



**Universidade Federal de Campina Grande**

**Centro de Engenharia Elétrica e Informática**

Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

ERICSON NORBERTO ALVES SANTOS

**CÁLCULO DE QUEDA DE TENSÃO E PERDAS EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA**

Campina Grande, Paraíba

Abril de 2013

ERICSON NORBERTO ALVES SANTOS

CÁLCULO DE QUEDA DE TENSÃO E PERDAS EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à  
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da  
Universidade Federal de Campina Grande como  
parte dos requisitos necessários para a obtenção  
do grau de Bacharel em Ciências no Domínio da  
Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Distribuição de Energia Elétrica

Orientador

Professora Núbia Silva Dantas Brito, D. Sc.

Campina Grande, Paraíba

Abril de 2013

ERICSON NORBERTO ALVES SANTOS

CÁLCULO DE QUEDA DE TENSÃO E PERDAS EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à  
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da  
Universidade Federal de Campina Grande como  
parte dos requisitos necessários para a obtenção  
do grau de Bacharel em Ciências no Domínio da  
Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Distribuição de Energia Elétrica

Aprovado em: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

---

**Professor Avaliador**

Universidade Federal de Campina Grande  
Avaliador

---

**Professora Núbia Silva Dantas Brito, D. Sc.**

Universidade Federal de Campina Grande  
Orientadora

Campina Grande, Paraíba

Abril de 2013

## AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, ao Deus pai todo poderoso por ter me permitido chegar ao final de um curso tão difícil, superando obstáculos e tantas outras barreiras. Agradeço a minha amada mãe, dona Maria Enizabeth pela paciência e por ter acreditado em mim ao longo destes últimos cinco anos, agradeço aos meus irmãos pela confiança e pelo apoio sempre presente, agradeço profundamente aos meus professores do Departamento de Engenharia Elétrica, que não mediram esforços na transmissão do bem mais precioso que carregarei pelo resto da vida, o conhecimento. Agradeço aos amigos que fiz, ao longo do curso e que tantas vezes partilharam as angústias e alegrias e, por fim, agradeço especialmente a professora Núbia Brito pela orientação no desenvolvimento deste trabalho e nos ensinamentos transmitidos durante minha vida acadêmica.

## RESUMO

O projeto de redes de distribuição requer que sejam feitos estudos que visam determinar parâmetros importantes dos quais podemos citar: perdas, queda de tensão, índice de desequilíbrio e o limite térmico dos cabos. Além disto, o dimensionamento dos circuitos das redes de distribuição de média tensão e baixa tensão deverão prever também o crescimento vegetativo para a região que os mesmos atendem. A queda de tensão é um dos parâmetros mais importante a se determinar uma vez que há limites máximos estabelecidos em lei que devem ser respeitados pelas distribuidoras. Este trabalho apresentará uma planilha de cálculo de queda de tensão e perdas que faz uso de macros escritas em linguagem Visual Basic for Applications, VBA, com o intuito de automatizar o processo, muitas vezes oneroso, de cálculo de queda de tensão e perdas.

**Palavras-chave:** Queda de Tensão, Perdas, Método dos Momentos, Visual Basic for Applications, Planilha, Excel®.

## ABSTRACT

The design distribution networks, requires that studies are carried out aimed to determine important parameters which include: loss, voltage drop, index of unbalance and thermal limit of the cables. Furthermore, the dimensioning of the circuits of distribution networks medium voltage and low voltage will also provide vegetative growth to the region that they serve. The voltage drop is one of the most important parameters to determine since there are maximum limits established by law that must be respected by the distributors. This paper will present a spreadsheet voltage drop that makes use of macros written in Visual Basic for Applications language, VBA, in order to automate the process, often costly, calculation of voltage drop.

**Keywords:** Voltage Drop, Losses, Method of Moments, Visual Basic for Applications, Spreadsheet, Excel®.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1: Sistema de Distribuição de Energia Elétrica.....	2
Figura 2.1: (a) Diagrama unifilar de um alimentador.....	5
Figura 2.2: Alimentador com carga contínua (SOUZA, 1997, p. 56).....	10
Figura 2.3: Distribuição contínua retangular (SOUZA, 1997, p.54).....	10
Figura 2.4: Distribuição contínua triangular (SOUZA, 1997, p.54).....	11
Figura 2.5: Circuito monofásico (SOUZA, 1997, p.71).....	17
Figura 2.6: (a) Circuito "Bifásico".....	18
Figura 3.1: Tipos de perdas de energia.....	20
Figura 3.2: SIN e subsistemas. Índice de perdas (%).....	21
Figura 3.3: (a) Diagrama unifilar de um alimentador simples.....	22
Figura 3.4: Alimentador com carga contínua.....	23
Figura 3.5: Cargas contínuas.....	25
Figura 4.1: As dez planilhas que compõem a pasta de trabalho.....	29
Figura 4.2: A faixa de opções (Ribbon Bar) do MS Excel® 2010.....	31
Figura 4.3: Aba personalizada Queda de Tensão.....	32
Figura 4.4: Categoria "Configurações Gerais".....	32
Figura 4.5: Categoria "Queda de Tensão".....	32
Figura 4.6: Categoria "Simulação".....	33
Figura 4.7: Categoria "Ferramentas".....	33
Figura 4.8: Dados de identificação do projeto.....	34
Figura 4.9: Detalhamento de Trechos.....	35
Figura 4.10: Exemplo 4.4.....	37
Figura 4.11: Simulação Cálculo de Queda de Tensão.....	38
Figura 4.12: Fator de Potência.....	38
Figura 4.13: Tensão primária.....	38
Figura 4.14: Comprimento do trecho.....	39
Figura 4.15: Carga total acumulada.....	39
Figura 4.16: Condutor AWG.....	39
Figura 4.17: Queda de tensão no trecho.....	39
Figura 4.18: Detalhamento de trechos.....	40
Figura 4.19: Dados do trecho 1-2.....	40
Figura 4.20: Detalhamento de trechos.....	40
Figura 4.21: Circuito exemplo.....	41
Figura 4.22: Circuito exemplo.....	41
Figura 4.23: Exemplo 4.5.....	42
Figura 4.24: Exemplo 4.5 – Trechos 0-1 e 1-2.....	43
Figura 4.25: Exemplo 4.5 – Trecho 1-3 4.5.....	43
Figura 4.26: Simulação Cargas Especiais.....	44
Figura 4.27: Tensão primária.....	45
Figura 4.28: Comprimento do trecho.....	45
Figura 4.29: Cargas acumuladas para o trecho 0-1 (fp 1).....	45
Figura 4.30: Seleção do tipo de condutor do trecho 0-1.....	45
Figura 4.31: Cargas acumuladas para o trecho 0-1 (fp 0,8).....	45
Figura 4.32: Cargas para um mesmo trecho com fatores de potência distintos.....	46

Figura 4.33: Formulário de queda de tensão com cargas do trecho 0-1 .....	46
Figura 4.34: Comprimento do trecho 1-2 .....	46
Figura 4.35: Cargas distribuída e acumulada para o trecho 1-2 .....	47
Figura 4.36: Seleção do tipo de condutor do trecho 1-2.....	47
Figura 4.37: Cargas para um mesmo trecho com fatores de potência distintos .....	47
Figura 4.38: Formulário de queda de tensão com as cargas do trecho 0-1-2 .....	48
Figura 4.39: Identificação do trecho do circuito .....	48
Figura 4.40: Cargas para o trecho 1-3 do circuito do exemplo 2 .....	48
Figura 4.41: Cálculo de Perdas de Potência (Simulação).....	50
Figura 4.42: Comprimento do trecho .....	50
Figura 4.43: Carga total do trecho .....	50
Figura 4.44: Condutor do trecho .....	50
Figura 4.45: Dados do trecho 01-02 circuito.....	51
Figura 4.46: Dados do trecho 02-03 circuito.....	51
Figura 4.47: Planilha de perdas de potência do exemplo 4.4 .....	51
Figura 4.48: Impressão de planilha .....	52
Figura 5.1: Exemplo 4.1 .....	54
Figura 5.2: Planilha do exemplo 4.1.....	55
Figura 5.3 Exemplo 4.2 .....	55
Figura 5.4: Planilha do exemplo.....	56
Figura 5.5: Exemplo 4.4 .....	57
Figura 5.6: Planilha do exemplo 4.4.....	58
Figura 5.7: Exemplo 4.5 .....	58
Figura 5.8: Exemplo 4.5 – Trechos 0-1 e 1-2.....	59
Figura 5.9: Exemplo 4.5 – Trecho 1-3 .....	59
Figura 5.10: Planilha do exemplo 4.5.....	60
Figura 5.11: Exemplo 4.9 .....	60
Figura 5.12: Planilha do exemplo 4.9.....	61
Figura 5.13: Exercício 4.3 .....	62
Figura 5.14: Exercício 4.3 <sup>a</sup> .....	62
Figura 5.15: Planilha do exercício 4.3.....	63
Figura 5.16: Exercício 4.3b .....	63
Figura 5.17: Planilha do exercício 4.3 .....	63
Figura 5.18: Exercício 4.6 .....	64
Figura 5.19: Planilha do exercício 4.6.....	65
Figura 5.20: Exercício 4.8 .....	65
Figura 5.21: Planilha do exercício 4.8.....	66
Figura 5.22: Planilha do exercício 4.9.....	68
Figura 5.23: Exercício 4.10 .....	68
Figura 5.24: Planilha do exercício 4.10.....	69
Figura 5.25: Exemplo 5.2 .....	70
Figura 5.26: Exemplo 5.2 .....	71
Figura 5.27: Exercício 5.1 .....	71
Figura 5.28: Exercício 5.3a .....	72
Figura 5.29: Exercício 5.3a .....	73
Figura 5.30: Exercício 5.3b .....	73
Figura 5.31: Exercício 5.3b .....	73
Figura 5.32: Exercício 5.4 .....	74
Figura 5.33: Exercício 5.4 .....	74
Figura 5.34: Exercício 5.5 .....	75

Figura 5.35: Exercício 5.5 .....	76
Figura 5.36: Exercício 5.6 .....	76
Figura 5.37: Exercício 5.6a .....	77
Figura 5.38: Exercício 5.6b .....	77
Figura A1: Tabela de Condutores AWG .....	81
Figura A2: Tabela de Condutores AWG .....	82

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Pontos de entrega em Tensão Nominal .....	13
Tabela 2.2 – Resultados do exemplo .....	17
Tabela 2.3 – Classificação das barras do alimentador radial.....	14
Tabela 2.4 – Faixas de tensão secundárias .....	19
Tabela 2.5 – Limites de queda de tensão em redes secundárias.....	19
Tabela 4.1 – Configurações de Tensão/Sistema.....	35

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

VBA	Visual Basic For Applications
MS	Microsoft®
PCQT	Planilha de Cálculo de Queda de Tensão
MATLAB	Matrix Laboratory
SDEE	Sistema de Distribuição de Energia Elétrica
SDBT	Sistema de Distribuição de Baixa Tensão
SDMT	Sistema de Distribuição de Média Tensão
BT	Baixa Tensão
MT	Média Tensão
CAT	Controle Automático de Tensão
DNAEE	Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica

## SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	iv
RESUMO .....	v
ABSTRACT.....	vi
LISTA DE ILUSTRAÇÕES .....	vii
LISTA DE TABELAS .....	x
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS .....	xi
SUMÁRIO .....	xii
1 DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.....	1
2 QUEDA DE TENSÃO .....	3
2.1. CÁLCULO DE QUEDA DE TENSÃO.....	8
2.2. QUEDAS DE TENSÃO PROVOCADAS POR CARGAS CONTÍNUAS .....	10
2.3. RAIO DE AÇÃO DO ALIMENTADOR .....	12
2.4. TOPOLOGIA DO ALIMENTADOR RADIAL.....	14
2.5. ALIMENTADOR COM VÁRIAS CARGAS .....	15
2.6. QUEDA DE TENSÃO EM FUNÇÃO DO TIPO DE CIRCUITO.....	16
2.7. LIMITES DE QUEDA DE TENSÃO.....	18
3 PERDAS.....	20
3.1. REDUÇÃO DAS PERDAS .....	21
3.2. CÁLCULO DAS PERDAS DE POTÊNCIA.....	22
3.3. PERDAS EM ALIMENTADORES COM CARGAS CONTÍNUAS .....	23
3.4. PERDAS EM ALIMENTADORES COM VÁRIAS CARGAS .....	25
3.5. PERDAS EM FUNÇÃO DO TIPO DE CIRCUITO .....	26
4 PLANILHA DE QUEDA DE TENSÃO E PERDAS.....	27
4.1. A LINGUAGEM DE PROGRAMAÇÃO VBA.....	27
4.2. QUANDO USAR O VBA E POR QUE .....	28
4.3. DESCRIÇÃO GERAL DA PLANILHA DE CÁLCULO.....	28
4.4. BARRA DE FERRAMENTAS .....	31
4.5. BARRA DE FERRAMENTAS QUEDA DE TENSÃO .....	32

4.6. CÁLCULO DE QUEDA DE TENSÃO BASEADO NA NDU006 .....	34
4.7. CÁLCULO DE QUEDA DE TENSÃO (SIMULAÇÃO) .....	36
4.8. CÁLCULO DE PERDAS DE POTÊNCIA .....	48
4.9. SALVAR/IMPRIMIR A PLANILHA DE QUEDA DE TENSÃO.....	51
5 ESTUDOS DE CASO .....	54
5.1. CÁLCULO DE QUEDA DE TENSÃO.....	54
5.2. CÁLCULO DE PERDAS DE POTÊNCIA .....	70
6 CONCLUSÃO.....	78
BIBLIOGRAFIA .....	80
ANEXO I.....	81
ANEXO II .....	84

# 1 DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Distribuição de energia elétrica é o estágio final na entrega de energia elétrica aos usuários finais. Um sistema de distribuição de energia elétrica transporta eletricidade desde o sistema de geração e entrega-o aos consumidores, usando para isto o sistema de transmissão de eletricidade. Tipicamente, a rede inclui linhas de média tensão (inferior a 50 kV) de potência, subestações e transformadores de baixa tensão montados em postes. Outros dispositivos reguladores e/ou de proteção são por vezes utilizados, visando manter a segurança e os níveis de tensão dentro de padrões estabelecidos na legislação vigente.

Os aspectos que definem as principais características de um sistema de distribuição são (SOUZA, 1997, p. 2):

- Intensidade e densidade de carga;
- Tipo de consumidor;
- Configuração;
- Nível de tensão;
- Número de fases e de condutores.

Um sistema de distribuição moderno começa como o circuito primário que sai da subestação, e termina como o serviço secundário no medidor do cliente. Os circuitos de distribuição servem muitos clientes. A tensão usada é apropriada para distâncias mais curtas e varia de 2,3 kV a cerca de 35 kV, dependendo da distância e da carga a ser servida. Circuitos de distribuição são alimentados a partir de um transformador localizado numa subestação, em que a tensão é reduzida a partir dos valores mais altos utilizados para a transmissão de energia.

A distribuição urbana e suburbana é feita geralmente em três fases alimentando cargas residenciais, comerciais e industriais. A distribuição nas zonas rurais pode ser feita usando-se apenas uma única fase (MRT<sup>1</sup>), reduzindo desta forma custos para o atendimento a pequenas cargas, apenas os grandes consumidores são alimentados diretamente por tensões de distribuição. A fig. 1.1 ilustra um SDEE<sup>2</sup> típico e as diversas transformações de tensão ao

---

<sup>1</sup> MRT – Monofásico com Retorno por Terra.

<sup>2</sup> SDEE – Sistema de Distribuição de Energia Elétrica

longo do caminho até o consumidor final. A determinação do tipo de sistema de distribuição a ser implantando depende de um estudo prévio onde são identificadas algumas características que permitem que certos critérios de qualidade sejam alcançados. Os principais critérios de qualidade são (SOUZA, 1997, p. 3):

- Continuidade do serviço;
- Regulação de tensão;
- Segurança;
- Confiabilidade;
- Simplicidade de operação;
- Flexibilidade;
- Facilidade de manutenção.

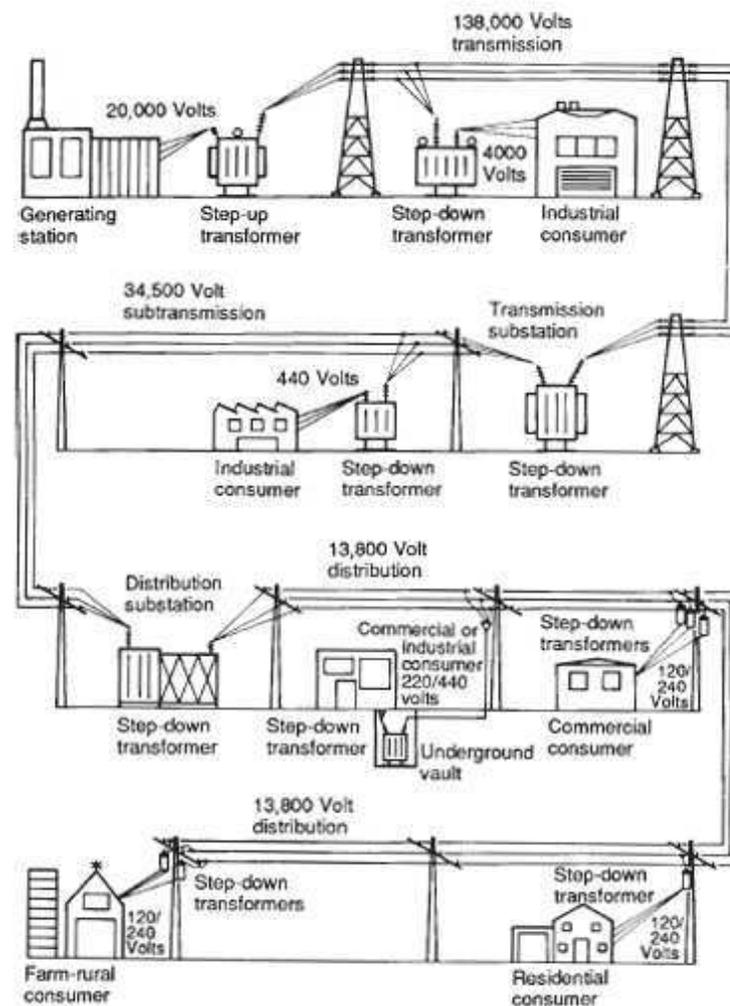


Figura 1.1: Sistema de Distribuição de Energia Elétrica típico, mostrando o caminho percorrido e as transformações de tensão, desde a geração até o consumidor final (fonte: PANSINI, 2004, p. 2).

## 2 QUEDA DE TENSÃO

Uma das responsabilidades das distribuidoras de energia elétrica é fornecer tensão de qualidade aos seus consumidores. Um destes indicadores de qualidade é o limite de queda de tensão que estabelece que a tensão deve permanecer dentro de uma pequena faixa apropriada. Em circuitos de distribuição a tensão primária e secundária cai devido ao fluxo de corrente através da impedância da linha. Parte da energia transmitida é, desta forma, perdida sob a forma de calor (efeito Joule). A resolução N° 505 da ANEEL, publicada em 26 de novembro de 2001, estabelece as disposições relativas à conformidade dos níveis de tensão de energia elétrica em regime permanente.

Tabela 2.1 – Pontos de entrega em Tensão Nominal igual ou inferior a 1 kV  
TENSÕES NOMINAIS PADRONIZADAS (fonte: resolução N° 505, ANEEL, 2001).

Tensão Nominal (TN)		Faixa de Valores Adequados das Tensões de Leitura (TL) em relação à TN (Volts)	Faixa de Valores Precários das Tensões de Leitura (TL) em relação à TN (Volts)	Faixa de Valores Críticos das Tensões de Leitura (TL) em relação à TN (Volts)
Ligação	Volts			
Trifásica	220/127	$(201 \leq TL \leq 231)/$ $(116 \leq TL \leq 133)$	$(189 \leq TL \leq 201)$ ou $(231 \leq TL \leq 233)/$ $(109 \leq TL \leq 116)$ ou $(133 \leq TL \leq 140)$	$(TL < 189$ ou $TL > 233)/$ $(TL < 109$ ou $TL > 140)$
	380/220	$(348 \leq TL \leq 396)/$ $(201 \leq TL \leq 231)$	$(327 \leq TL \leq 348)$ ou $(396 \leq TL \leq 403)/$ $(189 \leq TL \leq 201)$ ou $(231 \leq TL \leq 233)$	$(TL < 327$ ou $TL > 403)/$ $(TL < 189$ ou $TL > 233)$
Monofásica	254/127	$(232 \leq TL \leq 264)/$ $(116 \leq TL \leq 132)$	$(220 \leq TL \leq 232)$ ou $(264 \leq TL \leq 269)/$ $(109 \leq TL \leq 116)$ ou $(132 \leq TL \leq 140)$	$(TL < 220$ ou $TL > 269)/$ $(TL < 109$ ou $TL > 140)$
	440/220	$(402 \leq TL \leq 458)/$ $(201 \leq TL \leq 229)$	$(380 \leq TL \leq 402)$ ou $(458 \leq TL \leq 466)/$ $(189 \leq TL \leq 201)$ ou $(229 \leq TL \leq 233)$	$(TL < 380$ ou $TL > 466)/$ $(TL < 189$ ou $TL > 233)$

A mitigação da queda de tensão é feita através do uso de reguladores de tensão e de bancos de capacitores instalados ao longo da rede de distribuição. Três problemas cotidianos da distribuição são (SOUZA, 1997, p. 51):

- Cálculo de queda de tensão;
- Levantamento do perfil de tensão;
- Cálculo de perdas.

O objetivo deste capítulo é fazer uma breve revisão de alguns métodos usados para o cálculo da queda de tensão em redes de distribuição de energia elétrica. Algumas considerações são feitas de modo a se obterem as técnicas apropriadas de análise, quais sejam (SOUZA, 1997, p. 51):

- Configuração radial predominante;
- Pequena abertura angular;
- Relação  $r/x$  alta (na faixa de 0,5 a 0,2);
- Efeito capacitivo desprezível;
- Modelagem por circuitos a parâmetros concentrados.

Dado um alimentador, como o da figura 2.1, de comprimento  $l$ , impedância por unidade de comprimento  $z = r + jx$ , com uma carga concentrada em seu extremo  $S_T$  de fator de potência  $\cos\phi$ , seus parâmetros se expressam por:

$$Z = (r + jx)l = R + jX$$

ou

$$Z = Z \angle \theta$$

Onde:

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2}$$

$$\theta = \text{tg}^{-1} \frac{X}{R}$$

Fasorialmente, temos:

$$V_0 = V_1 + ZI \quad (2.1)$$

Considerando uma carga indutiva (o que é mais comum, na prática), a equação 2.1 pode ser reescrita da seguinte forma:

$$V_0 \cos \delta = V_1 + ZI \cos(\theta - \varphi) \quad (2.2)$$

e

$$V_0 \sin \delta = ZI \sin(\theta - \varphi) \quad (2.3)$$

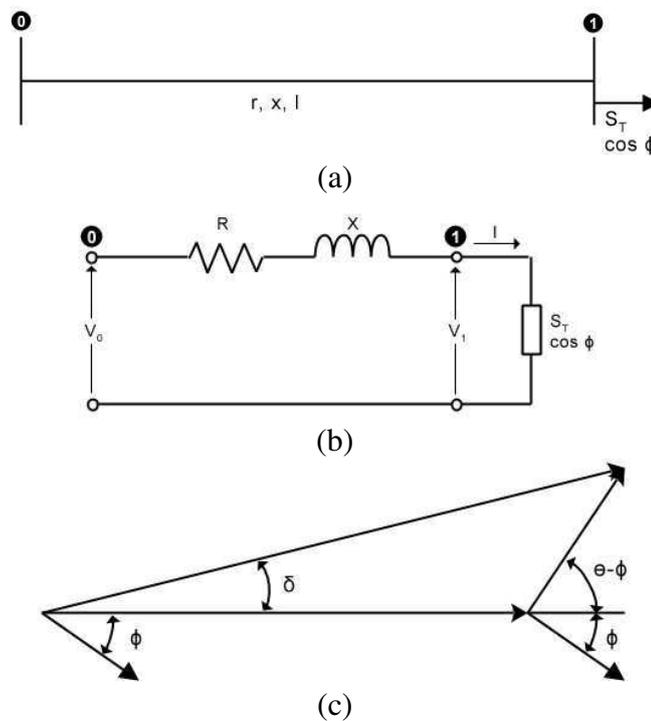


Figura 2.1: (a) Diagrama unifilar de um alimentador (b) circuito equivalente e (c) seu diagrama fasorial (SOUZA, 1997, p. 52).

