

Fundamentos de Sistemas Elétricos de Potência

Editora Livraria da Física

Luiz Cera Zanetta Jr.

Fundamentos de Sistemas Elétricos de Potência

Editora Livraria da Física
São Paulo – 2006 – 1ª edição

Copyright 2005: Editora Livraria da Física

Editor: José Roberto Marinho

Capa: Arte Ativa

Impressão: Gráfica Paym

Diagramação: Carlos Eduardo de Moraes Pereira

Ilustrações: Ricardo Vianna Lacourt

Revisão do texto: Tânia Mano Maeta

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)

Zanetta Júnior, Luiz Cera

Fundamentos de sistemas elétricos de potência / Luiz Cera Zanetta Jr.

– 1. ed. – São Paulo : Editora Livraria da Física, 2005.

Bibliografia.

1. Centrais elétricas
2. Correntes elétricas
3. Energia elétrica – Distribuição
4. Energia elétrica – Sistemas
5. Energia elétrica – Transmissão
6. Linhas elétricas I. Título.

05-1252

CDD-621.3191

Índices para catálogo sistemático:

1. Sistemas eletricos de potência : Engenharia elétrica 621.3191

ISBN: 85-88325-41-1

Editora Livraria da Física

Telefone: (11) 3936-3413

www.livrariadafisica.com.br

Sumário

PREFÁCIO.....	1
CAPÍTULO 1 Introdução aos Parâmetros de Linhas de Transmissão	5
1.1 Introdução.....	5
1.2 Condutores Utilizados em Sistemas de Potência.....	6
1.2.1 Resistência de Condutores.....	8
1.2.2 Efeito da Temperatura na Resistência dos Condutores em Corrente Contínua.....	9
1.3 Indutância de Linhas de Transmissão.....	11
1.3.1 Generalidades.....	11
1.3.2 Fluxo Concatenado com um Condutor.....	15
1.3.3 Indutância de um Condutor devida ao Fluxo Interno.....	15
1.3.4 Efeito Pelicular.....	20
1.3.5 Indutância de um Condutor devida ao Fluxo Externo.....	24
1.3.6 Adição dos Fluxos Interno e Externo.....	28
1.3.7 Indutância de uma Linha a Dois Fios com Condutores Cilíndricos.....	29
1.3.8 Fluxo Concatenado com um Condutor por um Grupo de Condutores.....	31
1.3.9 Linha Bifásica com Condutores Compostos ou em Feixe.....	34
1.3.10 Reatância Indutiva da Linha com Utilização de Tabelas.....	43
1.3.11 Indutância de Linhas Trifásicas com Espaçamento Equilátero.....	45
1.3.12 Linhas Trifásicas com Espaçamento Assimétrico.....	47
1.4 Capacitância de Linhas de Transmissão.....	50
1.4.1 Generalidades.....	50
1.4.2 Condutor Isolado.....	51
1.4.3 Diferença de Potencial entre Dois Pontos no Espaço.....	52
1.4.4 Capacitância de uma Linha Bifásica.....	53
1.4.5 Linha Trifásica com Espaçamento Equilátero.....	59
1.4.6 Linha Trifásica com Espaçamento Assimétrico.....	62
1.4.7 Consideração de Condutores Compostos ou <i>Bundle</i>	65
1.5 Referências Bibliográficas.....	70
CAPÍTULO 2 Cálculo Matricial de Parâmetros de Linhas de Transmissão	71
2.1 Introdução.....	71
2.2 Cálculo de Parâmetros Incluindo o Efeito do Solo.....	71
2.2.1 Matriz de Impedâncias Série.....	72
2.2.2 Aplicação do Método das Imagens.....	73
2.2.3 Solo com Resistividade não Nula.....	76
2.2.4 Efeito dos Cabos-Guarda.....	78
2.2.5 Aplicação de Componentes Simétricas.....	83

