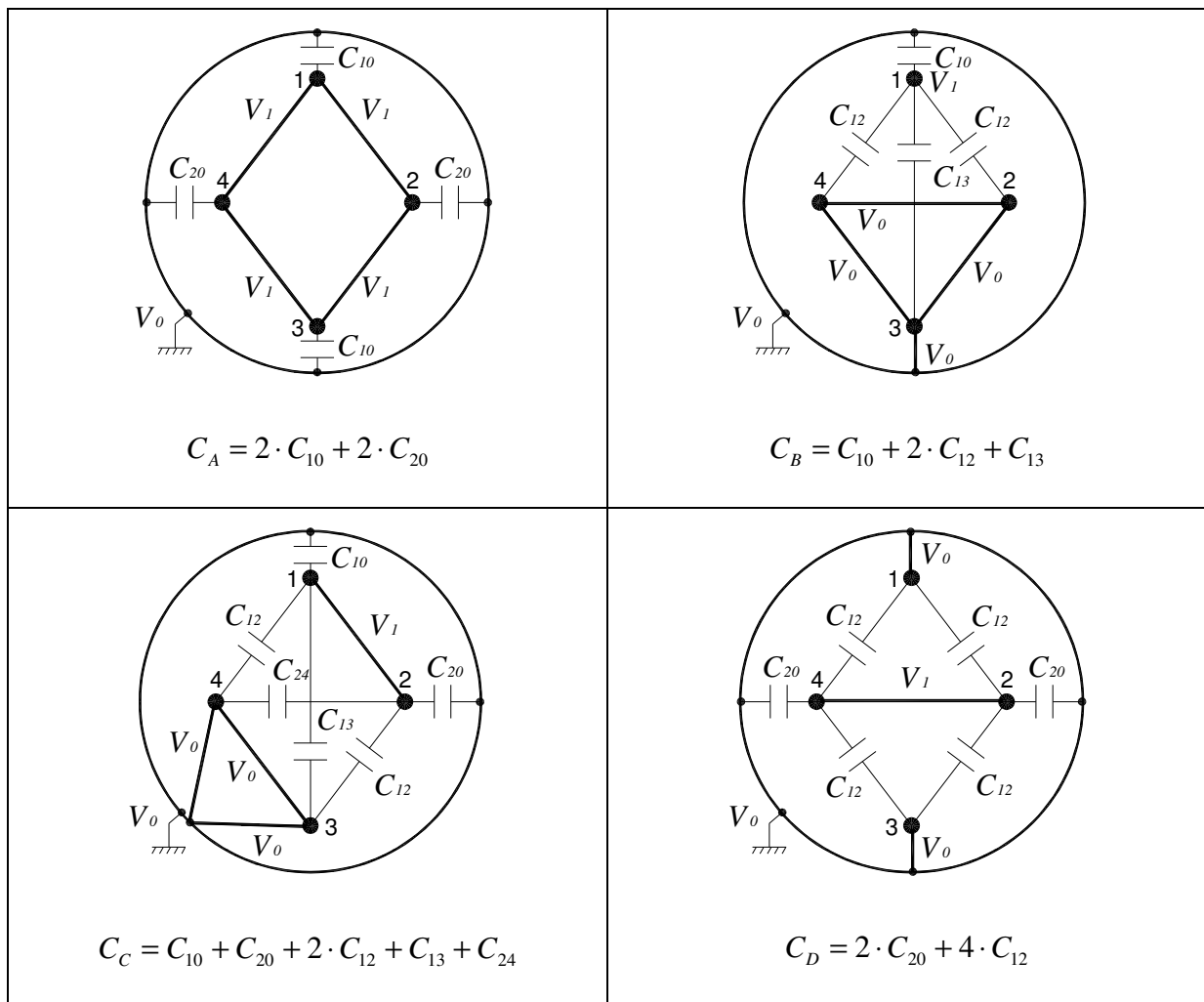


Figura A.15: Método de curto-circuito para um cabo de quatro condutores trapezoidais e uma bainha metálica (Primeira parte).

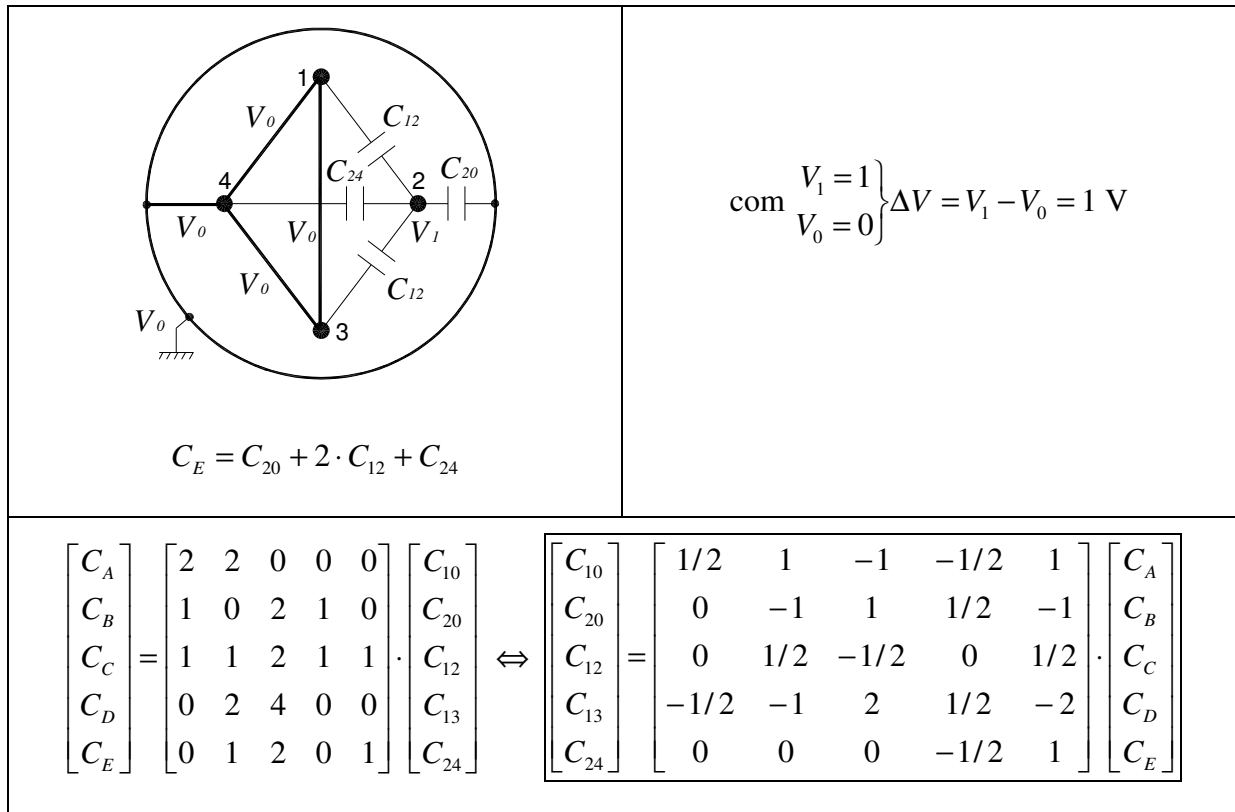


Figura A.16: Método de curto-circuito para um cabo de quatro condutores trapezoidais e uma bainha metálica (Segunda parte).

Anexo B

PORMENORES ADICIONAIS DE CÁLCULO DE CAPACIDADES

O Anexo B apresenta alguns pormenores adicionais de cálculo na determinação das capacidades dos cabos. Este anexo completa o Capítulo 4.

B.1. EXPRESSÕES DAS CAPACIDADES DE SERVIÇO C_s

B.1.1. Capacidade de serviço (C_s) de um cabo de um condutor e uma bainha



Figura B.1: Capacidade de serviço de um cabo de um condutor e uma bainha.

Da Figura B.1, C_{10} (em F/m) representa a capacidade unitária (por unidade de comprimento) entre o condutor e a bainha. O esquema equivalente da Figura B.1, e a fórmula resultante, são directamente deduzidos da configuração original (por observação directa da própria Figura B.1). Assim, a capacidade de serviço C_s vale:

$$C_s = C_{10}$$

B.1.2. Capacidade de serviço (C_s) de um cabo de dois condutores e uma bainha

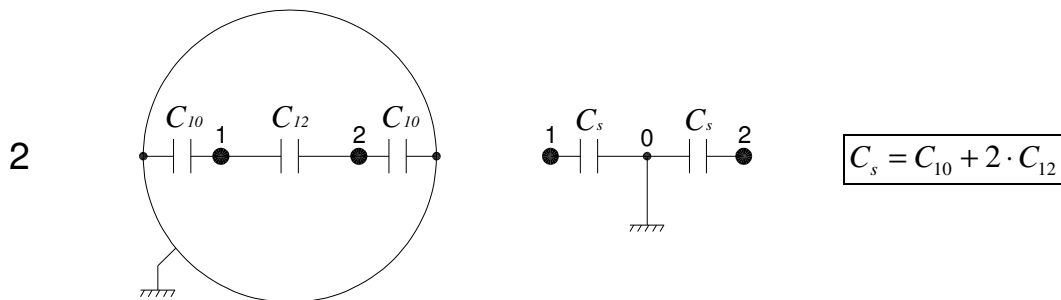


Figura B.2: Capacidade de serviço de um cabo de dois condutores e uma bainha.

Da Figura B.2, C_{12} (em F/m) representa a capacidade parcial unitária entre os condutores 1 e 2. O esquema da Figura B.2 pode ser simplificado da forma indicada na Figura B.3.

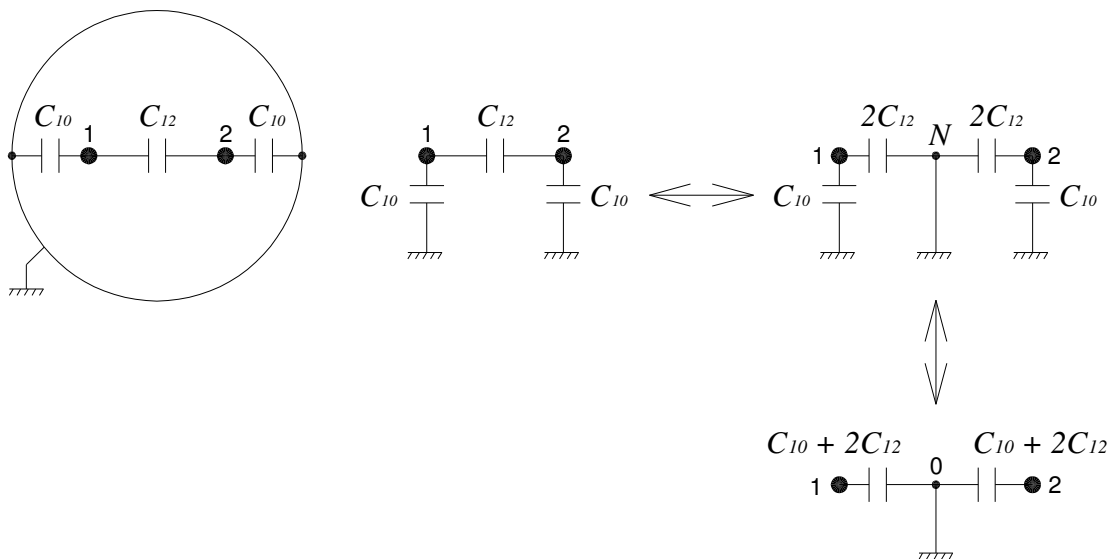


Figura B.3: Capacidade de serviço de um cabo de dois condutores e uma bainha (esquemas equivalentes).

Da Figura B.3, o valor de $2C_{12}$ é deduzido do divisor de tensão no ponto neutro N . Assim, a capacidade de serviço C_s vale:

$$C_s = C_{10} + 2 \cdot C_{12}$$

B.1.3. Capacidade de serviço (C_s) de um cabo de três condutores e uma bainha

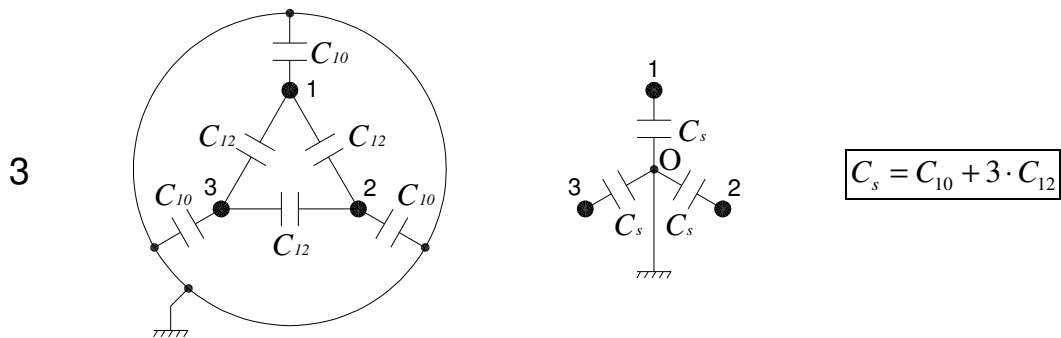


Figura B.4: Capacidade de serviço de um cabo de três condutores e uma bainha.

Da Figura B.4, dada a simetria equidistante dos condutores, relativamente à bainha, pode-se considerar:

$$C_{12} = C_{23} = C_{31} \text{ e } C_{10} = C_{20} = C_{30}$$

O esquema original da Figura B.4, é constituído por dois esquemas em paralelo, como se indica na Figura B.5.

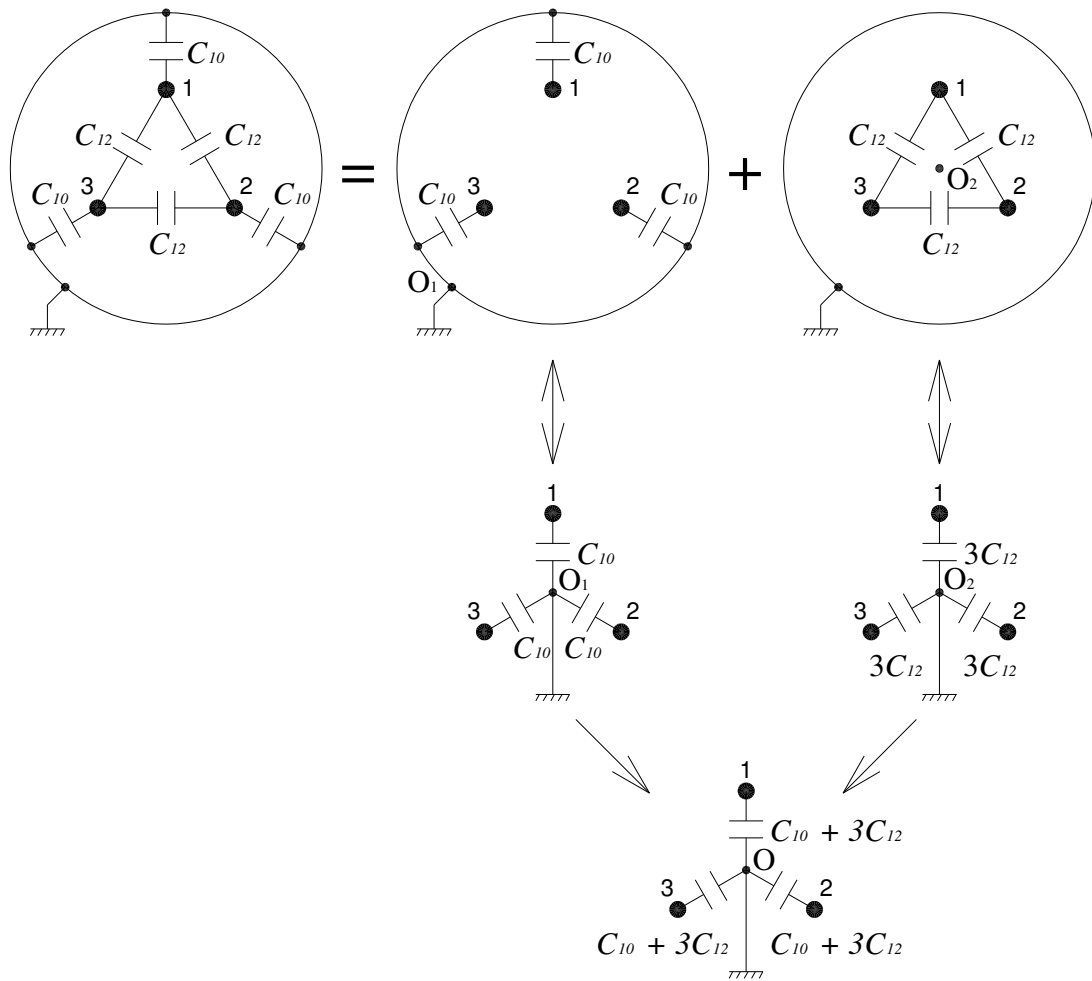


Figura B.5: Capacidade de serviço de um cabo de três condutores e uma bainha (esquemas equivalentes).