As equações 2.2 e 2.3 podem ser reescritas com a corrente expressa em termos da potência e tensão na carga:

$$V_0 \cos \delta = V_1 + Z \frac{S_T}{V_1} \cos(\theta - \varphi) \quad (2.4)$$

e

$$V_0 \sin \delta = Z \frac{S_T}{V_1} \sin(\theta - \varphi) \quad (2.5)$$

Nas equações 2.4 e 2.5,  $\delta$  é a abertura angular do alimentador. Combinando as equações 2.4 e 2.5, tem-se:

$$V_0^2 = V_1^2 + Z^2 S_T^2 \frac{1}{V_1^2} + 2ZS_T \cos(\theta - \varphi) \quad (2.6)$$

Três soluções podem ser obtidas a partir da equação 2.6 :

- Solução Exata

Como a equação 2.6 é uma equação do segundo grau na variável  $V_1^2$ , então sua solução exata é dada por:

$$V_1^2 = \frac{V_0^2 - 2ZS_T \cos(\theta - \varphi) + \sqrt{[2ZS_T \cos(\theta - \varphi) - V_0^2]^2 - 4Z^2 S_T^2}}{2} \quad (2.7)$$

As principais características desta solução são:

- Fornecer a solução exata;
- Pouco prático uma vez que o alimentador apresenta impedâncias diferentes e atende várias cargas ao longo do percurso.

- Solução Iterativa

Consiste em calcular  $V_0$  através da equação 2.6 a partir de uma estimativa inicial de  $V_1$ . A diferença entre os valores calculado e especificado (ou medido) de  $V_0$  é usada para corrigir sucessivamente o valor de  $V_1$ . O processo termina quando a diferença torna-se menor que uma certa tolerância ou quando o número de iterações excede um determinado número. A tolerância e o número máximo de iterações são previamente definidos (SOUZA, 1997, p. 53). As principais características desta solução são:

- i. Apresenta boa precisão;
- ii. É um método prático.

- Soluções Aproximadas

Desprezando-se as perdas no alimentador, substituindo-se  $V_1$  por  $V_0$  no denominador da expressão 2.6, obtemos:

$$V_1 = \sqrt{V_0^2 - \frac{Z^2 S_T^2}{V_0^2} - 2ZS_T \cos(\theta - \varphi)} \quad (2.8)$$

Considerando agora a abertura angular muito pequena,  $\cos \delta \approx 1$ , a equação 2.8 simplifica-se mais ainda:

$$V_1 = V_0 - Z \frac{S_T}{V_0} \cos(\theta - \varphi) \quad (2.9)$$

Um exemplo e a sua solução em MATLAB® é apresentado a seguir para avaliar a precisão dos resultados obtidos com cada uma das aproximações.

#### Exemplo 1

Um alimentador de 10 km de extensão é constituído de cabos CA 1/0 (0,607 + j0,451 Ω/km). A carga do alimentador é de 1,2 MVA, fator de potência 0,9 e concentra-se no seu extremo. Calcular a tensão na carga, se no início do alimentador é 13,8 kV. Os resultados do exemplo 1 são apresentados na tabela 2, abaixo. O código em MATLAB® com a resolução do problema está disponível no anexo, no final deste trabalho.

Tabela 2.2 – Resultados do exemplo 1

	Solução Exata (Equação 2.7)	Solução Iterativa	Solução Aproximada (Equação 2.8)	Solução Aproximada (Equação 2.9)
$V_1$	13.1199 kV	13.1199 kV (Após duas iterações)	13.1217 kV	13.1540 kV

## 2.1 CÁLCULO DE QUEDA DE TENSÃO

A disponibilidade da energia elétrica representa um incremento na qualidade de vida da população. Num primeiro momento em que se implanta um sistema de distribuição de energia elétrica, a população local imediatamente passa a contar com inúmeros benefícios, tanto do ponto de vista de maior conforto doméstico como de melhores possibilidades de emprego e produção. À medida que os benefícios da energia elétrica passam a fazer parte do dia-a-dia das pessoas, é natural que se inicie um processo de discussão quanto à qualidade daquele produto.

Não tão evidente, no entanto, é a questão da qualidade da energia elétrica como um produto comercial, mesmo que não ocorram interrupções. Isso normalmente só é percebido de forma um pouco difusa, através de falhas de funcionamento em alguns equipamentos. Definimos a queda de tensão como sendo a diferença de potencial entre dois pontos quaisquer de um circuito. Nos sistemas de distribuição de energia elétrica há um interesse especial em se determinar a queda de tensão, visto que esta informação é de fundamental importância para os projetos de implantação, reforma e extensão.

Formulação matemática

A equação (2.9) será utilizada convenientemente para o cálculo de tensão, expressa aqui como sendo:

$$\Delta V = V_0 - V_1$$

Considerando que  $\cos(\theta - \varphi) = \cos \theta \cos \varphi + \sin \theta \sin \varphi$ . Assim,

$$\Delta V = \frac{S_T}{V_0} (Z \cos \theta \cos \varphi + Z \sin \theta \sin \varphi)$$

$$\Delta V = \frac{S_T l}{V_0} (r \cos \varphi + x \sin \varphi)$$

ou, simplificadamente:

$$\Delta V = S_T l G \tag{2.10}$$

Onde  $S_T$  é a carga total do alimentador que é concentrada em seu extremo e:

$$G = \frac{rcos\varphi + xsin\varphi}{V_0^2} \cdot 100 \quad (2.11)$$

Representa a queda de tensão unitária ao longo do alimentador (queda de tensão por unidades de comprimento do alimentador e de potência da carga) e é função da bitola e dos espaçamentos dos condutores, da tensão nominal do alimentador e do fator de potência da carga (SOUZA, 1997, p. 55). A queda de tensão se expressa com vantagem em percentagem da tensão do início do alimentador ou da tensão nominal:

$$\Delta V = \frac{V_0 - V_1}{V_0} \cdot 100\% \quad (2.12)$$

Das expressões (2.10) e (2.12), temos:

$$\frac{V_0 - V_1}{V_0} \cdot 100 = S_T l G$$

$$V_1 = V_0 \left( 1 - \frac{S_T l G}{100} \right) \quad (2.13)$$

A equação (2.13) pode então ser usada para calcular a queda de tensão do início do circuito até o ponto  $l$  do circuito, desde que conhecidos o coeficiente de queda de tensão, a carga instalada e a tensão no início do alimentador.

## 2.2 QUEDAS DE TENSÃO PROVOCADAS POR CARGAS CONTÍNUAS

Em geral a carga de um sistema de distribuição é complexa. É prática, contudo sem grande perda de precisão, simplificar a distribuição das cargas considerando-a como uma função espacial contínua (figura 2.2). Esta simplificação é razoável visto que as cargas são tantas e estão muito próximas uma das outras.

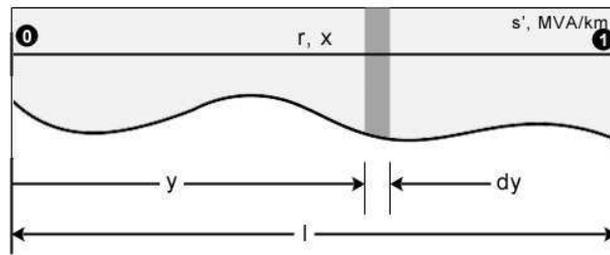


Figura 2.2: Alimentador com carga contínua (SOUZA, 1997, p. 56).

A queda de tensão entre dois pontos do alimentador separados por uma distância finita é determinada por integração da expressão (2.14) dada por:

$$\Delta V = G \int_0^l \int_y^l s(\gamma) d\gamma dy \quad (2.14)$$

A equação (2.14) é válida para qualquer distribuição de carga, embora duas distribuições sejam as mais usuais:

- Distribuição Retangular

Fazendo  $s(\gamma) = s'$  na equação (2.14) e efetuando a integração na variável  $\gamma$ , particularizamos a equação geral.

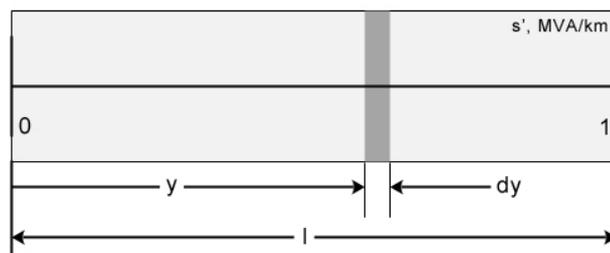


Fig. 2.3: Distribuição contínua retangular (SOUZA, 1997, p.54).

$$\Delta V = \frac{G s' l^2}{2} \quad (2.15)$$

ou

$$\Delta V = \frac{G S_T l}{2} \quad (2.16)$$

Onde  $S_T$  é a carga do alimentador. Para efeito de cálculo da queda de tensão entre os extremos do alimentador cuja carga tenha distribuição retangular, as duas alternativas seguintes são possíveis:

- i. A carga total pode ser concentrada no meio do alimentador;
- ii. A carga total pode ser substituída por metade dela concentrada no fim do alimentador.

- Distribuição triangular

Para este caso, representado pela figura 2.4, a função densidade de carga é dada por:

$$s(y) = 2s'' \operatorname{tg}\left(\frac{\varphi}{2}\right)y \quad (2.17)$$

Onde  $s''$ , a densidade superficial de carga ( $\text{kVA}/\text{km}^2$ ), e  $\varphi$  são constantes conhecidas.

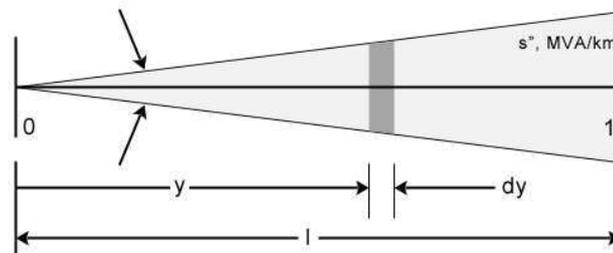


Fig. 2.4: Distribuição contínua triangular (SOUZA, 1997, p.54)

Para pequenos valores de  $\varphi$

$$\operatorname{tg}\left(\frac{\varphi}{2}\right) \approx \frac{\operatorname{tg}\varphi}{2} \quad (2.18)$$

De modo que

$$s(y) = s'' \operatorname{tg}(\varphi)y \quad (2.19)$$

Combinando-se as equações (2.14) e (2.19) e integrando-se, temos:

$$\Delta V = G s'' \operatorname{tg}(\varphi) \frac{l^3}{3} \quad (2.20)$$

ou

$$\Delta V = G \frac{2}{3} S_T l \quad (2.21)$$

Onde:

$$S_T = s'' \frac{l^2}{2} \operatorname{tg} \varphi$$

é a carga total do alimentador.

Para efeito de cálculo da queda de tensão no alimentador cuja carga tenha distribuição triangular, as duas alternativas seguintes são possíveis:

- i. A carga total pode ser concentrada no ponto correspondente a dois terços do comprimento do alimentador;
- ii. A carga total pode ser substituída por dois terços dela concentrada no fim do alimentador.

### 2.3 RAIOS DE AÇÃO DO ALIMENTADOR

O raio de ação, ou o carregamento máximo de um alimentador é limitado pela queda de tensão ou a corrente máxima admissível e, normalmente, o limite de queda de tensão é alcançado primeiro. Alguns processos de regulação de tensão podem ser adotados para se evitar a restrição de queda de tensão. Esse prolongamento da vida útil pode ser conseguido através da instalação de reguladores de tensão e/ou banco de capacitores.

Em relação aos equipamentos utilizados para correção de tensão em um SDEE, é importante destacar que alguns têm capacidade apenas de executar a correção de tensão e não regulação de tensão. Esse é o caso, por exemplo, dos capacitores, que na maioria das vezes são estáticos, ou seja, ficam normalmente energizados, independentemente do nível de controle de tensão desejado para o sistema em dado momento e quando são desenergizados ocasionam uma variação brusca na tensão, sendo normalmente necessária a comutação dos

reguladores de tensão na subestação ou ao longo da rede (quando houver). Existem também os bancos de capacitores chaveados, que podem ser energizados parcialmente, de acordo com a necessidade do sistema para o controle de tensão, mas deverá ser estabelecida uma filosofia de controle hierárquico, considerando as características da carga de cada subestação de distribuição, dos sistemas regionais de subtransmissão e do sistema de transmissão, porém são muito mais caros, e normalmente são preteridos em prol dos reguladores de tensão.

O perfil de tensão no ciclo diário de carga ou em condições de emergência é uma variável de fundamental importância para determinar a qualidade de atendimento aos clientes. Para esses casos são usados os reguladores de tensão ao longo do SDMT, onde normalmente são controlados usando a mesma filosofia de regulação de tensão através do CAT (controle automático de tensão), porém, estes reguladores de tensão instalados na rede são fontes de VTCDs.

Um problema crucial no planejamento de sistemas de distribuição é determinar a rota de um alimentador e seu raio de ação (comprimento máximo possível). O raio de ação de um alimentador aéreo é limitado pela queda de tensão máxima admissível. Portanto, depende da tensão nominal, do condutor empregado (tipo, diâmetro e espaçamento), da carga (intensidade, fator de potência e tipo de distribuição) (SOUZA, 1997, p. 56). Reescrevendo as equações (2.10), (2.16) e (2.21) em função da variável  $l$ , válidas quando a carga for concentrada no fim do alimentador ou tem distribuição retangular ou triangular, respectivamente, temos:

$$l_c = \frac{\Delta V}{GS_T} \quad (2.22)$$

$$l_r = \frac{2\Delta V}{GS_T} \quad (2.23)$$

$$l_t = \frac{\frac{3}{2}\Delta V}{GS_T} \quad (2.24)$$

Onde, para as equações anteriores:

$$G = \frac{r\cos\phi + x\sin\phi}{V_0} \quad (2.25)$$

A influência da distribuição da carga sobre o raio de ação do alimentador se expressa, então, através da seguinte relação:

$$l_c = \frac{l_r}{2} = \frac{2l_t}{3} \quad (2.26)$$

ou seja, o raio de ação de um determinado alimentador que atende uma carga concentrada em seu extremo é a metade do raio de ação que teria se essa carga fosse uniformemente distribuída, ou então, é dois terços do que teria se a carga tivesse distribuição triangular (SOUZA, 1997, p. 57).

## 2.4 TOPOLOGIA DO ALIMENTADOR RADIAL

A implementação computacional de rotinas que identifiquem corretamente os parâmetros de um SDEE, necessários para levantamento do perfil de queda de tensão, é um tanto complexo visto que as várias cargas ao longo dos alimentadores interferem nos cálculos das quedas de tensão em barras subsequentes. Desta forma, é necessário desenvolver uma numeração sequencial correspondente a cada tipo específico de barra. Este modo de numeração é chamado de numeração normalizada e é definida conforme regras descritas a seguir:

- i. O número da barra original é zero;
- ii. As barras são numeradas sequencialmente na ordem direta de proximidade da origem;
- iii. A numeração começa pelo tronco, seguindo-se os ramais, do mais próximo ao mais remoto.

Tabela 2.3 – Classificação das barras do alimentador radial.

Tipo	Barra	Propriedades
-	original	Onde começa o alimentador e por onde entra toda a energia requerida pelos consumidores. Só existe uma barra deste tipo no alimentador radial simples.
0	terminal	Uma barra onde termina o alimentador.
> 1	de derivação	Onde há bifurcação do alimentador.
1	intermediária	Qualquer barra que não se classifique como nenhuma das anteriores. São simplesmente barra de carga ou de mudança de cabo ou de tipo de circuito.

## 2.5 ALIMENTADOR COM VÁRIAS CARGAS

Para calcular a queda de tensão em um alimentador com várias cargas, basta considerar que:

- A queda de tensão total num alimentador é a soma das quedas de tensão em cada trecho;
- Para a queda de tensão num determinado trecho, contribuem, além da sua própria carga, a carga de todos os trechos subsequentes;
- No cálculo da queda de tensão num trecho, sua eventual carga contínua pode ser substituída pela concentrada equivalente.

No caso geral do alimentador sem ramais ter  $n$  trechos, a queda de tensão se calcula através da seguinte fórmula recursiva (SOUZA, 1997, p. 58):

$$\Delta V_k = \Delta V_{k-1} + l_k G_k \left[ -\frac{\hat{S}_k}{2} + \sum_{i=k}^n (S_i + \hat{S}_i) \right]; \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (2.27)$$

Onde:

$$G_k = \frac{r_k \cos\phi + x_k \sin\phi}{V_0^2} \cdot 100 \quad [\%/MVA/km] \quad (2.28)$$

Sendo:

$r_k, x_k$  são, respectivamente, a resistência e a reatância do trecho  $k$  ( $\Omega/km$ )

$V_0$  é a tensão nominal (kV)

$l_k$  é o comprimento do trecho

$S_k$  é a carga concentrada no fim do trecho  $k$  (MVA)

$\hat{S}_k$  é a carga uniformemente distribuída no trecho  $k$  (MVA)

$\cos\phi$  é o fator de potência

Generalizando as equações (2.27) e (2.28) para quando os fatores de potência forem diferentes, temos:

$$\Delta V_k = \Delta V_{k-1} + I_k \left[ -\hat{G}_{kk} \frac{\hat{S}_k}{2} + \sum_{i=k}^n (G_{ki} S_i + \hat{G}_{ki} \hat{S}_i) \right]; \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (2.29)$$

Onde:

$$G_{ki} = \frac{r_k \cos \phi_i + x_k \sin \phi_i}{V_0^2} \cdot 100 \quad (2.30)$$

$$\hat{G}_{ki} = \frac{r_k \cos \hat{\phi}_i + x_k \sin \hat{\phi}_i}{V_0^2} \cdot 100 \quad (2.31)$$

$\cos \phi_i$  é o fator de potência da carga concentrada no fim do trecho  $i$

$\cos \hat{\phi}_i$  é o fator de potência da carga uniformemente distribuída no fim do trecho  $i$

A equação (2.29) é uma fórmula de recorrência através da qual se calcula a queda de tensão do início do alimentador até o fim de um determinado trecho. Para isso, se deve ter calculado antes, a queda de tensão até o fim do trecho anterior imediato. Para se inicializar o processo recursivo, isto é, ao se calcular a queda de tensão no primeiro trecho faz-se  $\Delta V_0 = 0$ .

## 2.6 QUEDA DE TENSÃO EM FUNÇÃO DO TIPO DE CIRCUITO

Vários tipos de circuito, derivados do trifásico, são empregados na distribuição. Embora os circuitos se modifiquem (quanto ao número de condutores e fases instaladas) o princípio de cálculo é o mesmo e baseia-se na equação (2.10), diferenciando-se apenas o coeficiente de queda de tensão,  $G$ , dado de acordo com as expressões a seguir, para as configurações de circuitos apresentadas.

- Circuito Trifásico

Aplicação direta das equações (2.10) e (2.11).

- Circuito Monofásico

A impedância do condutor de neutro deve ser transferida para o condutor de fase, fazendo com que a impedância passe a valer  $(r + r') + j(x + x')$  e a tensão  $V_0/\sqrt{3}$ . Supondo condutores do mesmo tipo, acarreta que:

$$r = r' \text{ e } x = x'$$

Logo:

$$G = 6 \frac{r \cos \phi + x \sin \phi}{V_0^2} \cdot 100 \quad (2.32)$$

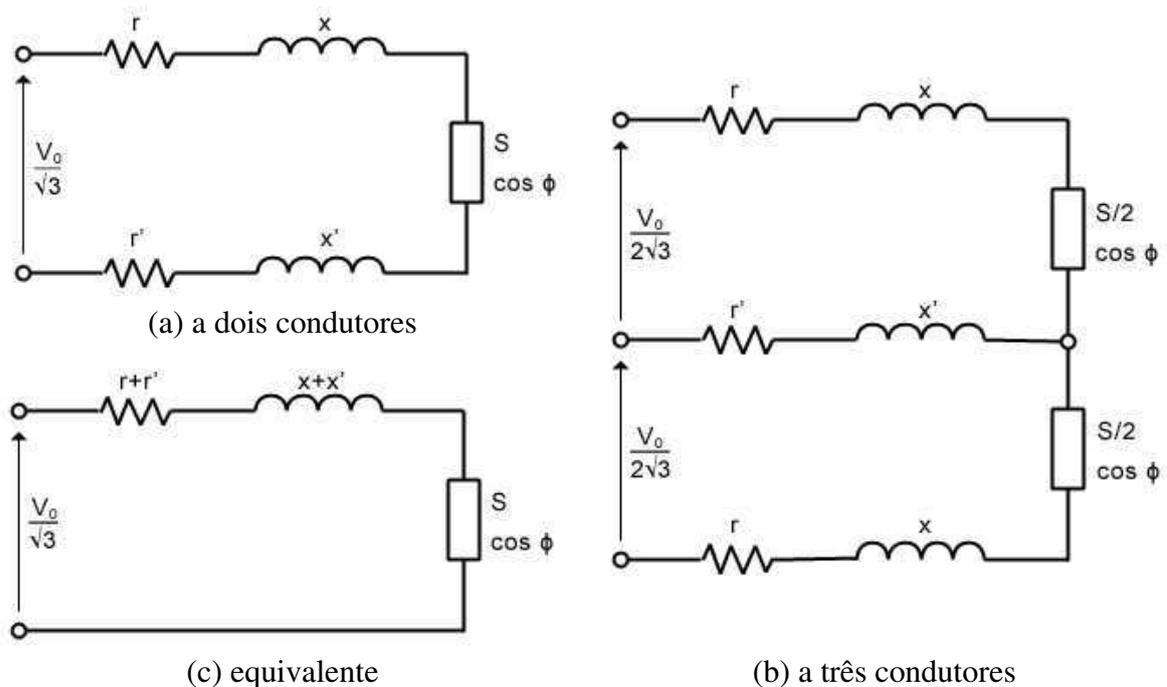


Figura 2.5: Circuito monofásico (SOUZA, 1997, p.71).

- Circuito Bifásico

Este circuito (figura 2.6a) é na verdade um circuito trifásico em que uma das fases não foi instalada. Supondo-se mantido o equilíbrio de fases e os condutores de fase e de neutro do mesmo tipo, temos:

$$G = \frac{3}{2} \frac{r[\cos \phi + \cos(60 - \phi)] + x[\sin \phi + \sin(60 - \phi)]}{V_0^2} \cdot 100 \quad (2.33)$$

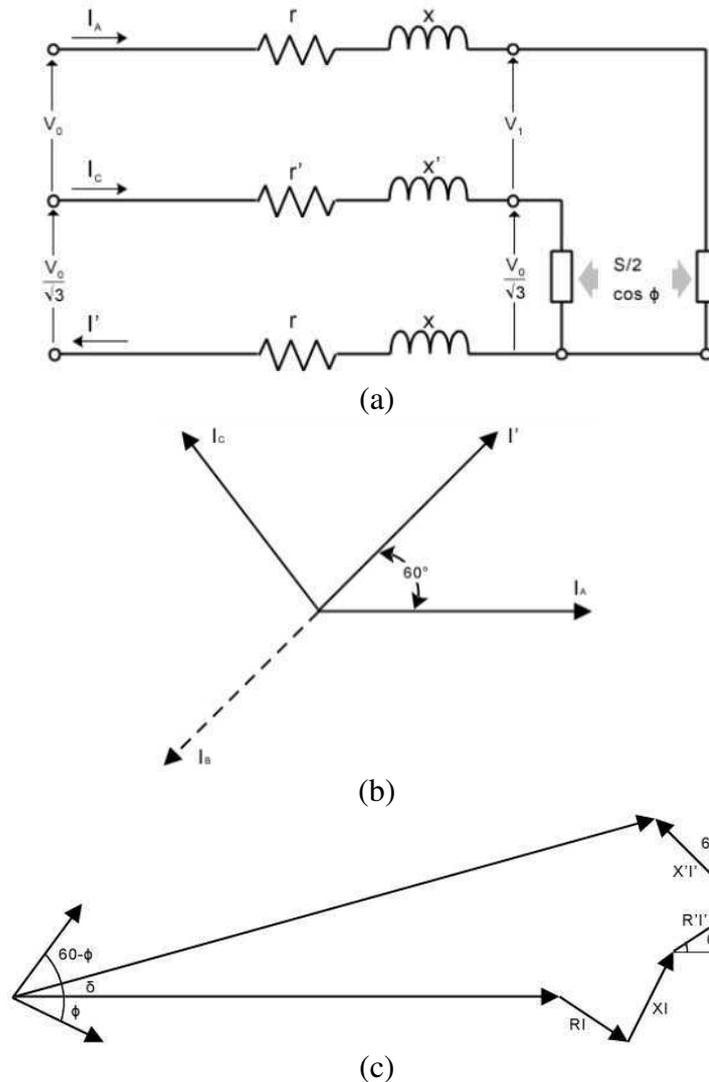


Figura 2.6: (a) Circuito "Bifásico"; (b) Diagrama fasorial de corrente; (c) Diagrama fasorial de tensão (SOUZA, 1997, p.72).

## 2.7 LIMITES DE QUEDA DE TENSÃO

Os limites de queda de tensão e as faixas de tensão secundárias são apresentadas nas tabelas abaixo. Cada distribuidora tem critérios próprios para obter limites de queda de tensão. A NDU006 e NDU007 (Normas de Distribuição Unificada) especificam os critérios para o

projeto e a otimização de redes de distribuição de energia elétrica urbana e rural, respectivamente, e baseiam-se na portaria 047/78 do DNAEE<sup>1</sup> que regulamenta este assunto.

Tabela 2.4 – Faixas de tensão secundárias

Tipo de circuito	Tensão nominal	Limites precários (volts)		Limites adequados (volts)	
Trifásico a 4 fios	220/127 V	189/109	233/135	201/116	229/132
	380/220 V	327/189	403/233	348/201	396/229
Monofásico a 2 ou 3 fios	230/115 V	206/103	254/127	212/106	242/121
	240/120 V	206/103	254/127	216/108	250/125
	254/127 V	/109	/135	/110	/132
	440/220 V	378/189	466/233	402/201	458/229

Tabela 2.5 – Limites de queda de tensão em redes secundárias

Circuito	Limite
Trifásico	3,5 %
Bifásico	5,0 %
Monofásico	6,0 %
Exclusivo de iluminação	6,5 %

<sup>1</sup> Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica – DNAEE foi extinto, em seu lugar foi criada a Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL.

### 3 PERDAS

As perdas, embora representem uma pequena fração da eletricidade distribuída, constituem um problema significativo nos dias atuais. Além do impacto ao meio ambiente, há o impacto financeiro sobre todos os usuários da rede de distribuição. Vários fatores contribuem para as citadas perdas e estes vão desde questões técnicas a até questões administrativas. Algumas das perdas são inevitáveis, contudo podem ser reduzidas por meio de técnicas e equipamentos adequados. Do ponto de vista ambiental, as perdas devido a razões técnicas estão diretamente ligadas às emissões de carbono. Os sistemas de potência apresentam vários tipos de perdas, que podem ser classificadas, de modo geral, de acordo com o diagrama da figura 8.

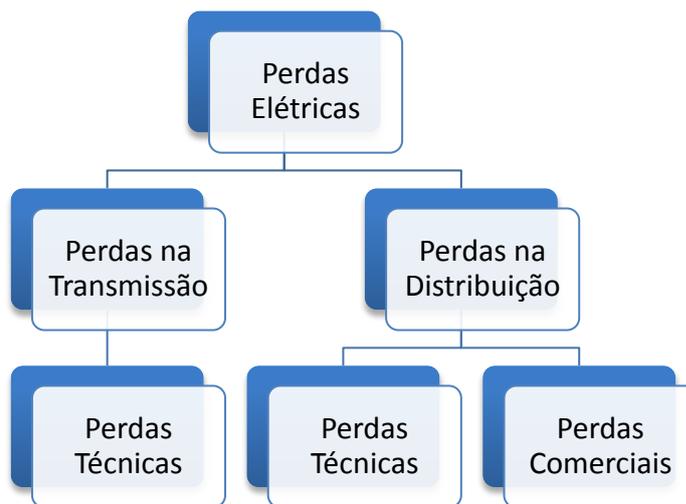


Figura 3.1: Tipos de perdas de energia

As perdas de distribuição são divididas em duas categorias:

- Perdas técnicas;
- Perdas não técnicas (ou perdas comerciais).

Denominam-se perdas técnicas de energia as perdas inerentes às atividades de transporte da energia elétrica na rede. Estas perdas são de natureza física, causadas pela resistência dos cabos condutores, reguladores, transformadores e outros equipamentos necessários ao correto funcionamento do sistema de distribuição. Tais perdas não podem ser

evitadas, contudo podem ser minimizadas com o emprego de materiais de boa qualidade, manutenção periódica em equipamentos e outras medidas profiláticas.

As perdas não técnicas ou comerciais são divididas em perdas por fraude e por furto. A fraude ocorre quando o consumidor adultera o equipamento de medição de várias maneiras possíveis, de modo que a leitura mensal seja inferior ao montante efetivamente consumido. Já o furto ocorre quando a energia é consumida por meio de ligações clandestinas, sem passar por medidor algum. Outras perdas incluem imprecisão de medição e diferenças temporárias.

As perdas são importantes porque há um custo ambiental e econômico associado a elas. Enquanto as perdas técnicas estão diretamente relacionadas com as emissões de carbono e têm um impacto sobre a capacidade de geração, todas as perdas têm de ser rateadas e pagas pelos usuários da rede. As distribuidoras de energia elétrica recebem incentivos econômicos que objetivam reduzir as perdas, no entanto, algumas das causas de tais perdas não estão sob o seu controle direto.

As principais causas das perdas técnicas são:

- Sub padronização e condutor de tamanho pequeno;
- Baixo fator de potência;
- Transformação;
- Sobrecarga de transformadores;
- Sobrecarga dos condutores;
- Comprimento das linhas;
- Manutenção inadequada e/ou falta de manutenção preventiva.

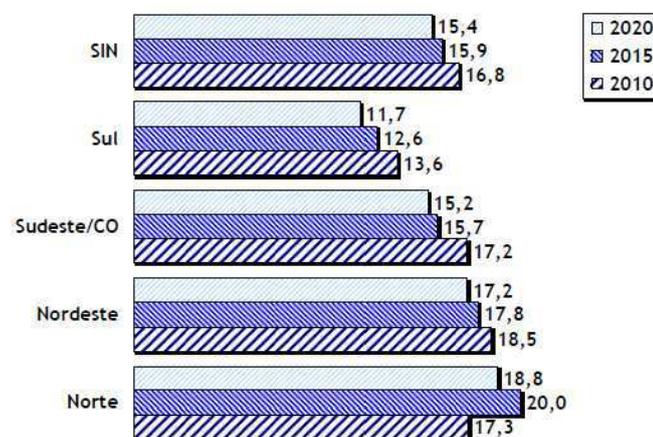


Figura 3.2: SIN e subsistemas. Índice de perdas (%)

### 3.1 REDUÇÃO DAS PERDAS

Como principais medidas a se adotar, visando a redução das perdas técnicas nas redes de distribuição, podemos citar as seguintes:

- Dimensionamento de linha;
- Dimensionamento e localização de transformadores de distribuição;
- Manutenção do nível de tensão;
- Controle do fluxo de reativos;
- Correção do desequilíbrio de fases;
- Manutenção preventiva e de qualidade.

Todas estas ações visam diminuir as perdas técnicas proporcionadas pelos equipamentos empregados na rede. Contudo, tais perdas não podem ser completamente eliminadas por razões de ordem física.

### 3.2 CÁLCULO DAS PERDAS DE POTÊNCIA

Considere o alimentador simples, de carga concentrada em seu extremo, mostrado na figura 9.

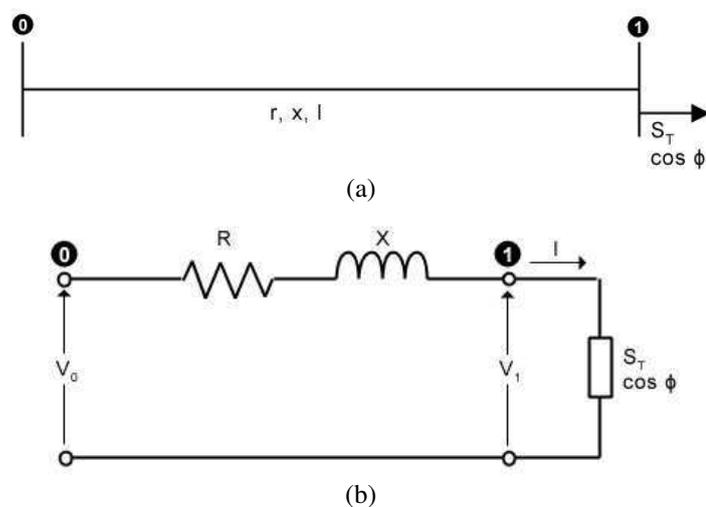


Figura 3.3: (a) Diagrama unifilar de um alimentador simples e (b) seu circuito equivalente (SOUZA, 1997, p.87)

As perdas são dadas por:

$$P = RI^2 \quad (3.1)$$

ou

$$P = lr \frac{S_T^2}{V_1^2} \quad (3.2)$$

Desprezando-se a queda de tensão, as perdas podem então ser aproximadas por:

$$P = lHS_T^2 \quad (3.3)$$

Onde  $S_T$  é a potência da carga e

$$H = \frac{r}{V_0^2} \quad (3.4)$$

São as perdas unitárias.

### 3.3 PERDAS EM ALIMENTADORES COM CARGAS CONTÍNUAS

Seja um alimentador de comprimento  $l$  com carga contínua, conforme ilustrado pela figura 10.

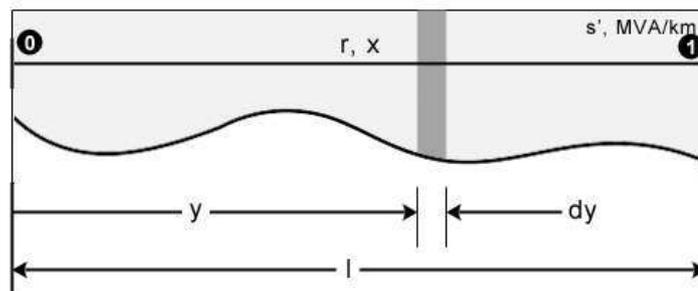


Figura 3.4: Alimentador com carga contínua

Então, as perdas entre dois pontos do alimentador separados por uma distância finita são determinadas pela integração de:

$$dP = HS^2(\gamma)d\gamma \quad (3.5)$$

Ou, em particular, para os extremos do alimentador:

$$P = H \int_0^l \left( \int_y^1 s(\gamma) d\gamma \right)^2 dy \quad (3.6)$$

- Distribuição Retangular

Fazendo  $s(y) = s'$  na equação (3.6) e integrando, temos:

$$P = \frac{1}{3} H S_T^2 \quad (3.7)$$

perdas para uma distribuição retangular, onde:

$$S_T = s'l$$

Para o caso quem que a distribuição é retangular, algumas observações são pertinentes quais sejam:

- A carga total pode ser concentrada a  $1/3$  do comprimento do trecho;
- A carga total pode ser substituída por  $1/\sqrt{3}$  dela concentrada no fim do trecho.

- Distribuição Triangular

Sendo a função densidade de carga dada por:

$$s(y) = s'' \operatorname{tg}(\varphi) y$$

Sendo  $s''$  a densidade superficial de carga dada em  $\text{kVA}/\text{km}^2$ , e supondo  $\operatorname{tg}\left(\frac{\varphi}{2}\right) \approx \frac{\operatorname{tg}(\varphi)}{2}$  integrando as equações anteriores, temos:

$$P = H \frac{8}{15} l S_T^2 \quad (3.8)$$

Onde  $S_T = s'' \frac{l^2}{2} \operatorname{tg} \varphi$  é a carga total do alimentador.

Para efeito de cálculo podemos considerar a carga com distribuição triangular como concentrada a  $8/15$  do comprimento total do alimentador ou, substituí-la por 73% dela concentrada no fim do alimentador (SOUZA, 1997, p. 89).

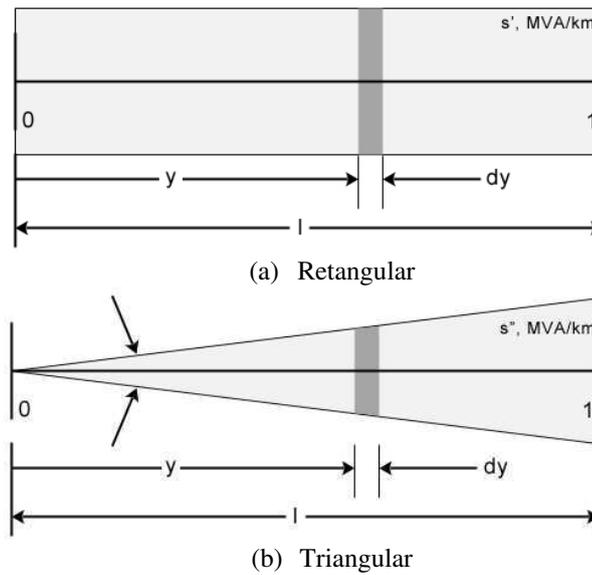


Figura 3.5: Cargas contínuas

### 3.4 PERDAS EM ALIMENTADORES COM VÁRIAS CARGAS

Na prática os alimentadores possuem várias cargas “penduradas” ao longo do alimentador, o que lhe confere uma distribuição aproximadamente contínua particular. Para estas situações o procedimento de cálculo de perdas consiste em dividir o alimentador em trechos na qual a potência de cada trecho é associada a sua respectiva barra. A determinação das perdas pode ser feita com base nas seguintes observações (SOUZA, 1997, p. 91):

- i. As perdas totais num alimentador nada mais são do que a soma das perdas em cada trecho;
- ii. Para as perdas num determinado trecho contribuem, além de sua própria carga, a carga de todos os trechos subsequentes;
- iii. No cálculo das perdas em um trecho, sua eventual carga contínua pode ser substituída pela sua concentrada equivalente.

A solução geral para o cálculo das perdas em um alimentador com várias cargas concentradas é dada por

$$P = \sum_{i=1}^n l_i H_i \left[ \frac{\sqrt{3}-3}{3} \hat{S}_i + \sum_{k=i}^n (\hat{S}_i + S_i) \right]^2 \quad (3.9)$$

Onde:

$\hat{S}_i$  é a carga com distribuição retangular no trecho  $i$  e

$S_i$  é a carga concentrada no fim do trecho.

Se as cargas do alimentador são concentradas com fatores de potência distintos, então a equação das perdas passa a ser:

$$P = \sum_{i=1}^n I_i H_i \left[ \left( \sum_{k=i}^n S_k \cos \varphi_k \right)^2 + \left( \sum_{k=i}^n S_k \sin \varphi_k \right)^2 \right] \quad (3.10)$$

### 3.5 PERDAS EM FUNÇÃO DO TIPO DE CIRCUITO

As perdas totais são determinadas pela equação (3.3), desde que  $S$  seja a potência trifásica e  $V_0$  a tensão de linha. Para circuitos trifásicos, usa-se a equação (3.4). Para circuitos monofásicos e bifásicos, as perdas são determinadas respectivamente por:

$$H = 6 \frac{r}{V_0^2} \quad (3.11)$$

e

$$H = \frac{3 r [\cos \varphi + \cos(60^\circ - \varphi)]}{2 V_0^2} \quad (3.12)$$

Válidas para circuitos com o mesmo tipo de condutor de fase e neutro.

## 4 PLANILHA DE QUEDA DE TENSÃO E PERDAS

Embora seja relativamente fácil calcular analiticamente a queda de tensão, em circuitos radiais extensos esta pode representar uma tarefa árdua para se fazer manualmente. A planilha de cálculo de queda de tensão, desenvolvida neste trabalho, tem por objetivo automatizar o processo através do cadastro (em tabelas) de informações dos diversos circuitos, seus respectivos coeficientes de perdas além de outros dados relevantes de modo que o usuário dispense o mínimo de esforço possível agilizando e tornando mais eficiente todo o processo do cálculo de queda de tensão.

A PCQT é uma planilha eletrônica habilitada para macros, desenvolvida no Microsoft® Excel® 2010. A PCQT pode ser usada para calcular a queda de tensão, ponto-a-ponto, em sistemas de distribuição de energia elétrica do tipo radiais baseados na norma NDU006<sup>1</sup> e, também pode ser usada para simulações de cálculo de quedas de tensão e perdas de potência em circuitos personalizados.

A PCQT foi desenvolvida em linguagem Visual Basic for Applications, VBA, e faz uso de formulários, caixas de texto, listboxes, entre outros elementos gráficos organizados em uma GUI<sup>2</sup> que visa automatizar, facilitar e agilizar o processo de cálculo de queda de tensão e perdas.

### 4.1 A LINGUAGEM DE PROGRAMAÇÃO VISUAL BASIC FOR APPLICATIONS

O Visual Basic para Aplicações é um aplicativo da linguagem de programação Visual Basic, da Microsoft, incorporada na suíte de aplicativos do Microsoft® Office. Ele pode ser usado para controlar a muitos dos aspectos da aplicação Office, incluindo a manipulação da GUI tais como menus e barra de ferramentas e o trabalho com formulários desenhados pelo usuário ou com caixas de diálogo. O VBA é uma linguagem muito rica em funcionalidades, contudo tem importantes limitações dentre as quais podemos citar:

- Suporte limitado a funções *callback*;
- Linguagem interpretada;
- Sem suporte à encapsulamento.

---

<sup>1</sup> NDU006 – Norma de Distribuição Unificada

<sup>2</sup> GUI do inglês Graphical User Interface (Interface Gráfica do Usuário).

Os aplicativos do Microsoft® Office oferecem um conjunto muito rico de recursos que fornecem muitas maneiras diferentes de criar, formatar e fazer coisas com documentos, e-mail, bancos de dados, planilhas e apresentações. Estas características são extensíveis, o que significa que as operações que são executadas usando o mouse, teclado e caixas de diálogo também podem ser realizadas através de scripts VBA. Usando o VBA é possível criar código que automatiza tarefas repetitivas e simplifica tarefas complexas.

#### 4.2 QUANDO USAR O VBA E POR QUE

Há três razões principais para considerarmos a programação VBA na suíte de aplicativos do Office, quais sejam:

- i. O VBA é eficiente na execução de tarefas repetitivas que demandam precisão na inserção de dados seja em banco de dados, planilhas ou formatação de textos longos no Word;
- ii. Possibilidade de simplificação de tarefas complexas através do uso de GUI's nas quais o usuário seleciona uma combinação de valores deixando-o alheio às operações de cálculo, pesquisa, e manipulação de dados em segundo plano;
- iii. Pode-se usar a programação VBA para interagir com os pormenores de duas ou mais aplicações do Office, ao mesmo tempo e, em seguida, modificar o conteúdo de uma aplicação com base no teor em outro.

#### 4.3 DESCRIÇÃO GERAL DA PLANILHA DE CÁLCULO DE QUEDA DE TENSÃO E PERDAS

A PCQT pode ser usada basicamente de três formas:

- i. Para cálculo de queda de tensão baseado na NDU006;
- ii. Para cálculo de queda de tensão (geral);
- iii. Para o cálculo de perdas de potência.

A pasta de trabalho é composta por 10 (dez) planilhas, cada uma com uma função específica cuja as principais características serão apresentadas a seguir.

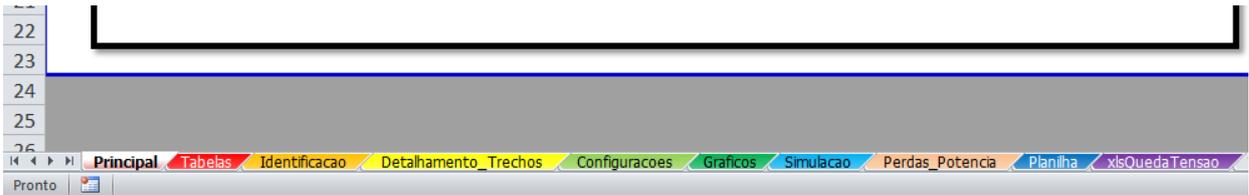


Figura 4.1: As dez planilhas que compõem a pasta de trabalho

a. Planilha **PRINCIPAL**

Esta planilha exibe apenas a tela inicial da pasta de trabalho, com algumas informações sobre o autor e a versão da planilha.

b. Planilha **TABELAS**

Esta planilha contém todas as tabelas necessárias para os cálculos de queda de tensão baseados na NDU006. Aqui encontram-se tabelas de:

- **Distribuidoras Energisa** – Todas as distribuidoras que compõem o grupo Energisa (Energisa Borborema, Paraíba, Nova Friburgo, etc.);
- **Responsabilidade Técnica** – Reúne os dados do(s) responsável(eis) técnico(s) e do revisor(es) (nome, CREA e função);
- **Cadastro de Municípios Paraibanos** – Reúne uma lista com todos os municípios da Paraíba atendidos pela Energisa Paraíba;
- **Fator de Potência** – Reúne uma lista de possíveis fatores de potência. Segundo a NDU006 somente os fatores de potência 0,8 e 1 são usados para os respectivos cálculos;
- **Tensão Primária** – No cálculo do coeficiente de queda de tensão,  $G$ , esta é a tensão para sistemas primários;
- **Tensão Secundária** – Tensão secundária do sistema. Usada apenas para informação
- **Coeficientes Unitários de Queda de Tensão (BT – Baixa Tensão)** – Três tabelas que reúnem os valores dos coeficientes unitários de queda de tensão para os fatores de potência 0,8 e 1, tensões de 380 a 115 V e condutores trifásicos, bifásicos e monofásicos. Estas tabelas correspondem às tabelas 33, 34 e 35 da NDU006 (páginas 83 e 84).
- **Coeficientes Unitários de Queda de Tensão (MT – Média Tensão)** – Três tabelas que reúnem os valores dos coeficientes unitários de queda de tensão para os fatores de

potência 0,8 e 1, tensões de 22 a 6,58 kV e condutores do tipo CA e CAA. Estas tabelas correspondem às tabelas 30, 31 e 32 da NDU006 (páginas 80 a 83).

c. Planilha **IDENTIFICAÇÃO**

Esta planilha armazena informações de identificação, dados do transformador, demandas, previsão de carga e identificação do responsável técnico e revisor da PCQT.

d. Planilha **DETALHAMENTO\_TRECHOS**

Esta planilha armazena os dados de identificação, comprimento, cargas, condutores e quedas de tensão do circuito.

e. Planilha **CONFIGURAÇÕES**

Esta planilha armazena configurações básicas da planilha de cálculo, tais como destino padrão de salvamento dos arquivos gerados, nome padrão da planilha de queda de tensão e da planilha de simulação, data e um título "default" do projeto. Os dados de identificação do projeto em andamento (atual) são, também, armazenados aqui não devendo, portanto, serem alterados sob quaisquer hipóteses. A modificação de tais dados implica na execução incorreta da planilha de queda de tensão. As informações salvas aqui, são geradas automaticamente a medida que informações são adicionadas à planilha de queda de tensão.

f. Planilha **GRÁFICOS**

Esta planilha armazena os gráficos do perfil de tensão gerados.

g. Planilha **SIMULAÇÃO**

Esta planilha armazena os dados de identificação, comprimento, cargas, condutores personalizados e das quedas de tensão por circuito. A planilha de simulação é usada para calcular a queda de tensão em circuitos nos quais as cargas têm características especiais, i.e. fatores de potência diferentes.

#### h. Planilha de **PERDAS\_POTENCIA**

Esta planilha armazena os dados de identificação, comprimento, cargas e das perdas de potência calculadas para o circuito.

#### i. Planilha **PLANILHA**

Esta planilha é usada para armazenar temporariamente os dados do circuito em simulação para posterior exportação. A exportação gera uma nova pasta de trabalho com a planilha gerada aqui.

#### j. Planilha **XLSQUEDATENSAO**

Esta planilha é usada para armazenar temporariamente os dados completos do circuito para posterior exportação. A exportação gera uma nova pasta de trabalho com a planilha gerada aqui.

### 4.4 BARRA DE FERRAMENTAS

Em aplicações baseadas em GUI, uma Ribbon, ou faixa de opções, é uma interface onde um conjunto de barras de ferramentas são dispostas na forma de abas. Uma Ribbon fornece a interface do usuário de um aplicativo uma barra de ferramentas grande e cheia de representações gráficas de elementos de controle que são agrupados por diferentes funcionalidades. As Ribbons podem conter separadores para evidenciar diferentes conjuntos de elementos de controle, eliminando a necessidade de diversas barras de ferramentas baseadas em ícones.



Figura 4.2: A faixa de opções (*Ribbon Bar*) do MS Excel 2010

Alguns destes guias são contextuais e só aparecem quando um certo tipo de objeto é selecionado, fornecendo ferramentas específicas para itens como tabelas ou imagens. As Ribbons surgiram com o MS Office 2007 e estão cada vez mais populares. Todas as opções

disponíveis na PCQT estão organizadas em uma aba personalizada, na Faixa de opções do MS Excel 2010.

#### 4.5 BARRA DE FERRAMENTAS QUEDA DE TENSÃO

Todas as opções da PCQT estão organizadas na aba personalizada chamada Queda de Tensão. A figura abaixo mostra a sua localização na interface do Excel®.



Figura 4.3: Aba personalizada Queda de Tensão

Todas as opções disponíveis estão agrupadas em categorias, detalhadas a seguir.

#### Configurações Gerais



Figura 4.4: Categoria "Configurações Gerais"

- Ajustes – Permite que sejam configurados os padrões da planilha. Usado para informar o caminho na qual as planilhas geradas, tanto no módulo de queda de tensão quanto no módulo de simulação, serão salvas.
- Tabelas – Exibe a planilha de tabelas.

#### Queda de Tensão

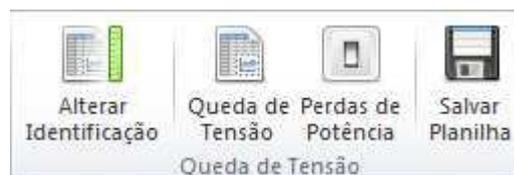


Figura 4.5: Categoria "Queda de Tensão"

- Alterar Identificação – Permite que sejam adicionadas e/ou alteradas as informações básicas do projeto, como título, data, município, responsáveis, etc.

- Queda de Tensão – Permite que sejam informados os dados do circuito (comprimento, cargas, condutores, etc).
- Perdas de Energia – Permite o cálculo de perdas de energia.
- Salvar Planilha – Exporta a planilha atual para uma nova pasta de trabalho.

## Simulação



Figura 4.6: Categoria "Simulação"

- Simulação – Inicia uma nova simulação de queda de tensão.
- Simulação Cargas Especiais – Inicia uma nova simulação de queda de tensão ou continua uma simulação existente na qual serão informadas cargas com fatores de potência distintos para um mesmo trecho.
- Apaga Simulação – Apaga todos os dados (exceto tabelas) informados, e prepara a planilha para uma nova simulação.
- Exporta Simulação – Exporta a planilha de simulação atual para uma nova pasta de trabalho.

## Ferramentas

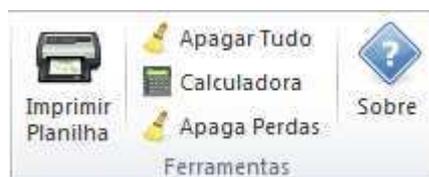


Figura 4.7: Categoria "Ferramentas"

- Imprimir Planilha – Imprime a planilha de queda de tensão atual, se houver algum dado informado.
- Apagar Tudo – Apaga os dados da planilha de queda de tensão atual (exceto tabelas) e prepara a planilha para um novo projeto.
- Apagar Perdas – Apaga os dados de perdas de potência informados.
- Calculadora – Abre a calculadora do Windows.

- Sobre – Exibe informações de créditos (autor e versão) da planilha.

#### 4.6 CÁLCULO DE QUEDA DE TENSÃO BASEADO NA NDU006

A PCQT foi desenvolvida para calcular quedas de tensão em redes de distribuição de energia elétrica de média tensão (MT) e de baixa tensão (BT) baseados na NDU006. As etapas descritas a seguir ilustram a sequência de ações que devem ser executadas para efetuar o cálculo de queda de tensão.

##### i. Dados de Identificação do Projeto

Clique no comando "Queda de Tensão". Uma janela como a da Figura 4.8 abaixo será exibida.

Dados Técnicos			
Título	PROJETO DE REDE URBANA - ENERGISA-PB		
Concessão	Energisa Paraíba	Município	Campina Grande
Órgão		Folha	
Dados Transformador			
Transf. N°			
Data	08/05/2013		
Sistema	Primário (MT)		
Dados do Responsável Técnico			
Projetista	ERICSON NORBERTO A. SANTOS	CREA:	15650-PE
Revisado Por	NUBIA SILVA D. BRITO	CREA:	16550-PB

Figura 4.8: Dados de identificação do projeto

Informe os dados técnicos (Título, Concessão, Município, Órgão e Folha), os dados do transformador (número, data e tipo de sistema) e os dados do responsável técnico (projetista e revisado por). Duas informações são bastante importantes e não deve ser omitidas nesta etapa:

- Concessão – Esta informação é usada para determinar quais os níveis de tensão primária ou secundária, trifásico ou monofásico estarão disponíveis na próxima etapa;

- Sistema – Esta informação determina se a planilha será criada para calcular a queda de tensão em sistemas de MT ou BT.

## ii. Detalhamento de Trechos

Informe os dados do circuito (comprimento, cargas, condutor, etc.).

Figura 4.9: Detalhamento de Trechos

Como mencionado anteriormente, os dados informados no formulário de Dados de Identificação de Projeto limitam as opções disponíveis para o detalhamento de trechos. Como pode ser visto na tabela 1 ao escolhermos, por exemplo, "Energisa Paraíba" no campo concessão dos dados de identificação, as tensões primárias ( $V_0$ ) disponíveis são 13,8 e 7,96 kV. Observando a planilha de Tabelas (Figura 4.1) na pasta de trabalho, verifica-se que a tensão de 13,8 kV somente poderá ser utilizada para sistema do tipo trifásico com cabos Nus ou Protegidos.

Portanto, deve-se ter muito cuidado ao informar o campo tensão  $U$  (kV), o tipo de cabo (Nu ou Protegido), o Sistema (Trifásico ou Monofásico) e o tipo de condutor (CA ou CAA) de modo a evitar o uso incorreto do coeficiente de queda de tensão unitário. A tabela abaixo lista as possibilidades de escolha para o campo tensão  $U$  (kV) em combinação com os demais dados do condutor.

Tabela 4.1 – Configurações de Tensão/Sistema

MT TRIFÁSICO				MT MONOFÁSICO	
Cabos NUS		Cabos Protegidos		Cabos NUS	
CA	CAA	CA	CAA	CA	CAA
fp 0,8 ou 1	fp 0,8 ou 1	fp 0,8 ou 1	fp 0,8 ou 1	fp 0,8 ou 1	fp 0,8 ou 1
22 kV				12,7 kV	
13,8 kV				7,96 kV	
11,4 kV				6,58 kV	

De acordo com a tabela 4.1, o coeficiente de queda de tensão unitária, será corretamente calculado se houver a correspondência entre o tipo de sistema (MT trifásico ou MT monofásico), o tipo de cabo (nu ou protegido) e a tensão  $U$  (kV). Para confirmar a inclusão dos dados, clique no botão OK. As informações serão salvas, e o formulário de inclusão de um novo trecho será atualizado (campos "De" e "Para" serão incrementados). Este procedimento deve ser repetido até que todos os trechos do circuito estejam informados.

### iii. Salvar Planilha

Se desejar salvar a planilha de queda de tensão em uma pasta de trabalho separada, clique no botão de comando "Salvar Planilha". Uma caixa de diálogo será exibida solicitando ao usuário que informe o nome e o local onde será salva a nova pasta de trabalho.

## 4.7 CÁLCULO DE QUEDA DE TENSÃO (GERAL)

O módulo de queda de tensão (geral) permite ao usuário calcular quedas de tensão em circuitos com cargas distribuídas e acumuladas com fatores de potência diferentes ao longo de cada trecho. Diferentemente do cálculo de queda de tensão baseado na norma NDU006 que, por definição, considera as cargas em cada trecho (com distribuição retangular ou concentradas) com fatores de potência iguais ou a 0,8 ou 1, o módulo de simulação permite que sejam informados em cada trecho, várias cargas com fatores de potência distintos e cabos com qualquer valor de impedância.

A planilha "Simulação" (Figura 4.1) possui, além do formulário de queda de tensão, tabelas com valores de impedâncias de cabos, fatores de potência e tensão primária e secundária. Estas são as tabelas do usuário utilizadas para informação das diversas impedâncias dos cabos<sup>3</sup>, fatores de potência específicos, tensão primária, etc.

### Módulo de Simulação

Considere o exemplo 4.4 de SOUZA, 1997, cap. 4, p. 62:

---

<sup>3</sup> O Anexo I detalha a forma correta de inserir impedâncias de cabos nas tabelas de simulação.

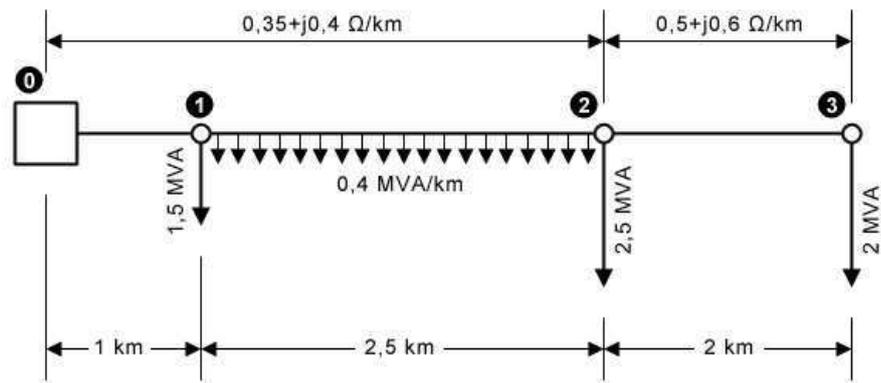


Figura 4.10: Exemplo 4.4

### Solução analítica

$$V_0 = 13,8 \text{ kV}$$

$$\text{fp} = 0,8$$

$$Z_1 = 0,35 + j0,40 \text{ } \Omega/\text{km}$$

$$Z_2 = 0,50 + j0,60 \text{ } \Omega/\text{km}$$

Cálculo dos coeficientes de queda de tensão:

$$G_1 = G_2 = \frac{0,35 \cdot 0,8 + 0,4 \cdot 0,6}{13,8^2} \cdot 10^2 = 0,2731 \text{ } \%/ \text{MVA}/\text{km}$$

$$G_3 = \frac{0,5 \cdot 0,8 + 0,6 \cdot 0,6}{13,8^2} \cdot 10^2 = 0,3991 \text{ } \%/ \text{MVA}/\text{km}$$

Cálculo da queda de tensão:

- Trecho 2-3

$$\Delta V\% = S1G = 2 \cdot 2 \cdot 0,3991 = 1,5964 \text{ } \%/ \text{MVA}/\text{km}$$

- Trecho 1-2

$$\Delta V\% = S1G = \left[ \frac{(0,4 \cdot 2,5)}{2} + 2,5 + 2 \right] \cdot 2,5 \cdot 0,2731 = 3,4138 \text{ } \%/ \text{MVA}/\text{km}$$

- Trecho 0-1

$$\Delta V\% = S1G = [1,5 + (0,4 \cdot 2,5) + 2,5 + 2] \cdot 1 \cdot 0,2731 = 1,9117 \text{ \%/MVA/km}$$

Logo, a queda total é:  $\Delta V\% = 1,9117 + 3,4138 + 1,5964 = 6,9219 \%$

### Solução usando o módulo de Simulação

- Cadastre as impedâncias dos cabos (anexo I);
- Clique no botão de comando Simulação (Figura 4.6) para iniciar uma nova simulação. A janela de dados da simulação (Figura 4.11) será exibida;

FP	1		<input checked="" type="radio"/> Cabos Nus* <input type="radio"/> Cabos Protegidos	
U (kV)	22000		Sistema	
U Saída	440		Cabos	
<b>TRECHO</b>			<b>CARGA</b>	
De	Para	km	Distrib. MVA	Acum. MVA
SE	01	0	0	0
<b>CONDUTOR</b>			<b>TOTAL</b>	
Condutor N° AWG			Total MVA/km.	
3# CA 1/0 (0,607+j0,451)			0,0000	
<b>QUEDA DE TENSÃO</b>				
Unit. %/MVA/km		No Trecho (%)	Total (%)	
0,1254		0,0000	0	

Figura 4.11: Simulação Cálculo de Queda de Tensão

- Selecione o fator de potência (0,8 para o exemplo em questão);

FP	0,8
U (kV)	13800
U Saída	440

Figura 4.12: Fator de Potência

- Selecione a tensão primária (13800);

FP	0,8
U (kV)	13800
U Saída	440

Figura 4.13: Tensão primária

- v. A tensão de saída tem apenas caráter informativo, não exercendo influência sobre qualquer cálculo;
- vi. Clique na caixa de texto km e informe (para o trecho da subestação até o ponto 1), o valor total da distância deste trecho (de 0-1, temos 1 km conforme o exemplo 4.4) e pressione enter;

Figura 4.14: Comprimento do trecho

- vii. Informe o valor total da carga distribuída (para o trecho em questão, este valor é zero) e a carga total acumulada (para o trecho em questão, este valor é  $1,5+(0,4*2,5)+2,5+2 = 7$  MVA) e pressione enter;

Figura 4.15: Carga total acumulada

- viii. Por fim, escolha o tipo de condutor e em seguida clique no botão OK.

Figura 4.16: Condutor AWG

O valor da queda de tensão no trecho será exibido no formulário e será automaticamente atualizado para cada valor de fator de potência, tensão primária e tipo de condutor selecionado.

Figura 4.17: Queda de tensão no trecho

Após confirmar a inclusão dos dados, o formulário de queda de tensão deverá apresentar os valores do trecho 0-1 como mostrado na Figura 4.18.

DETALHAMENTO DE TRECHOS									
TRECHO		CARGA			CONDUTORES	QUEDA DE TENSÃO			CORRENTE
DESIGNAÇÃO	COMPRIMENTO	DISTRIBUÍDA NO TRECHO	ACUMULADA NO FIM DO TRECHO	TOTAL <sup>1</sup>		UNITÁRIA	NO TRECHO	TOTAL	NO TRECHO <sup>2</sup>
A	B	C	D	E	F	G	H=ExG	I	J
Primário	km	MVA	MVA	MVA x km	no. AWG	%/MVA/km	%	%	A
SE-01	1,0000	0,0000	7,0000	7,0000	3# CA	0,2731	1,9117	1,9117	

Figura 4.18: Detalhamento de trechos

Para o trecho 1-2 o procedimento é o mesmo com a diferença que há um valor de carga distribuída que deve ser informado na etapa vii. Após informar todos os dados, o formulário deverá conter algo como os dados mostrados na Figura 4.19.

FP	0,8	<input checked="" type="radio"/> Cabos Nus <sup>®</sup> <input type="radio"/> Cabos Protegidos	
U (kV)	13800	Sistema	
U Saída	440	Cabos	
<b>TRECHO</b>		<b>CARGA</b>	
De	Para	km	
01	02	2,5	
		Distrib. MVA	Acum. MVA
		1	4,5
		<b>TOTAL</b>	
		Total MVA/km	
		12,5000	
<b>CONDUTOR</b>		<b>QUEDA DE TENSÃO</b>	
Condutor N° AWG		Unit. %/MVA/km	No Trecho (%)
3# CA (0,35+j0,4)		0,2731	3,4138
		Total (%)	
		0	

Figura 4.19: Dados do trecho 1-2

O resultado final é mostrado na Figura 4.20.

DETALHAMENTO DE TRECHOS									
TRECHO		CARGA			CONDUTORES	QUEDA DE TENSÃO			CORRENTE
DESIGNAÇÃO	COMPRIMENTO	DISTRIBUÍDA NO TRECHO	ACUMULADA NO FIM DO TRECHO	TOTAL <sup>1</sup>		UNITÁRIA	NO TRECHO	TOTAL	NO TRECHO <sup>2</sup>
A	B	C	D	E	F	G	H=ExG	I	J
Primário	km	MVA	MVA	MVA x km	no. AWG	%/MVA/km	%	%	A
SE-01	1,0000	0,0000	7,0000	7,0000	3# CA	0,2731	1,9117	1,9117	
01-02	2,5000	1,0000	4,5000	12,5000	3# CA	0,2731	3,4138	5,3255	
02-03	2,0000	0,0000	2,0000	4,0000	3# CA	0,3991	1,5964	6,9219	

Figura 4.20: Detalhamento de trechos

Cabe observar que se o circuito tiver ramos em derivação, o procedimento é o mesmo. Como recomendação é importante que o usuário, nestes casos, informe primeiramente os dados do circuito principal e depois os dados dos circuitos em derivação. O exemplo abaixo ilustra resumidamente esta ideia que deve sempre ser seguida para estes casos.

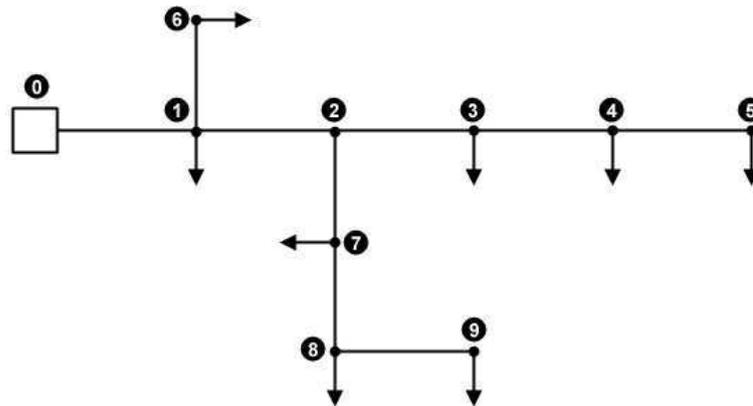


Figura 4.21: Circuito exemplo

Considere o circuito da Figura 4.21. O procedimento correto é informar os dados do trecho que formam o ramo principal e posteriormente informar os dados dos ramos em derivação, começando pelo ramo mais próximo do nó inicial (ponto zero). A sequência de lançamentos seria então:

- 1) Trechos 0-1, 1-2, 2-3, 3-4 e 4-5;
- 2) Trecho 1-6;
- 3) Trecho 2-7, 7-8 e 8-9.

Observe que podemos considerar outro circuito como sendo o circuito principal. Em uma configuração alternativa poderíamos ter uma sequência de lançamentos do tipo:

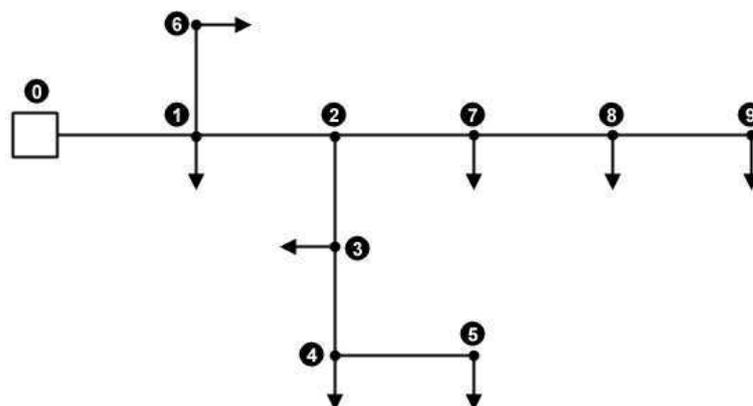


Figura 4.22: Circuito exemplo

- 1) Trechos 0-1, 1-2, 2-3, 3-4 e 4-5;
- 2) Trecho 1-6;
- 3) Trecho 2-7, 7-8 e 8-9.

Considere agora o exemplo 4.5 de SOUZA, 1997, cap. 4, p. 66:

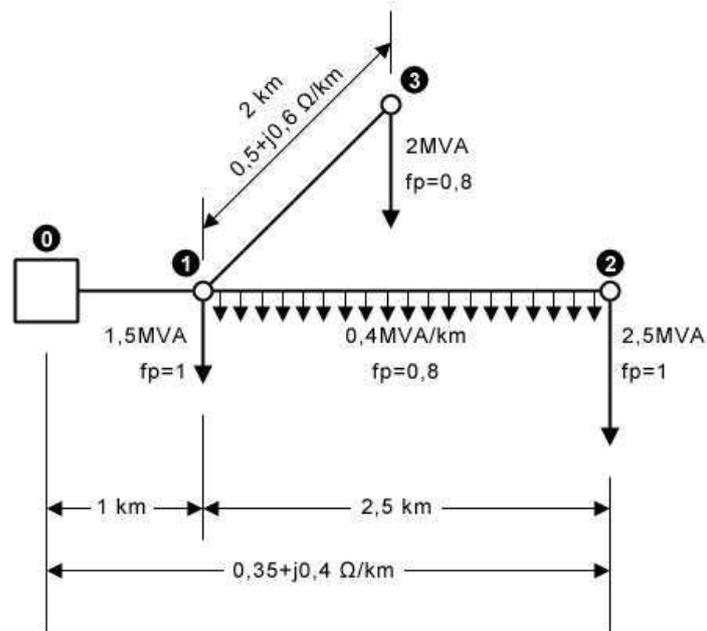


Figura 4.23: Exemplo 4.5

### Solução analítica

$$V_0 = 13,8 \text{ kV}$$

Cálculo dos coeficientes de queda de tensão

$$fp = 1$$

$$Z = 0,35 + j0,40 \text{ } \Omega/\text{km}$$

$$G_1 = \frac{0,35 \cdot 1}{13,8^2} \cdot 100 = 0,184 \text{ } \%/MVA/\text{km}$$

$$fp = 0,8$$

$$G_2 = \frac{0,35 \cdot 0,8 + 0,4 \cdot 0,6}{13,8^2} \cdot 100 = 0,273 \text{ } \%/MVA/\text{km}$$

$$Z = 0,5 + j0,6 \text{ } \Omega/\text{km}$$

$$G_3 = \frac{0,5 \cdot 0,8 + 0,6 \cdot 0,6}{13,8^2} \cdot 100 = 0,399 \text{ } \%/MVA/\text{km}$$

Cálculo da queda de tensão:

- Trecho 0-1

$$\Delta V\% = S1G = [(1,5 + 2,5) \cdot 0,184 + (1 + 2) \cdot 0,273] \cdot 1 = 1,555 \%/MVA/km$$

- Trecho 1-2

$$\Delta V\% = S1G = \left[ (2,5 \cdot 0,184) + \left( \frac{0,4 \cdot 2,5}{2} \cdot 0,273 \right) \right] \cdot 2,5 = 1,4913 \%/MVA/km$$

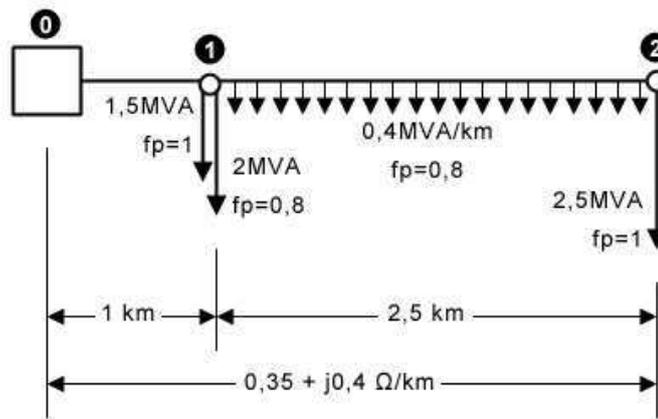


Figura 4.24: Exemplo 4.5 – Trechos 0-1 e 1-2

- Trecho 1-3

$$\Delta V\% = S1G = 2 \cdot 2 \cdot 0,399 = 1,596 \%/MVA/km$$

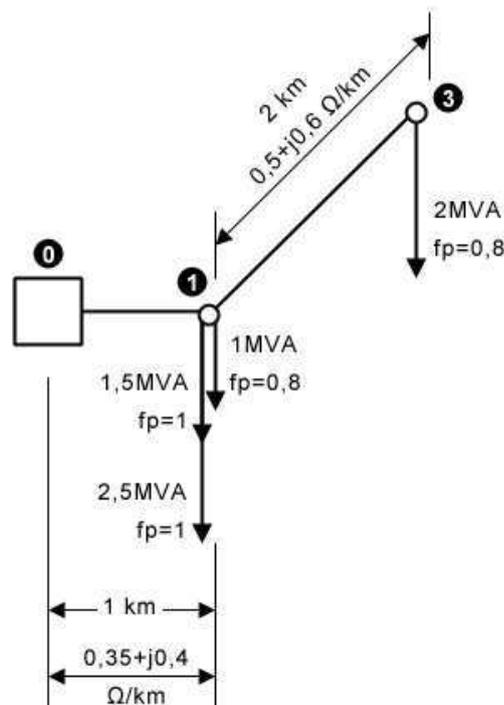


Figura 4.25: Exemplo 4.5 – Trecho 1-3 4.5

Logo, a queda total é:

- Para o trecho 0-1-2:  $\Delta V\% = 1,555 + 1,491 = 3,05 \%$
- Para o trecho 0-1-3:  $\Delta V\% = 1,555 + 1,596 = 3,15 \%$

### Solução usando o módulo de Simulação

Primeiramente começamos observando o circuito do exemplo 4.5 apresentado na Figura 4.23. Este circuito apresenta cargas concentradas e distribuídas com fatores de potência e impedâncias diferentes. Além disto, apresenta um circuito principal (caminho 0-1-2) e um ramo em derivação (caminho 1-3). Para simular este caso devemos utilizar o formulário para cargas especiais. O procedimento de simulação é descrito nas seguintes etapas:

#### TRECHO 0-1

- Cadastre as impedâncias dos cabos (anexo I);
- Clique no botão de comando Simulação Cargas Especiais (Figura 4.6) para iniciar uma nova simulação, a janela de dados da simulação (Figura 4.26) será exibida;

<b>TENSÃO</b> U (kV) 22000		<b>TRECHO</b> De Para km SE 01 0				<b>CARGA</b> Distrib. MVA FP Acum. MVA FP 0 1 0 1				<b>TOTAL</b> Queda Total (%) 0,0000
										+
										-
<b>CONDUTOR</b> Condutor N° AWG 3# CA 1/0 (0,607+j0,451)		<b>QUEDA DE TENSÃO</b> Un.d %/MVA/km Trecho d (%) Un.a %/MVA/km Trecho a (%) 0,1254 0,0000 0,1254 0,0000								

Figura 4.26: Simulação Cargas Especiais

- iii. Selecione a tensão primária (13800);

Figura 4.27: Tensão primária

- iv. Informe o comprimento do trecho (para o trecho 0-1 é 1 km);

Figura 4.28: Comprimento do trecho

- v. Informe as cargas distribuídas e acumuladas para o trecho 0-1. Observe aqui que temos cargas com fatores de potência 0,8 e 1. Inserimos primeiro as cargas de fator de potência 1 ( $1,5 + 2,5 = 4$  MVA);

Figura 4.29: Cargas acumuladas para o trecho 0-1 (fp 1)

- vi. Selecione o tipo de cabo correspondente ao trecho em questão e clique no botão de "mais" para adicionar a carga do trecho à lista de cargas.

Figura 4.30: Seleção do tipo de condutor do trecho 0-1

Antes de clicar no botão OK, devemos repetir as etapas v e vi para inserir as cargas de fator de potência 0,8 [ $(0,4 * 2,5) + 2 = 3$  MVA]. Este procedimento é descrito na etapa seguinte.

- vii. Informamos as cargas distribuídas e acumuladas do trecho 0-1 com fatores de potência 0,8 e 1. Inserimos agora as de fator de potência 0,8;

Figura 4.31: Cargas acumuladas para o trecho 0-1 (fp 0,8)

Após inserir as cargas de fatores de potência diferentes, procede-se a inclusão dos dados no formulário de queda de tensão clicando no botão OK.

The screenshot shows a software interface for calculating voltage drop. It is divided into several sections:

- TENSÃO:** U (kV) set to 13800.
- TRECHO:** De: SE, Para: 01, km: 1.
- CARGA:** Distrib. MVA: 0, FP: 1, Acum. MVA: 3, FP: 0,8.
- TOTAL:** Queda Total (%): 0,8193.
- CONDUTOR:** Condutor N° AWG: 3# CA (0,35+j0,4).
- QUEDA DE TENSÃO:** Un.d %/MVA/km: 0,1838; Trecho d (%): 0,0000; Un.a %/MVA/km: 0,2731; Trecho a (%): 0,8193.

A list of calculations is shown in the center: 1; 0; 1; 4; 1; 0,1838; 0,0000; 0,1838; 0,7352; 0,7352 and 1; 0; 1; 3; 0,8; 0,1838; 0,0000; 0,2731; 0,8193; 0,8193.

Figura 4.32: Cargas para um mesmo trecho com fatores de potência distintos

O valor calculado para o trecho inicial 0-1 é salvo no formulário de queda de tensão como pode ser visto na Figura 4.33 abaixo.

DETALHAMENTO DE TRECHOS									
TRECHO		CARGA			CONDUTORES	QUEDA DE TENSÃO			CORRENTE
DESIGNAÇÃO	COMPRIMENTO	DISTRIBUÍDA NO TRECHO	ACUMULADA NO FIM DO TRECHO	TOTAL <sup>1</sup>		UNITÁRIA	NO TRECHO	TOTAL	NO TRECHO <sup>2</sup>
A	B	C	D	E	F	G	H=ExG	I	J
Primário	km	MVA	MVA	MVA x km	no. AWG	%/MVA/km	%	%	A
SE-01	1,0000	0,0000	7,0000	7,0000	3# CA	0,0000	1,5545	1,5545	

Figura 4.33: Formulário de queda de tensão com cargas do trecho 0-1

## TRECHO 1-2

- i. Informe o comprimento do trecho (para o trecho 1-2 é 2,5 km);

The screenshot shows the 'TRECHO' section of the software interface. It has three input fields: 'De' (01), 'Para' (02), and 'km' (2,5).

Figura 4.34: Comprimento do trecho 1-2

- ii. Informe o valor das cargas distribuída ( $0,4 \times 2,5 = 1$  MVA) e acumulada (2,5 MVA);

CARGA			
Distrib. MVA	FP	Acum. MVA	FP
1	0,8	2,5	1

Figura 4.35: Cargas distribuída e acumulada para o trecho 1-2

- iii. Informe o tipo de condutor (observe que para este caso, não precisamos modificá-lo, pois é o mesmo do trecho anterior);

CONDUTOR
Condutor N° AWG
3# CA (0,35+j0,4)

Figura 4.36: Seleção do tipo de condutor do trecho 1-2

- iv. Adicione a as informações do trecho à lista clicando no botão de mais. Após isto, clique no botão OK para inseri-lo no formulário de queda de tensão;

TENSÃO		TRECHO				CARGA				TOTAL
U (kV)		De	Para	km	Distrib. MVA	FP	Acum. MVA	FP	Queda Total (%)	
13800		01	02	2,5	1	0,8	2,5	1	1,4901	
2,5; 1; 0,8; 2,5; 1; 0,2731; 0,3414; 0,1838; 1,1488; 1,4901										
CONDUTOR		QUEDA DE TENSÃO								
Condutor N° AWG		Un.d %/MVA/km	Trecho d (%)	Un.a %/MVA/km	Trecho a (%)					
3# CA (0,35+j0,4)		0,2731	0,3414	0,1838	1,1488					

Figura 4.37: Cargas para um mesmo trecho com fatores de potência distintos

Ao clicar no botão OK as informações do trecho do circuito serão inseridas no formulário de queda de tensão. A queda de tensão total do trecho (0-1-2) é então atualizada conforme pode-se observar na Figura 4.38.

DETALHAMENTO DE TRECHOS									
TRECHO		CARGA			CONDUTORES	QUEDA DE TENSÃO			CORRENTE
DESIGNAÇÃO	COMPRIMENTO	DISTRIBUÍDA NO TRECHO	ACUMULADA NO FIM DO TRECHO	TOTAL <sup>1</sup>		UNITÁRIA	NO TRECHO	TOTAL	NO TRECHO <sup>2</sup>
A	B	C	D	E	F	G	H=ExG	I	J
Primário	km	MVA	MVA	MVA x km	no. AWG	%/MVA/km	%	%	A
SE-01	1,0000	0,0000	7,0000	7,0000	3# CA	0,0000	1,5545	1,5545	
01-02	2,5000	1,0000	2,5000	7,5000	3# CA	0,0000	1,4902	3,0447	

Figura 4.38: Formulário de queda de tensão com as cargas do trecho 0-1-2

### TRECHO 1-3

Para inserir as informações do trecho 1-3 do circuito, procedemos como o descrito nas etapas i, ii, iii e iv anteriores. O detalhe mais importante aqui é que na etapa i devemos informar um novo caminho "De" e "Para" escolhendo para a lista "De" a opção 01 e para a lista "Para" a opção 03 conforme podemos observar na Figura 4.39 abaixo.

**TRECHO**

De      Para      km

Figura 4.39: Identificação do trecho do circuito

Ao final, devemos ter algo como o mostrado na Figura 4.40 abaixo.

DETALHAMENTO DE TRECHOS									
TRECHO		CARGA			CONDUTORES	QUEDA DE TENSÃO			CORRENTE
DESIGNAÇÃO	COMPRIMENTO	DISTRIBUÍDA NO TRECHO	ACUMULADA NO FIM DO TRECHO	TOTAL <sup>1</sup>		UNITÁRIA	NO TRECHO	TOTAL	NO TRECHO <sup>2</sup>
A	B	C	D	E	F	G	H=ExG	I	J
Primário	km	MVA	MVA	MVA x km	no. AWG	%/MVA/km	%	%	A
SE-01	1,0000	0,0000	7,0000	7,0000	3# CA	0,0000	1,5545	1,5545	
01-02	2,5000	1,0000	2,5000	7,5000	3# CA	0,0000	1,4902	3,0447	
01-03	2,0000	0,0000	2,0000	4,0000	3# CA	0,0000	1,5964	3,1509	

Figura 4.40: Cargas para o trecho 1-3 do circuito do exemplo 2

Da tabela da Figura 4.40 observa-se que a queda de tensão no trecho SE-01-02 é de 3,0447%, e no trecho SE-01-03 é de 3,1509% (1,5545% + 1,5964%) que correspondem aos valores calculados na resolução analítica do problema.

### 4.8 CÁLCULO DE PERDAS DE POTÊNCIA

O módulo de simulação também permite ao usuário calcular as perdas de potência em circuitos com cargas distribuídas e acumuladas ao longo de cada trecho. A planilha "Perdas\_Potencia" (veja Figura 4.1) contém o formulário onde serão inseridas as informações sobre cada trecho do circuito em estudo. Os valores das impedâncias dos cabos, bem como os valores de tensão primária e secundária, necessários para o cálculo do coeficiente de perdas de

potência são as mesmas tabelas usadas na simulação de queda de tensão, (planilha "Simulação").

### Exemplo de Cálculo de Perdas de Potência

Deseja-se calcular as perdas de potência para o exemplo 5.2 de SOUZA, 1997, cap. 5, p. 90, cujo circuito é o mesmo da Figura 4.10:

### Solução analítica

$$V_0 = 13,8 \text{ kV}$$

$$H_1 = H_2 = \frac{0,35}{13,8^2} \times 10^3 = 1,84 \text{ kW/MVA}^2/\text{km}$$

$$H_3 = \frac{0,8}{13,8^2} \times 10^3 = 2,63 \text{ kW/MVA}^2/\text{km}$$

- Trecho 0-1:

$$P = 1,84 \cdot (1,5 + 2,5 + 1 + 2)^2 \cdot 1 = 90,2 \text{ kW}$$

- Trecho 1-2:

$$P = 1,84 \cdot \left( 2,5 + \frac{1}{\sqrt{3}} + 2 \right)^2 \cdot 2,5 = 118,6 \text{ kW}$$

- Trecho 2-3:

$$P_3 = 2,62 \cdot (2)^2 \cdot 2 = 21,01 \text{ kW}$$

Logo, a perda de potência total no trecho é:

$$P = P_1 + P_2 + P_3 = 90,2 + 118,6 + 21,01 = 229,81 \text{ kW}$$

Solução usando o módulo de cálculo de perdas de potência:

- Cadastre as impedâncias dos cabos (veja o anexo I);
- Clique no botão de comando **Perdas de Potência** (Figura 4.6) para iniciar uma nova simulação, a janela de dados da simulação (Figura 4.41) será exibida;

Alimentador	Primário (MT)	
FP	1	
U (kV)	34500	

TRECHO			CARGA		TOTAL
De	Para	km	Distrib. MVA	Acum. MVA	Total MVA/km
SE	01	0	0	0	0,0000

CONDUTOR	PERDAS DE POTÊNCIA		
Condutor N° AWG	kW/MVA <sup>2</sup> /km	No Trecho (kW)	Total (kW)
3# CA 1/0 (0,607+j0,451)	0,5100	0,0000	0

Figura 4.41: Cálculo de Perdas de Potência (Simulação)

- iii. Informe o tipo de Alimentador (Primário MT);
- iv. Informe o Fator de Potência ( $fp = 1$  para o exemplo em questão);
- v. Informe a tensão de alimentação primária (13800 V);
- vi. Informe o comprimento do trecho (para o trecho 0-1 é de 1 km);

TRECHO		
De	Para	km
SE	01	1

Figura 4.42: Comprimento do trecho

- vii. Informe o valor da carga do trecho;

CARGA	
Distrib. MVA	Acum. MVA
0	7

Figura 4.43: Carga total do trecho

- viii. Selecione o tipo de condutor;

CONDUTOR
Condutor N° AWG
3# CA (0,35+j0,4)

Figura 4.44: Condutor do trecho

- ix. Clique no botão OK para confirmar a inserção dos dados na planilha;
- x. Repita os passos vi, vii, viii e iv para inserir os dados dos demais trechos do circuito;

Alimentador	Primário (MT)	
FP	1	
U (kV)	13800	
<b>TRECHO</b>		
De	Para	km
01	02	2,5
<b>CONDUTOR</b>		
Condutor N° AWG		
3# CA (0,35+j0,4)		
<b>CARGA</b>		
Distrib. MVA	Acum. MVA	
1	4,5	
<b>TOTAL</b>		
Total MVA/km		
25,7795		
<b>PERDAS DE POTÊNCIA</b>		
kW/MVA <sup>2</sup> /km	No Trecho (kW)	Total (kW)
1,8378	118,4439	0

Figura 4.45: Dados do trecho 01-02 circuito

Alimentador	Primário (MT)	
FP	1	
U (kV)	13800	
<b>TRECHO</b>		
De	Para	km
02	03	2
<b>CONDUTOR</b>		
Condutor N° AWG		
3# CA (0,5+j0,6)		
<b>CARGA</b>		
Distrib. MVA	Acum. MVA	
0	2	
<b>TOTAL</b>		
Total MVA/km		
4,0000		
<b>PERDAS DE POTÊNCIA</b>		
kW/MVA <sup>2</sup> /km	No Trecho (kW)	Total (kW)
2,6255	21,0040	0

Figura 4.46: Dados do trecho 02-03 circuito

A planilha resultante do cálculo das perdas é apresentada a seguir:

DETALHAMENTO DE PERDAS DE POTÊNCIA POR TRECHO								
TRECHO		CARGA			CONDUTORES	PERDAS DE POTÊNCIA		
DESIGNAÇÃO	COMPRI-MENTO	DISTRIBUÍDA NO TRECHO	ACUMULADA NO FIM DO TRECHO	TOTAL <sup>1</sup>		UNITÁRIA	NO TRECHO	TOTAL
A	B	C	D	E	F	G	H=ExG	I
Primário	km	MVA	MVA	MVA x km	no. AWG	kW/MVA <sup>2</sup> /km	kW	kW
SE-01	1,0000	0,0000	7,0000	49,0000	3# CA	1,8378	90,0522	90,0522
01-02	2,5000	1,0000	4,5000	25,7795	3# CA	1,8378	118,4439	208,4961
02-03	2,0000	0,0000	2,0000	4,0000	3# CA	2,6255	21,0040	229,5001

Figura 4.47: Planilha de perdas de potência do exemplo 4.4

#### 4.9 SALVAR/IMPRIMIR A PLANILHA DE QUEDA DE TENSÃO

Para salvar a planilha de queda de tensão basta clicar no ícone "Salvar Planilha" (Figura 4.5) para os circuitos baseados na norma NDU006 ou clicar no ícone "Exportar Planilha" (Figura 4.6) para salvar a planilha de simulação em uma pasta de trabalho separada. Os arquivos seguem o padrão do Windows para nomenclatura. Para imprimir uma planilha gerada com base na norma NDU006, basta clicar no ícone "Imprimir Planilha" (Figura 4.7).

Será exibida uma janela como a da Figura 4.48, abaixo. Escolha para qual tipo de projeto deseja uma impressão clicando no botão correspondente.

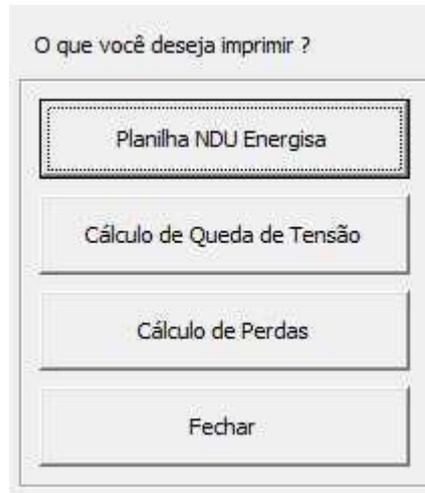


Figura 4.48: Impressão de planilha

Se houver alguma planilha gerada (algum circuito informado, ou em andamento) uma janela de seleção de impressora será exibida, caso contrário uma mensagem de erro será apresentada ao usuário.

## 5 ESTUDOS DE CASO

Serão apresentados agora alguns estudos de casos que objetivam comparar os resultados obtidos analiticamente e os resultados obtidos por meio da planilha de cálculo de queda de tensão e perdas. Inicialmente serão analisados alguns casos de quedas de tensão e posteriormente, casos de perdas de potência.

### 5.1 CÁLCULO DE QUEDA DE TENSÃO

Exemplo 4.1 (SOUZA, 1997, cap. 4, p. 54)

$$l = 10 \text{ km}$$

$$Z = 0,607 + j0,451 \Omega/\text{km} \quad (\text{CA } 1/0)$$

$$S = 1,2 \text{ MVA}$$

$$\text{fp} = 0,9$$

$$V_0 = 13,8 \text{ kV}$$

#### Solução analítica

$$\cos \varphi = 0,9 \rightarrow \varphi = \cos^{-1} 0,9 = 25,8^\circ$$

$$\sin \varphi = \sin 25,8^\circ = 0,436$$

Cálculo do coeficiente de queda de tensão  $G$  :

$$G = \frac{r \cos \varphi + x \sin \varphi}{V_0^2} \cdot 10^3 = \frac{0,607 \cdot 0,9 + 0,451 \cdot 0,436}{13,8^2} \cdot 10^3 = 0,390 \%/\text{MVA}/\text{km}$$

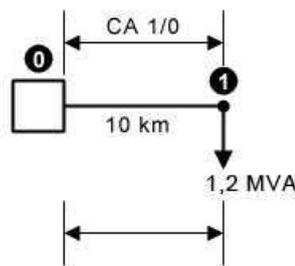


Figura 5.1: Exemplo 4.1

$$\Delta V\% = S1G = 1,2 \cdot 10 \cdot 0,39 = 4,68 \%$$

Logo, a tensão no fim do alimentador será de:  $13,8 - (13,8 \cdot 0,0468) = 13,1542 \text{ kV}$ .

### Solução usando o módulo de Simulação

DETALHAMENTO DE TRECHOS									
TRECHO		CARGA			CONDUTORES	QUEDA DE TENSÃO			CORRENTE
DESIGNAÇÃO	COMPRIMENTO	DISTRIBUÍDA	ACUMULADA NO	TOTAL <sup>1</sup>		UNITÁRIA	NO TRECHO	TOTAL	NO TRECHO <sup>2</sup>
A	B	C	D	E	F	G	H=ExG	I	J
Primário	km	MVA	MVA	MVA x km	no. AWG	%/MVA/km	%	%	A
SE-01	10,0000	0,0000	1,2000	12,0000	3# CA 1/0	0,3901	4,6812	4,6812	

Figura 5.2: Planilha do exemplo 4.1

Exemplo 4.2 (SOUZA, 1997, cap. 4, p. 58)

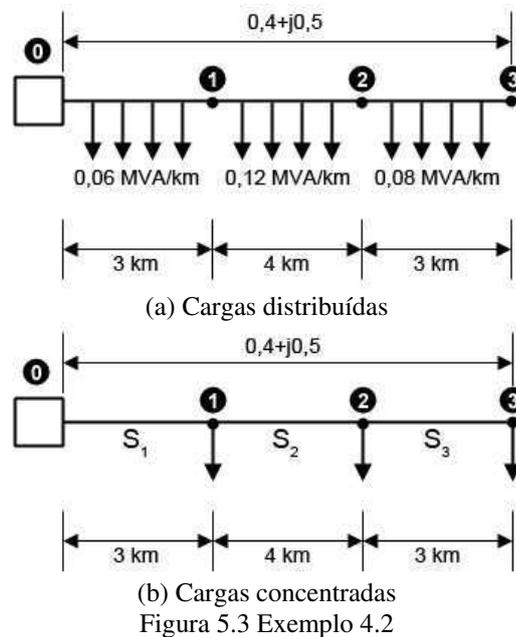


Figura 5.3 Exemplo 4.2

### Solução analítica

$$V_0 = 13,8 \text{ kV}$$

$$\cos\phi = 0,8$$

$$\sin\phi = 0,6$$

Cálculo do coeficiente de queda de tensão  $G$  :

$$G = \frac{r\cos\phi + x\sin\phi}{V_0^2} \cdot 10^3 = \frac{0,4 \cdot 0,8 + 0,5 \cdot 0,6}{13,8^2} \cdot 10^3 = 0,3256 \text{ \%/MVA/km}$$

As respectivas cargas retangulares são:

$$S_1 = 0,06 \cdot 3 = 0,18 \text{ MVA}$$

$$S_2 = 0,12 \cdot 4 = 0,48 \text{ MVA}$$

$$S_3 = 0,08 \cdot 3 = 0,24 \text{ MVA}$$

- Trecho 2-3:

$$\Delta V\% = \left( \frac{0,24}{2} \right) \cdot 3 \cdot 0,3256 = 0,1172 \%$$

- Trecho 1-2:

$$\Delta V\% = \left( \frac{0,48}{2} + 0,24 \right) \cdot 4 \cdot 0,3256 = 0,6252 \%$$

- Trecho 0-1:

$$\Delta V\% = \left( \frac{0,18}{2} + 0,48 + 0,24 \right) \cdot 3 \cdot 0,3256 = 0,7912 \%$$

A queda total é:

$$\Delta V\% = 0,7912 \% + 0,6252 \% + 0,1172 \% = 1,5336 \%$$

O que dá uma queda de tensão no final do trecho de:  $13,8 \cdot 0,015336 = 0,2116 \text{ kV}$

### Solução usando o módulo de Simulação

DETALHAMENTO DE TRECHOS									
TRECHO		CARGA			CONDUTORES	QUEDA DE TENSÃO			CORRENTE
DESIGNAÇÃO	COMPRIMENTO	DISTRIBUÍDA	ACUMULADA NO	TOTAL <sup>1</sup>		UNITÁRIA	NO TRECHO	TOTAL	NO TRECHO <sup>2</sup>
A	B	C	D	E	F	G	H=ExG	I	J
Primário	km	MVA	MVA	MVA x km	no. AWG	%/MVA/km	%	%	A
SE-01	3,0000	0,1800	0,7200	2,4300	3# CA	0,3256	0,7912	0,7912	
01-02	4,0000	0,4800	0,2400	1,9200	3# CA	0,3256	0,6252	1,4164	
02-03	3,0000	0,2400	0,0000	0,3600	3# CA	0,3256	0,1172	1,5336	

Figura 5.4: Planilha do exemplo

Exemplo 4.4 (SOUZA, 1997, cap. 4, p. 62)

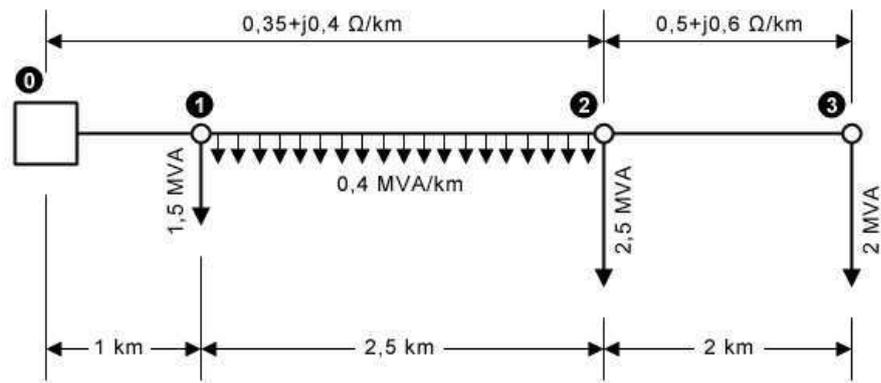


Figura 5.5: Exemplo 4.4

### Solução analítica

$$V_0 = 13,8 \text{ kV}$$

$$fp = 0,8$$

$$Z_1 = 0,35 + j0,40 \text{ } \Omega/\text{km}$$

$$Z_2 = 0,50 + j0,60 \text{ } \Omega/\text{km}$$

Cálculo dos coeficientes de queda de tensão:

$$G_1 = G_2 = \frac{0,35 \cdot 0,8 + 0,4 \cdot 0,6}{13,8^2} \cdot 10^2 = 0,2731 \text{ } \%/ \text{MVA}/\text{km}$$

$$G_3 = \frac{0,5 \cdot 0,8 + 0,6 \cdot 0,6}{13,8^2} \cdot 10^2 = 0,3991 \text{ } \%/ \text{MVA}/\text{km}$$

Cálculo da queda de tensão:

- Trecho 2-3

$$\Delta V\% = S1G = 2 \cdot 2 \cdot 0,3991 = 1,5964 \text{ } \%/ \text{MVA}/\text{km}$$

- Trecho 1-2

$$\Delta V\% = S1G = \left[ \frac{(0,4 \cdot 2,5)}{2} + 2,5 + 2 \right] \cdot 2,5 \cdot 0,2731 = 3,4138 \text{ } \%/ \text{MVA}/\text{km}$$

- Trecho 0-1

$$\Delta V\% = S1G = [1,5 + (0,4 \cdot 2,5) + 2,5 + 2] \cdot 1 \cdot 0,2731 = 1,9117 \text{ \%}/\text{MVA}/\text{km}$$

Logo, a queda total é:  $\Delta V\% = 1,9117 + 3,4138 + 1,5964 = 6,9219 \text{ \%}$

### Solução usando o módulo de Simulação

DETALHAMENTO DE TRECHOS									
TRECHO		CARGA			CONDUTORES	QUEDA DE TENSÃO			CORRENTE
DESIGNAÇÃO	COMPRIMENTO	DISTRIBUÍDA	ACUMULADA NO	TOTAL <sup>1</sup>		UNITÁRIA	NO TRECHO	TOTAL	NO TRECHO <sup>2</sup>
A	B	C	D	E	F	G	H=ExG	I	J
Primário	km	MVA	MVA	MVA x km	no. AWG	%/MVA/km	%	%	A
SE-01	1,0000	0,0000	7,0000	7,0000	3# CA	0,2731	1,9117	1,9117	
01-02	2,5000	1,0000	4,5000	12,5000	3# CA	0,2731	3,4138	5,3255	
02-03	2,0000	0,0000	2,0000	4,0000	3# CA	0,3991	1,5964	6,9219	

Figura 5.6: Planilha do exemplo 4.4

Exemplo 4.5 (SOUZA, 1997, cap. 4, p. 67)

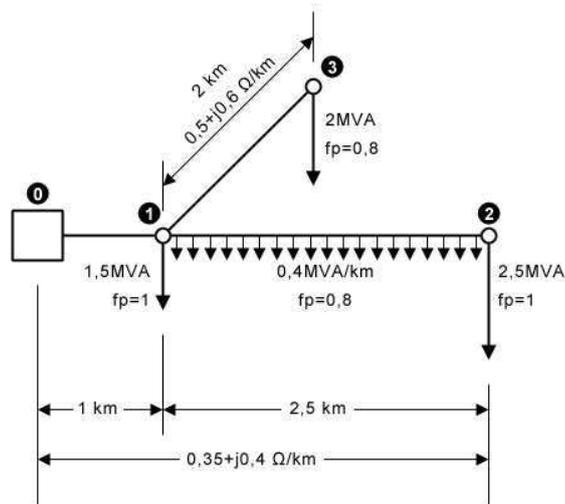


Figura 5.7: Exemplo 4.5

### Solução analítica

$$V_0 = 13,8 \text{ kV}$$

Cálculo dos coeficientes de queda de tensão

$$fp = 1$$

$$Z = 0,35 + j0,40 \text{ } \Omega/\text{km}$$

$$G_1 = \frac{0,35 \cdot 1}{13,8^2} \cdot 100 = 0,184 \text{ \%}/\text{MVA}/\text{km}$$

$$fp = 0,8$$

$$G_2 = \frac{0,35 \cdot 0,8 + 0,4 \cdot 0,6}{13,8^2} \cdot 100 = 0,273 \text{ \%}/\text{MVA}/\text{km}$$

$$Z = 0,5 + j0,6 \Omega/\text{km}$$

$$G_3 = \frac{0,5 \cdot 0,8 + 0,6 \cdot 0,6}{13,8^2} \cdot 100 = 0,399 \text{ \%/MVA/km}$$

Cálculo da queda de tensão:

- Trecho 0-1

$$\Delta V\% = S1G = [(1,5 + 2,5) \cdot 0,184 + (1 + 2) \cdot 0,273] \cdot 1 = 1,555 \text{ \%/MVA/km}$$

- Trecho 1-2

$$\Delta V\% = S1G = \left[ (2,5 \cdot 0,184) + \left( \frac{0,4 \cdot 2,5}{2} \cdot 0,273 \right) \right] \cdot 2,5 = 1,4913 \text{ \%/MVA/km}$$

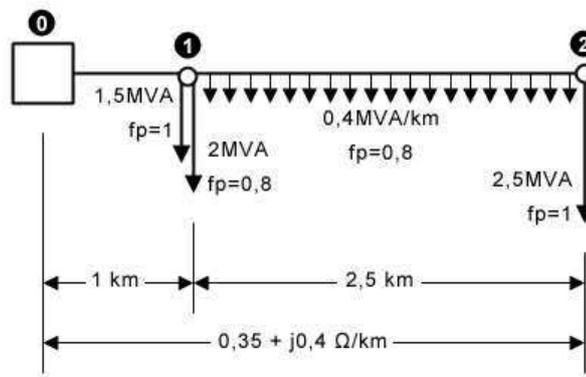


Figura 5.8: Exemplo 4.5 – Trechos 0-1 e 1-2

- Trecho 1-3

$$\Delta V\% = S1G = 2 \cdot 2 \cdot 0,399 = 1,596 \text{ \%/MVA/km}$$

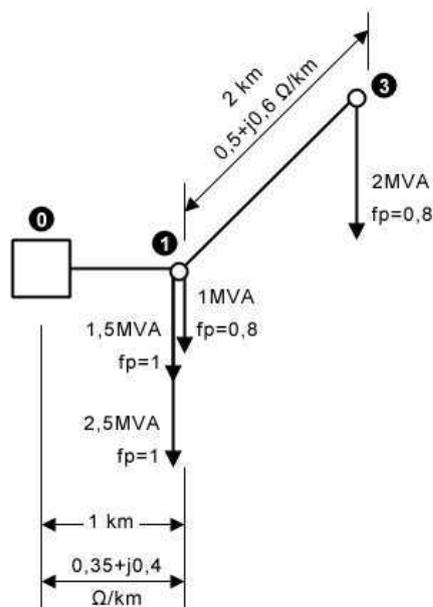


Figura 5.9: Exemplo 4.5 – Trecho 1-3

Logo, a queda total é:

- Para o trecho 0-1-2:  $\Delta V\% = 1,555 + 1,491 = 3,05 \%$
- Para o trecho 0-1-3:  $\Delta V\% = 1,555 + 1,596 = 3,15 \%$

### Solução usando o módulo de Simulação

DETALHAMENTO DE TRECHOS									
TRECHO		CARGA			CONDUTORES	QUEDA DE TENSÃO			CORRENTE NO TRECHO <sup>2</sup>
DESIGNAÇÃO	COMPRIMENTO	DISTRIBUÍDA	ACUMULADA NO	TOTAL <sup>1</sup>		UNITÁRIA	NO TRECHO	TOTAL	
A	B	C	D	E	F	G	H=ExG	I	J
Primário	km	MVA	MVA	MVA x km	no. AWG	%/MVA/km	%	%	A
SE-01	1,0000	0,0000	7,0000	7,0000	3# CA	0,0000	1,5545	1,5545	
01-02	2,5000	1,0000	2,5000	7,5000	3# CA	0,0000	1,4902	3,0447	
01-03	2,0000	0,0000	2,0000	4,0000	3# CA	0,0000	1,5964	3,1509	

Figura 5.10: Planilha do exemplo 4.5

Exemplo 4.9 (SOUZA, 1997, cap. 4, p. 77)

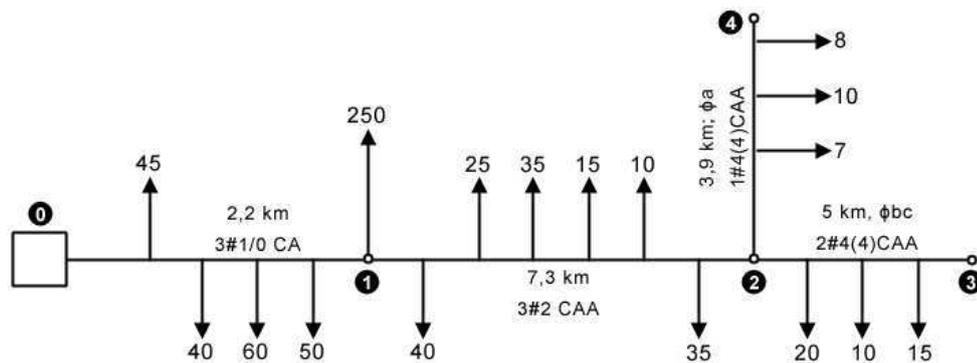


Figura 5.11: Exemplo 4.9

### Solução analítica

$$V_0 = 13,8 \text{ kV}$$

Cálculo dos coeficientes de queda de tensão

$$f_p = 0,8$$

$$Z_{0-1} = 0,607 + j0,451 \Omega/\text{km}$$

$$G_{0-1} = \frac{0,607 \cdot 0,8 + 0,451 \cdot 0,6}{13,8^2} \cdot 100 = 0,397 \text{ \%/MVA/km}$$

$$Z_{1-2} = 1,054 + j0,526 \Omega/\text{km}$$

$$G_{1-2} = \frac{1,054 \cdot 0,8 + 0,526 \cdot 0,6}{13,8^2} \cdot 100 = 0,608 \text{ \%/MVA/km}$$

$$Z_{2-3} = 1,603 + j0,546 \Omega/\text{km}$$

$$G_{2-3} = \frac{3 \cdot 1,603 \cdot [0,8 + \cos(23,1^\circ)] + 0,546 \cdot [0,6 - \sin(23,1^\circ)]}{2 \cdot 13,8^2} \cdot 100 = 2,26 \text{ \%}/\text{MVA}/\text{km}$$

$$Z_{2-4} = 1,603 + j0,546 \Omega/\text{km}$$

$$G_{2-4} = 6 \cdot \frac{1,603 \cdot 0,8 + 0,546 \cdot 0,6}{13,8^2} \cdot 100 = 5,072 \text{ \%}/\text{MVA}/\text{km}$$

Cálculo da queda de tensão:

- Trecho 0-1

$$\Delta V\% = \text{SIG} = \left[ \left( \frac{0,045 + 0,040 + 0,060 + 0,050}{2} \right) + 0,480 \right] \cdot 2,2 \cdot 0,397 = 0,504 \text{ \%}$$

- Trecho 1-2

$$\Delta V\% = \text{SIG} = \left[ \left( \frac{0,04 + 0,025 + 0,035 + 0,015 + 0,010 + 0,035}{2} \right) + 0,070 \right] \cdot 7,3 \cdot 0,608 = 0,6658 \text{ \%}$$

- Trecho 2-3

$$\Delta V\% = \text{SIG} = \left( \frac{0,020 + 0,010 + 0,015}{2} \right) \cdot 5 \cdot 2,26 = 0,2543 \text{ \%}$$

- Trecho 2-4

$$\Delta V\% = \text{SIG} = \left( \frac{0,007 + 0,010 + 0,008}{2} \right) \cdot 3,9 \cdot 5,072 = 0,2473 \text{ \%}$$

Logo, a queda total é:

- Para o trecho 0-1-2-3:  $\Delta V\% = 0,504 + 0,6658 + 0,2543 = 1,4241 \text{ \%}$
- Para o trecho 0-1-2-4:  $\Delta V\% = 0,504 + 0,6658 + 0,2473 = 1,4171 \text{ \%}$

**Solução usando o módulo de Simulação**

DETALHAMENTO DE TRECHOS									
TRECHO		CARGA			CONDUTORES	QUEDA DE TENSÃO			CORRENTE
DESIGNAÇÃO	COMPRIMENTO	DISTRIBUÍDA	ACUMULADA NO	TOTAL <sup>1</sup>		UNITÁRIA	NO TRECHO	TOTAL	NO TRECHO <sup>2</sup>
A	B	C	D	E	F	G	H=ExG	I	J
Primário	km	MVA	MVA	MVA x km	no. AWG	%/MVA/km	%	%	A
SE-01	2.2000	0.1950	0.4800	1.2705	3# CA 1/0	0.5971	0.5045	0.5045	
01-02	7.3000	0.1600	0.0700	1.0950	3# CAA 2	0.6085	0.6663	1.1708	
02-03	5.0000	0.0450	0.0000	0.1125	2# CAA 4	2.2603	0.2543	1.4251	
02-04	3.9000	0.0250	0.0000	0.0488	1# CAA 4	5.0725	0.2475	1.4183	

Figura 5.12: Planilha do exemplo 4.9

Exercício 4.3 (SOUZA, 1997, cap. 4, p. 79)

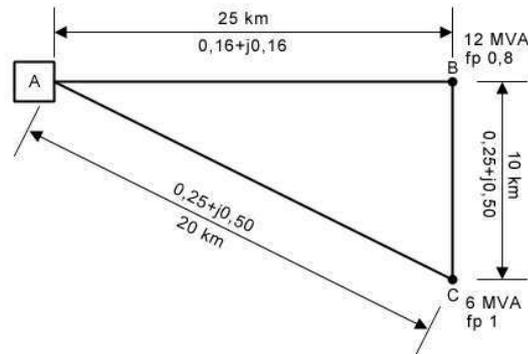


Figura 5.13: Exercício 4.3

### Solução analítica

$$V_0 = 34,5 \text{ kV}$$

Cálculo dos coeficientes de queda de tensão

$$fp = 0,8$$

$$Z_{A-B} = 0,16 + j0,16 \text{ } \Omega/\text{km}$$

$$G_{A-B} = \frac{0,8 \cdot 0,16 + 0,6 \cdot 0,16}{34,5^2} \cdot 100 = 0,01882 \text{ } \%/MVA/\text{km}$$

$$fp = 1$$

$$Z_{A-C} = 0,25 + j0,50 \text{ } \Omega/\text{km}$$

$$Z_{B-C} = 0,25 + j0,50 \text{ } \Omega/\text{km}$$

$$G_{A-C} = G_{B-C} = \frac{1 \cdot 0,25}{34,5^2} \cdot 100 = 0,021 \text{ } \%/MVA/\text{km}$$

Cálculo da queda de tensão:

- Linha B – C desenergizada

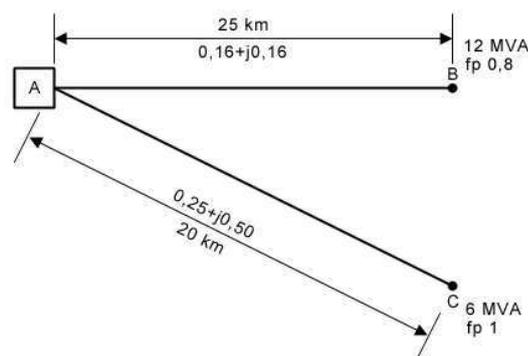


Figura 5.14: Exercício 4.3a

Trecho A – B:  $\Delta V\% = S1G = 12 \cdot 25 \cdot 0,01882 = 5,646 \%$

Trecho A – C:  $\Delta V\% = S1G = 6 \cdot 20 \cdot 0,021 = 2,52 \%$

### Solução usando o módulo de Simulação

DETALHAMENTO DE TRECHOS									
TRECHO		CARGA			CONDUTORES	QUEDA DE TENSÃO			CORRENTE NO TRECHO <sup>2</sup>
DESIGNAÇÃO	COMPRIMENTO	DISTRIBUÍDA	ACUMULADA NO	TOTAL <sup>1</sup>		UNITÁRIA	NO TRECHO	TOTAL	
A	B	C	D	E	F	G	H=ExG	I	J
Primário	km	MVA	MVA	MVA x km	no. AWG	%/MVA/km	%	%	A
SE-01	25,0000	0,0000	12,0000	300,0000	3# CA	0,0188	5,6400	5,6400	
SE-02	20,0000	0,0000	6,0000	120,0000	3# CA	0,0210	2,5200	2,5200	

Figura 5.15: Planilha do exercício 4.3

- Linha A – C desenergizada

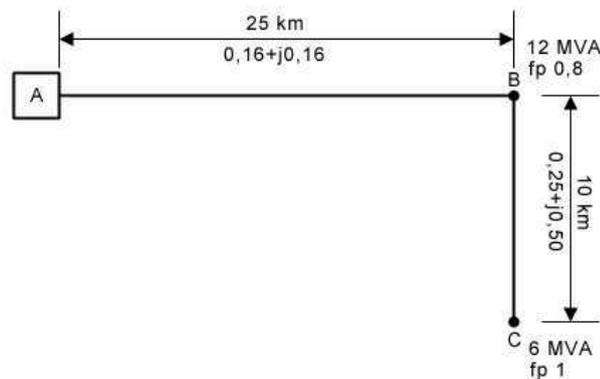


Figura 5.16: Exercício 4.3b

$$G_{BC} = \frac{0,16 \cdot 1 + 0,16 \cdot 0}{34,5^2} \times 100^2 = 0,0134 \text{ \%/MVA/km}$$

Trecho A – B:  $\Delta V\% = S1G = (12 \cdot 0,01882 + 6 \cdot 0,0134) \cdot 25 = 7,65 \%$

Trecho B – C:  $\Delta V\% = S1G = 6 \cdot 10 \cdot 0,021 = 1,26 \%$

Logo, a queda total é:  $\Delta V\% = 7,65 + 1,26 = 8,91 \%$

### Solução usando o módulo de Simulação

DETALHAMENTO DE TRECHOS									
TRECHO		CARGA			CONDUTORES	QUEDA DE TENSÃO			CORRENTE
DESIGNAÇÃO	COMPRIMENTO	DISTRIBUÍDA NO TRECHO	ACUMULADA NO FIM DO TRECHO	TOTAL <sup>1</sup>		UNITÁRIA	NO TRECHO	TOTAL	
A	B	C	D	E	F	G	H=ExG	I	J
Primário	km	MVA	MVA	MVA x km	no. AWG	%/MVA/km	%	%	A
SE-01	25,0000	0,0000	18,0000	450,0000	3# CA	0,0000	7,6500	7,6500	
01-02	10,0000	0,0000	6,0000	60,0000	3# CA	0,0000	1,2600	8,9100	

Figura 5.17: Planilha do exercício 4.3

Exercício 4.6 (SOUZA, 1997, cap. 4, p. 80)