2.3	Matriz de Capacitâncias.....	88
2.3.1	Consideração dos Cabos-Guarda	95
2.3.2	Aplicação das Componentes Simétricas no Cálculo de Capacitância	98
2.4	Linhas de Transmissão com Circuitos em Paralelo e Cabos-guarda	100
2.5	Cálculo Computacional de Parâmetros de Linhas de Transmissão	114
2.5.1	Cálculo da Impedância Série (Matriz de Impedâncias)	114
2.5.2	Cálculo da Matriz de Admitâncias Capacitiva.....	118
2.6	Referências Bibliográficas.....	121
CAPÍTULO 3 Relações entre Tensões e Correntes em uma Linha de Transmissão....		123
3.1	Introdução	123
3.2	Propagação de Ondas Eletromagnéticas em uma Linha de Transmissão	123
3.3	Impedância Característica de uma Linha de Transmissão	127
3.4	Regime Permanente em Linhas de Transmissão	127
3.4.1	Modelo de Linhas de Transmissão com Comprimento Finito	130
3.4.2	Quadripolo Equivalente	133
3.4.3	Modelo π Equivalente de uma Linha Genérica (Linha Longa)	134
3.4.4	Modelo π Nominal	140
3.4.5	Modelo para Linhas Curtas	141
3.4.6	Modelo T Nominal.....	142
3.5	Algumas Propriedades de Quadripolos.....	143
3.5.1	Associação em Cascata de Quadripolos.....	143
3.5.2	Associação de Quadripolos em Paralelo	144
3.5.3	Representação de Elementos Concentrados Através de Quadripolos.....	145
3.6	Transmissão de Potência.....	146
3.7	Compensação Reativa de Linhas de Transmissão	150
3.7.1	Linha de Transmissão em Vazio	150
3.7.2	Linha de Transmissão em Carga.....	154
3.8	Referências Bibliográficas.....	164
CAPÍTULO 4 Curto-circuito.....		165
4.1	Introdução	165
4.2	Modelos de Geradores	167
4.2.1	Motor Síncrono	170
4.2.2	Motor de Indução	170
4.3	Curto-circuito Considerando as Condições Pré-falta.....	171
4.4	Modelo de Carga e Análise Pré-falta	179
4.4.1	Modelo de Carga.....	179
4.4.2	Estudo das Condições Pré-Falta.....	180
4.5	Curto Trifásico Equilibrado	181

4.6	Curto-circuito Fase-terra.....	183
4.7	Curto Dupla-fase.....	188
4.8	Curto Dupla-fase-terra.....	191
4.9	Potência de Curto-circuito.....	195
4.9.1	Potência de Curto-circuito Trifásica.....	195
4.9.2	Potência de Curto-circuito Monofásica.....	198
4.10	Referências Bibliográficas.....	212
CAPÍTULO 5 Tratamento Matricial de Redes.....		213
5.1	Introdução.....	213
5.2	Matrizes para Redes de Seqüências.....	213
5.2.1	Formação da Matriz Y Considerando os Elementos Indutivos sem Mútuas.....	213
5.2.2	Formação da Matriz Y Considerando Elementos Indutivos com Mútuas.....	216
5.2.3	Obtenção da Matriz de Impedâncias Nodais.....	218
5.3	Matrizes Trifásicas.....	220
5.3.1	Formação da Matriz Y Trifásica.....	221
5.4	Referências Bibliográficas.....	224
CAPÍTULO 6 Cálculo Matricial do Curto-circuito.....		225
6.1	Introdução.....	225
6.2	Informações da Rede Pré-falta.....	225
6.3	Informações da Rede em Falta.....	226
6.4	Superposições.....	228
6.5	Componentes de Fase.....	228
6.6	Cálculos de Curto-circuito.....	229
6.6.1	Curto Trifásico.....	229
6.6.2	Curto Dupla-fase.....	230
6.6.3	Curto Fase-terra.....	231
6.6.4	Curto Dupla-fase-terra.....	232
6.7	Referências Bibliográficas.....	238
CAPÍTULO 7 Fluxo de Potência em uma Rede Elétrica.....		239
7.1	Introdução.....	239
7.2	Análise de uma Rede Elementar.....	240
7.3	Variáveis e Análises de Interesse.....	244
7.3.1	Barras.....	244
7.3.2	Ligações.....	245
7.4	Considerações sobre o Método Iterativo de Gauss e Gauss-Seidel.....	250
7.4.1	Método de Gauss.....	250
7.4.2	Fluxo de Potência com o Método Iterativo de Gauss-Seidel.....	253
7.5	Fluxo de Potência com o Método Iterativo de Newton-Raphson.....	254