Da Figura B.5, o valor de $3C_{12}$ é deduzido da transformação triângulo - estrela (Δ - Y). Assim, a capacidade de serviço C_s vale:

$$C_s = C_{10} + 3 \cdot C_{12}$$

B.1.4. Capacidade de serviço (C_s) de um cabo de quatro condutores e uma bainha

A) CASO DUMA SIMETRIA QUADRADA

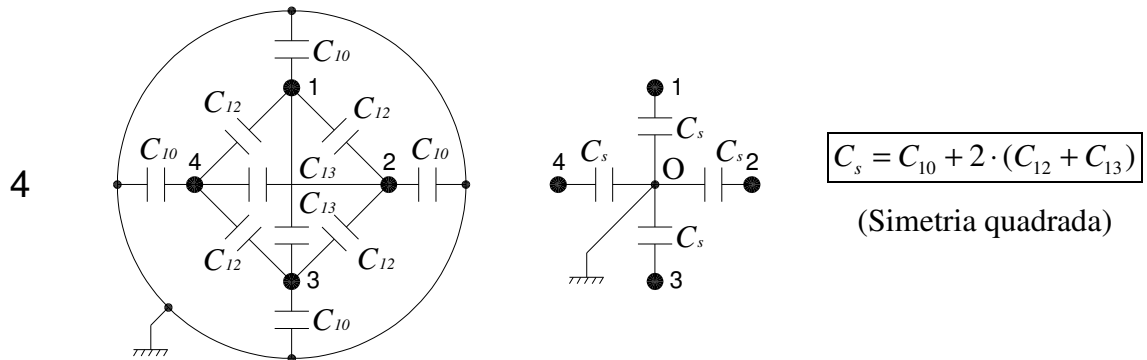


Figura B.6: Capacidade de serviço de um cabo de quatro condutores e uma bainha (simetria quadrada)

Da Figura B.6, dada a simetria equidistante dos condutores relativamente à bainha, pode-se considerar:

$$C_{12} = C_{23} = C_{34} = C_{14}$$

$$C_{13} = C_{24}$$

$$C_{30} = C_{40}$$

O esquema original da Figura B.6 é constituído por dois esquemas em paralelo, conforme se apresenta na Figura B.7.

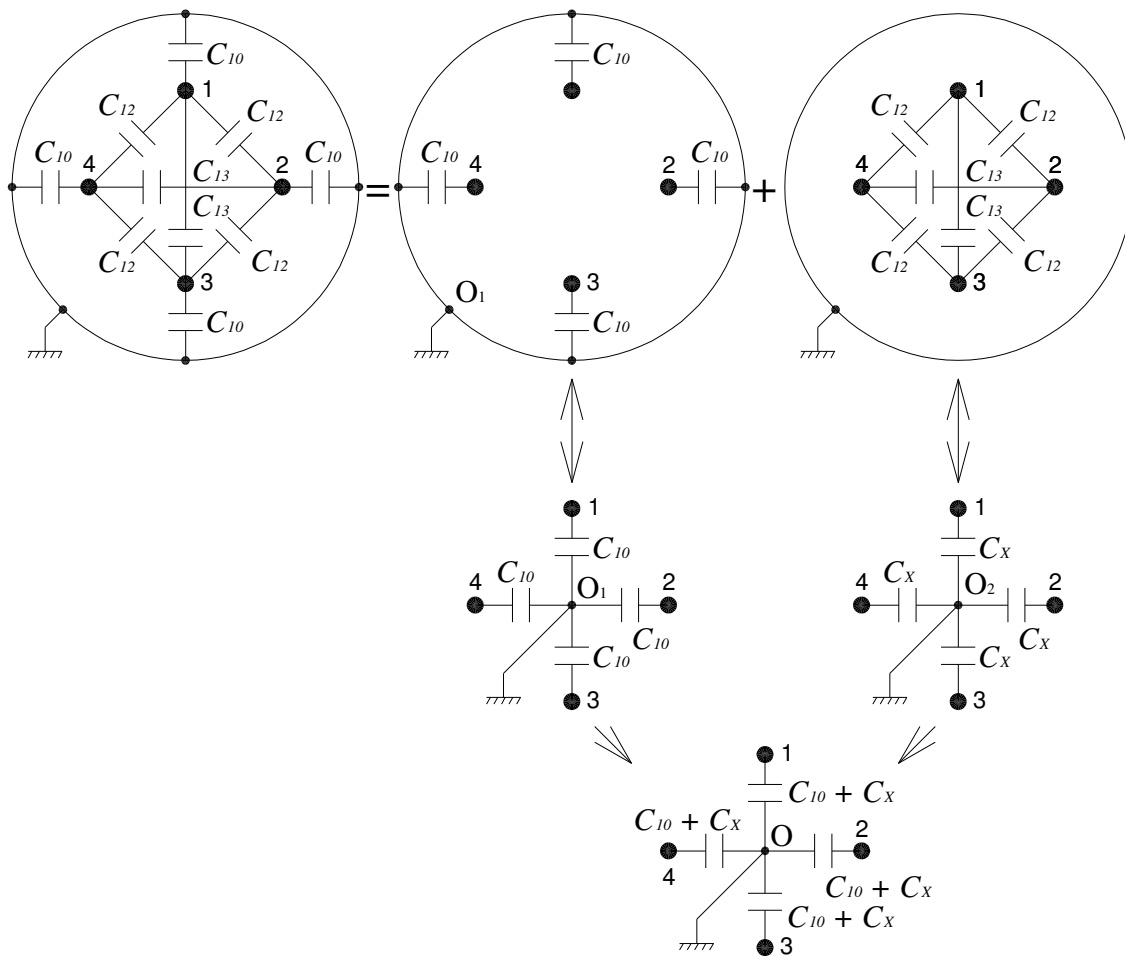


Figura B.7: Capacidade de serviço de um cabo de quatro condutores e uma bainha (simetria quadrada - esquemas equivalentes).

Assim, a capacidade de serviço vale:

$$C_s = C_{10} + C_x$$

em que a capacidade C_x pode ser determinada por via analítica. Utilizando uma transformação Quadrilátero - Estrela de 4 ramos, José Gonçalves da UAlg [4-20] desenvolveu essa transformação utilizando o esquema da Figura B.8.

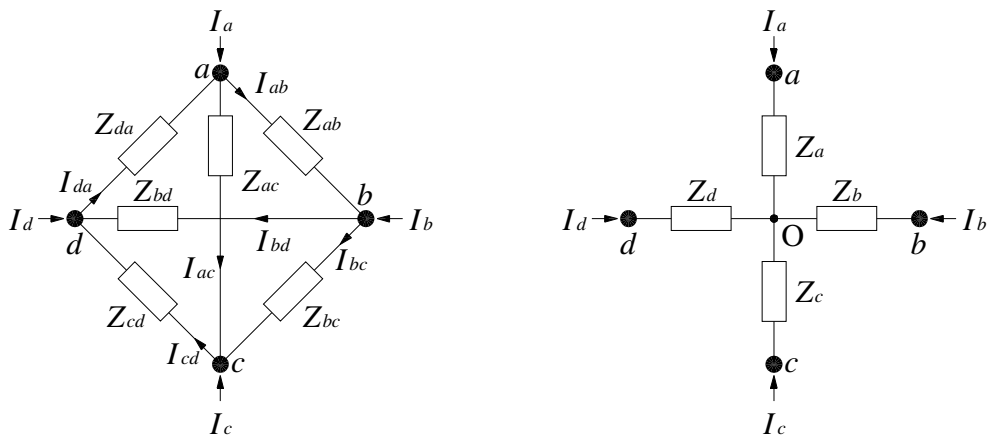


Figura B.8: Transformação polígono - estrela de quatro ramos.

Da Figura B.8, na configuração em polígono, Z_{ab} , Z_{bc} , Z_{cd} , Z_{da} , Z_{ac} e Z_{bd} , bem como as correntes I_{ab} , I_{bc} , I_{cd} , I_{da} , I_{ac} e I_{bd} , representam as impedâncias e as correntes nos ramos ab, bc, cd, da, ac e bd, respectivamente. Da mesma Figura B.8, na configuração em estrela de quadro lados, Z_a , Z_b , Z_c e Z_d representam as impedâncias dos ramos, e I_a , I_b , I_c e I_d as respectivas correntes nodais. Considerando "Y" a admitâncias dada pelo inverso da impedância "Z", a demonstração relativa à transformação apresentada na Figura B.8, estabelece que:

$$Z_a = \frac{AY_{cd} + Y_{bc}Y_{db}}{X}$$

$$Z_b = \frac{BC - Y_{cd}^2}{X} - \frac{BY_{db} + Y_{bc}Y_{cd}}{X}$$

sendo:

$$\begin{cases} A = Y_{ba} + Y_{bc} + Y_{db} \\ B = Y_{ca} + Y_{bc} + Y_{cd} \\ C = Y_{da} + Y_{db} + Y_{cd} \\ X = ABC - AY_{cd}^2 - BY_{db}^2 - CY_{bc}^2 - 2Y_{bc}Y_{cd}Y_{db} \end{cases}$$

em que, novamente, se considera que a admitância "Y" é igual ao inverso da respectiva impedância "Z".

Assim, é possível simplificar essas expressões, considerando uma simetria quadrada dos condutores. Nesta condição, existem as seguintes igualdades:

$$Z_{ba} = Z_{bc} = Z_{cd} = Z_{da} \Leftrightarrow \frac{1}{Z_{ba}} = Y_{ba} = Y_{bc} = Y_{cd} = Y_{da}$$

e

$$Z_{ca} = Z_{db} \Leftrightarrow \frac{1}{Z_{ca}} = Y_{ca} = Y_{db}$$

Assim:

$$\left. \begin{array}{l} A = 2 \cdot Y_{ba} + Y_{ca} \\ B = 2 \cdot Y_{ba} + Y_{ca} \\ C = 2 \cdot Y_{ba} + Y_{ca} \end{array} \right\} \text{ ou seja: } \boxed{A = B = C = 2 \cdot Y_{ba} + Y_{ca}}$$

e

$$X = ABC - AY_{cd}^2 - BY_{db}^2 - CY_{bc}^2 - 2Y_{bc}Y_{cd}Y_{db}$$

$$\Leftrightarrow X = A^3 - AY_{ba}^2 - AY_{ca}^2 - AY_{ba}^2 - 2Y_{ba}^2Y_{ca}$$

$$\Leftrightarrow X = A^3 - 2AY_{ba}^2 - AY_{ca}^2 - AY_{ba}^2 - 2Y_{ba}^2Y_{ca}$$

$$\Leftrightarrow X = 4Y_{ba} \cdot (Y_{ba}^2 + 2Y_{ba}Y_{ca} + Y_{ca}^2) \Leftrightarrow \boxed{X = 4Y_{ba} \cdot (Y_{ba} + Y_{ca})^2}$$

Sabendo que:

$$Z_a = Z_b = Z_c = Z_d = \frac{AY_{cd} + Y_{bc}Y_{db}}{X}$$

$$\Leftrightarrow Z_a = \frac{(2Y_{ba} + Y_{ca}) \cdot Y_{cd} + Y_{bc}Y_{db}}{4Y_{ba} \cdot (Y_{ba} + Y_{ca})^2}$$

$$\Leftrightarrow \boxed{Z_a = \frac{1}{2 \cdot (Y_{ba} + Y_{ca})}}$$

Para as capacidades, virá:

$$\dot{Z} = \frac{1}{j\omega C} \Leftrightarrow \frac{1}{\dot{Z}} = \dot{Y} = j\omega C$$

Logo:

$$\dot{Y}_{ba} = j\omega C_{ba} = j\omega C_{12} \quad \text{e} \quad \dot{Y}_{ca} = j\omega C_{ca} = j\omega C_{13}$$

Assim:

$$\dot{Z}_a = \dot{Z}_X = \frac{1}{j\omega C_X} = \frac{1}{2 \cdot (j\omega C_{12} + j\omega C_{13})} \Leftrightarrow C_X = 2 \cdot (C_{12} + C_{13})$$

A capacidade de serviço vale finalmente:

$$C_s = C_{10} + C_X \Leftrightarrow \boxed{C_s = C_{10} + 2 \cdot (C_{12} + C_{13})} \quad (\text{para simetria quadrada}).$$

B) CASO DUMA DISTORÇÃO TRAPEZOIDAL

As expressões da alínea A) da Secção B.1.4 deste anexo são válidas no caso duma simetria quadrada dos condutores. O Capítulo 4 descreve também uma situação real onde os condutores têm uma disposição trapezoidal. Os esquemas equivalentes devem ser corrigidos de acordo com a Figura B.9.

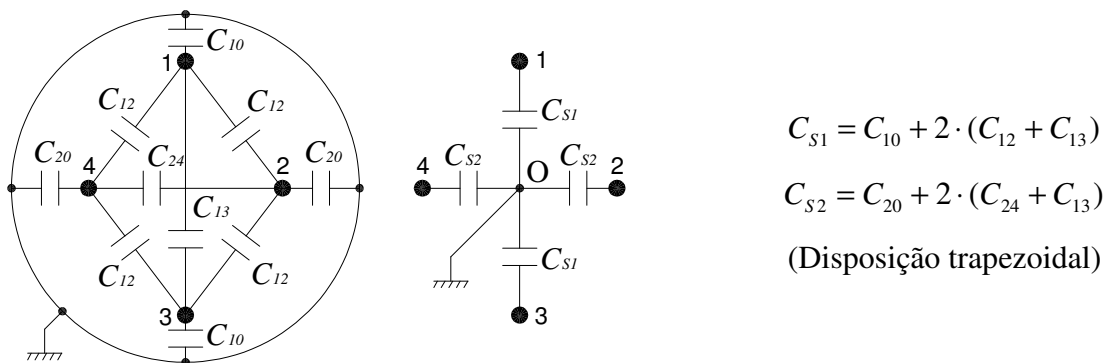


Figura B.9: Capacidade de serviço de um cabo de quatro condutores com distorção trapezoidal e uma bainha.

Da Figura B.9, o esquema original é constituído de dois esquemas em paralelo, como se indica na Figura B.10.

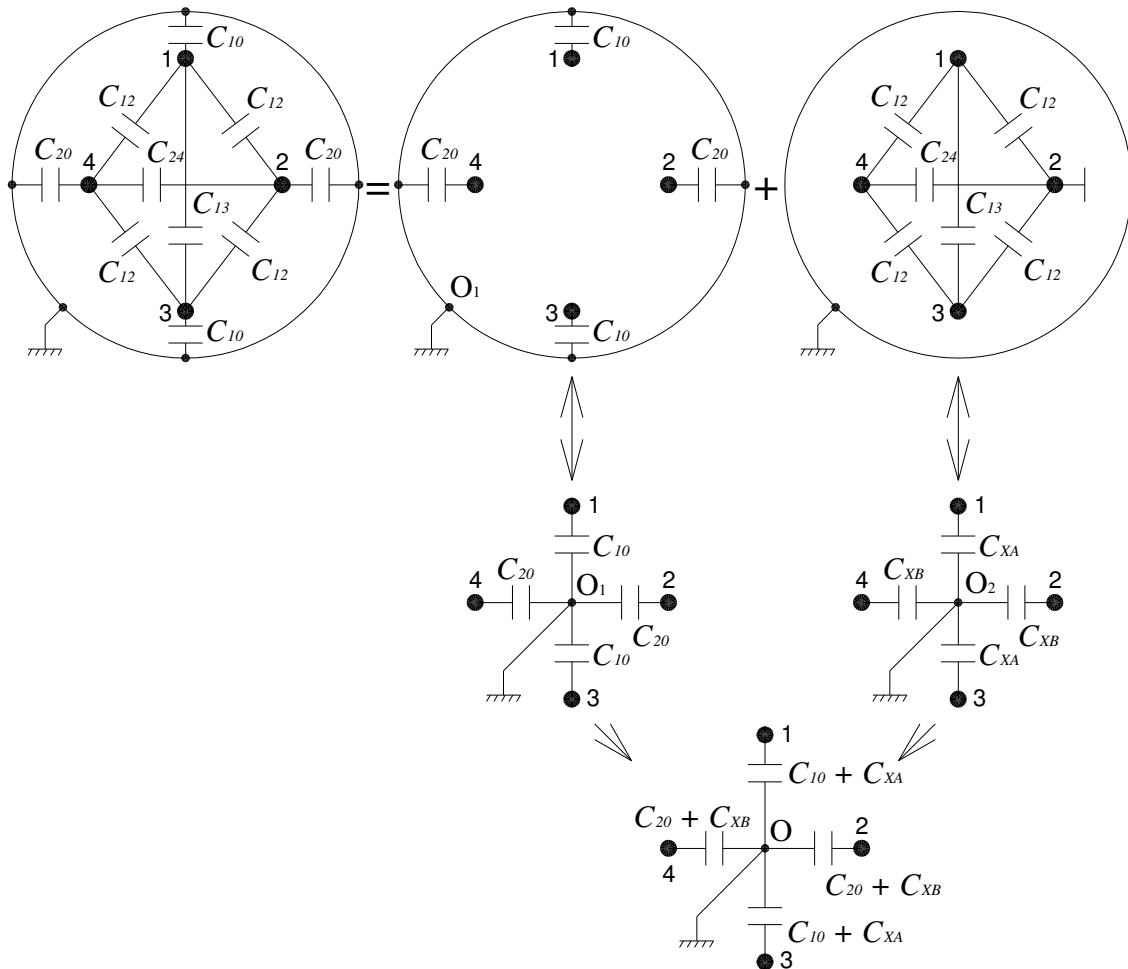


Figura B.10: Capacidade de serviço de um cabo de quatro condutores com distorção trapezoidal e uma bainha (esquemas equivalentes).