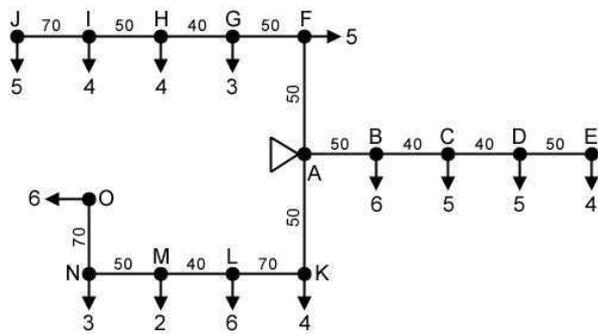


Figura 5.18: Exercício 4.6

### Solução analítica

$$V_0 = 380/220 \text{ V}$$

Cálculo dos coeficientes de queda de tensão

$$fp = 0,8$$

$$Z = 1,53 + j0,34 \text{ } \Omega/\text{km}$$

$$G = \frac{0,8 \cdot 1,53 + 0,6 \cdot 0,34}{380^2} \cdot 10^5 = 0,9889 \text{ } \%/kVA/\text{km}$$

- Trecho  $A - E$

$$\Delta V\% = S1G = (20 \cdot 0,05 \cdot 0,9889) + (14 \cdot 0,04 \cdot 0,9889) + (9 \cdot 0,04 \cdot 0,9889) + (4 \cdot 0,05 \cdot 0,9889)$$

$$\Delta V\% = 0,9889 + 0,5538 + 0,356 + 0,1978 = 2,0965 \text{ } \%$$

- Trecho  $A - O$

$$\Delta V\% = S1G = (21 \cdot 0,05 \cdot 0,9889) + (17 \cdot 0,07 \cdot 0,9889) + (11 \cdot 0,04 \cdot 0,9889) + (9 \cdot 0,05 \cdot 0,9889) + (6 \cdot 0,07 \cdot 0,9889)$$

$$\Delta V\% = 1,038 + 1,1768 + 0,435 + 0,445 + 0,415 = 3,5098 \text{ } \%$$

- Trecho  $A - J$

$$\Delta V\% = S1G = (21 \cdot 0,05 \cdot 0,9889) + (16 \cdot 0,05 \cdot 0,9889) + (13 \cdot 0,04 \cdot 0,9889) + (9 \cdot 0,05 \cdot 0,9889) + (5 \cdot 0,07 \cdot 0,9889)$$

$$\Delta V\% = 1,0383 + 0,7911 + 0,5142 + 0,4450 + 0,3461 = 3,1347 \text{ } \%$$

## Solução usando o módulo de Simulação

DETALHAMENTO DE TRECHOS									
TRECHO		CARGA			CONDUTORES	QUEDA DE TENSÃO			CORRENTE
DESIGNAÇÃO	COMPRIMENTO	DISTRIBUÍDA NO TRECHO	ACUMULADA NO FIM DO TRECHO	TOTAL <sup>1</sup>		UNITÁRIA	NO TRECHO	TOTAL	NO TRECHO <sup>2</sup>
A	B	C	D	E	F	G	H=ExG	I	J
Secundário	km	kVA	kVA	kVA x km	no. AWG	%/kVA/km	%	%	A
SE-01	0,0500	0,0000	20,0000	1,0000	3# CA	0,9889	0,9889	0,9889	
01-02	0,0400	0,0000	14,0000	0,5600	3# CA	0,9889	0,5538	1,5427	
02-03	0,0400	0,0000	9,0000	0,3600	3# CA	0,9889	0,3560	1,8987	
03-04	0,0500	0,0000	4,0000	0,2000	3# CA	0,9889	0,1978	2,0965	
SE-05	0,0500	0,0000	21,0000	1,0500	3# CA	0,9889	1,0383	1,0383	
05-06	0,0700	0,0000	17,0000	1,1900	3# CA	0,9889	1,1768	2,2151	
06-07	0,0400	0,0000	11,0000	0,4400	3# CA	0,9889	0,4351	2,6502	
07-08	0,0500	0,0000	9,0000	0,4500	3# CA	0,9889	0,4450	3,0952	
08-09	0,0700	0,0000	6,0000	0,4200	3# CA	0,9889	0,4153	3,5105	
SE-10	0,0500	0,0000	21,0000	1,0500	3# CA	0,9889	1,0383	1,0383	
10-11	0,0500	0,0000	16,0000	0,8000	3# CA	0,9889	0,7911	1,8294	
11-12	0,0400	0,0000	13,0000	0,5200	3# CA	0,9889	0,5142	2,3436	
12-13	0,0500	0,0000	9,0000	0,4500	3# CA	0,9889	0,4450	2,7886	
13-14	0,0700	0,0000	5,0000	0,3500	3# CA	0,9889	0,3461	3,1347	

Figura 5.19: Planilha do exercício 4.6

Exercício 4.8 (SOUZA, 1997, cap. 4, p. 80)

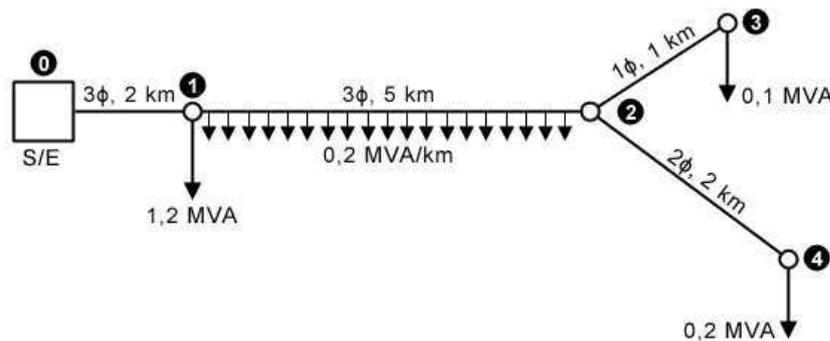


Figura 5.20: Exercício 4.8

## Solução analítica

$$V_0 = 13,8 \text{ kV}$$

Cálculo dos coeficientes de queda de tensão

$$fp = 0,8$$

$$Z = 0,65 + j0,34 \text{ } \Omega/\text{km}$$

$$\varphi = \cos^{-1} 0,8 = 36,87^\circ$$

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{0,34}{0,65} \right) = 27,61^\circ$$

$$G_{3\varphi} = \frac{0,8 \cdot 0,65 + 0,6 \cdot 0,34}{13,8^2} \cdot 100 = 0,3802 \text{ } \%/ \text{MVA}/\text{km}$$

$$G_{2\phi} = \frac{3 \cdot 0,65 \cdot [0,8 + 0,9198] + 0,34 \cdot [0,6 - 0,3923]}{2 \cdot 13,8^2} \cdot 100 = 0,9361 \%/\text{MVA}/\text{km}$$

$$G_{1\phi} = 6 \cdot \frac{0,8 \cdot 0,65 + 0,6 \cdot 0,34}{13,8^2} \cdot 100 = 2,2810 \%/\text{MVA}/\text{km}$$

- Trecho 0-1

$$\Delta V\% = S1G = (1,2 + 1 + 0,2 + 0,1) \cdot 0,3802 \cdot 2 = 1,9010 \%$$

- Trecho 1-2

$$\Delta V\% = S1G = \left( \frac{0,2 \cdot 5}{2} + 0,2 + 0,1 \right) \cdot 0,3802 \cdot 5 = 1,5208 \%$$

- Trecho 2-3

$$\Delta V\% = S1G = 0,1 \cdot 1 \cdot 2,2810 = 0,2281 \%$$

- Trecho 2-4

$$\Delta V\% = S1G = 0,2 \cdot 2 \cdot 0,9361 = 0,3744 \%$$

Logo, a queda total é:

- Trecho 0-1-2-3:  $\Delta V\% = 1,9010 + 1,5208 + 0,2281 = 3,6499 \%$
- Trecho 0-1-2-3:  $\Delta V\% = 1,9010 + 1,5208 + 0,3744 = 3,7962 \%$

### Solução usando o módulo de Simulação

DETALHAMENTO DE TRECHOS									
TRECHO		CARGA			CONDUTORES	QUEDA DE TENSÃO			CORRENTE
DESIGNAÇÃO	COMPRIMENTO	DISTRIBUÍDA	ACUMULADA NO	TOTAL <sup>1</sup>		UNITÁRIA	NO TRECHO	TOTAL	NO TRECHO <sup>2</sup>
A	B	C	D	E	F	G	H=ExG	I	J
Primário	km	MVA	MVA	MVA x km	no. AWG	%/MVA/km	%	%	A
SE-01	2,0000	0,0000	2,5000	5,0000	3# CA	0,3802	1,9010	1,9010	
01-02	5,0000	1,0000	0,3000	4,0000	3# CA	0,3802	1,5208	3,4218	
02-03	1,0000	0,0000	0,1000	0,1000	1# CA	2,2810	0,2281	3,6499	
02-04	2,0000	0,0000	0,2000	0,4000	2# CA	0,9359	0,3744	3,7962	

Figura 5.21: Planilha do exercício 4.8

Exercício 4.9 (SOUZA, 1997, cap. 4, p. 80)

### Solução analítica

$$V_0 = 13,8 \text{ kV}$$

Cálculo dos coeficientes de queda de tensão

$$fp_1 = 0,8$$

$$Z = 0,65 + j0,34 \Omega/\text{km}$$

$$\varphi_1 = \cos^{-1} 0,8 = 36,87^\circ$$

$$fp_2 = 0,5$$

$$\varphi_2 = \cos^{-1} 0,5 = 60^\circ$$

$$\sin \varphi_2 = 0,866$$

$$G_{3\varphi}^1 = \frac{0,8 \cdot 0,65 + 0,6 \cdot 0,34}{13,8^2} \cdot 100 = 0,3802 \text{ \%/MVA/km}$$

$$G_{3\varphi}^2 = \frac{0,5 \cdot 0,65 + 0,866 \cdot 0,34}{13,8^2} \cdot 100 = 0,3253 \text{ \%/MVA/km}$$

$$G_{2\varphi} = \frac{3}{2} \frac{0,65 \cdot [0,8 + 0,9198] + 0,34 \cdot [0,6 - 0,3923]}{13,8^2} \cdot 100 = 0,9361 \text{ \%/MVA/km}$$

$$G_{1\varphi} = 6 \cdot \frac{0,8 \cdot 0,65 + 0,6 \cdot 0,34}{13,8^2} \cdot 100 = 2,2810 \text{ \%/MVA/km}$$

- Trecho 0-1

$$\Delta V\% = S1G = [(1,2) \cdot 0,3253 + (1 + 0,2 + 0,1) \cdot 0,3802] \cdot 2 = 1,7692 \%$$

- Trecho 1-2

$$\Delta V\% = S1G = \left( \frac{0,2 \cdot 5}{2} + 0,2 + 0,1 \right) \cdot 0,3802 \cdot 5 = 1,5208 \%$$

- Trecho 2-3

$$\Delta V\% = S1G = 0,1 \cdot 1 \cdot 2,2810 = 0,2281 \%$$

- Trecho 2-4

$$\Delta V\% = S1G = 0,2 \cdot 2 \cdot 0,9361 = 0,3744 \%$$

Logo, a queda total é:

- Trecho 0-1-2-3:  $\Delta V\% = 1,7692 + 1,5208 + 0,2281 = 3,5181 \%$
- Trecho 0-1-2-3:  $\Delta V\% = 1,7652 + 1,5208 + 0,3744 = 3,6644 \%$

### Solução usando o módulo de Simulação

DETALHAMENTO DE TRECHOS									
TRECHO		CARGA			CONDUTORES	QUEDA DE TENSÃO			CORRENTE
DESIGNAÇÃO	COMPRIMENTO	DISTRIBUÍDA	ACUMULADA NO	TOTAL <sup>1</sup>		UNITÁRIA	NO TRECHO	TOTAL	NO TRECHO <sup>2</sup>
A	B	C	D	E	F	G	H=ExG	I	J
Primário	km	MVA	MVA	MVA x km	no. AWG	%/MVA/km	%	%	A
SE-01	2,0000	0,0000	2,5000	5,0000	3# CA	0,0000	1,7692	1,7692	
01-02	5,0000	1,0000	0,3000	4,0000	3# CA	0,0000	1,5208	3,2900	
02-03	1,0000	0,0000	0,1000	0,1000	1# CA	0,0000	0,2281	3,5181	
02-04	2,0000	0,0000	0,2000	0,4000	2# CA	0,0000	0,3744	3,6644	

Figura 5.22: Planilha do exercício 4.9

Exercício 4.10 (SOUZA, 1997, cap. 4, p. 80)

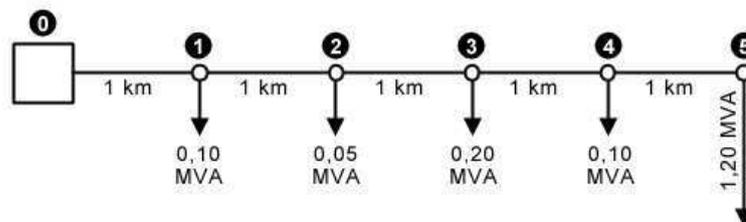


Figura 5.23: Exercício 4.10

### Solução analítica

$$V_0 = 13,8 \text{ kV}$$

Cálculo dos coeficientes de queda de tensão

$$fp = 0,8$$

$$Z = 0,3 + j0,6 \Omega/\text{km}$$

$$\varphi = \cos^{-1} 0,8 = 36,87^\circ$$

$$G = \frac{0,8 \cdot 0,3 + 0,6 \cdot 0,6}{13,8^2} \cdot 100 = 0,3151 \text{ \%/MVA/km}$$

Cálculo da queda de tensão ponto-a-ponto:

- Trecho 0-1

$$\Delta V\% = S1G = (0,1 + 0,05 + 0,2 + 0,1 + 1,2) \cdot 1 \cdot 0,3151 = 0,5199 \%$$

- Trecho 1-2

$$\Delta V\% = S1G = (0,05 + 0,2 + 0,1 + 1,2) \cdot 1 \cdot 0,3151 = 0,4884 \%$$

- Trecho 2-3

$$\Delta V\% = S1G = (0,2 + 0,1 + 1,2) \cdot 1 \cdot 0,3151 = 0,4727 \%$$

- Trecho 3-4

$$\Delta V\% = S1G = (0,1 + 1,2) \cdot 1 \cdot 0,3151 = 0,4096 \%$$

- Trecho 4-5

$$\Delta V\% = S1G = (1,2) \cdot 1 \cdot 0,3151 = 0,3781 \%$$

Logo, a queda total é:

$$\Delta V\% = 0,5199 + 0,4884 + 0,4727 + 0,4096 + 0,3781 = 2,2687 \%$$

Cálculo da queda de tensão considerando as cargas intermediárias uniformemente distribuídas:

$$\Delta V\% = \left[ \left( \frac{0,1 + 0,05 + 0,2 + 0,1}{2} \right) + 1,2 \right] \cdot 5 \cdot 0,3151 = 2,2451 \%$$

### Solução usando o módulo de Simulação

DETALHAMENTO DE TRECHOS									
TRECHO		CARGA			CONDUTORES	QUEDA DE TENSÃO			CORRENTE
DESIGNAÇÃO	COMPRIMENTO	DISTRIBUÍDA	ACUMULADA NO	TOTAL <sup>1</sup>		UNITÁRIA	NO TRECHO	TOTAL	NO TRECHO <sup>2</sup>
A	B	C	D	E	F	G	H=ExG	I	J
Primário	km	MVA	MVA	MVA x km	no. AWG	%/MVA/km	%	%	A
SE-01	1.0000	0.0000	1.6500	1.6500	3# CA	0.3151	0.5199	0.5199	
01-02	1.0000	0.0000	1.5500	1.5500	3# CA	0.3151	0.4884	1.0083	
02-03	1.0000	0.0000	1.5000	1.5000	3# CA	0.3151	0.4727	1.4810	
03-04	1.0000	0.0000	1.3000	1.3000	3# CA	0.3151	0.4096	1.8906	
04-05	1.0000	0.0000	1.2000	1.2000	3# CA	0.3151	0.3781	2.2687	

Figura 5.24: Planilha do exercício 4.10

## 5.2 CÁLCULO DE PERDAS DE POTÊNCIA

Exemplo 5.2 (SOUZA, 1997, cap. 4, p. 90)

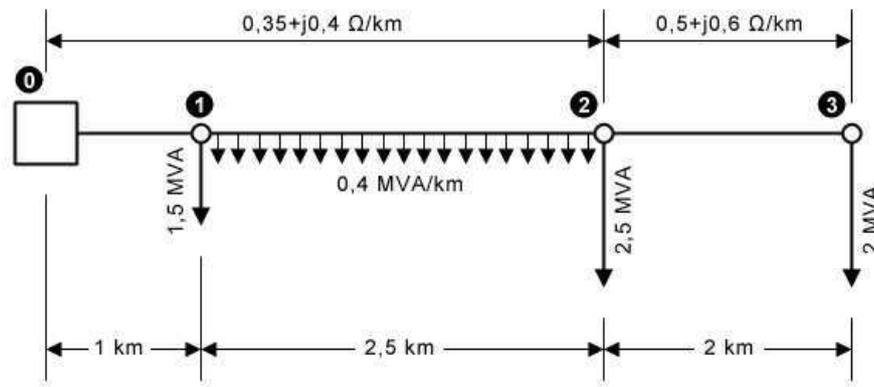


Figura 5.25: Exemplo 5.2

### Solução analítica

$$V_0 = 13,8 \text{ kV}$$

$$H_1 = H_2 = \frac{0,35}{13,8^2} \times 10^3 = 1,84 \text{ kW/MVA}^2/\text{km}$$

$$H_3 = \frac{0,8}{13,8^2} \times 10^3 = 2,63 \text{ kW/MVA}^2/\text{km}$$

- Trecho 0-1:

$$P = 1,84 \cdot (1,5 + 2,5 + 1 + 2)^2 \cdot 1 = 90,2 \text{ kW}$$

- Trecho 1-2:

$$P = 1,84 \cdot \left( 2,5 + \frac{1}{\sqrt{3}} + 2 \right)^2 \cdot 2,5 = 118,6 \text{ kW}$$

- Trecho 2-3:

$$P_3 = 2,62 \cdot (2)^2 \cdot 2 = 21,01 \text{ kW}$$

Logo, a perda de potência total no trecho é:

$$P = P_1 + P_2 + P_3 = 90,2 + 118,6 + 21,01 = 229,81 \text{ kW}$$

### Solução usando o módulo de Simulação

DETALHAMENTO DE PERDAS DE POTÊNCIA POR TRECHO								
TRECHO		CARGA			CONDUTORES	PERDAS DE POTÊNCIA		
DESIGNAÇÃO	COMPRIMENTO	DISTRIBUÍDA NO TRECHO	ACUMULADA NO FIM DO TRECHO	TOTAL <sup>1</sup>		UNITÁRIA	NO TRECHO	TOTAL
A	B	C	D	E	F	G	H=ExG	I
Primário	km	MVA	MVA	MVA x km	no. AWG	kW/MVA <sup>2</sup> /km	kW	kW
SE-01	1,0000	0,0000	7,0000	49,0000	3# CA	1,8378	90,0522	90,0522
01-02	2,5000	1,0000	4,5000	25,7795	3# CA	1,8378	118,4439	208,4961
02-03	2,0000	0,0000	2,0000	4,0000	3# CA	2,6255	21,0040	229,5001

Figura 5.26: Exemplo 5.2

Exercício 5.1 (SOUZA, 1997, cap. 5, p. 99)

### Solução analítica

$$V_0 = 13,8 \text{ kV}$$

$$Z = 0,45 + j0,50 \Omega/\text{km}$$

$$l = 10 \text{ km}$$

$$S_{\min} = 0,8 \text{ MVA}$$

$$S_{\max} = 1,4 \text{ MVA}$$

$$H = \frac{0,45}{13,8^2} \times 10^3 = 2,363 \text{ kW/MVA}^2/\text{km}$$

Perdas de potência para condições mínimas:

$$P_{\min} = 10 \cdot 2,363 \cdot 0,8^2 = 15,1232 \text{ kW}$$

Perdas de potência para condições máximas:

$$P_{\min} = 10 \cdot 2,363 \cdot 1,4^2 = 46,315 \text{ kW}$$

### Solução usando o módulo de Simulação

DETALHAMENTO DE PERDAS DE POTÊNCIA POR TRECHO								
TRECHO		CARGA			CONDUTORES	PERDAS DE POTÊNCIA		
DESIGNAÇÃO	COMPRIMENTO	DISTRIBUÍDA NO TRECHO	ACUMULADA NO FIM DO TRECHO	TOTAL <sup>1</sup>		UNITÁRIA	NO TRECHO	TOTAL
A	B	C	D	E	F	G	H=ExG	I
Primário	km	MVA	MVA	MVA x km	no. AWG	kW/MVA <sup>2</sup> /km	kW	kW
SE-01	10,0000	0,0000	0,8000	0,6400	3# CA	2,3629	15,1226	15,1226
SE-02	10,0000	0,0000	1,4000	1,9600	3# CA	2,3629	46,3128	46,3128

Figura 5.27: Exercício 5.1

Exercício 5.3 (SOUZA, 1997, cap. 5, p. 99)

### Solução analítica

$$V_0 = 34,5 \text{ kV}$$

$$S_B = 12 \text{ MVA}$$

$$fp_B = 0,8$$

$$S_C = 6 \text{ MVA}$$

$$fp_C = 1$$

a) Linha  $B - C$  desenergizada:

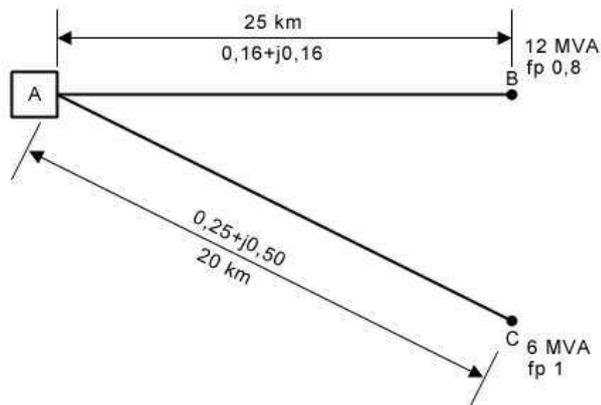


Figura 5.28: Exercício 5.3a

$$Z = 0,16 + j0,16 \text{ } \Omega/\text{km}$$

$$l = 25 \text{ km}$$

$$H_B = \frac{0,16}{34,5^2} \times 10^3 = 0,1344 \text{ kW/MVA}^2/\text{km}$$

$$P_B = 25 \cdot 0,1344 \cdot 12^2 = 483,84 \text{ kW}$$

$$H_C = \frac{0,25}{34,5^2} \times 10^3 = 0,210 \text{ kW/MVA}^2/\text{km}$$

$$P_C = 20 \cdot 0,210 \cdot 6^2 = 151,2 \text{ kW}$$

**Solução usando o módulo de Cálculo de Perdas**

DETALHAMENTO DE PERDAS DE POTÊNCIA POR TRECHO								
TRECHO		CARGA			CONDUTORES	PERDAS DE POTÊNCIA		
DESIGNAÇÃO	COMPRIMENTO	DISTRIBUÍDA NO TRECHO	ACUMULADA NO FIM DO TRECHO	TOTAL <sup>1</sup>		UNITÁRIA	NO TRECHO	TOTAL
A	B	C	D	E	F	G	H=ExG	I
Primário	km	MVA	MVA	MVA x km	no. AWG	kW/MVA <sup>2</sup> /km	kW	kW
SE-01	25,0000	0,0000	12,0000	144,0000	3# CA	0,1344	483,8400	483,8400
SE-02	20,0000	0,0000	6,0000	36,0000	3# CA	0,2100	151,2000	151,2000

Figura 5.29: Exercício 5.3a

b) Linha A – C desenergizada:

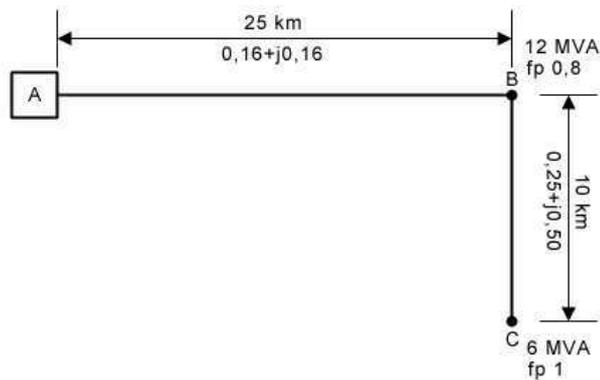


Figura 5.30: Exercício 5.3b

$$H = \frac{0,25}{34,5^2} \times 10^3 = 0,21 \text{ kW/MVA}^2/\text{km}$$

$$l = 10 \text{ km}$$

$$P_B = 25 \cdot (12^2 \cdot 0,1344 + 6^2 \cdot 0,210) = 672,84 \text{ kW}$$

$$P_C = 10 \cdot 0,21 \cdot 6^2 = 75,6 \text{ kW}$$

$$P_T = 672,84 + 75,6 = 748,44 \text{ kW}$$

**Solução usando o módulo de Cálculo de Perdas**

DETALHAMENTO DE PERDAS DE POTÊNCIA POR TRECHO								
TRECHO		CARGA			CONDUTORES	PERDAS DE POTÊNCIA		
DESIGNAÇÃO	COMPRIMENTO	DISTRIBUÍDA NO TRECHO	ACUMULADA NO FIM DO TRECHO	TOTAL <sup>1</sup>		UNITÁRIA	NO TRECHO	TOTAL
A	B	C	D	E	F	G	H=ExG	I
Primário	km	MVA	MVA	MVA x km	no. AWG	kW/MVA <sup>2</sup> /km	kW	kW
SE-01	25,0000	0,0000	18,0000	324,0000	3# CA	0,1344	672,8368	672,8368
01-02	10,0000	0,0000	6,0000	36,0000	3# CA	0,2100	75,6000	784,4400

Figura 5.31: Exercício 5.3b

Exercício 5.4 (SOUZA, 1997, cap. 5, p. 99)

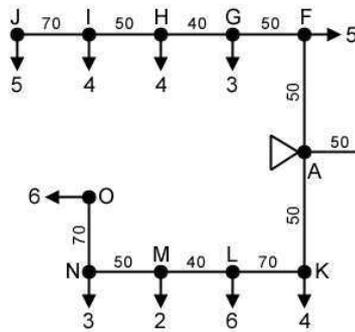


Figura 5.32: Exercício 5.4

$$V_0 = 380/220 \text{ V}$$

$$Z = 1,53 + j0,34 \ \Omega/\text{km}$$

### Solução analítica

$$H = \frac{1,53}{380^2} \times 10^5 = 1,0596 \text{ kW/kVA}^2/\text{km}$$

$$P_{A-E} = 1,0596 \cdot [0,05 \cdot (20)^2 + 0,04 \cdot (14)^2 + 0,04 \cdot (9)^2 + 0,05 \cdot (4)^2] = 33,78 \text{ kW}$$

$$P_{A-O} = 1,0596 \cdot [0,05 \cdot (21)^2 + 0,07 \cdot (17)^2 + 0,04 \cdot (11)^2 + 0,05 \cdot (9)^2 + 0,07 \cdot (6)^2] = 56,89 \text{ kW}$$

$$P_{A-J} = 1,0596 \cdot [0,05 \cdot (21)^2 + 0,05 \cdot (16)^2 + 0,04 \cdot (13)^2 + 0,05 \cdot (9)^2 + 0,07 \cdot (5)^2] = 50,54 \text{ kW}$$

### Solução usando o módulo de Cálculo de Perdas

DETALHAMENTO DE PERDAS DE POTÊNCIA POR TRECHO								
TRECHO		CARGA			CONDUTORES	PERDAS DE POTÊNCIA		
DESIGNAÇÃO	COMPRIMENTO	DISTRIBUÍDA NO TRECHO	ACUMULADA NO FIM DO TRECHO	TOTAL <sup>1</sup>		UNITÁRIA	NO TRECHO	TOTAL
A	B	C	D	E	F	G	H=ExG	I
Secundário	km	kVA	kVA	kVA x km	no. AWG	kW/kVA <sup>2</sup> /km	kW	kW
SE-01	0,0500	0,0000	20,0000	400,0000	3# CA	1,0596	21,1920	21,1920
01-02	0,0400	0,0000	14,0000	196,0000	3# CA	1,0596	8,3073	29,4993
02-03	0,0400	0,0000	9,0000	81,0000	3# CA	1,0596	3,4331	32,9324
03-04	0,0500	0,0000	4,0000	16,0000	3# CA	1,0596	0,8477	33,7801
SE-05	0,0500	0,0000	21,0000	441,0000	3# CA	1,0596	23,3642	23,3642
05-06	0,0700	0,0000	17,0000	289,0000	3# CA	1,0596	21,4357	44,7999
06-07	0,0400	0,0000	11,0000	121,0000	3# CA	1,0596	5,1285	49,9284
07-08	0,0500	0,0000	9,0000	81,0000	3# CA	1,0596	4,2914	54,2198
08-09	0,0700	0,0000	6,0000	36,0000	3# CA	1,0596	2,6702	56,8900
SE-10	0,0500	0,0000	21,0000	441,0000	3# CA	1,0596	23,3642	23,3642
10-11	0,0500	0,0000	16,0000	256,0000	3# CA	1,0596	13,5629	36,9271
11-12	0,0400	0,0000	13,0000	169,0000	3# CA	1,0596	7,1629	44,0900
12-13	0,0500	0,0000	9,0000	81,0000	3# CA	1,0596	4,2914	48,3814
13-14	0,0700	0,0000	5,0000	25,0000	3# CA	1,0596	1,8543	50,2357

Figura 5.33: Exercício 5.4

Exercício 5.5 (SOUZA, 1997, cap. 5, p. 100)

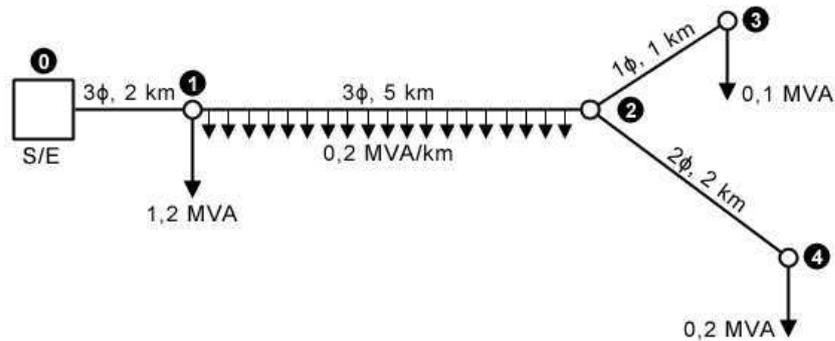


Figura 5.34: Exercício 5.5

### Solução analítica

$$V_0 = 13,8 \text{ kV}$$

$$r = 0,65$$

$$f_p = 0,8$$

$$H_{3\phi} = \frac{0,65}{13,8^2} \times 10^3 = 3,413 \text{ kW/MVA}^2/\text{km}$$

$$H_{2\phi} = \frac{3}{2} \cdot \frac{0,65 \cdot [0,8 + 0,92]}{13,8^2} \times 10^3 = 8,8059 \text{ kW/MVA}^2/\text{km}$$

$$H_{1\phi} = 6 \cdot H_{3\phi} = 20,478 \text{ kW/MVA}^2/\text{km}$$

- Trecho 0–1:

$$P_1 = 2 \cdot 3,413 \cdot (2,5)^2 = 42,62 \text{ kW}$$

- Trecho 1–2:

$$P_2 = 5 \cdot 3,413 \cdot \left( \frac{1}{\sqrt{3}} + 0,3 \right)^2 = 13,1356 \text{ kW}$$

- Trecho 2–3:

$$P_3 = 1 \cdot 20,478 \cdot (0,1)^2 = 0,2048 \text{ kW}$$

- Trecho 3–4:

$$P_4 = 2 \cdot 8,8059 \cdot (0,2)^2 = 0,7044 \text{ kW}$$

Perdas de potência no trecho 0-1-2-3:  $P = 42,62 + 13,1356 + 0,2048 = 55,9604 \text{ kW}$

Perdas de potência no trecho 0-1-2-4:  $P = 42,62 + 13,1356 + 0,7044 = 56,46 \text{ kW}$

### Solução usando o módulo de Cálculo de Perdas

DETALHAMENTO DE PERDAS DE POTÊNCIA POR TRECHO								
TRECHO		CARGA			CONDUTORES	PERDAS DE POTÊNCIA		
DESIGNAÇÃO	COMPRIMENTO	DISTRIBUÍDA NO TRECHO	ACUMULADA NO FIM DO TRECHO	TOTAL <sup>1</sup>		UNITÁRIA	NO TRECHO	TOTAL
A	B	C	D	E	F	G	H=ExG	I
Primário	km	MVA	MVA	MVA x km	no. AWG	kW/MVA <sup>2</sup> /km	kW	kW
SE-01	2,0000	0,0000	2,5000	6,2500	3# CA	3,4131	42,6638	42,6638
01-02	5,0000	1,0000	0,3000	0,7697	3# CA	3,4131	13,1353	55,7991
02-03	1,0000	0,0000	0,1000	0,0100	1# CA	20,4789	0,2048	56,0039
02-04	2,0000	0,0000	0,2000	0,0400	2# CA	8,8039	0,7043	56,5034

Figura 5.35: Exercício 5.5

Exercício 5.6 (SOUZA, 1997, cap. 5, p. 100)

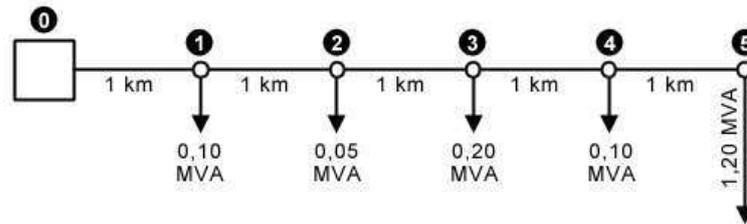


Figura 5.36: Exercício 5.6

### Solução analítica

$$r = 0,3 \Omega/\text{km}$$

$$V_0 = 13,8 \text{ kV}$$

$$H = \frac{0,3}{13,8^2} \times 10^3 = 1,5753 \text{ kW/MVA}^2/\text{km}$$

a) Perdas ponto-a-ponto:

$$P_1 = 1 \cdot 1,5753 \cdot (0,10 + 0,05 + 0,20 + 0,10 + 1,20)^2 = 4,2887 \text{ kW}$$

$$P_2 = 1 \cdot 1,5753 \cdot (0,05 + 0,20 + 0,10 + 1,20)^2 = 3,7846 \text{ kW}$$

$$P_3 = 1 \cdot 1,5753 \cdot (0,20 + 0,10 + 1,20)^2 = 3,5444 \text{ kW}$$

$$P_4 = 1 \cdot 1,5753 \cdot (0,10 + 1,20)^2 = 2,6622 \text{ kW}$$

$$P_5 = 1 \cdot 1,5753 \cdot (1,20)^2 = 2,2684 \text{ kW}$$

O total de perdas é, então:  $P_T = 4,2887 + 3,7846 + 3,5444 + 2,6622 + 2,2684 = 16,5483 \text{ kW}$

### Solução usando o módulo de Cálculo de Perdas

DETALHAMENTO DE PERDAS DE POTÊNCIA POR TRECHO								
TRECHO		CARGA			CONDUTORES	PERDAS DE POTÊNCIA		
DESIGNAÇÃO	COMPRIMENTO	DISTRIBUÍDA NO TRECHO	ACUMULADA NO FIM DO TRECHO	TOTAL <sup>1</sup>		UNITÁRIA	NO TRECHO	TOTAL
A	B	C	D	E	F	G	H=ExG	I
Primário	km	MVA	MVA	MVA x km	no. AWG	kW/MVA <sup>2</sup> /km	kW	kW
SE-01	1,0000	0,0000	1,6500	2,7225	3# CA	1,5753	4,2888	4,2888
01-02	1,0000	0,0000	1,5500	2,4025	3# CA	1,5753	3,7847	8,0735
02-03	1,0000	0,0000	1,5000	2,2500	3# CA	1,5753	3,5444	11,6179
03-04	1,0000	0,0000	1,3000	1,6900	3# CA	1,5753	2,6623	14,2802
04-05	1,0000	0,0000	1,2000	1,4400	3# CA	1,5753	2,2684	16,5486

Figura 5.37: Exercício 5.6a

b) Considerando as cargas intermediárias uniformemente distribuídas, temos:

$$P = 5 \cdot 1,5753 \cdot \left(1,20 + \frac{0,45}{\sqrt{3}}\right)^2 = 16,7851 \text{ kW}$$

### Solução usando o módulo de Cálculo de Perdas

DETALHAMENTO DE PERDAS DE POTÊNCIA POR TRECHO								
TRECHO		CARGA			CONDUTORES	PERDAS DE POTÊNCIA		
DESIGNAÇÃO	COMPRIMENTO	DISTRIBUÍDA NO TRECHO	ACUMULADA NO FIM DO TRECHO	TOTAL <sup>1</sup>		UNITÁRIA	NO TRECHO	TOTAL
A	B	C	D	E	F	G	H=ExG	I
Primário	km	MVA	MVA	MVA x km	no. AWG	kW/MVA <sup>2</sup> /km	kW	kW
SE-05	5,0000	0,4500	1,2000	2,1310	3# CA	1,5753	16,7848	16,7848

Figura 5.38: Exercício 5.6b

## 6 CONCLUSÃO

Neste trabalho foram apresentados vários estudos de caso que ilustram o uso da planilha de cálculo de queda de tensão e perdas de potência. Foi utilizado, o MS Excel® que se mostrou uma ferramenta extremamente útil permitindo automatizar todo o processo de cálculo, exigindo do usuário apenas algumas poucas informações de entrada. Os cálculos baseiam-se nas equações aproximadas desenvolvidas no capítulo 3.

A norma NDU006, do grupo Energisa, estabelece as diretrizes necessárias para a elaboração de novos projetos ou reforma de projetos existentes de redes de distribuição de energia elétrica. Tal norma serviu de base para a elaboração de parte deste trabalho de modo que a PCQT pode ser usada para automatizar o processo de cálculo de queda de tensão em novos projetos ou projetos existentes reduzindo o tempo dispendido nas etapas de planejamento. A PCQT também possui um módulo de simulação que pode ser usado didaticamente para a resolução de exercícios com cargas distribuídas e/ou acumuladas com fatores de potência e impedância de cabos distintos, além de diferentes níveis de tensão de alimentação. Da mesma forma o cálculo de perdas pode ser efetuado para muitas configurações de circuitos.

Um software funcional, estável e seguro, requer anos de desenvolvimento e testes. Além disto muitos softwares modernos contam com sistemas de depuração e ferramentas do tipo "Error Reporting" como o Bugzilla, por exemplo. Tais ferramentas são implementadas nativamente ao software permitindo que bugs em tempo de execução sejam rastreados e reportados sem qualquer interferência do usuário. De posse destas informações, o desenvolvedor tem a possibilidade de implementar atualizações e melhorias nos softwares disponibilizadas através de patches e service packs.

O Visual Basic é uma linguagem de programação madura, e ao longo dos anos sofreu muitas atualizações e melhorias tanto em performance quando na adição de novos recursos e integração com ferramentas de programação modernas (ex. dot net framework). O VBA nada mais é do que o moderno Visual Basic portado para a plataforma Office. Trata-se de uma linguagem poderosíssima quando usada para os propósitos aos quais se destina. Contudo por ser uma linguagem interpretada, muitos recursos de programação top usados em linguagens compiladas (c++, csharp, visual basic, etc), como a orientação a objetos, estão disponíveis embora não tenham sido explorados em sua totalidade no desenvolvimento deste trabalho.



## BIBLIOGRAFIA

- [1] SOUZA, B. A., Distribuição de Energia Elétrica, Apostila. Campina Grande: UFPB, 1997. 144 p.
- [2] WALKENBACH, J., Excel 2010 Power Programming with VBA. Wiley Publishing, Inc. 2010. 1083 p.
- [3] WALKENBACH, J., Favorite Excel 2010 Tips and Tricks. Wiley Publishing, Inc. 2010. 507 p.
- [4] MOFFAT, S., Excel 2010 Advanced. The Mouse Training Company & Ventus Publishing ApS 2011. 256 p.
- [5] HENNIG, T., et al., A. Access 2007 VBA Programmer's Reference. Wiley Publishing, Inc. 2007. 1155 p.
- [6] MSDN, Microsoft Developers Network; Welcome to the Excel 2010 Developer Reference 2013. Disponível em: 11/04/2013. <<http://msdn.microsoft.com/library/ee861528%28v=office.14%29>>. Acesso em: 15 abr. 2013, 20:45.
- [7] NDU006. Norma de Distribuição Unificada 006: Critérios básicos para a elaboração de projetos de redes de distribuição aéreas urbanas. Grupo Energisa. Julho/2012.

## ANEXO I

A determinação do coeficiente de queda de tensão é uma etapa indispensável para o cálculo da queda de tensão em um determinado trecho de um circuito. Para calculá-lo, devemos ter em mãos informações a cerca dos condutores utilizados no circuito (resistência, reatância e número de fases). O coeficiente de queda de tensão pode ser calculado para três casos diferentes usando-se as fórmulas a seguir (SOUZA, 1997), quais sejam:

- Condutores Trifásicos

$$G_{3\phi} = \frac{r \cos\phi + x \sin\phi}{V_0^2} \cdot 100$$

- Condutores Bifásicos

$$G_{2\phi} = \frac{3}{2} \cdot \frac{r [\cos\phi - \cos(60^\circ - \phi)] + x [\sin\phi - \sin(60^\circ - \phi)]}{V_0^2} \cdot 100$$

- Condutores Monofásicos

$$G_{1\phi} = 6 \cdot \frac{r \cos\phi + x \sin\phi}{V_0^2} \cdot 100$$

Desde que  $r$  e  $x$  são dados em  $\Omega/\text{km}$  ou  $\Omega/\text{m}$ ,  $V_0$  é a tensão primária e  $G$  é dado em  $\%/MVA/\text{km}$  ou  $\%/kVA/\text{m}$ . O coeficiente já encontra-se calculado para os casos em que o projeto é baseado na norma NDU006 (esta norma já fornece os coeficientes para dois fatores de potência) e é calculado automaticamente, com base nos dados dos condutores, para o caso de um projeto de simulação (módulo simulação). A tabela de condutores personalizados encontra-se na planilha Simulação (fig. 4.1). Para inserir um novo tipo de condutor, abra a planilha Simulação e vá para a tabela "Tabelas de Cabos AWG".

Como pode ser visto na fig. A1, a tabela tem três colunas, detalhadas a seguir.

- Coluna No AWG

Código de identificação do condutor. Se o condutor não tiver código, pode ser informado um código pessoal. Deve ser sempre precedido de n# onde o n representa o número de fases do condutor.

- Coluna  $r$  ( $\Omega/\text{km}$ )

Resistência do condutor em ohms por quilômetro.

- Coluna  $x$  ( $\Omega/\text{km}$ )

Reatância do condutor em ohms por quilômetro.

- Coluna # Fases

Número de fases do condutor (número inteiro).

<b>TABELA DE CABOS AWG</b>			
<b>No AWG</b>	<b><math>r</math> (<math>\Omega/\text{km}</math>)</b>	<b><math>x</math> (<math>\Omega/\text{km}</math>)</b>	<b># Fases</b>
3# CA 1/0	0,6070	0,4510	3
3# CA	0,4000	0,5000	3
3# CA	0,3500	0,4000	3
3# CA	0,3700	0,3600	3
3# CA	0,5000	0,6000	3
3# CAA 2	1,0540	0,5260	3
3# CAA 4	1,6030	0,5460	3
2# CAA 4	1,6030	0,5460	2
1# CAA 4	1,6030	0,5460	1
3# CA	0,1600	0,1600	3
3# CA	0,2500	0,5000	3
3# CAA 4	0,3600	0,4300	3
3# CA	1,5300	0,3400	3
3# CA	0,6500	0,3400	3
2# CA	0,6500	0,3400	2
1# CA	0,6500	0,3400	1

Fig. A1: Tabela de Condutores AWG

Por exemplo, para inserir os dados do condutor especificado apenas pela sua impedância, dada por:

$$Z = 0,885 + j0,745 \Omega/\text{km}$$

Se for um condutor trifásico, devemos ter:

TABELA DE CABOS AWG			
No AWG	r ( $\Omega/\text{km}$ )	x ( $\Omega/\text{km}$ )	# Fases
3# CA 1/0	0,6070	0,4510	3
3# CA	0,4000	0,5000	3
3# CA	0,3500	0,4000	3
3# CA	0,3700	0,3600	3
3# CA	0,5000	0,6000	3
3# CAA 2	1,0540	0,5260	3
3# CAA 4	1,6030	0,5460	3
2# CAA 4	1,6030	0,5460	2
1# CAA 4	1,6030	0,5460	1
3# CA	0,1600	0,1600	3
3# CA	0,2500	0,5000	3
3# CAA 4	0,3600	0,4300	3
3# CA	1,5300	0,3400	3
3# CA	0,6500	0,3400	3
2# CA	0,6500	0,3400	2
1# CA	0,6500	0,3400	1
<b>3# CA</b>	<b>0,8850</b>	<b>0,7450</b>	<b>3</b>

Fig. A2: Tabela de Condutores AWG

Se o condutor for bifásico ou monofásico, alteramos apenas as primeira e quarta colunas para:

- Bifásico: 2# CA e 2
- Monofásico: 1# CA e 1

## ANEXO II

### Exemplo 1 do capítulo 2 resolvido no MATLAB.

```

% -----
% Universidade Federal de Campina Grande - UFCG
% Centro de Engenharia Elétrica e Informática - CEEI
% Departamento de Engenharia Elétrica - DEE
% Disciplina de Distribuição de Energia Elétrica
%
% Autor: Ericson Norberto
% Data.: 21/04/2012
% -----
% Programa para o Cálculo de queda de tensão usando a fórmula geral
% -----
clear all
clc

% Dados do Problema

ni = 5;
ve = 0.0001;
v0 = 13.8;
v1 = 13.0;
fp = 0.9;
z1 = 0.607+0.451*1j;
st = 1.2;
mz = [];
lt = 10;

% Calculos iniciais

Z1 = lt*abs(z1);
teta = angle(z1);
phi = acos(fp);

% Inicio do cálculo da queda de tensão

nt = 1;
while (nt <= ni)
    v_0 = sqrt((v1^2) + ((Z1^2)*(st^2)*(1/(v1^2))) + (2*Z1*st*cos(teta-phi)));
    v_e = v0 - v_0;

    if (v_e <= ve)
        %menor que o erro
        nt = ni + 1;
    else
        %maior que o erro
        mz(nt, 1) = nt;
        mz(nt, 2) = v1;
        mz(nt, 3) = v_0;
        mz(nt, 4) = v_e;

        v1 = v1 + v_e;
        nt = nt + 1;
    end
end

disp('-----');
mz
% eof

```