7.5.1	Método Iterativo de Newton-Raphson	254
7.5.2	Fluxo de Potência em uma Rede Elétrica com o Método de Newton-Raphson.....	258
7.5.3	Montagem da Matriz Jacobiana	259
7.6	Fluxo de Potência com o Método Newton-Raphson Desacoplado-rápido	273
7.7	Referências Bibliográficas.....	284
CAPÍTULO 8 Estabilidade.....		285
8.1	Introdução	285
8.2	Modelo Elementar	286
8.2.1	Modelo Clássico.....	286
8.2.2	Obtenção da Curva $P \times \delta$	286
8.3	Análise da Estabilidade.....	289
8.3.1	Elevação da Potência Mecânica	291
8.3.2	Ocorrência de Curto-circuito	292
8.4	Equação Eletromecânica.....	294
8.4.1	Equação de Oscilação (Swing)	294
8.4.2	Crítério das Áreas Iguais.....	296
8.5.1	Modelo Eletromecânico Simples	300
8.5	Referências Bibliográficas.....	312

FUNDAMENTOS DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

PREFÁCIO

Um sistema elétrico de potência é constituído por usinas geradoras, linhas de alta tensão de transmissão de energia e sistemas de distribuição.

As usinas geradoras estão localizadas próximo dos recursos naturais energéticos, como as usinas hidroelétricas estabelecidas nos pontos favoráveis para o aproveitamento dos desníveis e quedas de água dos rios, assim como locais propícios para a formação de lagos e o armazenamento da água. Da mesma forma, as usinas térmicas localizam-se próximo das reservas de combustíveis fósseis como o carvão ou gás. Cabe mencionar que pode ser mais econômico fazer o aproveitamento desses combustíveis por meio de sua queima, geração de calor e sua transformação em energia elétrica, transportando-a via linhas de alta tensão até os centros de consumo, do que efetuar o transporte do combustível por veículos, ferrovias ou embarcações. Até mesmo as usinas nucleares, que eventualmente poderiam se localizar próximo aos centros de consumo, por razões de segurança são instaladas em regiões afastadas das grandes cidades.

As grandes empresas estatais ou privadas são normalmente as responsáveis pela geração de energia elétrica, devido ao expressivo aporte de capital necessário nesses empreendimentos. Nas usinas geradoras a energia elétrica é produzida em um nível de tensão da ordem de uma ou duas dezenas de quilovolts, sendo muito comum a tensão de 13,8 kV, mas essa é uma tensão baixa demais para que o seu transporte seja economicamente viável a longas distâncias. Desse modo, utilizam-se transformadores encarregados de elevar esse nível de tensão a um patamar superior, que vai de algumas dezenas de quilovolts até algumas centenas.

Essa energia, ao chegar aos grandes centros de consumo, como as cidades e parques industriais, percorre regiões densamente habitadas, com circulação permanente de pessoas, cuja segurança exige a redução do nível de tensão a patamares inferiores, novamente sendo muito comum a tensão de 13,8 kV. Dessa tarefa se encarregam as empresas distribuidoras, que fornecem energia elétrica aos consumidores, geralmente classificados em grupos, como residenciais, comerciais e industriais.

Fatores macroeconômicos, empréstimos, juros, variações de preços internacionais de insumos energéticos, previsões de demanda e contratos de energia formam o pano de fundo de toda uma engenharia financeira que determina a viabilidade e o sucesso de cada empreendimento. Tudo isso ocorre ainda ligado a uma tendência recente de desregulamentação do setor elétrico, ou seja, a grosso modo diminuindo a participação estatal na geração, transmissão e distribuição, e permitindo a entrada no mercado de um número maior de agentes empreendedores privados.