Neste caso, existem duas capacidades de serviço: C_{S1} para os condutores 1 e 3, e C_{S2} para os condutores 2 e 4, ou seja: $C_{S1} = C_{10} + C_{XA}$ e $C_{S2} = C_{20} + C_{XB}$, respectivamente.

Utilizando os resultados da demonstração de José Gonçalves [4-20], é possível estabelecer as seguintes igualdades:

$$Z_a = Z_c \quad \text{e} \quad Z_b = Z_d$$

$$Z_{ba} = Z_{bc} = Z_{cd} = Z_{da} \Leftrightarrow \frac{1}{Z_{ba}} = Y_{ba} = Y_{bc} = Y_{cd} = Y_{da}$$

mas $Z_{ca} \neq Z_{db} \Leftrightarrow \frac{1}{Z_{ca}} = Y_{ca}$ e $\frac{1}{Z_{db}} = Y_{db}$

com as seguintes equivalências:

$$Z_{ba} = Z_{bc} = Z_{cd} = Z_{da} \propto \frac{1}{C_{12}}$$

$$Z_{ca} \propto \frac{1}{C_{13}} \text{ e } Z_{db} \propto \frac{1}{C_{24}}$$

Assim:

$$\left. \begin{array}{l} A = 2 \cdot Y_{ba} + Y_{db} \\ B = 2 \cdot Y_{ba} + Y_{ca} \\ C = 2 \cdot Y_{ba} + Y_{db} \end{array} \right\} \text{ ou seja: } \boxed{\begin{array}{l} A = C = 2 \cdot Y_{ba} + Y_{db} \\ B = 2 \cdot Y_{ba} + Y_{ca} \end{array}}$$

e

$$X = ABC - AY_{cd}^2 - BY_{db}^2 - CY_{bc}^2 - 2Y_{bc}Y_{cd}Y_{db}$$

$$\Leftrightarrow X = A^2 \cdot B - A \cdot Y_{ba}^2 - B \cdot Y_{db}^2 - A \cdot Y_{ba}^2 - 2 \cdot Y_{ba}^2 \cdot Y_{db}$$

$$\Leftrightarrow X = A^2 \cdot B - 2 \cdot A \cdot Y_{ba}^2 - B \cdot Y_{db}^2 - 2 \cdot Y_{ba}^2 \cdot Y_{db}$$

$$\Leftrightarrow \boxed{X = Y_{ca} \cdot (4 \cdot Y_{ba}^2 + 4 \cdot Y_{ba} \cdot Y_{db}) + 4 \cdot Y_{ba}^2 \cdot (Y_{ba} + Y_{db})}$$

Sabendo que:

$$Z_a = Z_c = \frac{AY_{cd} + Y_{bc}Y_{db}}{X} \Leftrightarrow Z_a = Z_c = \frac{(2 \cdot Y_{ba} + Y_{db}) \cdot Y_{cd} + Y_{bc}Y_{db}}{X}$$

$$\Leftrightarrow \boxed{Z_a = \frac{1}{2 \cdot (Y_{ba} + Y_{ca})} = Z_c} \text{ e}$$

$$Z_b = \frac{BC - Y_{cd}^2}{X} - \frac{BY_{db} + Y_{bc}Y_{cd}}{X} \Leftrightarrow$$

$$Z_b = \frac{BA - Y_{ba}^2}{Y_{ca} \cdot (4 \cdot Y_{ba}^2 + 4 \cdot Y_{ba}Y_{db}) + 4 \cdot Y_{ba}^2 \cdot (Y_{ba} + Y_{db})} - \frac{BY_{db} + Y_{ba}^2}{Y_{ca} \cdot (4 \cdot Y_{ba}^2 + 4 \cdot Y_{ba}Y_{db}) + 4 \cdot Y_{ba}^2 \cdot (Y_{ba} + Y_{db})}$$

$$\Leftrightarrow \boxed{Z_b = \frac{1}{2 \cdot (Y_{ba} + Y_{db})} = Z_d}$$

Para as capacidades, virá:

$$\dot{Z} = \frac{1}{j\omega C} \Leftrightarrow \frac{1}{\dot{Z}} = \dot{Y} = j\omega C$$

Logo:

$$\dot{Y}_{ba} = j\omega C_{ba} = j\omega C_{12} ; \dot{Y}_{ca} = j\omega C_{ca} = j\omega C_{13} ; \dot{Y}_{db} = j\omega C_{ca} = j\omega C_{24}$$

Assim:

$$\dot{Z}_a = \dot{Z}_{XA} = \frac{1}{j\omega \cdot C_{XA}} = \frac{1}{2 \cdot (j\omega \cdot C_{12} + j\omega \cdot C_{13})} \Leftrightarrow \boxed{C_{XA} = 2 \cdot (C_{12} + C_{13})}$$

$$\dot{Z}_b = \dot{Z}_{XB} = \frac{1}{j\omega \cdot C_{XB}} = \frac{1}{2 \cdot (j\omega \cdot C_{24} + j\omega \cdot C_{13})} \Leftrightarrow \boxed{C_{XB} = 2 \cdot (C_{12} + C_{24})}$$

As capacidades de serviço valem finalmente (para uma disposição trapezoidal):

$$C_{S1} = C_{10} + C_{XA} \Leftrightarrow \boxed{C_{S1} = C_{10} + 2 \cdot (C_{12} + C_{13})}$$

$$C_{S2} = C_{20} + C_{XB} \Leftrightarrow \boxed{C_{S2} = C_{20} + 2 \cdot (C_{12} + C_{24})}$$

B.2. CAPACIDADE DE UM CABO DE TRÊS CONDUTORES E UMA BAINHA METÁLICA - MÉTODO DOS POTENCIAIS

B.2.1. Expressões de base

As capacidades são distribuídas conforme a Figura B.11 e a Figura B.12.

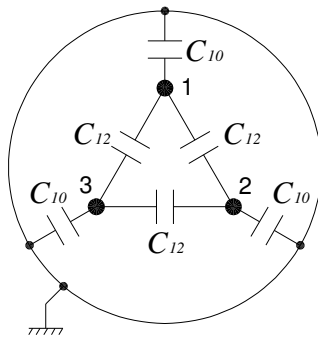


Figura B.11: Cabo de três condutores e uma bainha metálica.

Da expressão $C_s = C_{10} + 3 \cdot C_{12}$, verifica-se que:

$$C_{12} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot \ln\left(\frac{a_2}{a_1 \cdot s}\right)}{\ln\left[\frac{(L+h) \cdot a_1}{r \cdot a_2}\right] \cdot \ln\left[\frac{a_2^2 \cdot (L+h)}{r \cdot a_1^2 \cdot s^3}\right]}$$

$$C_{10} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon}{\ln\left[\frac{a_2^2 \cdot (L+h)}{r \cdot a_1^2 \cdot s^3}\right]}$$

em que:

$$s = \frac{r^k a_2^{k+1}}{a_1^{k+1} (L+h)^k}$$

sendo:

$$k = \frac{1}{2} \frac{\ln \frac{L+h+d}{R} - \ln \frac{L+h+D-R_{eq}}{D+h-R_{eq}}}{\ln \frac{R_{eq}}{D-h_1} - \ln \frac{R+d-h_1}{R-d+h_2}}$$

Neste caso, considera-se que R_{eq} (raio equivalente) corresponde a dois dos três condutores, em que:

$$\begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{d_{eq}^2 - u_1 v_1 - \sqrt{(u_1^2 - d_{eq}^2)(v_1^2 - d_{eq}^2)}}{2d_{eq}} \\ \frac{d_{eq}^2 + u_1 v_1 - \sqrt{(u_1^2 - d_{eq}^2)(v_1^2 - d_{eq}^2)}}{2d_{eq}} \end{bmatrix}$$

sendo:

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{eq} + r \\ R_{eq} - r \end{bmatrix}$$

cujos valores de d_{eq} e R_{eq} , são dados por:

$$d_{eq} = \sqrt{d_1^2} = d_1 \quad \text{e} \quad R_{eq} = \sqrt{d_1 \cdot r}, \text{ pelo que se obtém:}$$

$$\begin{cases} a_2 = \sqrt{(L+h)^2 + 3d \cdot (L+d+h)} \\ a_1 = \sqrt{h^2 + 3d \cdot (d+h)} \end{cases}$$

$$\begin{bmatrix} c \\ h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{(a^2 - d^2) \cdot (b^2 - d^2)}}{2d} \\ \frac{ab - d^2 - \sqrt{(a^2 - d^2) \cdot (b^2 - d^2)}}{2d} \end{bmatrix}$$

sendo:

$$L = 2 \cdot c ; \quad d = \frac{d_1}{2 \cdot \cos 30^\circ} ; \quad D = 2d$$

$$a = R + r \quad \text{e} \quad b = R - r$$

Das expressões anteriores, os coeficientes correspondem a (ver Figura B.11 e Figura B.12), em unidade do sistema SI:

a_1 - Distância entre o centro do condutor **1** e a carga filiforme do condutor **2** (ou **3**);

a_2 - Distância entre o centro do condutor **1** e a imagem do condutor **2** (ou **3**);

c - Distância entre a carga filiforme do condutor **1** e a sua imagem ($L = 2c$);

L - Distância entre o eixo da carga filiforme de um condutor e a sua imagem;

d - Distância entre o eixo do condutor e o eixo do cabo ($d = D/2$);

d_{eq} - Distância geométrica equivalente;

d_1 - Distância entre condutores do cabo trifásico;

R - Raio do cabo (bainha);

R_{eq} - Raio equivalente relativo aos outros condutores que constituem o cabo;

h - Excentricidade da carga eléctrica filiforme em relação e o respectivo eixo do condutor;

h_1 - Excentricidade do condutor 1 face ao seu eixo, tendo em consideração o raio equivalente dos outros condutores que constituem o cabo;

h_2 - Excentricidade do condutor equivalente de raio R_{eq} face ao seu próprio eixo;

ε - Permeabilidade dieléctrica do meio.

B.2.2. Demonstração

Considerando um cabo de três condutores, em que se utilizam os valores numéricos seguintes, virá:

$$\begin{bmatrix} R \\ r \\ d_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 50 \\ 15 \\ 50 \end{bmatrix} \text{ mm}; \quad \begin{bmatrix} R_a \equiv d \\ a \\ b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{D}{2 \cos 30^\circ} \\ R+r \\ R-r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 28,868 \\ 65 \\ 35 \end{bmatrix} \text{ mm};$$

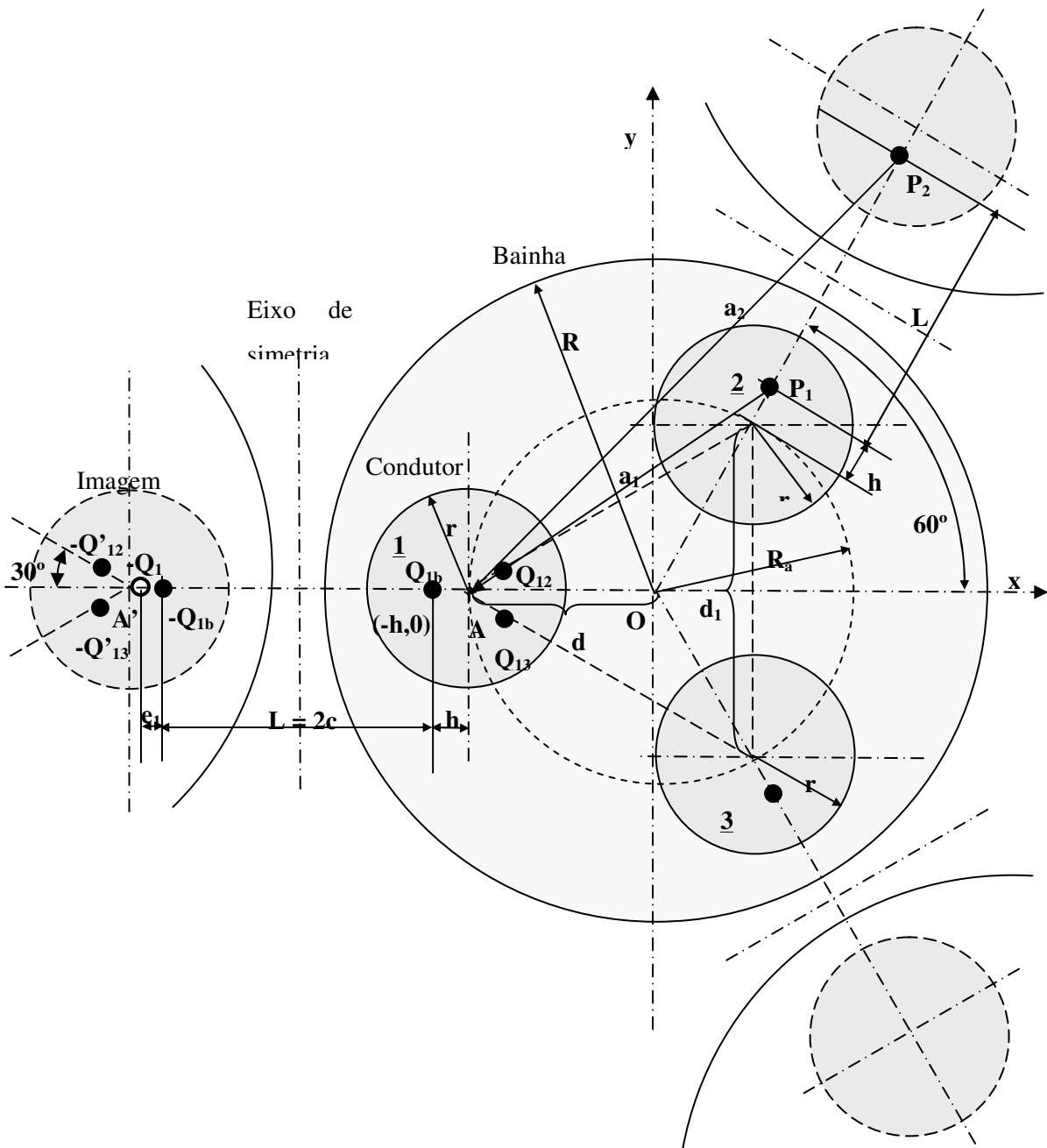


Figura B.12: Cabo de três condutores e uma bainha (método das imagens).

Dada a Figura B.12, Q_{1b} , Q_{12} e Q_{13} (em C/m) representam as cargas equivalentes filiformes, da bainha, do condutor 1 e do condutor 2, respectivamente, e Q'_{1b} , Q'_{12} e Q'_{13} as respectivas imagens, sendo:

e_1 - excentricidade da carga Q'_{1b} face ao respectivo condutor imagem (ver a Figura B.12);

P_1 e P_2 - Pontos coordenados da carga filiforme Q_{2b} e da sua imagem (ver a Figura B.12).