Após mais de um século de exploração da energia elétrica, as fontes de energia mais próximas dos centros de consumo já se encontram em utilização plena ou quase isso, o que implica a busca de potenciais cada vez mais distantes, com desafios a serem superados no transporte destas grandes quantidades de energia. Embora diversos aspectos ligados aos sistemas elétricos de grande porte, como os anteriormente mencionados, sejam assuntos palpantes, nosso interesse neste trabalho é dirigido a um aspecto extremamente importante neste encadeamento, que é o da transmissão de energia elétrica por meio de linhas de alta tensão. Inúmeros problemas técnicos devem ser superados para que a energia elétrica possa ser transportada atendendo aos requisitos de segurança das instalações e das pessoas envolvidas. Aspectos cruciais como confiabilidade, flexibilidade e custos envolvidos no transporte estabelecem o núcleo das ações das equipes técnicas encarregadas da operação e planejamento dos sistemas elétricos de potência.

Do ponto de vista das linhas aéreas de transmissão, cabe a nós entender os aspectos básicos dos campos elétrico e magnético, que estabelecem os fundamentos para a transmissão de energia através de cabos. Dessa forma trataremos dos aspectos básicos no cálculo dos parâmetros das linhas de transmissão, com e sem a presença do solo. Em seguida, estabeleceremos a modelagem elementar da linha de transmissão em regime permanente, delineando modelos utilizáveis do ponto de vista da teoria de circuitos, que são úteis no cálculo de variáveis elétricas como tensões, correntes e potências, assim como suas relações matemáticas.

Faz parte ainda de nosso objetivo analisar o cálculo das correntes de curto-circuito, principalmente do ponto de vista de sua avaliação para os diferentes tipos de faltas em redes elétricas, com o uso das componentes simétricas.

Um outro tema de nosso interesse e igualmente importante será a abordagem do fluxo de potência em redes pois, como sabemos, os sistemas elétricos são constituídos por diversas usinas de geração e centros de consumo, interligados por redes elétricas com diferentes configurações, que evoluem e se modificam devido a vários fatores. As interligações elétricas na transmissão permitiram um aproveitamento

mais econômico e confiável dos recursos energéticos e dos equipamentos elétricos. Fará parte de nossa investigação a compreensão do fluxo desta energia pelos diferentes caminhos possíveis de uma rede interligada, com o seu equacionamento por meio de uma formulação eficiente no cálculo das grandezas elétricas envolvidas.

Desfrutamos de notórios benefícios que as interligações de sistemas proporcionam às redes elétricas, como redução de custos e aumento da confiabilidade. No entanto, a partir destas interligações também surgiram dificuldades técnicas para uma operação estável dos sistemas diante de perturbações inevitáveis, algumas normais, provenientes de alterações operativas e variações da carga. Outras perturbações são causadas por curto-circuitos, cuja origem muitas vezes se encontra em tempestades e quedas de raios nas linhas de transmissão, além de outros fatores.

Desse modo, complementamos o texto com uma introdução à estabilidade de geradores conectados a barramentos suficientemente robustos, conhecidos como barramentos infinitos, introduzindo os conceitos elementares de estabilidade de redes, com base no modelo clássico de geradores.

Mencionamos que o objetivo deste livro foi reunir os elementos de transmissão de energia elétrica em um sistema de potência, particularmente aqueles empregados na cadeira de Sistemas de Potência I, na formação de engenheiros eletricitistas pela Escola Politécnica da USP. Sua despreziosa elaboração não pretende substituir uma vasta e rica literatura de textos clássicos existente sobre o tema, mas apenas condensar aspectos fundamentais empregados em um curso de graduação. Para sua leitura, o aluno de graduação necessita apenas conhecimentos de componentes simétricas e modelos de equipamentos em valores por unidade, desenvolvidos em cursos mais básicos.

A análise introdutória desenvolvida se ampliará num segundotrabalho impresso, ainda em elaboração, abordando aspectos complementares mais avançados.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO AOS PARÂMETROS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

1.1 Introdução

O projeto de uma linha de transmissão envolve cálculos elétricos e mecânicos, pois o bom dimensionamento elétrico está intimamente ligado a fatores mecânicos, como por exemplo o dimensionamento das estruturas capazes de suportar o peso dos cabos, rajadas de ventos e outras ocorrências como rompimento de cabos, etc. Como o cabo sofre deformações, a sua altura em relação ao solo, entre duas estruturas, é inferior à sua altura nas torres. Além disso, como os vãos entre torres podem ser irregulares, por exemplo em trechos montanhosos, nas travessias de rios ou de vales, existe a necessidade de uma otimização do número de torres e de suas alturas visando reduzir custos, assim como a definir adequadamente o tracionamento admissível desses cabos nas estruturas.

A elevação da tensão necessita de maior altura dos condutores em relação ao solo, assim como de um maior distanciamento entre fases, o que implica maiores estruturas de sustentação, freqüentemente metálicas, conhecidas como torres de linhas de transmissão. Os cabos condutores são presos às estruturas por meio de cadeias de isoladores, e são constituídos por fios encordoados que apresentam características elétricas e mecânicas. Do ponto de vista mecânico destacam-se como variáveis o peso e a resistência à tração, assim como sua flexibilidade, fundamental para a fabricação, transporte e montagem no campo. Do ponto de vista elétrico, são importantes variáveis a condutividade e a seção condutora.

Nosso objetivo básico volta-se para os aspectos elétricos fundamentais do cálculo dos parâmetros de uma linha de transmissão, correspondentes às características elétricas, dimensões e espaçamento dos condutores. Com o cálculo dos campos magnéticos e elétricos definiremos os parâmetros indutivos e capacitivos das linhas de transmissão. Na avaliação elementar de parâmetros, desenvolvida a seguir, desconsideramos o efeito do solo, mas dele nos ocuparemos em capítulo posterior dedicado ao tema.

Nosso interesse no cálculo dos parâmetros elétricos justifica-se pela importância dessa tarefa, da qual são dependentes e alicerçadas as demais avaliações que se façam de um sistema elétrico de potência.

1.2 Condutores Utilizados em Sistemas de Potência

Uma preocupação básica na seleção de um condutor, definido o material a ser utilizado, cobre ou alumínio, é com a área de seção transversal, que está associada ao volume de material a ser utilizado e portanto ao custo da transmissão. Os aspectos de custo são tratados dentro de um tópico chamado de seleção do condutor econômico, que não será objeto de nossa análise.

Ao alterarmos o diâmetro do condutor, modificamos a densidade de corrente I/S , e conseqüentemente as perdas. Os aspectos positivos em aumentar o diâmetro são reduzir as perdas e também o gradiente elétrico na superfície do condutor, atenuando o efeito corona. Em contrapartida, isso aumenta o custo da transmissão.

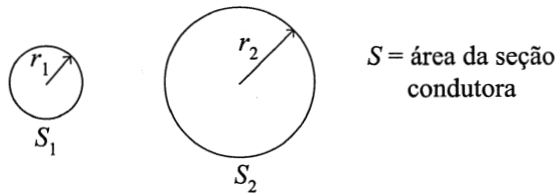


Figura 1.1: Condutores com raios diferentes.

Quando comparamos condutores de cobre com os de alumínio, fixados um mesmo comprimento e uma mesma resistência elétrica do circuito, o volume de alumínio será maior, pois será necessária uma seção condutora maior para compensar sua condutividade, inferior em relação à do cobre. Apesar disso, devido à maior densidade do cobre, o peso em cobre será aproximadamente o dobro em relação ao do alumínio. Isso confere uma vantagem adicional ao alumínio, que pode ser utilizado com estruturas de sustentação mais leves, além do seu custo mais baixo.

A dificuldade prática em se fabricar condutores com diâmetros elevados implica o uso de cabos formados por diversos fios, denominados cabos encordoados. Quando um só cabo encordoado não é suficiente para transmitir a corrente total, adicionamos mais cabos em paralelo, separados por espaçadores, formando cabos múltiplos. Existem diferentes tipos de condutores, e os mais usados em linhas de transmissão são normalmente, por razões econômicas, condutores de alumínio:

- CA: condutor de alumínio puro.
- AAAC: condutor de liga de alumínio, de *all aluminium alloy conductor*.
- CAA: condutor de alumínio com alma de aço, cuja denominação muito conhecida em inglês é ACSR, de *aluminium cable steel reinforced*.
- ACAR: condutor de alumínio com alma de liga de alumínio, de *aluminium conductor alloy reinforced*.