Assim, o cálculo dos coeficientes de capacidade pode ser obtido a partir das seguintes expressões:

$$d = \frac{d_1}{2 \cdot \cos 30^\circ} = 28,8675 \text{ mm}; \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ \epsilon \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \text{ pu} \\ 0 \text{ pu} \\ 8,842 \cdot 10^{-12} \text{ F/m} \end{bmatrix}; D = 2d = 57,735 \text{ mm}.$$

$$\begin{bmatrix} c \\ h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{(a^2 - d^2)(b^2 - d^2)}}{2d} \\ \frac{ab - d^2 - \sqrt{(a^2 - d^2)(b^2 - d^2)}}{2d} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 19,963 \\ 5,0074 \end{bmatrix} \text{ mm}; L = 2c = 39,926 \text{ mm};$$

sendo: $\begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R + r \\ R - r \end{bmatrix}$

$$\begin{bmatrix} c_{12} \\ h_{12} \end{bmatrix} \equiv \begin{bmatrix} c_{13} \\ h_{13} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{d_1^2}{4} - r^2} \\ \frac{d_1}{2} - \sqrt{\frac{d_1^2}{4} - r^2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 20 \\ 5 \end{bmatrix} \text{ mm (condutor 1 em relação ao eixo de simetria y,$$

tendo por influência o condutor 2).

$$\begin{cases} P_2 = [(L + d + h) \cos 60^\circ; (L + d + h) \sin 60^\circ] = (36,897; 63,908) \text{ mm} \\ P_1 = [(L + h) \cos 60^\circ; (L + h) \sin 60^\circ] = (16,940; 29,341) \text{ mm} \\ A = (-d, 0) \text{ mm} \end{cases};$$

$$\begin{cases} a_2 = |P_2 - A| = \sqrt{(L+h)^2 + 3d(L+d+h)} = 91,7035 \text{ mm} \\ a_1 = |P_1 - A| = \sqrt{h^2 + 3d(d+h)} = 54,401 \text{ mm} \end{cases};$$

Assim, os potenciais dos condutores (em volt) virão dados por:

$$\begin{bmatrix} V_{1a} \\ V_{2a} \\ V_{3a} \end{bmatrix} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \begin{bmatrix} \ln \frac{L+h}{r} & \ln \frac{a_2}{a_1} & \ln \frac{a_2}{a_1} \\ \ln \frac{a_2}{a_1} & \ln \frac{L+h}{r} & \ln \frac{a_2}{a_1} \\ \ln \frac{a_2}{a_1} & \ln \frac{a_2}{a_1} & \ln \frac{L+h}{r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \end{bmatrix};$$

Sendo o potencial da bainha dado por:

$$V_{bainha} = V_0 = \frac{1}{2\pi\epsilon} (Q_1 \ln s + Q_2 \ln s + Q_3 \ln s)$$

sendo s um factor que depende das excentricidades das cargas filiformes, tendo em atenção o seu deslocamento devido à influência entre elas.

Efectuando a substituição dos potenciais dos condutores em relação ao potencial da bainha, virá:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{1a} - V_0 \\ V_{2a} - V_0 \\ V_{3a} - V_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \begin{bmatrix} \ln \frac{L+h}{rs} & \ln \frac{a_2}{a_1s} & \ln \frac{a_2}{a_1s} \\ \ln \frac{a_2}{a_1s} & \ln \frac{L+h}{rs} & \ln \frac{a_2}{a_1s} \\ \ln \frac{a_2}{a_1s} & \ln \frac{a_2}{a_1s} & \ln \frac{L+h}{rs} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \end{bmatrix}.$$

Então, os coeficientes de potencial $P_{11}, P_{12}, P_{13}, P_{21}, P_{22}, P_{23}, P_{31}, P_{32}, P_{33}$, virão dados por:

$$\begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} \end{bmatrix} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \begin{bmatrix} \ln \frac{L+h}{rs} & \ln \frac{a_2}{a_1s} & \ln \frac{a_2}{a_1s} \\ \ln \frac{a_2}{a_1s} & \ln \frac{L+h}{rs} & \ln \frac{a_2}{a_1s} \\ \ln \frac{a_2}{a_1s} & \ln \frac{a_2}{a_1s} & \ln \frac{L+h}{rs} \end{bmatrix}$$

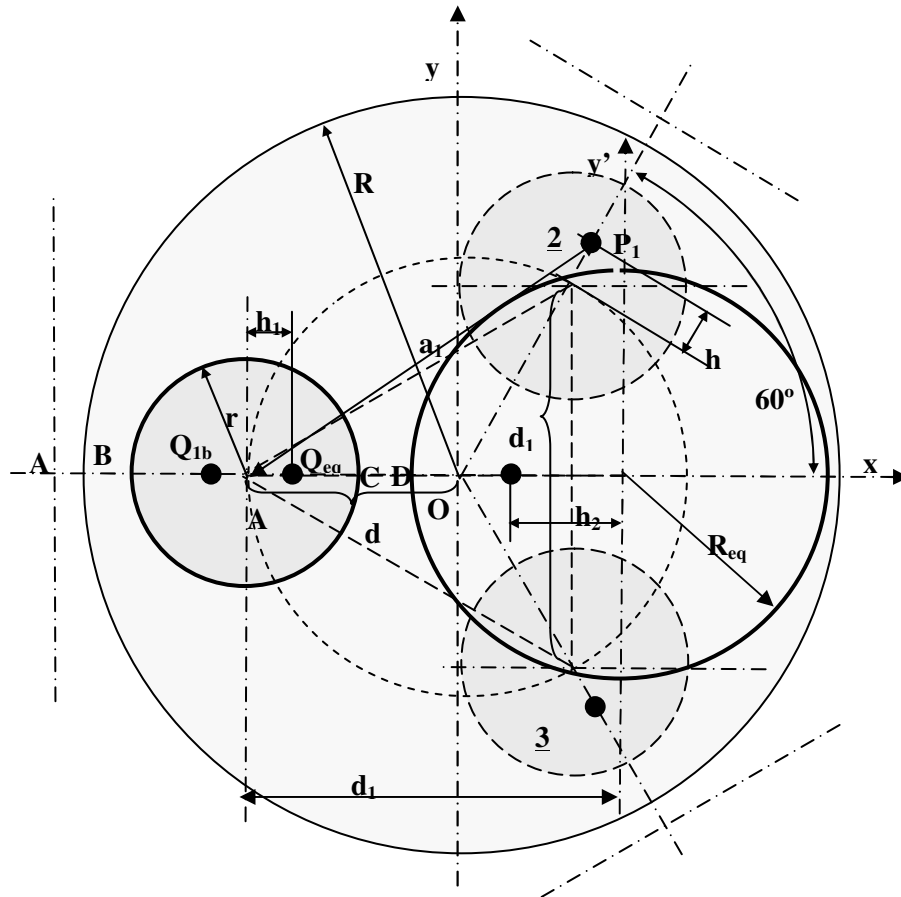


Figura B.13: Cabo de três condutores. Raio equivalente e distância equivalente entre o condutor 1 e os outros dois condutores.

Da Figura B.12 e da Figura B.13, o raio equivalente do conjunto (condutores 1 e 2) é:

$$R_{eq} = \sqrt{d_1 r} = \sqrt{50 \cdot 15} = 27,386 \text{ mm}$$

A distância equivalente entre o condutor 1 e os outros dois (2 e 3) é dada por:

$$d_{eq} = \sqrt{d_1^2} = d_1 = 50 \text{ mm}$$

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{eq} + r \\ R_{eq} - r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 42,386 \\ 12,386 \end{bmatrix} \text{ mm}$$

$$\begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{d_{eq}^2 - u_1 v_1 - \sqrt{(u_1^2 - d_{eq}^2)(v_1^2 - d_{eq}^2)}}{2d_{eq}} \\ \frac{d_{eq}^2 + u_1 v_1 - \sqrt{(u_1^2 - d_{eq}^2)(v_1^2 - d_{eq}^2)}}{2d_{eq}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 6,9023 \\ 17,4023 \end{bmatrix} \text{ mm}$$

em que:

h_1 representa a excentricidade do condutor **1** face aos condutores **2** e **3**;

h_2 representa a excentricidade equivalente dos condutores **2** e **3**, face ao condutor **1**.

$$K_{11} = C_{11} = \frac{2\pi\epsilon \ln \frac{a_2(L+h)}{r a_1 s^2}}{\ln \frac{a_1(L+h)}{r a_2} \ln \frac{a_2^2(L+h)}{r a_1^2 s^3}}; \quad C_{12} = -K_{12} = \frac{2\pi\epsilon \ln \frac{a_2}{a_1 s}}{\ln \frac{a_1(L+h)}{r a_2} \ln \frac{a_2^2(L+h)}{r a_1^2 s^3}};$$

$$C_{10} = K_{11} + K_{12} + K_{13} = \frac{2\pi\epsilon}{\ln \frac{a_2^2(L+h)}{r a_1^2 s^3}} \quad (C_{10} = K_{11} + K_{12} + K_{13} = \frac{2\pi\epsilon}{\ln \frac{a_2^2(L+h)}{r a_1^2 s^3}}).$$

$C_s = C_{10} + 3C_{12}$, em que C_{10} e C_{12} representam as capacidades parciais (em F/m), e K_{11} , K_{12} e K_{13} representam os coeficientes de capacidade (em F/m).

Nota: $K_{11} > 0$, $K_{12} < 0$ e $K_{13} < 0$.

Perante um par de cargas Q_1 e a carga equivalente aos dois condutores 2 e 3, obtém-se a seguinte expressão:

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B = V_C \\ V_D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_b \ln \frac{L+h+d}{R} + k_1 \ln \frac{R+d-h_2}{R-d+h_2} \\ k_b \ln \frac{L+h}{r} + k_1 \ln \frac{D-h_2}{r} \\ k_b \ln \frac{L+h+D-R_{eq}}{D+h-R_{eq}} + k_1 \ln \frac{R_{eq}}{D-h_1} \end{bmatrix}$$

em que k_1/k_b corresponde à relação das cargas entre o condutor de raio r (Q_{1b}) e o condutor de raio equivalente R_{eq} (Q_{eq}) (ver Figura B.13).

Assim, perante os dados apresentados, ter-se-á:

$$V_A = V_B \leftrightarrow k = \frac{k_1}{k_b} = \frac{C_{12}}{C_{10}} = \frac{1}{2} \frac{\ln \frac{L+h+d}{R} - \ln \frac{L+h+D-R_{eq}}{D+h-R_{eq}}}{\ln \frac{R_{eq}}{D-h_1} - \ln \frac{R+d-h_2}{R-d+h_2}} = 0,1474$$

(O factor 1/2 é devido ao facto de serem **2** condutores, para além do condutor n.º 1).

$$\text{Assim, de } C_{12} = -K_{12} = \frac{2\pi\epsilon \ln \frac{a_2}{a_1 s}}{\ln \frac{a_1(L+h)}{r a_2} \ln \frac{a_2^2(L+h)}{r a_1^2 s^3}} \text{ e de } C_{10} = \frac{2\pi\epsilon}{\ln \frac{a_2^2(L+h)}{r a_1^2 s^3}}, \text{ ter-se-á:}$$

$$\frac{2\pi\epsilon \ln \frac{a_2}{a_1 s}}{\ln \frac{a_1(L+h)}{r a_2} \ln \frac{a_2^2(L+h)}{r a_1^2 s^3}} = k \frac{2\pi\epsilon}{\ln \frac{a_2^2(L+h)}{r a_1^2 s^3}} \Leftrightarrow \frac{\ln \frac{a_2}{a_1 s}}{\ln \frac{a_1(L+h)}{r a_2}} = k, \text{ ou seja:}$$

$$\ln \frac{a_2}{a_1 s} = k \ln \frac{a_1(L+h)}{r a_2} \Leftrightarrow \frac{1}{s} = \frac{a_1^{k+1} (L+h)^k}{r^k a_2^{k+1}}.$$

$$s = \frac{r^k a_2^{k+1}}{a_1^{k+1} (L+h)^k} = 1,549$$

Considerando s da expressão anterior, a matriz dos coeficientes de potencial, virá:

$$\begin{pmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} \\ P_{12} & P_{22} & P_{23} \\ P_{13} & P_{23} & P_{33} \end{pmatrix} := \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon} \cdot \begin{pmatrix} \ln \left(\frac{L+h}{s \cdot r} \right) & \ln \left(\frac{a_2}{s \cdot a_1} \right) & \ln \left(\frac{a_2}{s \cdot a_1} \right) \\ \ln \left(\frac{a_2}{s \cdot a_1} \right) & \ln \left(\frac{L+h}{s \cdot r} \right) & \ln \left(\frac{a_2}{s \cdot a_1} \right) \\ \ln \left(\frac{a_2}{s \cdot a_1} \right) & \ln \left(\frac{a_2}{s \cdot a_1} \right) & \ln \left(\frac{L+h}{s \cdot r} \right) \end{pmatrix} =$$

$$= \begin{pmatrix} 1,1871 \cdot 10^{10} & 1,5248 \cdot 10^9 & 1,5248 \cdot 10^9 \\ 1,5248 \cdot 10^9 & 1,1871 \cdot 10^{10} & 1,5248 \cdot 10^9 \\ 1,5248 \cdot 10^9 & 1,5248 \cdot 10^9 & 1,1871 \cdot 10^{10} \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} \\ K_{12} & K_{22} & K_{23} \\ K_{13} & K_{23} & K_{33} \end{pmatrix} := \begin{pmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} \\ P_{12} & P_{22} & P_{23} \\ P_{13} & P_{23} & P_{33} \end{pmatrix}^{-1} = \begin{pmatrix} 8,6778 \cdot 10^{-11} & -9,8778 \cdot 10^{-12} & -9,8778 \cdot 10^{-12} \\ -9,8778 \cdot 10^{-12} & 8,6778 \cdot 10^{-11} & -9,8778 \cdot 10^{-12} \\ -9,8778 \cdot 10^{-12} & -9,8778 \cdot 10^{-12} & 8,6778 \cdot 10^{-11} \end{pmatrix}$$

Pelo que as capacidades C_{11} , C_{12} e C_{10} , virão dadas por:

$$C_{11} := \frac{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot \ln\left(\frac{a_2 \cdot (L+h)}{r \cdot a_1 \cdot s^2}\right)}{\ln\left(\frac{a_1 \cdot (L+h)}{r \cdot a_2}\right) \cdot \ln\left(\frac{a_2^2 \cdot (L+h)}{r \cdot a_1^2 \cdot s^3}\right)} = 8,6778 \times 10^{-11} \text{ F / m};$$

$$C_{12} := \frac{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot \ln\left(\frac{a_2}{a_1 \cdot s}\right)}{\ln\left(\frac{a_1 \cdot (L+h)}{r \cdot a_2}\right) \cdot \ln\left(\frac{a_2^2 \cdot (L+h)}{r \cdot a_1^2 \cdot s^3}\right)} = 9,8778 \times 10^{-12} \text{ F / m};$$

$$C_{10} := \frac{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon}{\ln\left(\frac{a_2^2 \cdot (L+h)}{r \cdot a_1^2 \cdot s^3}\right)} = 6,7023 \times 10^{-11} \text{ F / m}.$$

B.3. CAPACIDADE DE UM CABO DE QUATRO CONDUTORES E UMA BAINHA METÁLICA - MÉTODO DOS POTENCIAIS

B.3.1. Expressões de base

As capacidades são distribuídas conforme as Figura B.14 e a Figura B.15.

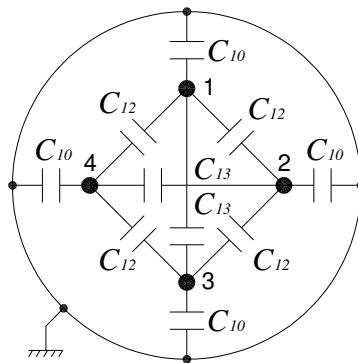


Figura B.14: Cabo de quatro condutores e uma bainha.

Neste caso, a capacidade de serviço virá por:

$$C_s = C_{10} + 2 \cdot (C_{12} + C_{13})$$

em que:

$$\begin{bmatrix} C_{10} \\ C_{12} \\ C_{13} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} + K_{12} + K_{13} + K_{14} \\ K_{12} \\ K_{13} \end{bmatrix}$$

Dada a simetria da Figura B.14, verifica-se que:

$$K_{14} = K_{12} \quad \text{e} \quad K_{13} = K_{24}$$

Assim, a matriz dos coeficientes de capacidade (K_{ij}) relativamente aos coeficientes de potencial (P_{ij}), para $i=1, 2, 3, 4$ e $j=1, 2, 3, 4$, é dado pela seguinte igualdade matricial:

$$\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} & K_{12} \\ K_{12} & K_{22} & K_{12} & K_{13} \\ K_{13} & K_{12} & K_{33} & K_{12} \\ K_{12} & K_{13} & K_{12} & K_{44} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & P_{12} \\ P_{12} & P_{22} & P_{12} & P_{13} \\ P_{13} & P_{12} & P_{33} & P_{12} \\ P_{12} & P_{13} & P_{12} & P_{44} \end{bmatrix}^{-1}$$

Substituindo valores para os coeficientes de potencial, ter-se-á:

$$\begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & P_{12} \\ P_{12} & P_{22} & P_{12} & P_{13} \\ P_{13} & P_{12} & P_{33} & P_{12} \\ P_{12} & P_{13} & P_{12} & P_{44} \end{bmatrix} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \begin{bmatrix} \ln \frac{L+h}{kr} & \ln \frac{a_2}{ka_1} & \ln \frac{a_4}{ka_3} & \ln \frac{a_2}{ka_1} \\ \ln \frac{a_2}{ka_1} & \ln \frac{L+h}{kr} & \ln \frac{a_2}{ka_1} & \ln \frac{a_4}{ka_3} \\ \ln \frac{a_4}{ka_3} & \ln \frac{a_2}{ka_1} & \ln \frac{L+h}{kr} & \ln \frac{a_2}{ka_1} \\ \ln \frac{a_2}{ka_1} & \ln \frac{a_4}{ka_3} & \ln \frac{a_2}{ka_1} & \ln \frac{L+h}{kr} \end{bmatrix}$$

em que, aproximadamente, pode-se considerar: $k = \frac{d+L+H}{R}$,

$$\text{sendo: } H = \frac{2 \cdot h_{12} \cdot \cos 45^\circ + h_{13}}{3}$$

Por outro lado (ver Figura B.15):

$$\begin{cases} a_3 = \sqrt{2}d_1 + h \\ a_4 = \sqrt{2}d_1 + h + L \end{cases}, \text{ ou ainda: } \begin{cases} a_1 = \sqrt{(h \cos 45^\circ)^2 + (d_1 + h \sin 45^\circ)^2} = \sqrt{d_1^2 + h^2 + \sqrt{2}d_1h} \\ a_2 = \sqrt{[(h+L) \cos 45^\circ]^2 + [d_1 + (h+L) \sin 45^\circ]^2} \end{cases}$$

$$\begin{bmatrix} c_{13} \\ h_{13} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{d^2 - r^2} \\ d - \sqrt{d^2 - r^2} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} c_{12} \\ h_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{d_1^2}{4} - r^2} \\ \frac{d_1}{2} - \sqrt{\frac{d_1^2}{4} - r^2} \end{bmatrix} \text{ e } \begin{bmatrix} c \\ h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{(a^2 - d^2)(b^2 - d^2)}}{2d} \\ \frac{ab - d^2 - \sqrt{(a^2 - d^2)(b^2 - d^2)}}{2d} \end{bmatrix}$$

$$L = 2c ; d = \frac{d_1}{\sqrt{2}} \text{ e } \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R+r \\ R-r \end{bmatrix}$$

• **Demonstração**

Para um cabo de quatro condutores, considerando apenas a carga Q_1 com o valor de 1 pu ($Q_2 = Q_3 = Q_4 = 0$) . e utilizando os valores numéricos seguintes, virá:

$$\begin{bmatrix} R \\ r \\ d_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 50 \\ 15 \\ 40 \end{bmatrix} \text{ mm}; \quad \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R+r \\ R-r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 65 \\ 35 \end{bmatrix}; \quad \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ pu}; \quad \begin{bmatrix} Q_3 \\ Q_4 \\ \varepsilon \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \text{ pu} \\ 0 \text{ pu} \\ 8,842 \cdot 10^{-12} \text{ F/m} \end{bmatrix};$$

$$d = \frac{d_1}{\sqrt{2}} = \frac{40}{\sqrt{2}} = 28,284 \text{ mm}; \quad \begin{bmatrix} c \\ h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{(a^2 - d^2)(b^2 - d^2)}}{2d} \\ \frac{ab - d^2 - \sqrt{(a^2 - d^2)(b^2 - d^2)}}{2d} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 21,328 \\ 4,7466 \end{bmatrix} \text{ mm}$$

(condutor **1** em relação ao eixo de simetria passando por **O**, ou condutores **2, 3 e 4**, em relação ao eixo de simetria), pelo que virá:

$$\begin{bmatrix} c_{12} \\ h_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{d_1^2}{4} - r^2} \\ \frac{d_1}{2} - \sqrt{\frac{d_1^2}{4} - r^2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{40^2}{4} - 15^2} \\ \frac{40}{2} - \sqrt{\frac{40^2}{4} - 15^2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 13,2288 \\ 6,7712 \end{bmatrix} \text{ mm e}$$

$$\begin{bmatrix} c_{13} \\ h_{13} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{d^2 - r^2} \\ d - \sqrt{d^2 - r^2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{28,284^2 - 15^2} \\ 28,284 - \sqrt{28,284^2 - 15^2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 23,9792 \\ 4,3051 \end{bmatrix} \text{ mm}$$

e $L = 2c = 42,656 \text{ mm}$.

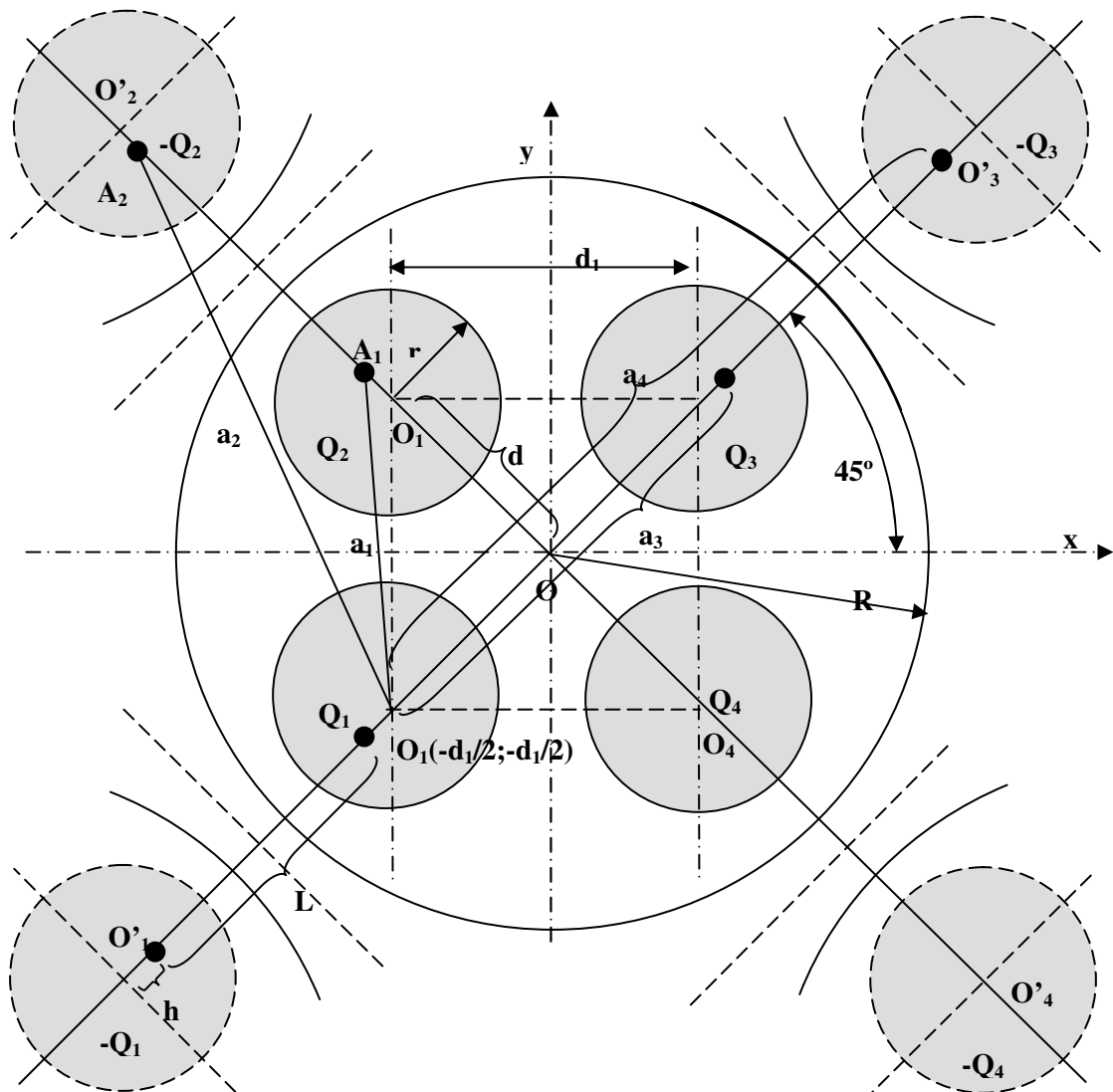


Figura B.15: Cabo de quatro condutores e respectivas imagens.

em que:

$$\begin{cases} \bar{a}_1 = \overline{A_1 O_1} = (h \cos 45^\circ; -d_1 - h \sin 45^\circ) = (3,3563; -43,3563) \text{ mm} \\ \bar{a}_2 = \overline{A_2 O_1} = ((h + L) \cos 45^\circ; -d_1 - (h + L) \sin 45^\circ) = (33,5187; -73,5187) \text{ mm} \end{cases}$$

logo:

$$\begin{cases} a_1 = \sqrt{(h \cos 45^\circ)^2 + (d_1 + h \sin 45^\circ)^2} = \sqrt{d_1^2 + h^2 + \sqrt{2}d_1h} = 43,4861 \text{ mm} \\ a_2 = \sqrt{[(h + L) \cos 45^\circ]^2 + [d_1 + (h + L) \sin 45^\circ]^2} = 80,7991 \text{ mm} \end{cases}$$

sendo:

$$\begin{cases} a_1 = \sqrt{d_1^2 + h^2 + \sqrt{2}d_1h} = 43,4861 \text{ mm} \\ a_2 = \sqrt{d_1^2 + (h + L)^2 + \sqrt{2}d_1(L + h)} = 80,7991 \text{ mm} \end{cases}$$

ou:

$$\begin{cases} a_1 = \sqrt{(h \cos 45^\circ)^2 + (d_1 + h \sin 45^\circ)^2} = \sqrt{d_1^2 + h^2 + \sqrt{2}d_1h} = 43,4861 \text{ mm} \\ a_2 = \sqrt{[(h + L) \cos 45^\circ]^2 + [d_1 + (h + L) \sin 45^\circ]^2} = 80,7991 \text{ mm} \end{cases}$$

Por outro lado:

$$\begin{cases} a_3 = \sqrt{2}d_1 + h = \sqrt{2} \cdot 40 + 4,747 = 61,3151 \text{ mm} \\ a_4 = \sqrt{2}d_1 + h + L = \sqrt{2} \cdot 40 + 4,747 + 42,656 = 103,9711 \text{ mm} \end{cases}$$

Assim, ter-se á a seguinte equação matricial:

$$\begin{bmatrix} V_{1a} \\ V_{2a} \\ V_{3a} \\ V_{4a} \end{bmatrix} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \begin{bmatrix} \ln \frac{L+h}{r} & \ln \frac{a_2}{a_1} & \ln \frac{a_4}{a_3} & \ln \frac{a_2}{a_1} \\ \ln \frac{a_2}{a_1} & \ln \frac{L+h}{r} & \ln \frac{a_2}{a_1} & \ln \frac{a_4}{a_3} \\ \ln \frac{a_4}{a_3} & \ln \frac{a_2}{a_1} & \ln \frac{L+h}{r} & \ln \frac{a_2}{a_1} \\ \ln \frac{a_2}{a_1} & \ln \frac{a_4}{a_3} & \ln \frac{a_2}{a_1} & \ln \frac{L+h}{r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \\ Q_4 \end{bmatrix};$$

$$V_0 = \frac{1}{2\pi\epsilon} (Q_1 \ln \frac{L+d+H}{R} + Q_2 \ln \frac{L+d+H}{R} + Q_3 \ln \frac{L+d+H}{R} + Q_4 \ln \frac{L+d+H}{R}), \text{ pelo que se}$$

$$\text{pode substituir aproximadamente por: } k = \frac{d+L+h}{R} = \frac{28,2843 + 42,656 + 4,7466}{50} = 1,5137$$

Então, a tensão dos condutores 1, 2, 3 e 4, face à bainha, virão dados por:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{1a} - V_0 \\ V_{2a} - V_0 \\ V_{3a} - V_0 \\ V_{4a} - V_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \begin{bmatrix} \ln \frac{L+h}{kr} & \ln \frac{a_2}{ka_1} & \ln \frac{a_4}{ka_3} & \ln \frac{a_2}{ka_1} \\ \ln \frac{a_2}{ka_1} & \ln \frac{L+h}{kr} & \ln \frac{a_2}{ka_1} & \ln \frac{a_4}{ka_3} \\ \ln \frac{a_4}{ka_3} & \ln \frac{a_2}{ka_1} & \ln \frac{L+h}{kr} & \ln \frac{a_2}{ka_1} \\ \ln \frac{a_2}{ka_1} & \ln \frac{a_4}{ka_3} & \ln \frac{a_2}{ka_1} & \ln \frac{L+h}{kr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \\ Q_4 \end{bmatrix}$$

Pelo que os coeficientes de potencial virão teoricamente dados por:

$$\begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & P_{12} \\ P_{12} & P_{22} & P_{12} & P_{13} \\ P_{13} & P_{12} & P_{33} & P_{12} \\ P_{12} & P_{13} & P_{12} & P_{44} \end{bmatrix} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \begin{bmatrix} \ln \frac{L+h}{kr} & \ln \frac{a_2}{ka_1} & \ln \frac{a_4}{ka_3} & \ln \frac{a_2}{ka_1} \\ \ln \frac{a_2}{ka_1} & \ln \frac{L+h}{kr} & \ln \frac{a_2}{ka_1} & \ln \frac{a_4}{ka_3} \\ \ln \frac{a_4}{ka_3} & \ln \frac{a_2}{ka_1} & \ln \frac{L+h}{kr} & \ln \frac{a_2}{ka_1} \\ \ln \frac{a_2}{ka_1} & \ln \frac{a_4}{ka_3} & \ln \frac{a_2}{ka_1} & \ln \frac{L+h}{kr} \end{bmatrix},$$

cujos resultados numéricos serão iguais a:

$$\begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & P_{12} \\ P_{12} & P_{22} & P_{12} & P_{13} \\ P_{13} & P_{12} & P_{33} & P_{12} \\ P_{12} & P_{13} & P_{12} & P_{44} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,3249 \cdot 10^{10} & 3,689 \cdot 10^9 & 2,0431 \cdot 10^9 & 3,689 \cdot 10^9 \\ 3,689 \cdot 10^9 & 1,3249 \cdot 10^{10} & 3,689 \cdot 10^9 & 2,0431 \cdot 10^9 \\ 2,0431 \cdot 10^9 & 3,689 \cdot 10^9 & 1,3249 \cdot 10^{10} & 3,689 \cdot 10^9 \\ 3,689 \cdot 10^9 & 2,0431 \cdot 10^9 & 3,689 \cdot 10^9 & 1,3249 \cdot 10^{10} \end{bmatrix} \text{ m/F}$$

Da matriz dos coeficientes de potencial, obter-se-á a matriz dos coeficientes de capacidade, dados por:

$$\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} & K_{12} \\ K_{12} & K_{22} & K_{12} & K_{13} \\ K_{13} & K_{12} & K_{33} & K_{12} \\ K_{12} & K_{13} & K_{12} & K_{44} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & P_{12} \\ P_{12} & P_{22} & P_{12} & P_{13} \\ P_{13} & P_{12} & P_{33} & P_{12} \\ P_{12} & P_{13} & P_{12} & P_{44} \end{bmatrix}^{-1}, \text{ ou seja, numericamente, ter-se-á:}$$

$$\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} & K_{12} \\ K_{12} & K_{22} & K_{12} & K_{13} \\ K_{13} & K_{12} & K_{33} & K_{12} \\ K_{12} & K_{13} & K_{12} & K_{44} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 8,7239 \cdot 10^{-11} & -2,0562 \cdot 10^{-11} & -2,0023 \cdot 10^{-12} & -2,0562 \cdot 10^{-11} \\ -2,0562 \cdot 10^{-11} & 8,7239 \cdot 10^{-11} & -2,0562 \cdot 10^{-11} & -2,0023 \cdot 10^{-12} \\ -2,0023 \cdot 10^{-12} & -2,0562 \cdot 10^{-11} & 8,7239 \cdot 10^{-11} & -2,0562 \cdot 10^{-11} \\ -2,0562 \cdot 10^{-11} & -2,0023 \cdot 10^{-12} & -2,0562 \cdot 10^{-11} & 8,7239 \cdot 10^{-11} \end{bmatrix} \text{F/m}$$

As capacidades entre o condutor **1** e a bainha, entre o condutor **1** e o condutor **2**, e entre o condutor **1** e o condutor **3**, são numericamente iguais a:

$$\begin{bmatrix} C_{10} \\ C_{12} \\ C_{13} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} + K_{12} + K_{13} + K_{14} \\ K_{12} \\ K_{13} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 44,112 \\ 20,562 \\ 2,0023 \end{bmatrix} \text{pF/m};$$

$$C_s = C_{10} + 4C_{12} + 2C_{13} = 130,37 \text{ pF/m}.$$

A demonstração apresentada utiliza a resolução numérica duma matriz inversa. Uma solução totalmente analítica é apresentada de seguida. Contudo, a complexidade das equações obtidas faz com que a sua utilização seja pouca prática.