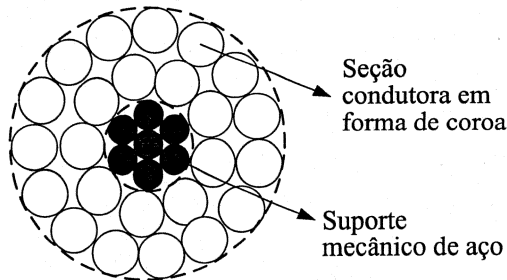


Figura 1.2: Formação 24/7 de um cabo CAA que apresenta 24 fios de alumínio e 7 de aço.

No processo de encordoamento os fios descrevem uma trajetória helicoidal em torno do centro do condutor. Levando-se em conta ainda que os cabos sofrem uma deformação provocada pelo seu peso, o comprimento real é um pouco maior que a extensão da linha ℓ .

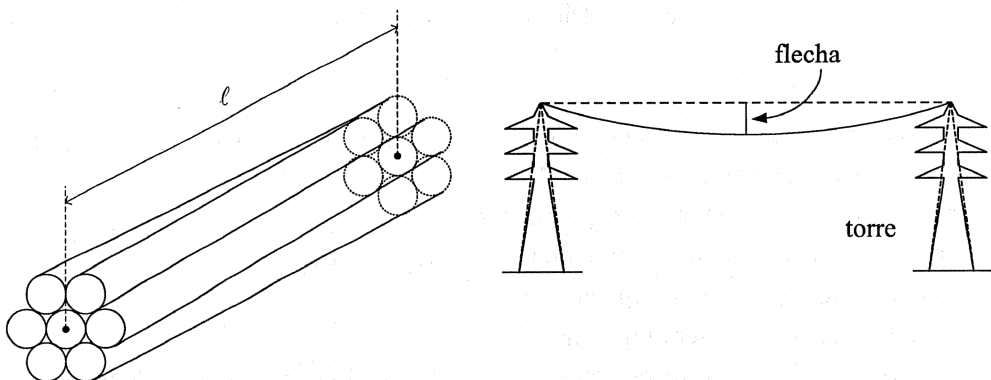


Figura 1.3: Efeitos de encordoamento e flecha.

ℓ : comprimento da linha,

$$\ell_{real} \approx 1,02\ell.$$

Da mesma forma, a resistência total da linha pode ser estimada em um valor um pouco acima dos obtidos nos cálculos.

1.2.1 Resistência de Condutores

As perdas nos condutores em corrente contínua, devidas ao efeito Joule, são representadas por meio de resistências, com a seguinte expressão conhecida:

$$R = \frac{\rho \ell}{S}, \quad (1.1)$$

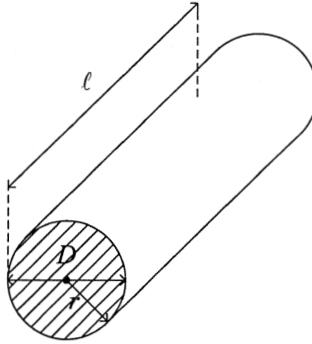


Figura 1.4: Dimensões de um condutor.

São importantes as seguintes variáveis que definem um condutor cilíndrico:

ℓ : comprimento do condutor ou da linha (pés, metros, km),

r : raio do condutor (centímetros, polegadas),

S : área da seção do condutor (mm^2 ou CM = circular mil),

ρ : resistividade do material utilizado,

σ : condutividade do material utilizado.

A área de 1 CM corresponde à área de um círculo com diâmetro de um milésimo de polegada. A área de 1 MCM corresponde a 1000 vezes a área de 1 CM. Obtemos a seguinte correspondência entre áreas dadas em mm^2 e CM:

$$S_{\text{mm}^2} = S_{\text{CM}} 5,067 \times 10^{-4},$$

ou aproximadamente em MCM:

$$S_{\text{mm}^2} \approx 0,5S_{\text{MCM}}.$$

A resistividade, ou condutividade ($\rho_{\text{padrão}}$ ou $\sigma_{\text{padrão}}$), padronizada para um condutor, é a do cobre recozido. Dessa forma, para outros processos metalúrgicos, podemos estabelecer uma correspondência entre suas resistividades com a padronizada, conforme os exemplos a seguir para o cobre e o alumínio.

O cobre à têmpera dura tem 97% da condutividade do $\sigma_{\text{padrão}}$, apresentando a resistividade $\rho = 1,77 \times 10^{-8} \Omega\text{m}$ (20 °C).

O alumínio à têmpera dura tem 61% da condutividade do $\sigma_{\text{padrão}}$, com resistividade $\rho = 2,83 \times 10^{-8} \Omega\text{m}$ (20 °C).

1.2.2 Efeito da Temperatura na Resistência dos Condutores em Corrente Contínua

Sem entrarmos em maiores detalhes, a figura abaixo ilustra o efeito conhecido da variação linear da resistência em função da temperatura, quando o condutor é percorrido por corrente contínua.

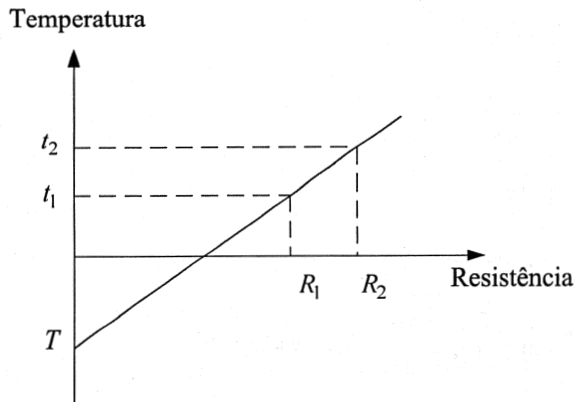


Figura 1.5: Gráfico temperatura \times resistência.

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{|T| + t_2}{|T| + t_1},$$

com:

T = Temperatura de referência na qual a resistência seria teoricamente desprezível.

$T = -234,5$ °C para cobre recozido com 100% de condutividade do $\sigma_{padr\tilde{a}o}$,

$T = -241,0$ °C para cobre à têmpera dura,

$T = -228,0$ °C para alumínio à têmpera dura.

Para a correção da resistência, em função de temperatura, utilizamos a semelhança de triângulos, tomando a temperatura T em módulo.

Vejam os alguns valores tabelados de resistência de condutores, utilizando o cabo Grosbeak 636 MCM (636 mil circular mil ou 636.000 CM), com:

$$R_{dc} = 0,0268 \Omega / 1000 \text{ pés (CC)} .$$

Em corrente contínua, passando a unidade de comprimento para milhas, obtemos:

$$R_{dc} = \frac{0,0268}{0,1894} \Omega / \text{mi} (20 \text{ } ^\circ\text{C}) .$$

Muitos dados encontram-se tabelados em unidades inglesas e desse modo é conveniente nos habituarmos a trabalhar com as conversões de unidades para o sistema internacional. A conversão de 1000 pés para milhas é feita da seguinte forma:

$$1 \text{ pé} \rightarrow 0,3048 \text{ m} ,$$

$$1000 \text{ pés} \rightarrow 0,3048 \text{ km} ,$$

$$1000 \text{ pés} \rightarrow \frac{0,3048}{1,609} \text{ mi} ,$$

$$1000 \text{ pés} \rightarrow 0,1894 \text{ mi} .$$

Corrigindo essa resistência para 50 °C, obtemos:

$$R_{dc \ 50^\circ\text{C}} = R_{dc \ 20^\circ\text{C}} \frac{228 + 50}{228 + 20} = 0,1586 \Omega / \text{mi} .$$

Nesse caso, $t_1 = 20$ °C, $t_2 = 50$ °C e $T = -228$ °C.