$$K_{11} = K_{22} = K_{33} = K_{33} = \frac{2\pi\epsilon \left[\left(\ln \frac{L+h}{rk} \right)^2 - 2 \left(\ln \frac{a_2}{k \cdot a_1} \right)^2 + \ln \left(\frac{a_4}{k \cdot a_3} \right) \ln \frac{L+h}{r \cdot k} \right]}{4 \left(\ln \frac{a_2}{a_1 k} \right)^2 \ln \frac{a_4}{a_3 k} - 4 \left(\ln \frac{a_2}{a_1 k} \right)^2 \ln \frac{L+h}{r \cdot k} - \left(\ln \frac{a_4}{a_3 k} \right)^3 - \left(\ln \frac{a_4}{a_3 k} \right)^2 \ln \frac{L+h}{r \cdot k} + \ln \frac{a_4}{a_3 k} \left(\ln \frac{L+h}{r \cdot k} \right)^2 + \left(\ln \frac{L+h}{r \cdot k} \right)^3}$$

$$K_{11} = K_{22} = K_{33} = K_{33} = \frac{2 \left(\ln \frac{a_2}{k \cdot a_1} \right)^2 - \ln \left(\frac{a_4}{k \cdot a_3} \right) \ln \frac{L+h}{r \cdot k} - \left(\ln \frac{L+h}{r \cdot k} \right)^2}{\ln \frac{r \cdot a_4}{a_3 (L+h)} \left[\left(\ln \frac{a_4 (L+h)}{r \cdot a_3 \cdot k^2} \right)^2 - 4 \left(\ln \frac{a_2}{a_1 \cdot k} \right)^2 \right]} \text{ (positivo);}$$

$$K_{12} = \frac{\pi\epsilon}{2} \frac{\ln \frac{a_1^4 k^4}{a_2^4}}{\ln \frac{a_2^2 a_4 (L+h)}{r \cdot a_1^2 \cdot a_3 \cdot k^4} \ln \frac{a_1^2 a_4 (L+h)}{r \cdot a_2^2 \cdot a_3}} = -C_{12} \text{ (negativo);}$$

$$K_{13} = 2\pi\epsilon \frac{(\ln \frac{a_4}{k \cdot a_3})^2 - 2(\ln \frac{a_2}{k \cdot a_1})^2 + \ln \frac{L+h}{r \cdot k} \ln \frac{a_4}{k \cdot a_3}}{\ln \frac{r \cdot a_4}{a_3 (L+h)} \left[(\ln \frac{a_4 (L+h)}{r \cdot a_3 \cdot k^2})^2 - 4(\ln \frac{a_2}{a_1 \cdot k})^2 \right]} =$$

(negativo);

$$= 2\pi\epsilon \frac{\ln \frac{a_4}{k \cdot a_3} \ln \frac{a_4 (L+h)}{r \cdot k^2 \cdot a_3} - 2(\ln \frac{a_2}{k \cdot a_1})^2}{\ln \frac{r \cdot a_4}{a_3 (L+h)} \left[(\ln \frac{a_4 (L+h)}{r \cdot a_3 \cdot k^2})^2 - 4(\ln \frac{a_2}{a_1 \cdot k})^2 \right]} = -C_{13}$$

$$C_{10} =$$

$$= \pi\epsilon \left[2 \frac{\ln \frac{a_4}{k \cdot a_3} \ln \frac{a_4 (L+h)}{r \cdot k^2 \cdot a_3} - \ln(\frac{a_4}{k \cdot a_3}) \ln \frac{L+h}{r \cdot k} - (\ln \frac{L+h}{r \cdot k})^2}{\ln \frac{r \cdot a_4}{a_3 (L+h)} \left[(\ln \frac{a_4 (L+h)}{r \cdot a_3 \cdot k^2})^2 - 4(\ln \frac{a_2}{a_1 \cdot k})^2 \right]} + \frac{\ln \frac{a_1^4 k^4}{a_2^4}}{\ln \frac{a_2^2 a_4 (L+h)}{r \cdot a_1^2 \cdot a_3 \cdot k^4} \ln \frac{a_1^2 a_4 (L+h)}{r \cdot a_2^2 \cdot a_3}} \right]$$

$$C_{10} = K_{11} + 2K_{12} + K_{13} =$$

$$= \pi\epsilon \left[2 \frac{2(\ln \frac{a_2}{k \cdot a_1})^2 - \ln(\frac{a_4}{k \cdot a_3}) \ln \frac{L+h}{r \cdot k} - (\ln \frac{L+h}{r \cdot k})^2}{\ln \frac{r \cdot a_4}{a_3 (L+h)} \left[(\ln \frac{a_4 (L+h)}{r \cdot a_3 \cdot k^2})^2 - 4(\ln \frac{a_2}{a_1 \cdot k})^2 \right]} + \frac{\ln \frac{a_1^4 k^4}{a_2^4}}{\ln \frac{a_2^2 a_4 (L+h)}{r \cdot a_1^2 \cdot a_3 \cdot k^4} \ln \frac{a_1^2 a_4 (L+h)}{r \cdot a_2^2 \cdot a_3}} + \right.$$

$$\left. + 2 \frac{\ln \frac{a_4}{k \cdot a_3} \ln \frac{a_4 (L+h)}{r \cdot k^2 \cdot a_3} - 2(\ln \frac{a_2}{k \cdot a_1})^2}{\ln \frac{r \cdot a_4}{a_3 (L+h)} \left[(\ln \frac{a_4 (L+h)}{r \cdot a_3 \cdot k^2})^2 - 4(\ln \frac{a_2}{a_1 \cdot k})^2 \right]} \right]$$

$$C_{10} = \pi\epsilon \left[2 \frac{\ln \frac{a_4 (L+h)}{r \cdot k^2 \cdot a_3} (\ln \frac{a_4}{k \cdot a_3} - 1) - (\ln \frac{L+h}{r \cdot k})^2}{\ln \frac{r \cdot a_4}{a_3 (L+h)} \left[(\ln \frac{a_4 (L+h)}{r \cdot a_3 \cdot k^2})^2 - 4(\ln \frac{a_2}{a_1 \cdot k})^2 \right]} + \frac{\ln \frac{a_1^4 k^4}{a_2^4}}{\ln \frac{a_2^2 a_4 (L+h)}{r \cdot a_1^2 \cdot a_3 \cdot k^4} \ln \frac{a_1^2 a_4 (L+h)}{r \cdot a_2^2 \cdot a_3}} \right].$$

B.4. FOLHAS DE CÁLCULO EXCEL UTILIZADAS NAS SIMULAÇÕES

Considerando a grande quantidade de expressões e variáveis utilizadas pelo método dos potenciais na determinação das capacidades, foram desenvolvidos um conjunto de folhas de cálculo Excel que a seguir se apresentam.

3 CONDUTORES

Entrada de dados:	
ϵ	8,85419E-12
R	50
r	15
d1	50

Resultados:	
C12	9,89137E-12
C10	6,71153E-11
Cs	9,67894E-11

Cálculos intermédios:	
d	28,86751
D	57,73503
a	65,00000
b	35,00000
h	5,00741
c	19,96299
L	39,92597
a2	91,70798
a1	54,39420
Req	27,38613
deq	50,00000
u1	42,38613
v1	12,38613
h1	6,90233
h2	17,40233
k	0,14738
s	1,54905

4 CONDUTORES Exemplo com cabo VAV 4x10

Entrada de dados:		FEMM	
ϵ_0	8,85419E-12	W,CA	1,52822E-10
ϵ_r	3,000	W,CB	7,05590E-11
ϵ	2,65626E-11	W,CC	1,10219E-10
R	10		
r	1,7841		
d1	6,75		

Resultados:	
	MET.POT FEMM
C10	6,70835E-11 7,64110E-11
C12	2,99580E-11 3,08990E-11
C13	5,23878E-12 2,90900E-12
Cs	1,37477E-10 1,44027E-10

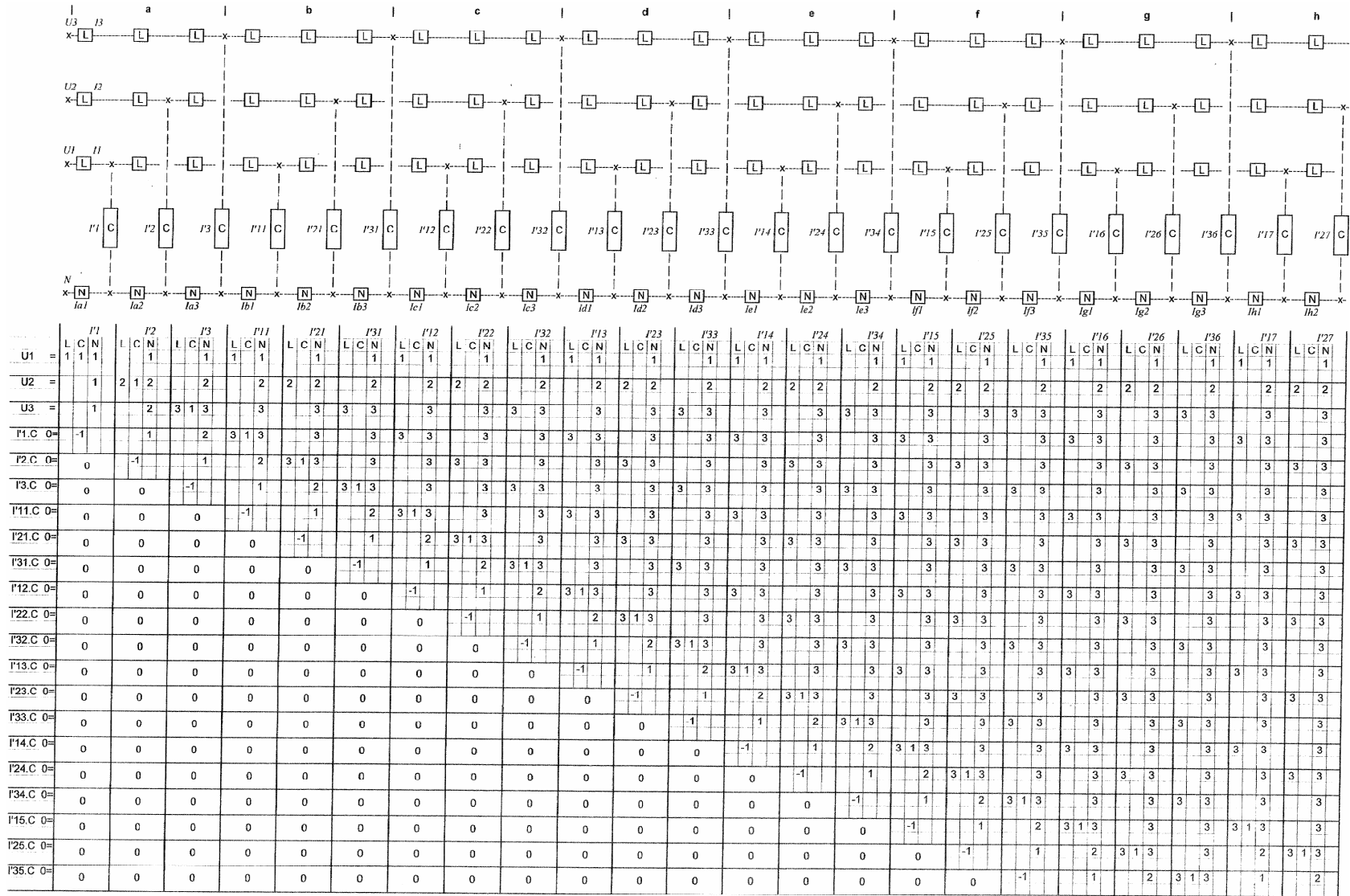
Cálculos intermédios:	
	Matriz:
a	11,78410
b	8,21590
d	4,77297
c	7,54774
h	0,20799
L	15,09547
	Potências:
c12	2,86489
c13	4,42699
h12	0,51011
h13	0,34598
	Inversa:
a1	6,89864
a2	20,63600
a3	9,75393
a4	24,84941
k	2,00764
H	0,35579

Anexo C

EXPRESSÕES ANALÍTICAS ADICIONAIS PARA REDES DE IP

O Anexo C apresenta algumas expressões analíticas em formato `m.file` do *Matlab*.

Anexo C - Expressões Analíticas Adicionais para Rede de IP



Ficheiro: candeiros_21_V01
Folha: Cand 36

Página 4

Anexo C - Expressões Analíticas Adicionais para Redes de IP

	I ¹ L C N	I ² L C N	I ³ L C N	I ¹¹ L C N	I ²¹ L C N	I ³¹ L C N	I ¹² L C N	I ²² L C N	I ³² L C N	I ¹³ L C N	I ²³ L C N	I ³³ L C N	I ¹⁴ L C N	I ²⁴ L C N	I ³⁴ L C N	I ¹⁵ L C N	I ²⁵ L C N	I ³⁵ L C N	I ¹⁶ L C N	I ²⁶ L C N	I ³⁶ L C N	I ¹⁷ L C N	I ²⁷ L C N
I ^{16.C} 0=	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	1	2	3	3
I ^{26.C} 0=	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	1	2	3	3
I ^{36.C} 0=	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	1	2	3
I ^{17.C} 0=	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	1	2
I ^{27.C} 0=	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	1
I ^{37.C} 0=	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I ^{18.C} 0=	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I ^{28.C} 0=	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I ^{38.C} 0=	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I ^{19.C} 0=	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I ^{29.C} 0=	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I ^{39.C} 0=	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Anexo C - Expressões Analíticas Adicionais para Redes de IP

I'37	I'18	I'28	I'38	I'19	I'29	I'39	I'110	I'210	I'310
L C N	L C N	L C N	L C N	L C N	L C N	L C N	L C N	L C N	L C N
3	3 1 3	3	3	3 1 3	3	3	3 1 3	3	3
3	2	3 1 3	3	2	3 1 3	3	2	3 1 3	3
3 1 3	1	2	3 1 3	1	2	3 1 3	1	2	3 1 3
2	3 1 3	3	3	3 1 3	3	3	3 1 3	3	3
1	2	3 1 3	3	2	3 1 3	3	2	3 1 3	3
-1	1	2	3 1 3	1	2	3 1 3	1	2	3 1 3
0	-1	1	2	3 1 3	3	3	3 1 3	3	3
0	0	-1	1	2	3 1 3	3	2	3 1 3	3
0	0	0	-1	1	2	3 1 3	1	2	3 1 3
0	0	0	0	-1	1	2	3 1 3	3	3
0	0	0	0	0	-1	1	2	3 1 3	3
0	0	0	0	0	0	-1	1	2	3 1 3

Anexo C - Expressões Analíticas Adicionais para Redes de IP

```
% =====  
% REDE COM N CANDEEIROS - CARGAS CONCENTRADAS  
% =====  
  
% Resultados puramente numéricos: não precisa de syms  
% syms a1 a2 a3 a4 a5 a6 a7 a8 a9 ve v m mi  
% syms c l n  
% não utilizar i nem j como variáveis (complexo)  
% syntax: a + bi ou a+i*b  
% syntax: a + bj ou a+j*b  
%  
format short eng  
clear % apagar todas as variaveis  
  
%ve= 230  
%c = 148.7+j*156.4;  
%l = .05645;  
%n = .05627;  
  
%ve= 230;  
%ncand= 3;  
%c = 149+j*156;  
%l = .056;;  
  
ve= input('Amplitude da tensão de entrada Ve = ')  
ncand= input('Numero total de candeeiros por fase ncand = ')  
c = input('Impedancia de cada carga individual Zc = ')  
l = input('Impedancia do condutor da linha por troço Zl = ')  
  
ve % Amplitude das tensões  
ncand % Número de candeeiros por fase;
```

Anexo C - Expressões Analíticas Adicionais para Redes de IP

```
c % Impedancia da carga Zc
ct = c/ncand % Impedância da carga total por fase
l % Impedancia do condutor da linha por troço Zl
lt = l*3*ncand % Impedancia total do condutor da linha Zl

vo = [1;1*exp(j*2*pi/3);1*exp(-j*2*pi/3)]*ve; % Tensões de entrada

u1 = vo(1,1);
u2 = vo(2,1);
u3 = vo(3,1);

v = [u1;u2;u3];

a1=[ct+lt,0,0];
a2=[0,ct+lt,0];
a3=[0,0,ct+lt];
m = cat(1,a1,a2,a3);

% Resultados:
mi=m^(0-1)*v;

% Correntes de neutro == 0:

% Correntes de entrada:
i1 = mi(1,1);
i2 = mi(2,1);
i3 = mi(3,1);
in = i1+i2+i3;
i = [i1;i2;i3;in]

% QUEDAS DE TENSÃO

dU1=abs(u1-ct*i1);
```

Anexo C - Expressões Analíticas Adicionais para Redes de IP

```
dU2=abs(u2-ct*i2);  
dU3=abs(u3-ct*i3);  
dU =cat(1,dU1,dU2,dU3)
```

```
dUc1=abs(u1)-abs(ct*i1);  
dUc2=abs(u2)-abs(ct*i2);  
dUc3=abs(u3)-abs(ct*i3);  
dUc =cat(1,dUc1,dUc2,dUc3)
```

```
% VERIFICAÇÃO DAS TENSÕES
```

```
u1-(i1*(lt+ct));  
u2-(i2*(lt+ct));  
u3-(i3*(lt+ct));
```

Anexo C - Expressões Analíticas Adicionais para Redes de IP

```
% =====  
% REDE COM 9 CANDEEIROS - CARGAS DISTRIBUIDAS  
% =====  
  
% Resultados puramente numéricos: não precisa de syms  
% syms a1 a2 a3 a4 a5 a6 a7 a8 a9 ve v m mi  
% syms c l n  
% não utilizar i nem j como variáveis (complexo)  
% syntax: a + bi ou a+i*b  
% syntax: a + bj ou a+j*b  
%  
format short eng  
clear % apagar todas as variaveis  
  
ve= 230  
c = 148.7+j*156.4;  
l = .05645;  
n = .05627;  
  
ve= 230  
c = 149+j*156;  
l = .056;  
n = .056;  
  
%ve= input('Amplitude da tensão de entrada Ve = ')  
%c = input('Impedancia da carga Zc = ')  
%l = input('Impedancia do condutor da linha Zl = ')  
%n = input('Impedancia do condutor do neutro Zn = ')  
  
ve %Amplitude das tensões  
c % Impedancia da carga Zc  
l % Impedancia do condutor da linha Zl  
n % Impedancia do condutor do neutro Zn
```

Anexo C - Expressões Analíticas Adicionais para Redes de IP

```
vo = [1;1*exp(j*2*pi/3);1*exp(-j*2*pi/3)]*ve; % Tensões de entrada

u1 = vo(1,1)
u2 = vo(2,1)
u3 = vo(3,1)

v = [u1;u2;u3;0;0;0;0;0;0];

a1=[c+l+n,n,n,l+n,n,n,l+n,n,n];
a2=[n,c+2*l+2*n,2*n,2*n,2*l+2*n,2*n,2*n,2*l+2*n,2*n];
a3=[n,2*n,c+3*l+3*n,3*n,3*n,3*l+3*n,3*n,3*n,3*l+3*n];
a4=[0,0,0-c,n,2*n,c+3*l+3*n,3*n,3*n,3*l+3*n];
a5=[0,0-c,n,2*n,c+3*l+3*n,3*n,3*n,3*l+3*n,3*n];
a6=[0-c,n,2*n,c+3*l+3*n,3*n,3*n,3*l+3*n,3*n,3*n];
a7=[0,0,0,0,0,0-c,n,2*n,c+3*l+3*n];
a8=[0,0,0,0,0-c,n,2*n,c+3*l+3*n,3*n];
a9=[0,0,0,0-c,n,2*n,c+3*l+3*n,3*n,3*n];
m = cat(1,a1,a2,a3,a4,a5,a6,a7,a8,a9);

% Resultados:
mi=m^(0-1)*v;

% Correntes de neutro:
ic3= mi(9,1);
ic2= mi(8,1)+ic3;
ic1= mi(7,1)+ic2;
ib3= mi(6,1)+ic1;
ib2= mi(5,1)+ib3;
ib1= mi(4,1)+ib2;
ia3= mi(3,1)+ib1;
ia2= mi(2,1)+ia3;
ia1= mi(1,1)+ia2;
ineutro=cat(1,(ia1),(ia2),(ia3),(ib1),(ib2),(ib3),(ic1),(ic2),(ic3));
```

Anexo C - Expressões Analíticas Adicionais para Redes de IP

```
abs(ineutro) %modulo das correntes de neutro
angle(ineutro) % fase (radian) das correntes de neutro

% Correntes de entrada:
i1 = mi(1,1)+mi(4,1)+mi(7,1);
i2 = mi(2,1)+mi(5,1)+mi(8,1);
i3 = mi(3,1)+mi(6,1)+mi(9,1);
in = i1+i2+i3;
i = [i1;i2;i3;in]

% Correntes residuais por troço:
ires01= ia1+i1+i2+i3;
ires02= ia2+(i1-mi(1,1))+i2+i3;
ires03= ia3+(i1-mi(1,1))+(i2-mi(2,1))+i3;
ires04= ib1+(i1-mi(1,1))+(i2-mi(2,1))+(i3-mi(3,1));
ires05= ib2+(i1-mi(1,1)-mi(4,1))+(i2-mi(2,1))+(i3-mi(3,1));
ires06= ib3+(i1-mi(1,1)-mi(4,1))+(i2-mi(2,1)-mi(5,1))+(i3-mi(3,1));
ires07= ic1+(i1-mi(1,1)-mi(4,1))+(i2-mi(2,1)-mi(5,1))+(i3-mi(3,1)-mi(6,1));
ires08= ic2+(i2-mi(2,1)-mi(5,1))+(i3-mi(3,1)-mi(6,1));
ires09= ic3+(i3-mi(3,1)-mi(6,1));

ires= cat(1,ires01,ires02,ires03,ires04,ires05,ires06,ires07,ires08,ires09);

abs(ires) % amplitude das correntes residuais
angle(ires) % fase das correntes residuais

% Tensões:
up1 = mi(1,1)*c;
%up1=[sqrt((imag(up1))^2+(real(up1))^2),cos(atan(imag(up1)/real(up1)))];
up2 = mi(2,1)*c;
%up2=[sqrt((imag(up2))^2+(real(up2))^2),cos(atan(imag(up2)/real(up2)))];
up3 = mi(3,1)*c;
```

Anexo C - Expressões Analíticas Adicionais para Redes de IP

```
%up3=[sqrt((imag(up3))^2+(real(up3))^2),cos(atan(imag(up3)/real(up3)))];
up11= mi(4,1)*c;
%up11=[sqrt((imag(up11))^2+(real(up11))^2),cos(atan(imag(up11)/real(up11)))];
up21= mi(5,1)*c;
%up21=[sqrt((imag(up21))^2+(real(up21))^2),cos(atan(imag(up21)/real(up21)))];
up31= mi(6,1)*c;
%up31=[sqrt((imag(up31))^2+(real(up31))^2),cos(atan(imag(up31)/real(up31)))];
up12= mi(7,1)*c;
%up12=[sqrt((imag(up12))^2+(real(up12))^2),cos(atan(imag(up12)/real(up12)))];
up22= mi(8,1)*c;
%up22=[sqrt((imag(up22))^2+(real(up22))^2),cos(atan(imag(up22)/real(up22)))];
up32= mi(9,1)*c;
%up32=[sqrt((imag(up32))^2+(real(up32))^2),cos(atan(imag(up32)/real(up32)))];
up = cat(1,up1,up2,up3,up11,up21,up31,up12,up22,up32);
```

```
% QUEDAS DE TENSÃO
```

```
dU1=abs(u1-up12);
dU2=abs(u2-up22);
dU3=abs(u3-up32);
dU = cat(1,dU1,dU2,dU3)
```

```
dUc1=abs(u1)-abs(up12);
dUc2=abs(u2)-abs(up22);
dUc3=abs(u3)-abs(up32);
dUc = cat(1,dUc1,dUc2,dUc3)
```

```
% VERIFICAÇÕES DAS TENSÕES DE ENTRADA:
vo; % Tensões de entrada originais
```

```
% Ciclo 1:
ut1 = i1*1+mi(1,1)*c+ia1*n;
ut2 = i2*2*1+mi(2,1)*c+n*(ia2+ia1);
```

Anexo C - Expressões Analíticas Adicionais para Redes de IP

```
ut3 = i3*3*1+mi(3,1)*c+n*(ia3+ia2+ia1);
```

```
% Ciclo 2:
```

```
utt1 = i1*1+(i1-mi(1,1))*3*1+mi(4,1)*c+n*(ib1+ia3+ia2+ia1);
```

```
utt2 = i2*2*1+(i2-mi(2,1))*3*1+mi(5,1)*c+n*(ib2+ib1+ia3+ia2+ia1);
```

```
utt3 = i3*3*1+(i3-mi(3,1))*3*1+mi(6,1)*c+n*(ib3+ib2+ib1+ia3+ia2+ia1);
```

```
% Ciclo 3:
```

```
uttt1 = i1*1+(i1-mi(1,1))*3*1+(i1-mi(1,1)-mi(4,1))*3*1+mi(7,1)*c+n*(ic1+ib3+ib2+ib1+ia3+ia2+ia1);
```

```
uttt2 = i2*2*1+(i2-mi(2,1))*3*1+(i2-mi(2,1)-mi(5,1))*3*1+mi(8,1)*c+n*(ic2+ic1+ib3+ib2+ib1+ia3+ia2+ia1);
```

```
uttt3 = i3*3*1+(i3-mi(3,1))*3*1+(i3-mi(3,1)-
```

```
mi(6,1))*3*1+mi(9,1)*c+n*(ic3+ic2+ic1+ib3+ib2+ib1+ia3+ia2+ia1);
```

Anexo C - Expressões Analíticas Adicionais para Redes de IP

```
% =====  
% REDE COM 18 CANDEEIROS - CARGAS DISTRIBUIDAS  
% =====  
  
% Resultados puramente numéricos: não precisa de syms  
% syms a1 a2 a3 a4 a5 a6 a7 a8 a9 ve v m mi  
% syms c l n  
% não utilizar i nem j como variáveis (complexo)  
% syntax: a + bi ou a+i*b  
% syntax: a + bj ou a+j*b  
%  
format short eng  
clear % apagar todas as variaveis  
  
ve= 230  
c = 148.7+j*156.4;  
l = .05645;  
n = .05627;  
  
ve= 230  
c = 149+j*156;  
l = .056;  
n = .056;  
  
%ve= input('Amplitude da tensão de entrada Ve = ')  
%c = input('Impedancia da carga Zc = ')  
%l = input('Impedancia do condutor da linha Zl = ')  
%n = input('Impedancia do condutor do neutro Zn = ')  
  
c % Impedancia da carga Zc  
l % Impedancia do condutor da linha Zl  
n % Impedancia do condutor do neutro Zn
```

Anexo C - Expressões Analíticas Adicionais para Redes de IP

```
vo = [1;1*exp(j*2*pi/3);1*exp(-j*2*pi/3)]*ve; % Tensões de entrada

u1 = vo(1,1)
u2 = vo(2,1)
u3 = vo(3,1)

v = [u1;u2;u3;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0];

a01l=[1,0,0,1,0,0,1,0,0,1,0,0,1,0,0,1,0,0]*1;
a01c=[1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0]*c;
a01n=[1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1]*n;
a01=a01l+a01c+a01n;
a02l=[0,2,0,0,2,0,0,2,0,0,2,0,0,2,0,0,2,0]*1;
a02c=[0,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0]*c;
a02n=[1,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2]*n;
a02=a02l+a02c+a02n;
a03l=[0,0,3,0,0,3,0,0,3,0,0,3,0,0,3,0,0,3]*1;
a03c=[0,0,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0]*c;
a03n=[1,2,3,3,3,3,3,3,3,3,3,3,3,3,3,3,3,3]*n;
a03=a03l+a03c+a03n;
a04l=[0,0,0,3,0,0,3,0,0,3,0,0,3,0,0,3,0,0]*1;
a04c=[-1,0,0,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0]*c;
a04n=[0,1,2,3,3,3,3,3,3,3,3,3,3,3,3,3,3,3]*n;
a04=a04l+a04c+a04n;
a05l=[0,0,0,0,3,0,0,3,0,0,3,0,0,3,0,0,3,0]*1;
a05c=[0,-1,0,0,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0]*c;
a05n=[0,0,1,2,3,3,3,3,3,3,3,3,3,3,3,3,3,3]*n;
a05=a05l+a05c+a05n;
a06l=[0,0,0,0,0,3,0,0,3,0,0,3,0,0,3,0,0,3]*1;
a06c=[0,0,-1,0,0,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0]*c;
a06n=[0,0,0,1,2,3,3,3,3,3,3,3,3,3,3,3,3,3]*n;
a06=a06l+a06c+a06n;
a07l=[0,0,0,0,0,0,3,0,0,3,0,0,3,0,0,3,0,0]*1;
```

Anexo C - Expressões Analíticas Adicionais para Redes de IP

```
a07c=[0,0,0,-1,0,0,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0]*c;;
a07n=[0,0,0,0,1,2,3,3,3,3,3,3,3,3,3,3]*n;
a07=a07l+a07c+a07n;
a08l=[0,0,0,0,0,0,0,3,0,0,3,0,0,3,0,0]*1;
a08c=[0,0,0,0,-1,0,0,1,0,0,0,0,0,0,0,0]*c;;
a08n=[0,0,0,0,0,1,2,3,3,3,3,3,3,3,3,3]*n;
a08=a08l+a08c+a08n;
a09l=[0,0,0,0,0,0,0,0,3,0,0,3,0,0,3,0]*1;
a09c=[0,0,0,0,0,-1,0,0,1,0,0,0,0,0,0,0]*c;;
a09n=[0,0,0,0,0,0,1,2,3,3,3,3,3,3,3,3]*n;
a09=a09l+a09c+a09n;
a10l=[0,0,0,0,0,0,0,0,0,3,0,0,3,0,0,3]*1;
a10c=[0,0,0,0,0,0,-1,0,0,1,0,0,0,0,0,0]*c;;
a10n=[0,0,0,0,0,0,0,1,2,3,3,3,3,3,3,3]*n;
a10=a10l+a10c+a10n;
a11l=[0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,3,0,0,3,0,0]*1;
a11c=[0,0,0,0,0,0,0,-1,0,0,1,0,0,0,0,0]*c;;
a11n=[0,0,0,0,0,0,0,0,1,2,3,3,3,3,3,3]*n;
a11=a11l+a11c+a11n;
a12l=[0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,3,0,0,3,0]*1;
a12c=[0,0,0,0,0,0,0,0,-1,0,0,1,0,0,0,0]*c;;
a12n=[0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,2,3,3,3,3,3]*n;
a12=a12l+a12c+a12n;
a13l=[0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,3,0,0,3]*1;
a13c=[0,0,0,0,0,0,0,0,0,-1,0,0,1,0,0,0]*c;;
a13n=[0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,2,3,3,3,3]*n;
a13=a13l+a13c+a13n;
a14l=[0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,3,0,0]*1;
a14c=[0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,-1,0,0,1,0,0]*c;;
a14n=[0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,2,3,3,3]*n;
a14=a14l+a14c+a14n;
a15l=[0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,3,0]*1;
a15c=[0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,-1,0,0,1,0]*c;;
a15n=[0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,2,3,3]*n;
```


Anexo C - Expressões Analíticas Adicionais para Redes de IP

```
ib3= mi(6,1)+ic1;
ib2= mi(5,1)+ib3;
ib1= mi(4,1)+ib2;
ia3= mi(3,1)+ib1;
ia2= mi(2,1)+ia3;
ia1= mi(1,1)+ia2;

% Correntes de entrada:
i1 = mi(1,1)+mi(4,1)+mi(7,1)+mi(10,1)+mi(13,1)+mi(16,1);
i2 = mi(2,1)+mi(5,1)+mi(8,1)+mi(11,1)+mi(14,1)+mi(17,1);
i3 = mi(3,1)+mi(6,1)+mi(9,1)+mi(12,1)+mi(15,1)+mi(18,1);
in = i1+i2+i3;
i = [i1;i2;i3;in]

% QUEDAS DE TENSÃO

dU1=abs(u1-mi(16,1)*c);
dU2=abs(u2-mi(17,1)*c);
dU3=abs(u3-mi(18,1)*c);
dU = cat(1,dU1,dU2,dU3)

dUc1=abs(u1)-abs(mi(16,1)*c);
dUc2=abs(u2)-abs(mi(17,1)*c);
dUc3=abs(u3)-abs(mi(18,1)*c);
dUc = cat(1,dUc1,dUc2,dUc3)

% VERIFICAÇÕES DAS TENSÕES DE ENTRADA:
vo; % Tensões de netrada originais

% Ciclo 1:
ut1 = i1*1+mi(1,1)*c+ia1*n;
```

Anexo C - Expressões Analíticas Adicionais para Redes de IP

```
ut2 = i2*2*1+mi(2,1)*c+n*(ia2+ia1);  
ut3 = i3*3*1+mi(3,1)*c+n*(ia3+ia2+ia1);
```

```
% Ciclo 2:
```

```
utt1 = i1*1+(i1-mi(1,1))*3*1+mi(4,1)*c+n*(ib1+ia3+ia2+ia1);  
utt2 = i2*2*1+(i2-mi(2,1))*3*1+mi(5,1)*c+n*(ib2+ib1+ia3+ia2+ia1);  
utt3 = i3*3*1+(i3-mi(3,1))*3*1+mi(6,1)*c+n*(ib3+ib2+ib1+ia3+ia2+ia1);
```

```
% Ciclo 3:
```

```
%uttt1 = i1*1+(i1-mi(1,1))*3*1+(i1-mi(1,1)-mi(4,1))*3*1+mi(7,1)*c+n*(ic1+ib3+ib2+ib1+ia3+ia2+ia1);  
%uttt2 = i2*2*1+(i2-mi(2,1))*3*1+(i2-mi(2,1)-mi(5,1))*3*1+mi(8,1)*c+n*(ic2+ic1+ib3+ib2+ib1+ia3+ia2+ia1);  
%uttt3 = i3*3*1+(i3-mi(3,1))*3*1+(i3-mi(3,1)-  
mi(6,1))*3*1+mi(9,1)*c+n*(ic3+ic2+ic1+ib3+ib2+ib1+ia3+ia2+ia1);
```

Anexo C - Expressões Analíticas Adicionais para Redes de IP

```
% =====  
% REDE COM 27 CANDEEIROS - CARGAS DISTRIBUIDAS  
% =====  
  
% Resultados puramente numéricos: não precisa de syms  
% syms a1 a2 a3 a4 a5 a6 a7 a8 a9 ve v m mi  
% syms c l n  
% não utilizar i nem j como variáveis (complexo)  
% syntax: a + bi ou a+i*b  
% syntax: a + bj ou a+j*b  
%  
format short eng  
clear % apagar todas as variaveis  
  
ve= 230  
c = 148.7+j*156.4;  
l = .05645;  
n = .05627;  
  
ve= 230  
c = 149+j*156;  
l = .056;  
n = .056;  
  
%ve= input('Amplitude da tensão de entrada Ve = ')  
%c = input('Impedancia da carga Zc = ')  
%l = input('Impedancia do condutor da linha Zl = ')  
%n = input('Impedancia do condutor do neutro Zn = ')  
  
c % Impedancia da carga Zc  
l % Impedancia do condutor da linha Zl  
n % Impedancia do condutor do neutro Zn
```


Anexo C - Expressões Analíticas Adicionais para Redes de IP

```
a24c=[0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,-1,0,0,1,0,0,0]*c;;
a24n=[0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,2,3,3,3,3]*n;
a24=a24l+a24c+a24n;
a25l=[0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,3,0,0]*l;
a25c=[0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,-1,0,0,1,0,0]*c;;
a25n=[0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,2,3,3,3]*n;
a25=a25l+a25c+a25n;
a26l=[0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,3,0]*l;
a26c=[0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,-1,0,0,1,0]*c;;
a26n=[0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,2,3,3]*n;
a26=a26l+a26c+a26n;
a27l=[0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,3]*l;
a27c=[0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,-1,0,0,1]*c;;
a27n=[0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,2,3]*n;
a27=a27l+a27c+a27n;

m27 =
cat(1,a01,a02,a03,a04,a05,a06,a07,a08,a09,a10,a11,a12,a13,a14,a15,a16,a17,a18,a19,a20,a21,a22,a23,a24,a25
,a26,a27);
m = m27;

% Resultados:
mi=m^(0-1)*v

% Correntes de neutro:
ii3= mi(27,1);
ii2= mi(26,1)+ii3;
ii1= mi(25,1)+ii2;
ih3= mi(24,1)+ii1;
ih2= mi(23,1)+ih3;
ih1= mi(22,1)+ih2;
ig3= mi(21,1)+ih1;
ig2= mi(20,1)+ig3;
ig1= mi(19,1)+ig2;
```

Anexo C - Expressões Analíticas Adicionais para Redes de IP

```
if3= mi(18,1)+ig1;  
if2= mi(17,1)+if3;  
if1= mi(16,1)+if2;  
ie3= mi(15,1)+if1;  
ie2= mi(14,1)+ie3;  
ie1= mi(13,1)+ie2;  
id3= mi(12,1)+ie1;  
id2= mi(11,1)+id3;  
id1= mi(10,1)+id2;  
ic3= mi(9,1)+id1;  
ic2= mi(8,1)+ic3;  
ic1= mi(7,1)+ic2;  
ib3= mi(6,1)+ic1;  
ib2= mi(5,1)+ib3;  
ib1= mi(4,1)+ib2;  
ia3= mi(3,1)+ib1;  
ia2= mi(2,1)+ia3;  
ia1= mi(1,1)+ia2;
```

```
% Correntes de entrada:
```

```
i1 = mi(1,1)+mi(4,1)+mi(7,1)+mi(10,1)+mi(13,1)+mi(16,1)+mi(19,1)+mi(22,1)+mi(25,1);  
i2 = mi(2,1)+mi(5,1)+mi(8,1)+mi(11,1)+mi(14,1)+mi(17,1)+mi(20,1)+mi(23,1)+mi(26,1);  
i3 = mi(3,1)+mi(6,1)+mi(9,1)+mi(12,1)+mi(15,1)+mi(18,1)+mi(21,1)+mi(24,1)+mi(27,1);  
in = i1+i2+i3;  
i = [i1;i2;i3;in]
```

```
% QUEDAS DE TENSÃO
```

```
dU1=abs(u1-mi(25,1)*c);  
dU2=abs(u2-mi(26,1)*c);  
dU3=abs(u3-mi(27,1)*c);  
dU = cat(1,dU1,dU2,dU3)
```

Anexo C - Expressões Analíticas Adicionais para Redes de IP

```
dUc1=abs(u1)-abs(mi(25,1)*c);
dUc2=abs(u2)-abs(mi(26,1)*c);
dUc3=abs(u3)-abs(mi(27,1)*c);
dUc = cat(1,dUc1,dUc2,dUc3)

% VERIFICAÇÕES DAS TENSÕES DE ENTRADA:
vo; % Tensões de entrada originais

% Ciclo 1:
ut1 = i1*1+mi(1,1)*c+ia1*n;
ut2 = i2*2*1+mi(2,1)*c+n*(ia2+ia1);
ut3 = i3*3*1+mi(3,1)*c+n*(ia3+ia2+ia1);

% Ciclo 2:
utt1 = i1*1+(i1-mi(1,1))*3*1+mi(4,1)*c+n*(ib1+ia3+ia2+ia1);
utt2 = i2*2*1+(i2-mi(2,1))*3*1+mi(5,1)*c+n*(ib2+ib1+ia3+ia2+ia1);
utt3 = i3*3*1+(i3-mi(3,1))*3*1+mi(6,1)*c+n*(ib3+ib2+ib1+ia3+ia2+ia1);

% Ciclo 3:
%uttt1 = i1*1+(i1-mi(1,1))*3*1+(i1-mi(1,1)-mi(4,1))*3*1+mi(7,1)*c+n*(ic1+ib3+ib2+ib1+ia3+ia2+ia1);
%uttt2 = i2*2*1+(i2-mi(2,1))*3*1+(i2-mi(2,1)-mi(5,1))*3*1+mi(8,1)*c+n*(ic2+ic1+ib3+ib2+ib1+ia3+ia2+ia1);
%uttt3 = i3*3*1+(i3-mi(3,1))*3*1+(i3-mi(3,1)-
mi(6,1))*3*1+mi(9,1)*c+n*(ic3+ic2+ic1+ib3+ib2+ib1+ia3+ia2+ia1);
```

Anexo C - Expressões Analíticas Adicionais para Redes de IP

```
% =====  
% REDE COM 36 CANDEEIROS - CARGAS DISTRIBUIDAS  
% =====  
  
% Resultados puramente numéricos: não precisa de syms  
% syms a1 a2 a3 a4 a5 a6 a7 a8 a9 ve v m mi  
% syms c l n  
% não utilizar i nem j como variáveis (complexo)  
% syntax: a + bi ou a+i*b  
% syntax: a + bj ou a+j*b  
%  
format short eng  
clear % apagar todas as variaveis  
  
ve= 230  
c = 148.7+j*156.4;  
l = .05645;  
n = .05627;  
  
ve= 230  
c = 149+j*156;  
l = .056;  
n = .056;  
  
%ve= input('Amplitude da tensão de entrada Ve = ')  
%c = input('Impedancia da carga Zc = ')  
%l = input('Impedancia do condutor da linha Zl = ')  
%n = input('Impedancia do condutor do neutro Zn = ')  
  
c % Impedancia da carga Zc  
l % Impedancia do condutor da linha Zl  
n % Impedancia do condutor do neutro Zn
```


Anexo C - Expressões Analíticas Adicionais para Redes de IP

```
ij1= mi(28,1)+ij2;
ii3= mi(27,1)+ij1;
ii2= mi(26,1)+ii3;
ii1= mi(25,1)+ii2;
ih3= mi(24,1)+ii1;
ih2= mi(23,1)+ih3;
ih1= mi(22,1)+ih2;
ig3= mi(21,1)+ih1;
ig2= mi(20,1)+ig3;
ig1= mi(19,1)+ig2;
if3= mi(18,1)+ig1;
if2= mi(17,1)+if3;
if1= mi(16,1)+if2;
ie3= mi(15,1)+if1;
ie2= mi(14,1)+ie3;
ie1= mi(13,1)+ie2;
id3= mi(12,1)+ie1;
id2= mi(11,1)+id3;
id1= mi(10,1)+id2;
ic3= mi(9,1)+id1;
ic2= mi(8,1)+ic3;
ic1= mi(7,1)+ic2;
ib3= mi(6,1)+ic1;
ib2= mi(5,1)+ib3;
ib1= mi(4,1)+ib2;
ia3= mi(3,1)+ib1;
ia2= mi(2,1)+ia3;
ia1= mi(1,1)+ia2;
ineutro=cat(1, ia1, ia2, ia3, ib1, ib2, ib3, ic1, ic2, ic3, id1, id2, id3, ie1, ie2, ie3, if1, if2, if3, ig1, ig2, ig3, ih1, ih2
, ih3, ii1, ii2, ii3, ij1, ij2, ij3, ik1, ik2, ik3, il1, il2, il3);

abs(ineutro) %modulo das correntes de neutro
angle(ineutro) % fase (radian) das correntes de neutro
```

Anexo C - Expressões Analíticas Adicionais para Redes de IP

```
% Correntes de entrada:
i1 =
mi(1,1)+mi(4,1)+mi(7,1)+mi(10,1)+mi(13,1)+mi(16,1)+mi(19,1)+mi(22,1)+mi(25,1)+mi(28,1)+mi(31,1)+mi(34,1);
i2 =
mi(2,1)+mi(5,1)+mi(8,1)+mi(11,1)+mi(14,1)+mi(17,1)+mi(20,1)+mi(23,1)+mi(26,1)+mi(29,1)+mi(32,1)+mi(35,1);
i3 =
mi(3,1)+mi(6,1)+mi(9,1)+mi(12,1)+mi(15,1)+mi(18,1)+mi(21,1)+mi(24,1)+mi(27,1)+mi(30,1)+mi(33,1)+mi(36,1);
in = i1+i2+i3;
i = [i1;i2;i3;in]

% QUEDAS DE TENSÃO

dU1=abs(u1-mi(34,1)*c);
dU2=abs(u2-mi(35,1)*c);
dU3=abs(u3-mi(36,1)*c);
dU = cat(1,dU1,dU2,dU3)

dUc1=abs(u1)-abs(mi(34,1)*c);
dUc2=abs(u2)-abs(mi(35,1)*c);
dUc3=abs(u3)-abs(mi(36,1)*c);
dUc = cat(1,dUc1,dUc2,dUc3)

% VERIFICAÇÕES DAS TENSÕES DE ENTRADA:
vo; % Tensões de entrada originais

% Ciclo 1:
ut1 = i1*1+mi(1,1)*c+ia1*n;
ut2 = i2*2*1+mi(2,1)*c+n*(ia2+ia1);
ut3 = i3*3*1+mi(3,1)*c+n*(ia3+ia2+ia1)
```

Anexo C - Expressões Analíticas Adicionais para Redes de IP

```
% Ciclo 2:
utt1 = i1*1+(i1-mi(1,1))*3*1+mi(4,1)*c+n*(ib1+ia3+ia2+ia1);
utt2 = i2*2*1+(i2-mi(2,1))*3*1+mi(5,1)*c+n*(ib2+ib1+ia3+ia2+ia1);
utt3 = i3*3*1+(i3-mi(3,1))*3*1+mi(6,1)*c+n*(ib3+ib2+ib1+ia3+ia2+ia1)

% Ciclo 3:
uttt1 = i1*1+(i1-mi(1,1))*3*1+(i1-mi(1,1)-mi(4,1))*3*1+mi(7,1)*c+n*(ic1+ib3+ib2+ib1+ia3+ia2+ia1);
uttt2 = i2*2*1+(i2-mi(2,1))*3*1+(i2-mi(2,1)-mi(5,1))*3*1+mi(8,1)*c+n*(ic2+ic1+ib3+ib2+ib1+ia3+ia2+ia1);
uttt3 = i3*3*1+(i3-mi(3,1))*3*1+(i3-mi(3,1)-
mi(6,1))*3*1+mi(9,1)*c+n*(ic3+ic2+ic1+ib3+ib2+ib1+ia3+ia2+ia1)

% Ciclo fim:
utttf3a = i3*3*1+(i3-mi(3,1))*3*1+(i3-mi(3,1)-mi(6,1))*3*1+(i3-mi(3,1)-mi(6,1)-mi(9,1))*3*1+(i3-mi(3,1)-
mi(6,1)-mi(9,1)-mi(12,1))*3*1+(i3-mi(3,1)-mi(6,1)-mi(9,1)-mi(12,1)-mi(15,1))*3*1+(i3-mi(3,1)-mi(6,1)-
mi(9,1)-mi(12,1)-mi(15,1)-mi(18,1))*3*1;
utttf3b = (i3-mi(3,1)-mi(6,1)-mi(9,1)-mi(12,1)-mi(15,1)-mi(18,1)-mi(21,1))*3*1+(i3-mi(3,1)-mi(6,1)-
mi(9,1)-mi(12,1)-mi(15,1)-mi(18,1)-mi(21,1)-mi(24,1))*3*1+(i3-mi(3,1)-mi(6,1)-mi(9,1)-mi(12,1)-mi(15,1)-
mi(18,1)-mi(21,1)-mi(24,1)-mi(27,1))*3*1+(i3-mi(3,1)-mi(6,1)-mi(9,1)-mi(12,1)-mi(15,1)-mi(18,1)-mi(21,1)-
mi(24,1)-mi(27,1)-mi(30,1))*3*1+(i3-mi(3,1)-mi(6,1)-mi(9,1)-mi(12,1)-mi(15,1)-mi(18,1)-mi(21,1)-mi(24,1)-
mi(27,1)-mi(30,1)-mi(33,1))*3*1+mi(36,1)*c;
utttf3 =
utttf3a+utttf3b+n*(i13+i12+i11+ik3+ik2+ik1+ij3+ij2+ij1+ii3+ii2+ii1+ih3+ih2+ih1+ig3+ig2+ig1+if3+if2+if1+ie
3+ie2+ie1+id3+id2+id1+ic3+ic2+ic1+ib3+ib2+ib1+ia3+ia2+ia1)
```

Anexo D

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DOS APARELHOS DE MEDIÇÃO

Os parágrafos seguintes fornecem as características técnicas dos aparelhos de medições utilizados no terreno. Uma descrição do protocolo de utilização é apresentada no Capítulo 5.

D.1. MEDIÇÕES PASSIVAS DOS CABOS SEM CARGAS

D.1.1. Medidor de indutância

DESCRIÇÃO	Medidor de indutância, capacidade e resistência
Marca	TOPWARD
Modelo	LCR METER 5030
Specification for 5000 series LCR Meters	
Parameters Tested	L/Q, L/R, C/D, C/Q, C/R, R/Q
Display Digit	L,C,R:4 Digits, D, Q:4 Digits, 0.56" LED Display
Equivalent Circuit	Series or Parallel
Test Frequency	100Hz, 120Hz, 1KHz, 10KHz* (*For 5030, 5040 only)
Test Level	50mV, 100mV, 250mV Auto Selected, $\pm 10\%$
DC Bias	External Bias 0~60V, 250mA Max
Display Range	L:0.001 μ H~9999H C:0.001pF~9999mF R:0.001Ohm~9999MOhm D:0.001~9999 Q:0.001~9999
Range	Automatic Ranging (6 Ranges)
Test Mode	Auto or Manual
Test Time	0.5 Sec/Test at 1KHz
Comparator	2 Sets of 4-Digit Code-Switch for L, C, R, Hi-Lo Comparison

	2 Sets of 4-Digit Code-Switch for D, Q, Hi-Lo Comparison
Self Test & Calibration	Self Function Test, Open CAL, Short CAL
Power Source	ACV 115V/230V, $\pm 10\%$, 60Hz/50Hz
Dimension	404(W) x 101(H) x 328(D) mm
Net Weight	5.1 kg
Web site	http://www.topward.com/lcr.htm

D.1.2. Multímetro

DESCRIÇÃO	Medidor de tensão e corrente
Marca	FLUKE
Modelo	45

D.1.3. Wattímetro

DESCRIÇÃO	Medidor das potências activa e reactiva
Marca	METRIX
Modelo	PX120

D.1.4. Fonte de alimentação

DESCRIÇÃO	Fonte de alimentação de corrente continua
Marca	ISO-TECH
Modelo	IPS 2303 DD

D.2. MEDIÇÕES ACTIVAS DA REDE EM FUNCIONAMENTO COM CARGAS

D.2.1. Analisador de rede

DESCRIÇÃO	Medições em tempo real dos parâmetros eléctricos numa rede em funcionamento
Marca	HT
Modelo	PQA 824
Medições	Tensões CC/AC TRMS
	Anomalias de Tensão
	Spike de Tensão Fase - Terra Mono e Trifásico
	Correntes CA
	Corrente de Pico
	Potências e Energias
	$\cos \varphi$
	Harmónicas de Tensão / Corrente
	Frequências
	Flicker -Sistema mono e trifásico