No entanto, cabe mencionar que, em corrente alternada, as resistências apresentam um comportamento dependente do efeito pelicular, sendo mais conveniente sua obtenção em tabelas fornecidas pelos fabricantes. Para o mesmo cabo Grosbeak, extrairíamos os seguintes valores:

$$R_{ac \ 20^\circ\text{C}} = 0,1454 \Omega / \text{mi} , R_{ac \ 50^\circ\text{C}} = 0,1596 \Omega / \text{mi} .$$

1.3 Indutância de Linhas de Transmissão

Neste item introduziremos o cálculo de indutâncias de linhas de transmissão, sem levar em conta a presença do solo. Antes porém, recordemos alguns conceitos básicos de fluxo concatenado em espiras ou bobinas, assim como os conceitos de fluxos interno e externo concatenados com condutores.

1.3.1 Generalidades

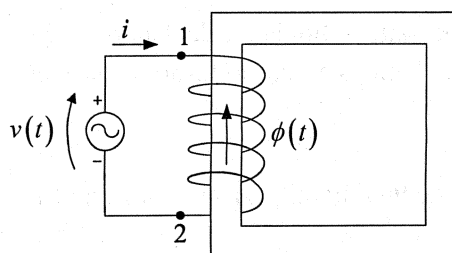


Figura 1.6: Indutância com núcleo ferromagnético.

Dada uma bobina, envolvendo um núcleo composto por material ferromagnético, sabemos que para densidades de fluxo elevadas pode ocorrer a saturação do núcleo e nessa situação obtemos indutâncias não lineares, que variam com a intensidade da corrente.

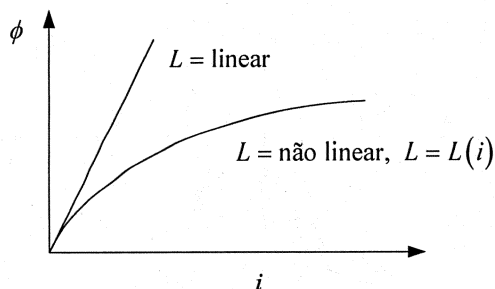


Figura 1.7: Curva $\phi \times i$.

Nos meios com permeabilidade magnética constante, como por exemplo o ar, encontramos uma relação linear entre o fluxo e a corrente i , $\phi = Li$.

Nas linhas de transmissão aéreas, assumimos a indutância L com um valor

constante, para qualquer nível de corrente, adotando $\mu_{ar} \cong \mu_0$, sendo μ_0 a permeabilidade do vácuo.

No caso linear, sabemos que:

$$v(t) = L \frac{di(t)}{dt}.$$

Analisaremos a relação entre a tensão e a corrente, em grandezas alternadas no campo complexo, aplicando a transformada de Laplace:

$$V(s) = sLI(s).$$

Em regime permanente senoidal, calculando no ponto $s = j\omega$, sendo ω a frequência de excitação, obtemos a relação fasorial entre tensão e corrente:

$$\dot{V} = j\omega L \dot{I},$$

com a corrente atrasada de 90° em relação à tensão, simplificamos a notação:

$$V = jXI. \tag{1.2}$$

Definimos a reatância indutiva do bipolo por:

$$X = \omega L.$$

Quando temos circuitos relativamente próximos, encontramos uma indutância mútua entre eles, definida pela relação entre fluxo concatenado com um circuito devido à corrente no outro.

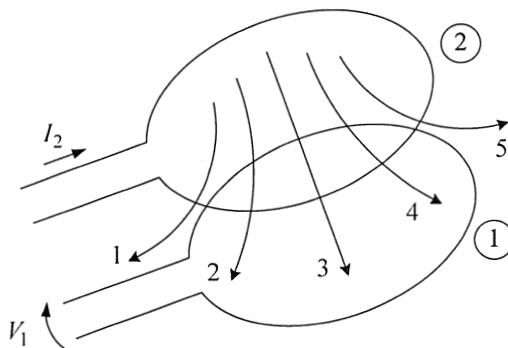


Figura 1.8: Indutância mútua.

Sendo: