

TESE

1143

Escola Federal de Engenharia de Itajubá

**LABORATÓRIO DE LINHAS DE
TRANSMISSÃO**

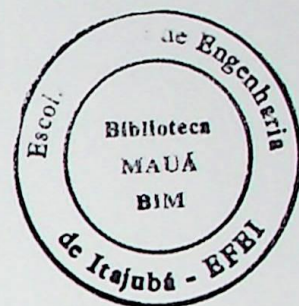
Seide da Cunha Filho

ITAJUBÁ

2001



Escola Federal de Engenharia de Itajubá
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica



LABORATÓRIO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

Dissertação apresentada à Escola
Federal de Engenharia de Itajubá,
para obtenção do título de Mestre em
Engenharia Elétrica.

Seide da Cunha Filho

ITAJUBÁ
2001

CLASS.	621.315(043.2)
CUTTER.	C.9728
TOMBO.	1143



LABORATÓRIO DE TRATAMENTO DE
TRANSMISSÃO

Departamento de Engenharia de Alimentos
Escola Federal de Engenharia de Araruama
Av. Eng. Manoel de Araújo, 100 - Araruama - RJ

Escola de Engenharia

1980

Seide da Cunha Filho

Laboratório de Linhas de Transmissão

Dissertação apresentada à Escola Federal de Engenharia de Itajubá, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de concentração:

Automação e Sistemas Elétricos Industriais

Orientador:

Germano Lambert Torres

Co-orientador:

Luiz Eduardo Borges da Silva

Itajubá

Dez/2001

AGRADECIMENTOS

Ao Professor GERMANO LAMBERT TORRES, do Instituto de Engenharia Elétrica da Escola Federal de Engenharia de Itajubá, por sua paciência, dedicação e segura orientação no desenvolvimento deste trabalho, por sua amizade e pelo agradável convívio iniciado na graduação que certamente marcaram de forma decisiva a minha existência ;

Ao Professor PEDRO PAULO LEITE DO PRADO, do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade de Taubaté, pelo incentivo e atenção com que sempre me apoiou; mas, sobretudo, por sua sabedoria ao aplicar sua “visão” para meu aperfeiçoamento e crescimento na vida acadêmica;

Ao colega CARLOS VALÉRIO, também do Instituto de Engenharia Elétrica da EFEI, pelo apoio material na implementação dos algoritmos, sem o qual este trabalho se limitaria a uma concepção acadêmica sem alcançar um produto tecnicamente confiável;

Aos meus pais, BEATRIZ e SEIDE, meus irmãos, VALÉRIA, VILMA e LUIS FELIPE e finalmente à minha namorada, GISLENE, por acreditarem e depositarem esforços em meu empenho nesse trabalho em detrimento de nossa convivência;

A TODOS, OS MEUS MAIS SINCEROS E PROFUNDOS AGRADECIMENTOS.

ÍNDICE

Agradecimentos	iii
Índice	iv
Resumo	vii
Abstract	viii

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

1.1 - Considerações Gerais.....	1
1.2 - Organização do Trabalho e Descrição dos Capítulos.....	2

CAPÍTULO 2 – VISÃO GERAL DO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA

2.1 - Introdução.....	3
2.2 - Operação do Sistema Interligado Nacional.....	4
2.3 - Rede de Transmissão.....	7
2.4 - Linhas Aéreas e Subterrâneas.....	9

CAPÍTULO 3 – CONDUTORES ELÉTRICOS

3.1 – Considerações Gerais sobre Condutores de Energia Elétrica.....	13
3.2 – Cabos para Linhas Aéreas.....	17
3.3 - Cabos para Linhas Subterrâneas.....	20

CAPÍTULO 4 – FUNDAMENTOS GERAIS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

4.1 - Conceitos Básicos.....	32
4.2 – Equações Gerais de Linhas de Transmissão.....	35
4.3 – Linhas de Transmissão como Quadripolos.....	38
4.4 – Significado das Constantes das Linhas de Transmissão.....	41
4.5 – Representação de Outros Componentes do Sistema como Quadripolos.....	43
4.6 – Compensação de Linhas de Transmissão.....	45
4.7 – Cálculo da Reatância Indutiva e da Indutância das Linhas de Transmissão.....	49
4.7.1 – Cálculo do Fluxo de Acoplamento entre Dois Condutores.....	49

4.7.2 – Cálculo das Indutâncias e Reatâncias Indutivas de Linha Trifásica Simples, sem Cabos Pára-Raios.....	56
4.7.3 - Cálculo das Indutâncias e Reatâncias Indutivas de Linha Trifásica Simples, com Cabos Pára-Raios.....	58
4.7.4 - Cálculo das Indutâncias e Reatâncias Indutivas de Linhas Trifásicas a Circuito Duplo.....	60
4.8 – Cálculo da Capacitância, Reatância Capacitiva e Susceptância das Linhas de Transmissão.....	62
4.8.1 - Introdução.....	62
4.8.2 – Cálculo das Capacitâncias das Linhas Trifásicas Simples sem Cabos Pára-raios.....	63
4.8.3 - Cálculo das Capacitâncias das Linhas com Condutores Múltiplos.....	66
4.8.4 – Cálculo das Capacitâncias das Linhas Trifásicas Simples com um Cabo Pára-raios.....	67
4.8.5 – Cálculo das Capacitâncias das Linhas Trifásicas Simples com Dois ou Mais Cabos Pára-raios.....	69
4.8.6 – Cálculo das Capacitâncias das Linhas Trifásicas a Circuito duplo.....	70
4.8.7 – Cálculo das Reatâncias Capacitivas das Linhas de Transmissão.....	71
4.8.8 – Cálculo da Susceptância Capacitiva de Linhas de Transmissão.....	73
4.8.9 – Cálculo das Reatâncias e Susceptâncias Capacitivas de Seqüência Positiva e Seqüência Zero.....	73

CAPÍTULO 5 – DESCRIÇÃO DO LABORATÓRIO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

5.1 – Introdução.....	76
5.2 - Projeto Cabos.....	76
5.3 - Projeto Flecha.....	79
5.4 - Projeto Parâmetros.....	81
5.5 - Projeto Lattice.....	84
5.6 - Projeto Compensação.....	85
5.7 - Projeto Comportamento.....	86

CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES.....	88
REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	91

RESUMO

O novo cenário energético nacional, resultado de recentes mudanças nas formas de comércio, intercâmbio e gerenciamento dos potenciais de geração, transmissão e distribuição trouxe à luz das discussões a capacidade de transmissão de energia elétrica no sistema já existente de nossa rede de transmissão, saturadas pela crescente demanda de consumo de energia elétrica. O estudo de recapacitação de linhas de transmissão mostra-se uma das alternativas à construção de novas linhas. O entendimento do funcionamento e de como cada parâmetro das linhas têm participação em seu desempenho, digo eficiência, é pois, de extrema necessidade para se encontrar a melhor forma de resolver tais problemas. Esse trabalho tem como objetivo a implementação de algoritmos de cálculos desses parâmetros para o auxílio de engenheiros e técnicos da área e estudantes da disciplina de Linhas de Transmissão, com o intuito de oferecer uma ferramenta de análise e estudo dos fenômenos que regem o funcionamento das linhas. O pacote computacional final, objeto desse trabalho, é capaz de realizar diferentes tipos de cálculos das linhas de transmissão para diferentes configurações e situações em que elas se encontram, principalmente para aquelas aéreas.

ABSTRACT

The new national energy scenery, result of recent changes in the trade forms, exchange and administration of generation, transmission and distribution, results in discussions about the capacity of electric power transmission. Nowadays, the existent transmission system is saturated by the crescent electric power consumption. Studies about increase capacity of transmission lines are shown as an alternative to the construction of new lines. The understanding of the operation and how each parameter has participation in its performance, is very important to find the best way to solve such problems. The objective of this work is to build an computational package to aid engineers and technicians in these professional activities. This package can also give a support for students during the learning process. The computational package is able to accomplish different types of calculations of the transmission lines for different configurations and situations.

1.1 – Considerações Gerais

Do mesmo modo que cresce a demanda de energia elétrica, há a necessidade de se aumentar a capacidade de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica para se atender esse crescimento. Enquanto que a locação e construção de geradores consistem em um problema relativamente fácil, a construção de novas linhas de transmissão tem se mostrado cada dia mais difícil. Como resultado, autoridades e entidades responsáveis pelo nosso sistema de potência estão procurando novas possibilidades de maximizar a capacidade de transmissão das linhas já construídas em nosso cenário do sistema de potência.

Uma das possibilidades de aumentar a capacidade das linhas é o estudo térmico dos condutores que compõe essas linhas de transmissão. Na prática observa-se que a temperatura tem grande importância no estudo da capacidade de condução de corrente dos condutores.

O objeto desse trabalho é o desenvolvimento de um Laboratório de Linhas de Transmissão, que é um pacote computacional com a função de dar apoio aos cursos de graduação da disciplina de Linhas de Transmissão. Este pacote computacional é composto por diferentes tipos de cálculos que permitem aos alunos adquirir conhecimentos e sensibilidade sobre as principais questões de linhas de transmissão, notadamente, as aéreas. As linhas de transmissão, subtransmissão e distribuição subterrâneas também podem ser tratadas por este pacote. O produto final é um programa aplicável em muitas situações de diferentes configurações de linhas de transmissão para as mais diversas regiões geográficas, desse modo, criando também uma ferramenta de auxílio a engenheiros e técnicos da área de sistemas de potência.

1.2 - Organização da Monografia e Descrição dos Capítulos

O Capítulo 1, faz uma descrição dos motivos, objetivos e objeto de desenvolvimento do presente trabalho. Especificamente, neste item é descrito a seqüência em que os assuntos são inseridos, bem como a justificativas para a existência deles no contexto dos estudos gerais.

No Capítulo 2 são apresentados alguns dados estatísticos e da grandeza do sistema elétrico nacional, mostrando o estado da arte do sistema e denotando a dinâmica de nosso mercado energético. Denota, também, no contexto do sistema de potência a forma de transmissão, subtransmissão e distribuição fazendo uma breve comparação entre os sistemas aéreos e subterrâneos mais comuns.

Uma descrição dos aspectos de construção e propriedades físicas dos condutores elétricos é apresentada no Capítulo 3. A definição dos aspectos construtivos e partes componentes dos cabos que formam os condutores elétricos utilizados nas linhas de transmissão aéreas e subterrâneas estão aí descritos. Particularidades relacionadas aos cabos de potência isolados são comentados nessa parte do trabalho.

Os conceitos fundamentais das linhas de transmissão de energia elétrica são tratados no Capítulo 4. Para o desenvolvimento do programa de linhas, toda teoria relacionada às características da linha são estudados neste capítulo. Os principais parâmetros que influenciam diretamente no desempenho das linhas trifásicas a circuitos simples, linhas trifásicas a circuito duplo e considerando a presença ou não dos cabos pára-raios são desenvolvidos apoiando-se na literatura correspondente, citada na referência [6].

Finalmente, o Capítulo 5 é dedicado a demonstração do formato alcançado pelo produto final deste trabalho. É apresentado então, um breve tutorial de suas funcionalidades, mostrando a forma na qual os dados e resultados são inseridos e mostrados, respectivamente. Nesse capítulo, também são descritos as funcionalidades de cada Projeto com suas respectivas limitações.

VISÃO GERAL DO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA

CAPÍTULO 2

2.1 - Introdução

Na tentativa de assegurar a qualidade dos serviços de energia elétrica a todos os consumidores do Brasil, a Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel) gerencia também o Programa de Abastecimento de Energia Elétrica, inserido no Plano Plurianual 2000/2003 do governo federal, voltado a estabelecer as condições necessárias para o aumento da oferta de energia elétrica, a fim de suprir o aumento de demanda previsto para os próximos anos.

No final de 1998, a capacidade instalada nacional alcançava 62,2 mil MW. Para atender às necessidades do País no período 2000-2003 será necessário ampliar a oferta em cerca de 20 mil MW, elevando a capacidade instalada para 82,2 mil MW ^[1]. O que representa uma taxa média de crescimento de 5,7% ao ano, ou seja, um incremento anual de 4 mil MW.

A expansão da oferta de energia elétrica implica: em ampliar a geração hidrelétrica e a rede de transmissão do sistema elétrico nacional; no aumento da participação das usinas termelétricas a gás natural; no incentivo à diversificação dos processos de geração, tais como co-geração e fontes alternativas - geração eólica, solar - e na importação de energia elétrica de países vizinhos.

Um sistema de Geração-Transmissão-Distribuição de energia elétrica de potência é composto de várias partes, equipamentos e tecnologias relacionadas a cada etapa do sistema. Na etapa da geração encontram-se as máquinas geradoras de energia elétrica instaladas de modo característico e inerente a cada tipo de gerador ou aproveitamento do recurso natural disponível, tais como usinas hidrelétricas, térmicas, eólicas e outros mais modernos e pouco usuais, como as

usinas de energia fotovoltaica; esses equipamentos estão conectados imediatamente a subestações elétricas que são componentes importantes no sistema elétrico de potência.

A subestação elétrica é um concentrador das linhas que transformam energia elétrica, responsáveis pela distribuição da eletricidade até os centros de consumo ou mesmo para outras subestações de transformação. Uma subestação de transmissão é geralmente usada para interligar com outra subestação de distribuição onde o fluxo de potência pode ser redirecionado através de manobras de chaveamento entre as linhas e barramentos. Em uma subestação de distribuição a eletricidade é recebida em linhas de transmissão de alta tensão e transformada para distribuição em tensões mais baixas; essa transformação de tensão é feita por transformadores de força; além dele, encontram-se ainda outros equipamentos de grande importância instalados, incluindo barramentos, chaves seccionadoras, disjuntores, isoladores, filtros, transformadores para instrumentos, destinados às medidas de altas tensões e correntes; ainda, reatores indutivos e capacitivos para realizar a compensação de reativo, relés de proteção, regulação, equipamentos de controle e comunicação além de outros equipamentos de baixa tensão, para o comando e controle dessa subestação.

2.2 - Operação do Sistema Interligado Nacional

O Operador Nacional do Sistema Elétrico concentra sua atuação sobre o Sistema Interligado Nacional, que ao final de 2000 correspondia a uma capacidade geradora instalada de 65.757,1 MW, distribuídos entre os diferentes tipos de geração. A Tabela 2.1 abaixo, ilustra a potência instalada nos vários tipos de usina.

Tabela 2.1 – Potência Instalada correspondente ao Tipo de Geração ^[1].

Tipo de Geração	Potência Instalada [MW]
Hidroelétricas	53.327,6
Térmicas	4.163,5
Nuclear	1.966
Itaipu (50%)	6.300
Total	65.757,7

A maior parte da capacidade instalada é composta por usinas hidroelétricas, que se distribuem em 12 diferentes bacias hidrográficas nas diferentes regiões.

Como as usinas hidrelétricas são construídas onde melhor se pode aproveitar as aflúncias e os desníveis dos rios, geralmente em locais distantes dos centros consumidores, foi necessário desenvolver no país um extenso sistema de transmissão.

Formando caminhos alternativos, a rede de transmissão permite transportar com segurança a energia produzida até os centros de consumo. Mais ainda, as grandes interligações possibilitam a troca de energia entre regiões, permitindo obter benefícios a partir da diversidade de comportamento das vazões entre rios de diferentes bacias hidrográficas.

Ao final de 2000, a rede de transmissão era formada por mais de 69.000 km de linhas de transmissão em tensões superiores a 230 kV^[1].

Tabela 2.2 – Tensão de Operação e Extensão das Linhas Instaladas no Brasil^[1].

Tensão (kV)	Extensão (km)
230	32.582,2
345	9.023,5
440	6.162,5
500	17.657,5
750	2.379,0
600DC	700

Desde meados da década de 70, o sistema eletroenergético brasileiro é operado de forma coordenada, visando obter ganhos sinérgicos a partir da interação entre os agentes. A operação coordenada visa minimizar os custos globais de produção de energia elétrica, contemplando restrições intra e extra-setoriais e aumentando a confiabilidade do atendimento.

Conceitualmente, a operação centralizada do Sistema Interligado Nacional está embasada na interdependência operativa entre as usinas, na interconexão dos sistemas elétricos e na integração dos recursos de geração e transmissão no atendimento ao mercado.

A interdependência operativa é causada pelo aproveitamento conjunto dos recursos hidrelétricos, através da construção e da operação de usinas e reservatórios localizados em seqüência em várias bacias hidrográficas. Desta forma, a operação de uma determinada usina depende das vazões liberadas a montante

por outras usinas que podem ser de outras empresas, ao mesmo tempo em que sua operação afeta as usinas a jusante, de forma análoga.

A utilização dos recursos de geração e transmissão dos sistemas interligados permite reduzir os custos operativos, minimizando a produção térmica e o consumo de combustíveis sempre que houver superávits hidrelétricos em outros pontos do sistema.

Em períodos de condições hidrológicas desfavoráveis, as usinas térmicas contribuem para o atendimento ao mercado como um todo, e não apenas aos consumidores de sua empresa proprietária. Assim, a participação complementar das usinas térmicas no atendimento do mercado consumidor exige interconexão e integração entre os agentes.

Com o atual processo de desverticalização e privatização das empresas, o número de agentes aumentou significativamente, bem como o nível de competição entre eles. Ainda assim, confirmando a experiência adquirida em mais de duas décadas de operação coordenada entre empresas, a otimização do uso dos recursos de geração e transmissão disponíveis se impõe, pelos benefícios que é capaz de produzir, tanto para os agentes setoriais como para o conjunto dos consumidores. A exploração coordenada dos recursos hidro e termoelétricos permite que se maximize a disponibilidade e a confiabilidade do suprimento, com redução dos custos para os consumidores.

A operação do SIN em 2000 foi marcada pela cuidadosa gestão de recursos energéticos escassos, em virtude de condições hidrológicas desfavoráveis, principalmente nas bacias hidrográficas onde estão localizados os maiores reservatórios do sistema. A participação da geração térmica na produção total de energia chegou a alcançar 5,9% com o despacho das usinas nos níveis de geração indicados pela estratégia de otimização dos recursos existentes.

Em 2001 está prevista a entrada em operação das primeiras termoelétricas a gás natural, adicionando até o fim do ano cerca de 2000 MW de potência instalada^[1].

A transferência de energia entre regiões foi intensamente utilizada para recuperar os níveis de armazenamento dos reservatórios das regiões Sudeste e Nordeste, a partir da disponibilidade de excedentes energéticos na região Norte e da maximização da geração de Itaipu. A carga própria atendida em 2000 foi de cerca de 360.224 GWh, com um crescimento de 4,9% em relação ao ano anterior^[1].

2.3 - Rede de Transmissão

As linhas de transmissão no Brasil costumam ser extensas, porque as grandes usinas hidrelétricas geralmente estão situadas a distâncias consideráveis dos centros consumidores de energia. Hoje o País está quase que totalmente interligado, de norte a sul.

Apenas o Amazonas, Roraima, Acre, Amapá, Rondônia e parte dos Estados do Pará e Mato Grosso ainda não fazem parte do sistema integrado de eletrificação. Neste Estados, o abastecimento é feito por pequenas usinas termelétricas ou por usinas hidrelétricas situadas próximas às suas capitais.

O sistema interligado de eletrificação permite que as diferentes regiões permutem energia entre si, quando uma delas apresenta queda no nível dos reservatórios. Como o regime de chuvas é diferente nas regiões Sul, Sudeste, Norte e Nordeste, os grandes troncos (linhas de transmissão da mais alta tensão: 500 kV ou 750 kV) possibilitam que os pontos com produção insuficiente de energia sejam abastecidos por centros de geração em situação favorável.

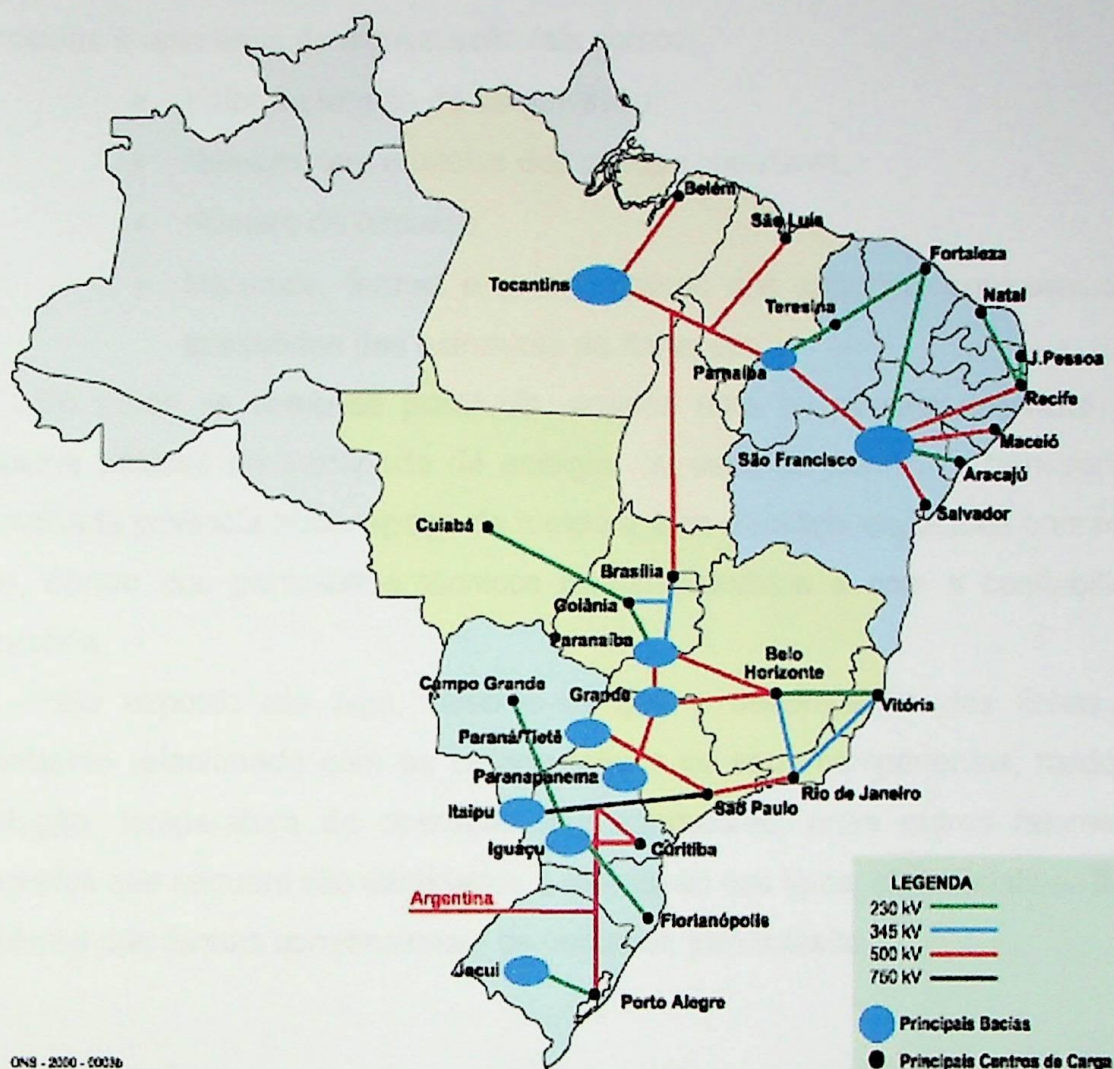
Os recursos empregados na expansão do sistema de transmissão são da iniciativa privada, desde 1999, quando a Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel) realizou o primeiro leilão para construção de extensão de três novas linhas de transmissão e dezenas de subestações. Os empreendedores que venceram a disputa precisarão aplicar R\$ 411,28 milhões na construção das redes.

No ano 2000, foram licitadas mais três 3,6 mil quilômetros de interligação, em três diferentes linhas, interligando trechos das regiões Norte, Sul e Sudeste. O custo estimado de investimento é de R\$ 1,7 bilhão ^[1].

O sistema elétrico de potência é formado por uma rede de linhas de transmissão que são usadas para conectar os diversos centros de geração para posterior distribuição da eletricidade para os centros de carga, nas mais técnica e economicamente variadas formas. A Fig 2.1 mostra a rede de transmissão do Brasil com linhas de transmissão com tensões de 230kV e superiores.



Integração Eletroenergética



ONS - 2000 - 00036

Figura 2.1 – Principais Centros Consumidores e Linhas de Transmissão do Brasil^[1].

A escolha da forma como a energia elétrica será transportada da geração até a subestação, de subestação para subestação, e daí até os consumidores no final da linha é um problema que deve ser analisado por vários ângulos, visto que, são inúmeros os fatores que influenciam nessa escolha para se encontrar a melhor solução econômica e técnica. Esses fatores estão relacionados a espaços requeridos para a instalação da linha, ao ambiente onde serão instalados, a problemas sócio-econômico-cultural das pessoas ou entidades que se beneficiarão da prestação de serviço em qual caráter está submetida à linha de transmissão dentro do sistema elétrico. Como tal, esse serviço deverá ser eficiente, confiável e econômico.

Para se transportar uma determinada quantidade de energia elétrica em uma distância preestabelecida, deve-se analisar inicialmente algumas das variáveis associadas a uma linha de transmissão tais como:

- Valor da tensão de transmissão;
- Número, tipo e bitolas dos cabos condutores;
- Número de circuitos;
- Materiais, formas e características dos suportes, equipamentos e acessórios das estruturas da linha, etc.

De todas as soluções possíveis, apenas uma ou poucas satisfazem aos requisitos básicos do transporte da energia, ou seja, de permitir o transporte de determinada potência num espaço de tempo a uma distância específica com menor custo, dentro dos parâmetros técnicos preestabelecidos e com a confiabilidade necessária.

Pelo exposto até aqui, observa-se que o desempenho das linhas está diretamente relacionado com as características de seus componentes, modos de instalação, temperatura de operação dos condutores, entre outros fatores. Os parágrafos que seguem são destinados à discussão dos tipos, características físicas e elétricas das formas convencionais de linhas de transmissão.

2.4 - Linhas Aéreas e Subterrâneas

As linhas de transmissão aéreas consistem de torres, condutores, isoladores e equipamentos de linha para a emenda dos condutores e suportes apropriados das linhas de alta tensão para as torres. Os tipos mais comuns de estruturas de linhas de transmissão são as auto-portantes e estaiadas. A Fig 2.2 mostra os modelos de torres de linhas de transmissão mais utilizados em nosso sistema de transmissão.

Com o crescente aumento da demanda de energia elétrica no sistema de potência, novas linhas com capacidades de transporte crescentes são requeridas, levando a se empregar linhas com níveis de tensão mais altos, e conseqüentemente também, com estruturas de dimensões maiores, exigindo um número maior de faixas de servidão providas de maior largura.

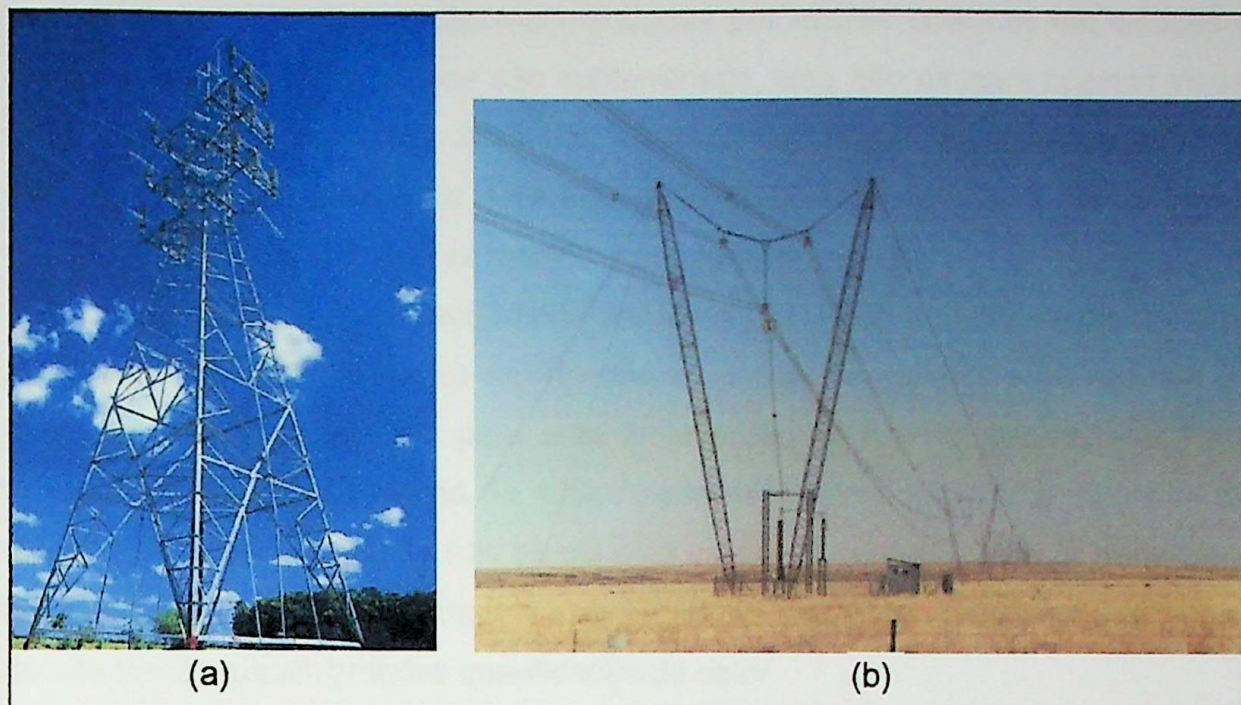


Figura 2.2 – Torres de linhas de transmissão: (a) tipo auto-portante e (b) tipo estaiada.

Tais estruturas são dimensionadas para suportar tempestades, ventos de altas velocidades e requerem largas faixas de terreno para serem instaladas.

Esses espaços se tornam muito difíceis de se conseguir, seja pelo custo elevado ou por causa do impacto visual que as linhas representam na paisagem, fato que muitas vezes não é bem recebido pela população, principalmente em centros urbanos. Soluções muito comuns para essa dificuldade da construção de novas linhas de transmissão são a elevação da tensão em linhas existentes, a troca da linha de circuito simples por outra de circuito duplo na mesma faixa de tensão e até o aumento da ordem das fases – de três para seis ou nove fases – que tem a vantagem de necessitarem de faixas de servidão mais estreitas, permitirem maiores densidades de potência na seção transversal do condutor e menores gradientes de potencial nos condutor.

Atualmente, tem-se dado muita atenção ao meio ambiente e ao seres vivos, principalmente aos humanos, ao que se refere aos fatores tais com interferência eletromagnética geradas por linhas de transmissão, uso da terra e efeitos ecológicos. Apesar dos estudos^[2] mostrarem que os campos magnéticos das linhas são mínimos no nível do solo e bem abaixo dos limites aceitáveis, grandes estudos em linhas com desenhos compactos, modificação da configuração de fases e formas de blindagem são sugeridos para a diminuição deste fenômeno.

Linhas subterrâneas são recomendadas por razões estéticas em cidades e em áreas de paisagem. Já que são subterrâneas, elas não causam impacto visual no ambiente que a envolve. As linhas de transmissão subterrâneas também não geram campos magnéticos na superfície do solo, pois geralmente a camada mais externa do cabo é aterrada e se mantém no potencial de terra.

Relativamente ao espaço necessário para instalação de cabos subterrâneos, este último leva desvantagem em relação às linhas aéreas por necessitarem de áreas de terra maiores que para uma linha aérea de mesma capacidade. Para instalar uma linha subterrânea de 400kV seria necessário cavar uma trincheira do tamanho de uma rodovia de três pistas com uma profundidade de 11/2 metro para acomodar até 12 cabos separadamente^[2]. Este espaço é necessário pois os cabos de alta tensão geram grandes quantidades de calor.

O ar que circula em volta dos cabos das linhas aéreas faz sua refrigeração e para cabos subterrâneos é necessário um bom espaçamento para permitir refrigeração natural, evitando superaquecimento.

Áreas de terra adicionais são necessárias para terminações dos cabos, onde as emendas com linhas aéreas são feitas. O espaço necessário instalação das terminações de cabos subterrâneos é de aproximadamente 2000m², onde serão colocados as torres terminais, um pequeno prédio e outros equipamentos de transmissão. Esse detalhe da instalação pode ser observado na Fig 2.3 mostrada a seguir.

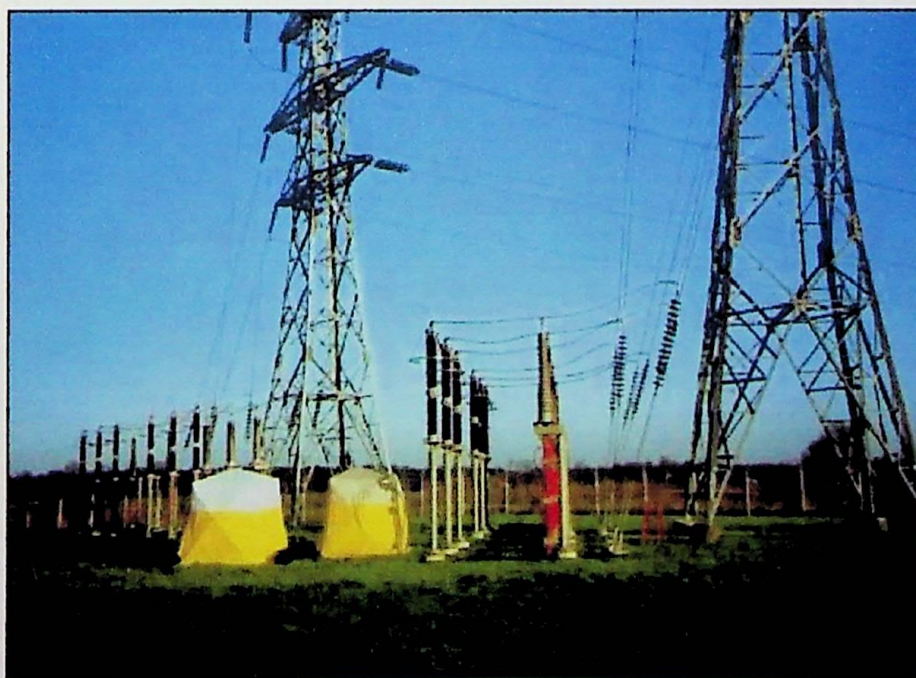


Figura 2.3 – Conexão de linha aérea com subterrânea.

Os métodos mais utilizados para instalação de cabos subterrâneos são enumerados a seguir.

1. Diretamente enterrados;
2. Em banco de dutos;
3. Em eletrodutos
4. Em valas preenchidas com areia.

3.1 – Considerações Gerais sobre Condutores de Energia Elétrica

Os condutores de uma linha de transmissão podem ser considerados um dos elementos mais importantes de um sistema de energia elétrica, pois são os guias dos campos magnéticos e elétricos no processo de transporte da energia. Devido às várias possibilidades de infra-estrutura e materiais empregados na construção e instalação desses cabos, surgiram concomitantemente, muitas soluções de formas características no modo de conceber e fabricar cabos para os vários níveis de tensão e corrente associado ao modo no qual serão instalados. Dessa forma pode-se classificar os condutores de potência com relação ao modo de transmissão em duas classes distintas:

- Condutores para linhas aéreas;
- Condutores para linhas subterrâneas.

A diferença notável nas formas de instalação introduz problemas e restrições aos parâmetros das linhas, bem como vantagens e desvantagens da utilização de uma ou outra maneira de instalar em particular.

Nesse capítulo serão comentados os aspectos mecânicos, elétricos e construtivos dos vários tipos de cabos utilizados como condutores elétricos, colocando no centro das discussões a contribuição ou o prejuízo que cada fator possa dar ao comportamento térmico do condutor pela passagem da corrente elétrica.

A escolha e dimensionamento corretos dos condutores são fatores decisivos na limitação das perdas de energia provocadas por efeitos Joule, corona, pelicular,

de proximidade e também dos problemas de natureza mecânica que podem decorrer de esforços excessivos e vibrações. As perdas por efeito Joule são controladas pela escolha de condutores com áreas de secções transversais adequadas às correntes que deverão conduzir, juntamente com a escolha de materiais com resistividades compatíveis. Se a corrente é proporcional a potência a ser transmitida e inversamente proporcional ao nível de tensão, e para se transmitir grandes pacotes de potência usa-se níveis de tensões elevadas, esse fator propicia manifestações do efeito corona que depende do gradiente de potencial nas imediações dos condutores e que pode ser minimizado com o aumento do diâmetro do condutor.

Dois aspectos devem ser analisados e comparados para se direcionar a pesquisa da escolha do tipo de condutor a ser empregado na linha, são eles:

- Material a ser utilizado
- Forma geométrica do condutor.

Material

Os materiais utilizados atualmente na fabricação de condutores dos cabos elétricos são o cobre e o alumínio. O cobre, que é o material tradicional, deve ser eletrolítico, ou seja refinado por eletrólise, de pureza mínima 99,9%, recozido (têmpera mole), de condutibilidade 100% IACS (International Annealed Copper Standard). O alumínio, normalmente obtido por laminação contínua, vem sendo amplamente empregado como condutor elétrico, em virtude principalmente da sua boa trabalhabilidade, menor peso específico e conveniência econômica. O alumínio puro utilizado em condutores isolados é normalmente de têmpera meio-dura e de condutibilidade 61% IACS.

Para efeito de uma comparação entre ambos, pode-se raciocinar sobre as bitolas necessárias de cada um para o transporte de uma mesma corrente. Essa condição equivale aproximadamente à igualdade das resistências ôhmicas, ou seja:

$$R_{cu} = \rho_{cu} \cdot \frac{L}{S_{cu}} = R_{al} = \rho_{al} \cdot \frac{L}{S_{al}} \quad (3.1)$$

$$\rho_{al} \cdot S_{cu} = \rho_{cu} \cdot S_{al} \quad (3.2)$$

Como a condutibilidade de alumínio é 61% da do cobre, pode-se escrever (3.3) com base na relação (3.2).

$$\frac{S_{al}}{S_{cu}} = \frac{\rho_{al}}{\rho_{cu}} = \frac{100}{61} = 1,64 \quad (3.3)$$

onde: R é a resistência ôhmica do condutor [Ω/km];

ρ é a resistividade do material condutor [$\Omega \cdot \text{cm}$];

S é secção transversal do condutor [mm^2].

e concluir:

$$\frac{\phi_{al}}{\phi_{cu}} = \sqrt{1,64} = 1,28 \quad (3.4)$$

onde: ϕ é o diâmetro do condutor [mm]

Por outro lado:

$$\frac{\gamma_{cu}}{\gamma_{al}} = \frac{8,9}{2,7} = 3,29 \quad (3.5)$$

onde: γ é o peso específico [kg/cm^3]

que permite concluir:

$$\frac{M_{cu}}{M_{al}} = \frac{3,29}{1,64} \cong 2 \quad (3.6)$$

onde: M é a massa [kg].

Ou seja, para o transporte de uma mesma corrente o condutor de alumínio terá diâmetro 28% maior que o de cobre, mas, mesmo assim pesará cerca da metade deste.

A maior limitação ao uso do alumínio como condutor elétrico vinha sendo a confecção de acessórios em face da rápida oxidação do metal quando em contato com o ar e à deterioração das suas propriedades mecânicas, notadamente a resistência à tração, quando deformado. Com o desenvolvimento de novas técnicas de trabalho e linhas de acessórios especiais estes problemas hoje estão resolvidos e o cabo em alumínio tem encontrado ampla aplicação.

Forma

Várias alternativas de construção do condutor de cobre ou alumínio são possíveis:

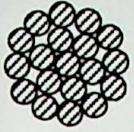
Redondo sólido



Solução ideal do ponto de vista econômico; sua limitação está no aspecto dimensional em flexibilidade, sendo mais aplicável para as bitolas

menores. Seu uso no âmbito de cabos de energia está limitado a fios para construções, ou em aplicações especiais.

Redondo Normal



Amplamente utilizado em cabos de energia singelo ou múltiplo, com ou sem qualquer tipo de isolamento. Apresenta melhor flexibilidade, pois são formados por “encordoamento” de fio metálico. Sobre um fio de secção transversal circular são enrolados, em forma espiral, outros fios envolvendo esse primeiro, formando uma, duas ou mais camadas. Os fios que compõem o cabo são em geral todos da mesma bitola, ou podem ter diâmetros diferentes em camadas diferentes. O sentido de encordoamento de cada uma das camadas é sempre oposto ao da camada anterior.

Os cabos com fios de mesma bitola são formados obedecendo a seguinte lei:

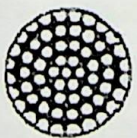
$$n = 3x^2 + 3x + 1 \quad (3.7)$$

onde: n – representa o número total de fios;

x – número de camadas.

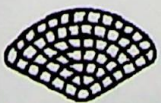
Observar que cada camada terá o número de fios igual ao número de fios da camada anterior mais seis.

Redondo Compacto



A construção é semelhante ao do cabo redondo normal, porém após o encordoamento sofre um processo de compactação através da passagem do cabo por um perfil, cujo objetivo é tornar os fios que compõe o condutor na forma trapezoidal diminuindo assim a área da seção transversal do condutor sem baixar a ampacidade.

Setorial compacto



É fabricado analogamente ao redondo compacto, sendo que o perfil do setorial é obtido pela passagem de uma corda redonda normal por um jogo de calandras dimensionadas para atribuir ao condutor o formato setorial adequado, com deformação dos fios elementares.

Utilizado nos cabos múltiplos (tripolares e tetrapolares isolados) trás a vantagem da redução do diâmetro externo do cabo e conseqüentemente economia de materiais de enchimento e proteção.

Flexível e extra flexível

Utilizados em cabos alimentadores de máquinas móveis (escavadeiras, dragas, pontes rolantes, etc.) ou aparelhos portáteis (máquinas de solda, aparelhos eletrodomésticos, etc.). São obtidos através do encordoamento de grande número de fios de diâmetro reduzido.

Conci

É usado unicamente em “cabos a óleo” (OF). Trata-se de um condutor anular cujo núcleo é oco, formando um canal para o óleo impregnante. É formado por uma ou várias coroas anelares, que por sua vez são formados por setores anelares encordoados helicoidalmente.

Até este ponto foi descrita a principal característica construtiva apenas dos condutores utilizados para a transmissão de energia elétrica, sendo portanto, possível encontrar cabos de energia elétrica com essas características, mas dependendo do modo de instalação o cabo pode conter outros componentes para adequação ao modo de instalação.

As diferenças relevantes na forma construtivas dos cabos estão diretamente relacionadas ao modo de instalação de tal modo que define os cabos isolados e os nus. Enquanto os cabos isolados são geralmente empregados em linhas de transmissão subterrâneas, internas ou ainda, linhas aéreas mas que requeiram proteções contra corrosão, contatos diretos e indiretos, proteção contra ataques mecânicos, etc., os cabos nus são particularmente usados em linhas aéreas de transmissão de energia elétrica.

Os itens que seguem fazem descrições mais precisas das características construtivas dos cabos utilizados nestes dois tipos de linha.

3.2 – Cabos para Linhas Aéreas

Os cabos utilizados em linhas aéreas são de construção muito mais simples comparada aos cabos para linhas subterrâneas, por não precisarem do isolamento, salvo em casos particulares. O dielétrico utilizado para este tipo de linha é o próprio

ar que envolve os condutores e o sistema de suporte desses nas estruturas que os mantém acima do solo.

Os condutores das linhas aéreas de transmissão, para se manterem suspensos acima do solo são submetidos a forças axiais que variam com as mudanças das condições ambientais, tais como a temperatura ambiente e os ventos atmosféricos. Tais forças axiais sofridas pelo condutor aumentam com a diminuição da temperatura e com o aumento dos ventos e vice-versa. O vento também é responsável por vibrações de frequências elevadas que podem provocar a ruptura do condutor por meio da fadiga deles nos pontos de sua fixação. Se se aplicar uma força de tração elevada demais no cabo pode-se sujeitá-lo a problemas maiores decorrentes de vibrações, por outro lado, baixas taxas de tração causam flechas maiores, exigindo torres mais altas ou um espaçamento menor entre elas, evidenciando a necessidade de maior número de estruturas para que se possa manter o condutor dentro de uma “altura de segurança” do solo, que é a menor distância entre o cabo e o solo.

Um dos fatores importantes a serem considerados na escolha dos condutores é a capacidade de operar com temperaturas elevadas sem perdas acentuadas de resistência mecânica e com menor alongamento permanente, permitindo maiores densidades de corrente.

A seguir são descritas algumas características dos cabos utilizados nas linhas aéreas de transmissão de energia elétrica.

A especificação do cabo é feita pela área da seção transversal nominal, número de fios e diâmetro nominal. A área de seção transversal é a soma das áreas da seção transversal dos fios que compõe o cabo, enquanto que o diâmetro nominal é o diâmetro do círculo que circunscreve todos os fios do cabo.

A unidade da medida da área da seção transversal adotada é o CM – “Circular Mil”, que corresponde à área de um círculo de um milionésimo de polegada de diâmetro, o equivalente a $0,506707 \cdot 10^{-3} \text{ [mm}^2\text{]}$.

Os cabos de alumínio (CA) são compostos por fios de 99,45% de pureza e têmpera dura, sendo sua condutividade igual a 61% IACS. No Brasil, eles são especificados através de sua área de seção transversal em $[\text{mm}^2]$, e as indústrias produtoras utilizam nomes de flores no idioma inglês para designar cada cabo, como por exemplo: TULIP – cabo composto de 19 fios de alumínio com área de 336,4kCM ou $170,46 \text{ mm}^2$ e diâmetro nominal de 16,91mm.

Condutor de alumínio com alma de aço denominado CAA no Brasil (ACSR – Aluminium Conductor Steel Reinforced) é o tipo de condutor de corrente mais utilizado mundialmente, e foram concebidos para atender a falta de resistência mecânica à tração dos cabos de puro alumínio. Condutores de puro alumínio (AAC – All Aluminium Conductor) são usados em regiões litorâneas por serem mais resistentes a corrosão e também para aplicações na qual requerem baixas resistências elétricas e que não necessitem de altos esforços mecânicos suportados pelo núcleo de aço. Recentemente, condutores de liga de alumínio (All Aluminium Alloy Conductor) têm sido utilizado por terem baixo peso e uma razão força/peso alta, viabilizando longos espaçamentos entre torres com menores flechas (arqueamento). Outros tipos de condutores contendo proporções variadas de alumínio, liga de alumínio, e fios de aço também são empregados em aplicações especiais. Tipos populares de condutores híbridos são os cabos de alumínio reforçados com fios de liga de alumínio, chamados de CALA no Brasil (ACAR – Aluminium Conductor Alloy Reinforced) e condutor de liga de alumínio reforçado com fios de aço (AACSR – Aluminium Alloy Conductor Steel Reinforced). Alguns exemplos de condutores normalmente utilizados em linhas de transmissão aéreas são mostrados na Fig 3.1.

Outro tipo de cabo é o Condutor de alumínio suportado por aço (SSAC – Steel Supported Aluminium Conductor) que permitem altas temperaturas de operação com menor flecha, pois o aço é material responsável por suportar toda a tensão mecânica da ancoragem já que o alumínio, que é o material responsável pelo carregamento da corrente elétrica está na forma recozido, não podendo suportar nenhuma tração, mas que pode operar com temperaturas de até 200°C sem perdas de resistência mecânica ou incremento do alongamento permanente. Nos atuais condutores de alta temperatura e ampacidade são usados ligas de alumínio e zircônio para a condução da corrente e fios de aço reforçado com liga de Invar (53% ferro e 47% de níquel) para o núcleo. Outro recente desenvolvimento na tecnologia de construção de condutores para linhas de transmissão é a integração da tecnologia de comunicação de dados via fibra ótica, um cabo de fibra ótica é colocada no núcleo do cabo de guarda da linha de transmissão aérea, denominando o sistema de OPGW – “Optical Ground Wire” e uma variação desse sistema é a colocação do cabo de fibra ótica no núcleo do cabo de potência^[2]. Tal sistema de comunicação de dados oferece a

segurança de um sistema livre de ruídos já que a fibra ótica não sofre interferência eletromagnética.

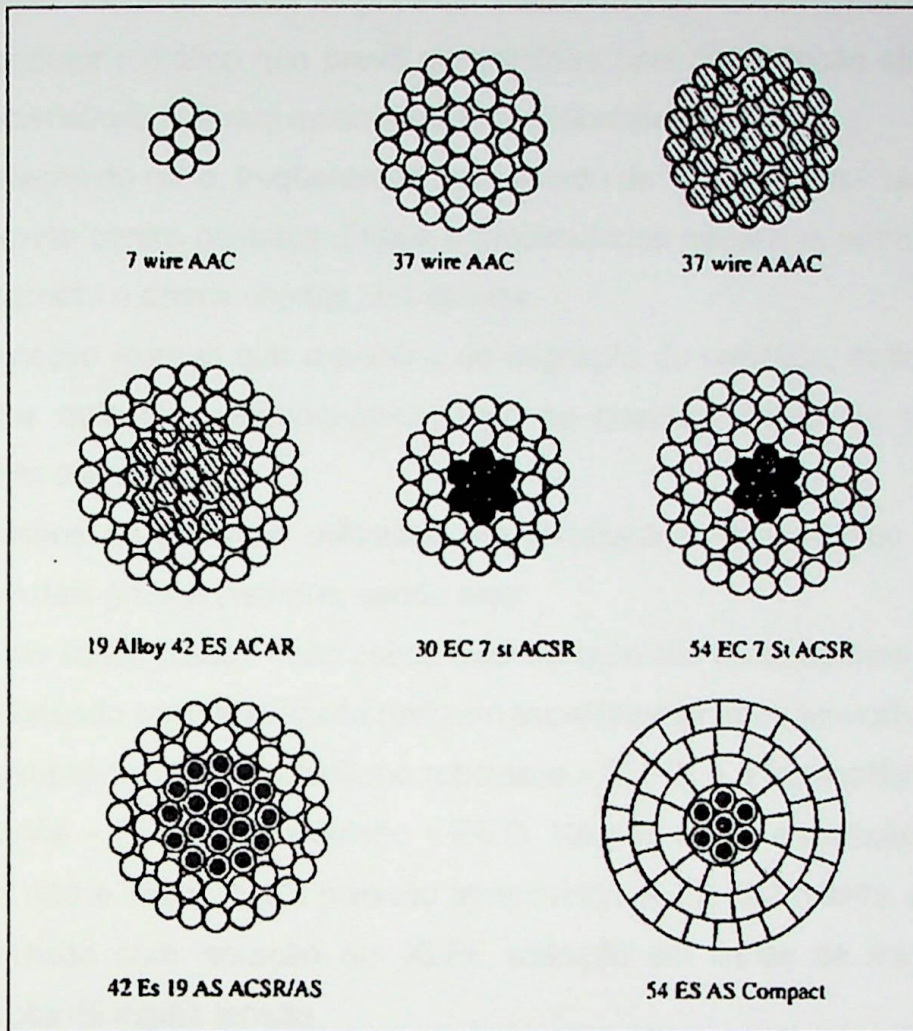


Figura 3.1 – Tipos de Condutores de Linhas de Transmissão Aéreas.

3.3 - Cabos para Linhas Subterrâneas

Os cabos utilizados para instalação de linhas de transmissão subterrâneas possuem características bem diferentes daqueles empregados nas linhas aéreas. Para se adequarem ao modo de instalação estes cabos que têm condutores de construção semelhante àqueles das linhas aéreas recebem vários outros componentes, tais como blindagem, isolamento, e proteções, que terão funções importantes no desempenho do cabo e finalmente na linha de transmissão.

Toda camada adicionada sobre o condutor tem sua razão de existir e desempenham diferentes papéis na construção do cabo. Os próximos parágrafos

serão destinados a discussões das propriedades, materiais empregados e funções de cada camada.

Portanto, todos os cabos de potência possuem três componentes essenciais:

1. O condutor metálico que provê um caminho para a condução elétrica, cujas características já foram mencionadas anteriormente.
2. A isolação do cabo, freqüentemente chamado de “dielétrico” ou “isolante”, que o previne contra contatos diretos e proximidades perigosas entre o condutor energizado e outros objetos ou pessoas.
3. A proteção externa que o previne de migração de umidade, dano mecânico, ataque químico e eletroquímico, fogo ou qualquer influência perigosa ao próprio cabo.

Os cabos de potência utilizados em instalações subterrâneas podem ser divididos em dois grupos distintos, sendo eles:

- a) Cabos tipo sólido (seco) – são cabos cuja isolação são feitas apenas de material sólido, podendo ser estratificada (utilizam papel impregnado), termofixo (borracha etileno-propileno - EPR, polietileno reticulado - XLPE) e o termoplástico (cloreto de polivinila – PVC e o polietileno – PET). Nesses cabos a pressão interna da isolação não é maior que a pressão atmosférica. A Fig 3.2 mostra um cabo de média tensão com isolação em XLPE utilizado em linhas de transmissão e distribuição de média tensão.

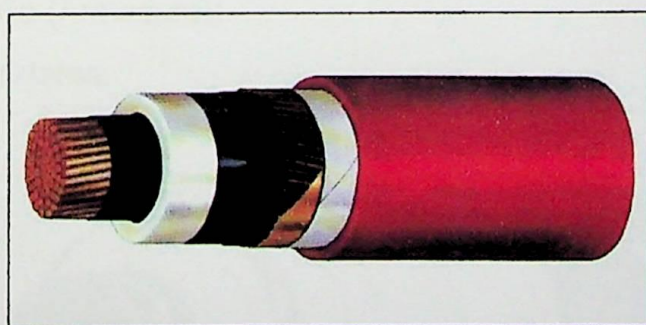


Figura 3.2 – Cabo unipolar isolado^[3].

- b) Cabos pressurizados – são cabos que utilizam isolação estratificada e cuja pressão interna é mantida sempre maior que a pressão atmosférica através do bombeamento de óleo fluido constituindo os cabos a óleo-fluido (cabos OF e cabos tipo *pipe*) ou de gás inerte (hexafluoreto de enxofre, SF₆) consistindo no cabo a gás. A Fig 3.3 mostra o detalhe em corte de um cabo do tipo a óleo fluido

de produção da Pirelli Cabos Elétricos onde pode-se observar o isolamento do tipo papel impregnado e os dutos de passagem e distribuição do óleo fluido.

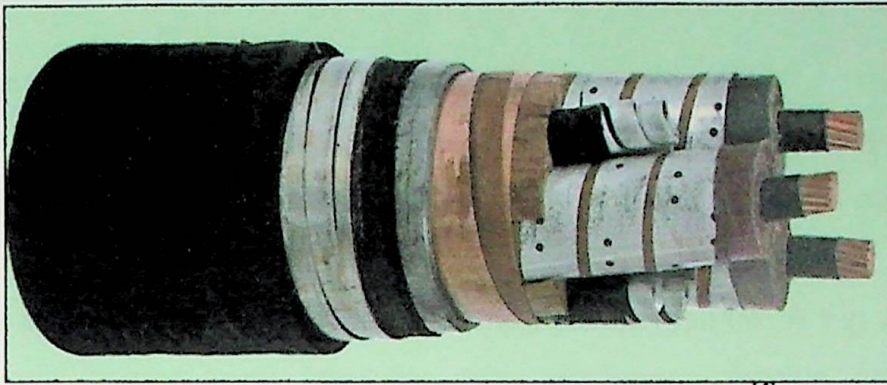


Figura 3.3 – Cabo tripolar tipo a óleo fluido^[4].

De modo geral, os cabos de potência construídos para linhas subterrâneas podem possuir a seqüência de camadas sobre o condutor conforme a lista a seguir e mostradas na Fig 3.4.

- (1) Canal para passagem do óleo;
- (2) Condutor elétrico;
- (3) Blindagem sobre o condutor;
- (4) Isolação;
- (5) Blindagem da isolação (bainha);
- (6) Preenchimento;
- (7) Proteção (Armadura);
- (8) Capa externa.

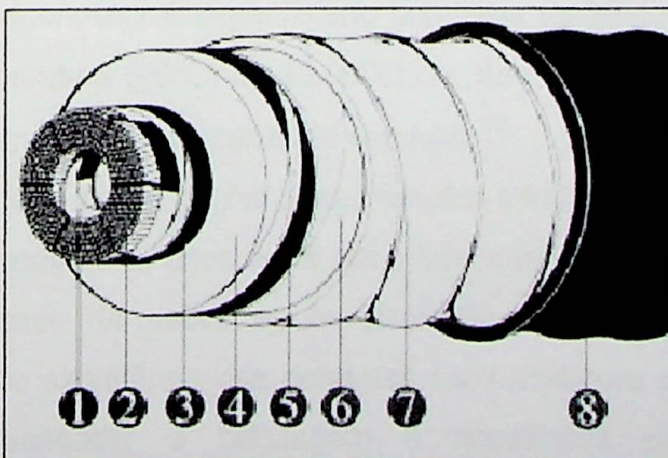


Figura 3.4 – Indicação das várias camadas que compõe os cabos isolados de potência.

A seguir será feita uma descrição das camadas citadas acima, denotando a propriedade e sua função na composição do cabo e ainda será visto o conceito associado a cada camada.

Blindagem sobre o condutor

Um condutor encordoado recoberto apenas por uma camada isolante diretamente aplicada sobre o condutor apresenta a distribuição do campo elétrico distorcido devido a irregularidade da superfície do condutor, provocando concentrações de esforços elétricos em determinados pontos. A Fig 3.5 mostra a distribuição do campo num condutor sem blindagem. Nestas condições, as solicitações elétricas concentradas podem exceder os limites permissíveis pelo isolamento, ocasionando uma depreciação na vida útil do cabo. Além disso, no caso de cabos com isolação sólida, a existência de ar entre o condutor e o isolante pode dar origem a ionização, com conseqüências danosas para o material isolante.

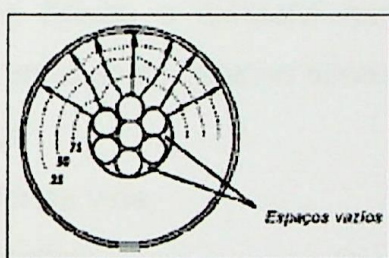
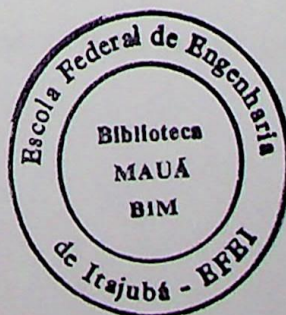


Figura 3.5 – Condutor sem Blindagem.

Com a interposição de uma camada semicondutora, o campo elétrico se torna uniforme e os problemas são minimizados ou mesmo eliminados. O material utilizado como semicondutor é especificado com uma resistividade térmica máxima em função da temperatura (90°C) de $10.000\Omega.\text{cm}$, de forma que esta camada possa ser considerada como parte integrante do condutor [4].

Para um perfeito desempenho dessa função, a blindagem interna, constituída pela camada semicondutora, deve estar em íntimo contato com a superfície interna da isolação. No caso de cabos secos (isolação extrudada) isso é alcançado mediante a extrusão simultânea das camadas semicondutora e isolante e no caso da isolação estratificada; a blindagem é constituída por fitas de papel semicondutoras aplicadas helicoidalmente.



A Fig 3.6 mostra a distribuição do campo elétrico num condutor com blindagem.

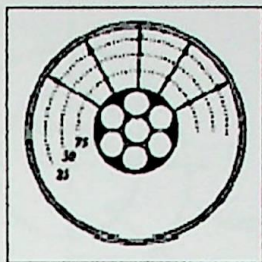


Figura 3.6 – Condutor com Blindagem.

Desse modo, define-se como cabo a campo radial os cabos que possuem blindagem sobre o condutor e a isolação.

Isolação

A isolação elétrica dos condutores é feita por materiais isolantes com muitas diferenças nas propriedades físicas e elétricas que devem ser analisadas na tentativa da escolha correta, entre estas características destacam-se:

- Rigidez dielétrica
- Durabilidade e longa vida;
- Resistividade térmica;
- Limites térmicos;
- Perda dielétrica;
- Resistência à ionização;
- Resistência a certos agentes químicos;
- Facilidade em seu manuseio e fabricação, etc...

Um dos parâmetros mais importantes é a rigidez dielétrica do material isolante, ou seja o gradiente de perfuração do dielétrico que está associado ao conceito de gradiente de potencial.

Chama-se “gradiente de potencial” (ou “campo elétrico”), que se exprime normalmente em kV/mm, a relação entre a diferença de potencial, ou tensão elétrica aplicada a uma camada elementar de dielétrico e a espessura dessa camada.

Sabe-se que o gradiente não é uniforme em toda a espessura do dielétrico, sendo mais elevado nas proximidades do condutor e mais baixo na superfície externa da isolação.

Entretanto, fala-se em “gradiente médio” que se entende como a relação entre a tensão fase-terra e a espessura total do isolante.

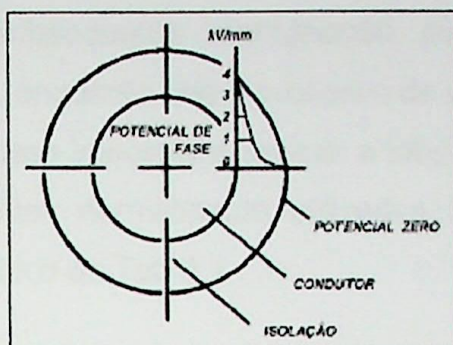


Figura 3.7 – Gradiente de potencial em um condutor isolado.

A expressão matemática que expressa o gradiente máximo é dada por (3.7):

$$G = \frac{0,502 E_{ff}}{d_i \cdot \log \frac{D_e}{d_i}} \text{ [kV/mm]} \quad (3.7)$$

ou

$$G = \frac{0,869 E_0}{d_i \cdot \log \frac{D_e}{d_i}} \text{ [kV/mm]} \quad (3.8)$$

onde: G – gradiente máximo [kV/mm],

E_{ff} – tensão fase-fase [kV],

E_0 – tensão fase-terra [kV],

d_i – diâmetro sob o isolamento [mm] e

D_e – diâmetro sobre o isolamento [mm].

O gradiente máximo corresponde ao gradiente na superfície de contato entre o condutor e o isolante, enquanto o gradiente mínimo em correspondência ao contato entre a superfície externa do isolante e a terra (ou a blindagem externa que é aterrada).

A rigidez varia de seção para seção ao longo do comprimento do cabo, apresentando uma dispersão considerável em torno de um valor médio.

Esta dispersão será aleatória e proporcional ao número de vazios ou impurezas localizadas no seio do material isolante, que se constituem em sedes de ionização.

Por meio de provas de tensão em amostras de cabos ^[4], observa-se que a dispersão dos valores de rigidez é muito menor nos dielétricos estratificados do que nos dielétricos sólidos. Explica-se isto pelo fato de que o método de aplicação da isolação estratificada e subsequente impregnação, evita a presença de vazios localizados no isolamento, enquanto que o processo de preparação e aplicação dos dielétricos sólidos torna quase impossível garantir a total ausência destes vazios.

Os materiais isolantes normalmente utilizados em cabos de energia são mostrados no quadro sintético da Tab 3.1 .

Tabela 3.1 – Materiais isolantes usados em cabos de energia.

Sólidos (Extrudados)	Termoplásticos	<ul style="list-style-type: none"> ▪ PVC (Cloro de Polivinila) ▪ PET (Polietileno)
	Termofixos	<ul style="list-style-type: none"> ▪ XLPE (Polietileno Reticulado) ▪ EPR (Borracha Etileno-Propileno)
Estratificados	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Papel Impregnado com massa ▪ Papel impregnado com óleo ▪ Fluido Sob Pressão 	

Isolantes sólidos (extrudados)

Os isolantes sólidos dividem-se em duas grandes famílias: termoplásticos e os termofixos. Os termoplásticos são polímeros de cadeia linear e amolecem com o aumento da temperatura, enquanto que, os termofixos são polímeros tridimensionais obtidos por vulcanização e não amolecem com o aumento da temperatura.

São mais utilizados nos cabos de baixa e média tensão e possuem diversas características comuns que são enumeradas a seguir.

1. Homogeneidade da isolação
2. Boa resistência ao envelhecimento em serviço
3. Ausência de escoamento
4. Reduzida sensibilidade ao escoamento
5. Insensibilidade às vibrações
6. Bom comportamento ao fogo

Na pratica, até 15kV, o isolante seco mais usado é o PVC, apesar de suas características elétricas apenas regulares, porque é mais econômico e bastante durável, apresentando excelente resistência à ionização.

O polietileno comum, com excelente constante de isolamento, alta rigidez dielétrica e fator de perda baixíssimo, encontra limitação na baixa resistência à ionização e nas pobres características físicas.

O polietileno reticulado, obtido por reticulação molecular do polietileno comum, alia as excelentes propriedades deste com a alta temperatura admissível e boas propriedades mecânicas, mas é pouco flexível e tem baixa resistência à ionização. É utilizado até 15kV com plena garantia de confiabilidade^[4].

Porém, devido à dispersão relativamente alta de sua rigidez dielétrica e também ao fenômeno nocivo do “treeing” – arborescências que se formam no material isolante provocando descargas parciais e conseqüentemente deterioração do mesmo - que tem se verificado com certa freqüência neste material, considera-se inadequado o seu uso para tensões superiores a 15kV.

A borracha etileno-propileno - EPR é o isolante de desenvolvimento mais recente e também o mais completo, ou seja, alta temperatura admissível, resistência à ionização muito maior que o polietileno reticulado, gradiente de projeto do mesmo valor que este e excelente flexibilidade.

O EPR apresenta baixa dispersão da rigidez dielétrica e é praticamente isento do fenômeno do “treeing”. O conjunto dessas características faz com que o isolante sólido disponível mais indicado seja o EPR.

Isolantes estratificados

O papel impregnado com massa é tradicionalmente utilizado em cabos de energia para média e alta tensão. Este material vem sendo utilizado há várias décadas em todo o mundo, comprovando uma vida útil excepcionalmente longa. A contínua evolução tecnológica do papel impregnado tem melhorado ainda mais as suas características, produzindo novas gerações de cabos de excelente qualidade, alta confiabilidade e que são, essencialmente, cabos modernos.

Trata-se de uma isolação constituída por fitas delgadas de papel, colocadas helicoidalmente em diversas camadas e impregnadas, após rigoroso processo de secagem, por um material isolante cujas características variam com o tipo de cabo. O papel impregnado é hoje utilizado nos *cabos a óleo sob pressão* (cabos OF e tipo “pipe”) e nos *cabos com massa não escoante*^[4].

Os isolantes estratificados, pela sua constituição característica, apresentam uma dispersão extremamente baixa da sua rigidez dielétrica. Este fato faz com que o

papel impregnado seja por excelência o mais confiável dentre todos os materiais isolantes normalmente utilizados, ou, em outras palavras, o que apresenta menores probabilidades de falhas.

Além da rigidez dielétrica e a resistência à ionização, outras duas características dos isolantes são muito importantes para o rendimento e desempenho de um cabo de energia quando associados à isolação. Estas características são a temperatura de operação e o fator de potência do dielétrico.

A temperatura admissível do material isolante é a propriedade física que determinará a máxima temperatura de operação do cabo e conseqüentemente constitui um fator limitante da capacidade de condução de corrente do cabo.

O fator de potência do dielétrico, indicado por “ $\tan \delta$ ” é a relação entre a potência dissipada no dielétrico e a potência aparente (capacitivo) do cabo, quando este está sob tensão. Trata-se de um valor de máxima importância para caracterizar a boa qualidade do dielétrico e é sobre ele que se empenham os maiores esforços dos fabricantes de cabos para alta e altíssima tensão, que sempre buscam a minimização de seus valores e variações.

Materiais isolantes com altos valores de fator de potência do dielétrico são indesejáveis, pois este influi diretamente no aumento das perdas dielétricas com mostrado em (3.9).

$$W_d = \omega C V_0^2 \tan \delta \quad (3.9)$$

onde: W_d – perdas dielétricas [W/m];

$$\omega = 2\pi f \text{ [rad/s];}$$

C – capacitância da isolação por fase [$\mu\text{F/m}$];

V_0 – valor eficaz da tensão entre condutor e blindagem da isolação [kV].

As perdas dielétricas deverão, portanto, serem consideradas a partir de certos níveis de tensão, para cabos de campo elétrico radial usados em sistemas de corrente alternada. A Tab (3.2) a seguir mostra o nível de tensão para determinado tipo de cabo a partir do qual deve-se considerar as perdas dielétricas.

Tabela 3.2 – Tipo de cabo para tensão de operação^[5].

Tipo de cabo	V_0 [kV]
Cabos isolados com papel impregnado	
• Tipo sólido	38
• Óleo fluido e gás pressurizado	63,5

Blindagem sobre o isolamento

Consiste de uma camada de material semicondutor e, na maioria dos casos, também de uma camada de material condutor aplicado sobre a superfície do isolamento. Sua principal finalidade é confinar o campo elétrico dentro do cabo isolado, além de reduzir o risco de choque por poder aterrar a blindagem e limitar a rádio interferência.

Um cabo que possua blindagem sobre o condutor denomina-se “a *campo radial*”, enquanto que aquele que não possui a blindagem, denomina-se “a *campo não radial*”. No caso do cabo a campo radial, o campo distribui-se de forma equilibrada e radialmente em relação ao condutor. A Fig 3.8 mostra um cabo a campo radial e a distribuição do campo em seu interior. A construção a campo radial é preferível, principalmente em tensões elevadas, pois garante solicitações elétricas uniformes em cada camada do isolante.

As blindagens metálicas podem variar bastante na sua forma construtiva mas devem ser feitas de camadas de metais não magnéticos, tais como fitas finas de alumínio ou cobre ou na forma de bainhas condutivas finas e extrudadas. As blindagens da isolação devem ser aterradas pelo menos em um ponto, preferencialmente em dois ou mais pontos, mantendo-se totalmente no potencial de terra [4].

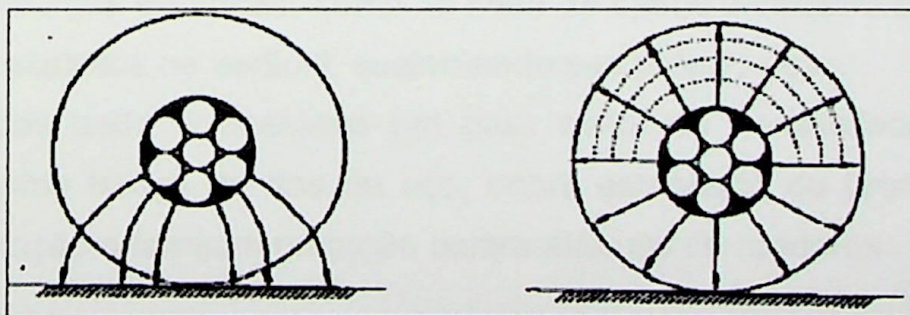


Figura 3.8 – Comportamento das linhas de campo elétrico no cabo sem e com blindagem de isolação.

Proteções

Quando um cabo é destinado a instalações nas quais deverão ocorrer esforços mecânicos, é comum a utilização de uma *armação*, ou seja, uma proteção metálica adicional. Tração, compressão e impactos são os esforços aos quais um cabo poderá estar submetido.

A proteção contra esforços mecânicos é feita por aplicação sobre o núcleo do cabo, de:

- Fitas metálicas planas (de cobre, aço galvanizado, alumínio, aço inoxidável, bronze, etc.), que podem ser aplicadas com determinada sobreposição ou com descontinuidade, sendo que neste caso são utilizadas duas fitas.

- Fitas metálicas de aço galvanizado ou alumínio intertravadas (“interlocked”), aplicadas de maneira tal que as hélices formadas pela fita previamente corrugada fiquem encaixadas sem vínculo rígido.

- Fios de aço galvanizado, bronze, cobre ou alumínio, aplicados concêntricamente ao condutor, de forma helicoidal.

- Fios de aço galvanizado, bronze ou cobre aplicados na forma de malha ou trança.

As armações com fitas metálicas planas ou corrugadas são utilizadas quando o cabo é submetido a esforços radiais (cisalhamento), como, por exemplo, quando diretamente enterrado sob vias de rolamento, a pouca profundidade; também é comum o seu uso como proteção contra roedores, quando o cabo é instalado em túneis e galerias. A escolha entre a fita plana e a intertravada dependerá do grau de flexibilidade desejado para o cabo, uma vez que a última enseja proteção radial sem comprometer de modo acentuado a flexibilidade do cabo.

As armações com fios metálicos são empregadas quando o cabo for submetido a esforços de tração, como no caso de cabos submarinos, ou quando os cabos forem instalados na vertical, sustentando seu próprio peso.

Em cabos onde é desejado um grau maior de flexibilidade, é comum a utilização de uma trança de fios de aço, cobre estanhado ou bronze, garantindo resistência à tração e também proteção contra ataques de roedores.

Cobertura

A cobertura é o elemento do cabo que geralmente tem o maior contato com o ambiente da instalação. Como sua função é a de dar proteção ao núcleo do cabo durante sua instalação, assim como durante a vida operacional do cabo, é importante que a cobertura seja mecânica, térmica e quimicamente compatível com as condições ambientais do local de uso do cabo, posto que estará sujeita às influências destas condições.

Na escolha do material para cobertura é fundamental a observação de algumas características, tais como resistência à penetração de umidade ou líquidos (impermeabilidade) resistência à abrasão, rasgamento e impacto, inflamabilidade, baixa emissão de gases tóxicos (durante eventual queima), estabilidade térmica, resistência ao ataque de agentes químicos e atmosféricos, e flexibilidade.

Apresentando características adequadas à maioria das aplicações, os compostos termoplásticos mais comuns são descritos abaixo:

- Compostos de cloreto de polivinila (PVC) são econômicos e resistentes à propagação de chama. As designações comuns para os compostos utilizados são: PVC, com características normais quanto a não propagação de chama e PVC-RC, com características especiais quanto a não propagação e auto-extinção de chama.

- Compostos de polietileno (PE) de baixa ou média densidade são utilizados para situações de exposição do cabo a intempéries (sobretudo luz solar) ou a ambientes com elevado teor de agentes químicos (ácidos, solventes, bases, etc.).

FUNDAMENTOS GERAIS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

CAPÍTULO 4

4.1 - Conceitos Básicos

Neste capítulo serão discutidos os conceitos fundamentais para a compreensão dos principais fenômenos que regem o funcionamento das linhas de transmissão clássicas, ou seja aquelas linhas de transmissão constituídas por ligações físicas entre uma fonte de energia e um elemento consumidor dessa energia. Esta conexão física é feita por condutores de energia elétrica pelos quais circulam as correntes. Essa concepção pode ser vista na Fig 4.1 a seguir.

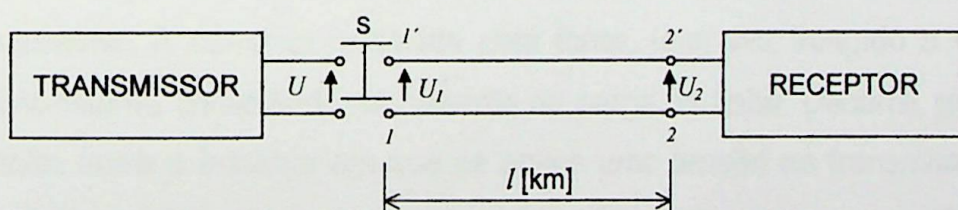


Figura 4.1 – Esquema de uma linha ideal^[6].

Para analisar o fenômeno da energização de uma linha monofásica formada por dois condutores metálicos, retilíneos, completamente isolados e de comprimento qualquer mostrada acima, considera-se que ela é ideal, isto é, a resistência elétrica dos condutores é considerada nula; e como o dielétrico entre os condutores também é considerado perfeito, dessa forma não há perdas a serem consideradas nessa transmissão.

Lembrando da física que, quando dois condutores são separados por um dielétrico qualquer e conduzindo uma corrente elétrica, pode-se definir uma

capacitância C [F/km] e uma indutância L [H/km], considerando ainda que, no receptor haja um dissipador de energia representado na Fig 4.2 por uma resistência R_2 .

Admitindo-se que no instante $t < 0$, tempo imediatamente anterior ao fechamento da chave S , os terminais da fonte estão sob uma tensão U [V]. No instante em que a chave S fechar, ou seja, em $t = 0$, entre os terminais 1 e $1'$ aparecerá a tensão U [V] devido ao deslocamento das cargas elétricas da fonte

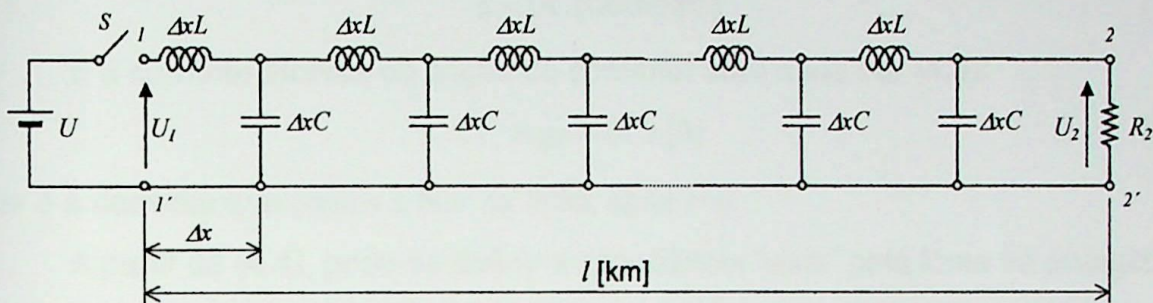


Figura 4.2 – Circuito equivalente aproximado de uma linha ideal^[6].
através de S .

Considerando um elemento infinitesimal Δx [km] da linha que conterá uma indutância ΔxL [L] e uma capacitância ΔxC [F], a tensão U só aparecerá nos terminais da capacitância após o decorrer do tempo Δt [s], pois a corrente que flui através de ΔxL não pode atingir o valor máximo I_0 [A] instantaneamente. Levará um outro Δt para que o capacitor do trecho Δx seguinte atinja o valor U , e assim sucessivamente. A corrente fornecida pela fonte, uma vez atingido o valor I_0 , se mantém constante consistindo na corrente de carga da linha. Decorre, portanto, um tempo finito entre o instante em que se aplica uma tensão ao transmissor de uma linha de transmissão e o instante em que essa tensão pode ser medida em seu receptor^[6].

Se a simples presença das cargas elétricas geram campos elétricos e o movimento delas geram campos magnéticos, ao energizar uma linha, será estabelecido progressivamente campos magnéticos e elétricos que se propagarão progressivamente do transmissor ao receptor.

Desse modo, pode-se definir uma velocidade de propagação ou *celeridade* para uma linha de comprimento l [km] dada por (4.1):

$$v = \frac{l}{T} \text{ [km/s]} \quad (4.1)$$

onde: T [s] é o tempo necessário para que a tensão no receptor seja U [V].

Agora, se T_l [s] é o tempo necessário para energizar 1 km de linha, então (4.1) fica:

$$T_l = \frac{1}{v} [\text{s}]. \quad (4.2)$$

Em um quilometro de linha estarão acumuladas cargas elétricas no valor dado por (4.3):

$$q = UC [\text{Coulomb}]. \quad (4.3)$$

E a corrente através da seção do condutor será dada por (4.4):

$$I_o = qv = UCv [\text{A}] \quad (4.4)$$

que é a corrente que passa a fluir na linha após $t=0$.

A partir de (4.4), pode-se definir a impedância “vista” pela fonte ao energizar a linha, fornecendo (4.5):

$$Z_o = \frac{U}{I_o} = \frac{1}{C.v} [\Omega]. \quad (4.5)$$

Se Δt é o tempo necessário para a energização de Δx da linha, é também o tempo no qual a corrente cresce de 0 a I_o nesse elemento. Esta variação dá origem a uma força eletromotriz (FEM) de intensidade dada por (4.6):

$$FEM = -\Delta x L \frac{dI_o}{dt} = -\frac{I_o}{\Delta t} \Delta x L \quad (4.6)$$

que se opõe a ela e $\Delta t = \frac{\Delta x}{v}$, então de (4.6) obtém-se (4.7) a seguir.

$$FEM = -\frac{I_o v}{\Delta x} \Delta x L = I_o L v [\text{V}]. \quad (4.7)$$

Para que I_o possa fluir, a FEM é contrabalançada pela tensão da fonte. Logo:

$$U = I_o L v [\text{V}] \quad (4.8)$$

ou

$$Z_o = \frac{U}{I_o} = Lv [\Omega]. \quad (4.9)$$

A (4.9) é outra forma de exprimir a lei de Ohm para o circuito e através dela e por (4.5) observa-se que a impedância é uma função da celeridade e da grandeza, C ou L , os quais dependem do meio em que a linha está e de suas dimensões físicas.

Ao igualar (4.5) a (4.9), encontra-se:

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}} \text{ [km/s]} \quad (4.10)$$

que expressa a velocidade de propagação dos campos magnéticos e elétricos ao longo de toda a linha. Vale lembrar que para calcular as constantes L e C para dois condutores no ar ou vácuo e ainda, desprezando o efeito do fluxo interno do condutor e presença do solo, usa-se (4.11) e (4.12) a seguir ^[6].

$$L = 2 \times 10^{-4} \ln \frac{D}{r} \text{ [H/km]} \quad (4.11)$$

e

$$C = \frac{1}{18 \times 10^6 \ln \frac{D}{r}} \text{ [F/km]} \quad (4.12)$$

onde: D – distância entre condutores [m] e

r – raio dos condutores [m].

Separando e igualando-se a velocidade de (4.5) e (4.9) vem:

$$Z_o = \sqrt{\frac{L}{C}} \text{ [\Omega]}. \quad (4.13)$$

E agora, substituindo L e C de (4.11) e (4.12) em (4.13), obtém-se:

$$Z_o = 60 \ln \frac{D}{r} \text{ [\Omega]}. \quad (4.14)$$

A expressão (4.14) é uma característica relevante das linhas de transmissão e é denominada *impedância natural da linha* ou *impedância de surto da linha*. Como Z_o também depende somente do meio em que se encontra a linha e suas características físicas, ela é constante. Logo, conclui-se que a corrente de carga I_o de uma linha alimentada por uma fonte de tensão será independente do comprimento da linha, do tipo de carga que estará em sua ponta e que, portanto, será constante.

4.2 – Equações Gerais de Linhas de Transmissão

Um problema importante a ser considerado tanto no projeto como no funcionamento de uma linha de transmissão é o da manutenção da tensão, dentro

de limites especificados, nos vários pontos do sistema. Os estudos de carga são fundamentais no planejamento da operação do sistema sob condições reais ou ideais e também na determinação da tensão em determinados pontos da linha.

Este trecho será destinado para desenvolver expressões com as quais pode-se calcular a tensão, a corrente e o fator de potência em qualquer ponto de uma linha de transmissão, desde que esses valores sejam conhecidos em um ponto da linha. As cargas são geralmente especificadas por sua tensão, potência e fator de potência, a partir desses dados a corrente poderá ser calculada para ser usada nas equações.

Os efeitos de cargas futuras serão determinados através de simulações e as cargas atuais são estudadas a partir dos dados obtidos durante a operação. No entanto, as expressões que vão ser deduzidas são importantes porque indicam o efeito dos diversos parâmetros da linha sobre as quedas de tensão ao longo da mesma para várias cargas. Essas também serão úteis no cálculo do rendimento da transmissão de energia, bem como no cálculo da potência limite que flui por uma linha em regime permanente.

Através da análise matemática das linhas de transmissão trabalhando em corrente alternada e em regime senoidal permanente, chega-se a equação geral das linhas mostradas em (4.15) e (4.16) e que através delas pode-se relacionar tensões e correntes em qualquer ponto ao longo da linha em função do comportamento ou condições pertinentes ao receptor.

$$\dot{U}_x = \frac{\dot{U}_2 + \dot{I}_2 \sqrt{\dot{z}/\dot{y}}}{2} e^{x\sqrt{\dot{z}\dot{y}}} + \frac{\dot{U}_2 - \dot{I}_2 \sqrt{\dot{z}/\dot{y}}}{2} e^{-x\sqrt{\dot{z}\dot{y}}} \quad [\text{V}] \quad (4.15)$$

$$\dot{I}_x = \frac{\dot{U}_2 + \dot{I}_2 \sqrt{\dot{z}\dot{y}}}{2\sqrt{\dot{z}/\dot{y}}} e^{x\sqrt{\dot{z}\dot{y}}} + \frac{\dot{U}_2 - \dot{I}_2 \sqrt{\dot{z}\dot{y}}}{2\sqrt{\dot{z}/\dot{y}}} e^{-x\sqrt{\dot{z}\dot{y}}} \quad [\text{A}] \quad (4.16)$$

onde $\dot{z} = (r + j\omega L)$ - é a impedância complexa por comprimento da linha [Ω/km] e

$\dot{y} = (g + j\omega C)$ - é a admitância complexa por comprimento da linha [mho/km]

Pelo exposto nas equações acima, verifica-se que em ambas se destacam as funções exponenciais complexas $e^{\pm x\sqrt{\dot{z}\dot{y}}}$ e o radical complexo $\sqrt{\dot{z}/\dot{y}}$.

Fazendo:

$$\dot{\gamma} = \sqrt{\dot{z}\dot{y}} = \sqrt{(r + j\omega L)(g + j\omega C)} = \sqrt{(r + jX_L)(g + jb)}. \quad (4.17)$$

Elevando os dois membros ao quadrado e separando os reais e imaginários de (4.17) obtém-se:

$$\dot{\gamma} = \alpha + j\beta \quad (4.18)$$

da qual

$$\alpha = \operatorname{Re}\{\dot{\gamma}\} = \sqrt{\frac{1}{2} \left[(rg - \omega^2 LC) + \sqrt{(r^2 + \omega^2 L^2)(g^2 + \omega^2 C^2)} \right]} \quad (4.19)$$

$$\beta = \operatorname{Im}\{\dot{\gamma}\} = \sqrt{\frac{1}{2} \left[(\omega^2 LC - rg) + \sqrt{(r^2 + \omega^2 L^2)(g^2 + \omega^2 C^2)} \right]}. \quad (4.20)$$

De modo que se tem como resultado (4.21) a seguir

$$e^{\pm x \sqrt{\dot{\gamma}}} = e^{\pm \alpha x} = e^{\pm \alpha x} e^{\pm j \beta x}. \quad (4.21)$$

Cabem agora, algumas interpretações das equações exponenciais à qual aplicou-se a exponencial complexa definidas acima, que sofrerão modificações descritas como segue:

- As propriedades de $e^{\alpha x}$ e $e^{j\beta x}$ ajudam a explicar a variação da tensão e da corrente em qualquer instante, em função da distância ao longo da linha. O termo $e^{\alpha x}$ muda o valor do módulo com a variação de x , enquanto que $e^{j\beta x}$ que é igual a $\cos \beta x + j \operatorname{sen} \beta x$, vale sempre 1 e produz uma defasagem de β radianos por unidade de comprimento da linha.
- O primeiro termo da equação (4.15), $\frac{\dot{U}_2 + \dot{I}_2 \sqrt{\dot{z}/\dot{y}}}{2} e^{x \sqrt{\dot{\gamma}}}$ cresce em módulo e adianta-se em fase com o aumento da distância aos terminais da carga; por outro lado, quando se avança pela linha a partir dos terminais do gerador em direção à carga, ele diminui em módulo e atrasa-se em fase. Essa é a característica de uma onda progressiva, cujo comportamento é análogo ao de uma onda na água: seu módulo varia em cada ponto com o tempo, sendo que, à medida que se afasta da origem, sua fase se atrasa e seu valor máximo diminui. A variação em valor instantâneo não está indicada na expressão, mas compreende-se, uma vez que U_2 e I_2 são fasores. A esse termo chamamos de tensão incidente.
- O segundo termo da equação (4.15), $\frac{\dot{U}_2 - \dot{I}_2 \sqrt{\dot{z}/\dot{y}}}{2} e^{-x \sqrt{\dot{\gamma}}}$, diminui em módulo e atrasa-se em fase a partir dos terminais da carga e em direção ao gerador. É

chamada de tensão refletida.

- d. Em qualquer ponto da linha a tensão é a soma das componentes incidente e refletida, no ponto. Sendo a corrente dada por uma equação análoga à da tensão, ela pode também ser considerada como possuindo uma componente incidente e outra refletida.

4.3 – Linhas de Transmissão como Quadripolos

As linhas de transmissão trifásicas podem ser representadas por um circuito que contenha dois terminais por onde a energia elétrica penetra na linha, terminais esses chamados de transmissor e por outros dois terminais, através dos quais a energia deixa a linha, constituindo o receptor. Tal circuito quando possui suas características próprias pode ser classificado como um *quadripolo*.

De acordo com a teoria de circuitos elétricos, esse circuito pode ser definido por seis pares de equações lineares, sendo todas inter-relacionadas entre si como segue:

$$\begin{array}{ll} \dot{U}_1 = z_1 (\dot{I}_1, \dot{I}_2) & \dot{I}_1 = y_1 (\dot{U}_1, \dot{U}_2) \\ \dot{U}_2 = z_2 (\dot{I}_1, \dot{I}_2) & \dot{I}_2 = y_2 (\dot{U}_1, \dot{U}_2) \\ \dot{U}_1 = \dot{a}_1 (\dot{U}_2, \dot{I}_2) & \dot{U}_2 = \dot{b}_1 (\dot{U}_1, \dot{I}_1) \\ \dot{I}_1 = \dot{a}_2 (\dot{U}_2, \dot{I}_2) & \dot{I}_2 = \dot{b}_1 (\dot{U}_1, \dot{I}_1) \\ \dot{I}_1 = \dot{g}_1 (\dot{E}_1, \dot{I}_2) & \dot{U}_1 = \dot{h}_1 (\dot{U}_2, \dot{I}_1) \\ \dot{U}_2 = \dot{g}_2 (\dot{E}_1, \dot{I}_2) & \dot{I}_2 = \dot{h}_2 (\dot{U}_2, \dot{I}_1) \end{array}$$

- a. Cada equação mostrada acima possui duas variáveis independentes e duas dependentes que estão relacionadas entre si pelos parâmetros do circuito que impõe importantes restrições que estão descritas a seguir:
- b. Não devem possuir fontes internas, ou seja, devem ser passivos;
- c. Devem manter uma linearidade, de modo que a saída tenha a mesma forma que a excitação aplicada à entrada;
- d. Devem possuir apenas dois pares de terminais, sendo dois representando a entrada e os outros dois, a saída, podendo um deles ser comum a ambos;
- e. Por fim, devem ser bilaterais, indicando que a resposta a uma excitação em

um par de terminais deve ser a mesma para a excitação ao outro par.

Considerando o quadripolo mostrado na Fig. 4.3, se \dot{U}_2 e \dot{I}_2 forem consideradas as variáveis independentes, então \dot{U}_1 e \dot{I}_1 serão as variáveis dependentes que estarão relacionadas com as primeiras através das admitâncias \dot{Y} e das \dot{Z} impedâncias do circuito de tal sorte que define o par de equações dadas por (4.22) e (4.23).

$$\dot{U}_1 = \dot{a}_1(\dot{U}_2, \dot{I}_2) \quad (4.22)$$

$$\dot{I}_1 = \dot{a}_2(\dot{U}_2, \dot{I}_2) \quad (4.23)$$

ou de outro modo,

$$\dot{U}_1 = \dot{A}\dot{U}_2 + \dot{B}\dot{I}_2 \quad (4.24)$$

$$\dot{I}_1 = \dot{C}\dot{U}_2 + \dot{D}\dot{I}_2 \quad (4.25)$$

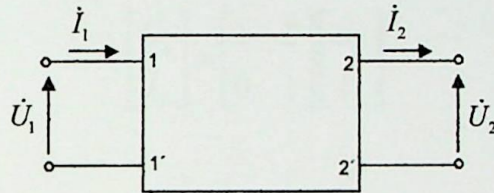


Figura 4.3 – Esquema de um quadripolo.

que escritas na forma matricial ficam,

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{A} & \dot{B} \\ \dot{C} & \dot{D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_2 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix}. \quad (4.26).$$

Se do mesmo modo, se considerar \dot{U}_1 e \dot{I}_1 como sendo as variáveis independentes e portanto, \dot{U}_2 e \dot{I}_2 as variáveis dependentes, as soluções análogas as eq. (4.22) e (4.23) serão:

$$\dot{U}_2 = \dot{b}_1(\dot{U}_1, \dot{I}_1) \quad (4.27)$$

$$\dot{I}_2 = \dot{b}_2(\dot{U}_1, \dot{I}_1) \quad (4.28)$$

ou seja,

$$\dot{U}_2 = \dot{D}\dot{U}_1 - \dot{B}\dot{I}_1 \quad (4.29)$$

$$\dot{I}_2 = -\dot{C}\dot{U}_1 + \dot{A}\dot{I}_1 \quad (4.30)$$

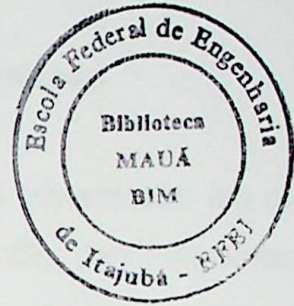
e matricialmente

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_2 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{D} & -\dot{B} \\ -\dot{C} & \dot{A} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{I}_1 \end{bmatrix}. \quad (4.31)$$

A representação das linhas de transmissão na forma de quadripolos mostra-se perfeitamente possível, pois satisfazem todas as condições impostas nesse tipo de representação, como também, facilita muito o modelo matemático definido pelas eq (4.26) e (4.31). As constantes A , B , C e D definem as características das linhas de transmissão e são denominadas *constantes generalizadas das linhas de transmissão*.

As constantes generalizadas das linhas são definidas do seguinte modo:

Linhas curtas – para essas linhas tem-se:

$$\begin{aligned} \dot{A} &= 1, \\ \dot{B} &= Z \\ \dot{C} &= 0 \text{ e} \\ \dot{D} &= 1, \end{aligned}$$


de modo que na forma matricial ficará:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \dot{Z} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_2 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix}. \quad (4.32)$$

Linhas médias – as constantes generalizadas assumem valores diferentes para cada modelo de circuito correspondente as linhas medias, a saber:

Circuito "T"

$$\begin{aligned} \dot{A} &= 1 + \frac{\dot{Z}\dot{Y}}{2} & \dot{B} &= \dot{Z} \left(1 + \frac{\dot{Z}\dot{Y}}{4} \right) \\ \dot{C} &= \dot{Y} & \dot{D} &= 1 + \frac{\dot{Z}\dot{Y}}{2} \end{aligned} \quad (4.33)$$

Circuito " π "

$$\begin{aligned} \dot{A} &= 1 + \frac{\dot{Z}\dot{Y}}{2} & \dot{B} &= \dot{Z} \\ \dot{C} &= \dot{Y} \left(1 + \frac{\dot{Z}\dot{Y}}{4} \right) & \dot{D} &= 1 + \frac{\dot{Z}\dot{Y}}{2} \end{aligned} \quad (4.34)$$

Linhas longas – receberão os seguintes valores para as constantes generalizadas:

$$\dot{A} = \cosh \gamma l; \quad \dot{B} = \dot{Z}_c \sinh \gamma l \quad (4.35)$$

$$\dot{C} = \frac{1}{\dot{Z}_c} \sinh \gamma l \text{ e } \dot{D} = 1 + \frac{\dot{Z}\dot{Y}}{2} \quad (4.36)$$

matricialmente, tem-se:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh \gamma l & Z_C \sinh \gamma l \\ \frac{1}{Z_C} \sinh \gamma l & \cosh \gamma l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_2 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} \quad (4.37)$$

ou

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_2 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh \gamma l & -Z_C \sinh \gamma l \\ -\frac{1}{Z_C} \sinh \gamma l & \cosh \gamma l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{I}_1 \end{bmatrix}. \quad (4.38)$$

4.4 – Significado das Constantes das Linhas de Transmissão

Como as constantes generalizadas das linhas de transmissão em corrente alternada são geralmente números complexos, pode-se então, defini-las como:

$$\begin{aligned} \dot{A} &= a' + ja'' = Ae^{j\beta_A} \\ \dot{B} &= b' + jb'' = Be^{j\beta_B} \\ \dot{C} &= c' + jc'' = Ce^{j\beta_C} \\ \dot{D} &= d' + jd'' = a' + ja'' = De^{j\beta_D} = Ae^{j\beta_A} \end{aligned} \quad (4.39)$$

Os significados físicos das constantes devem ser bem definidas, já que definem o comportamento em operação das linhas; para tanto, coloca-se primeiramente as eq (4.24) e (4.25) sob a seguinte forma:

$$\dot{U}_1 = (a' + ja'')\dot{U}_2 + (b' + jb'')\dot{I}_2 [V] \quad (4.40)$$

$$\dot{I}_1 = (c' + jc'')\dot{U}_2 + (d' + jd'')\dot{I}_2 [A] \quad (4.41)$$

que graficamente podem ser representadas como na Fig 4.4 na forma de um diagrama fasorial, onde U_2 é o fasor de referência e que o diagrama represente a linha operando com uma carga $N_2 = P_2 + jQ$, sendo φ_2 o ângulo de defasamento de I_2 com relação a U_2 .

Na figura, o triangulo OPQ representa a expressão:

$$\dot{A}\dot{U}_2 = (a' + ja'')\dot{U}_2$$

que é tirada de (4.40) para $I_2=0$, ou seja, quando a linha opera em vazio. É, portanto, a tensão U_1 necessária para manter no receptor a tensão U_2 da operação em vazio.

A $a'U_2$ é a componente em fase com U_2 ; $a''I_2$ é a componente ortogonal e a

queda ôhmica de tensão e a parcela $a''I_2$ é a componente da corrente de curto-circuito que provoca a queda de tensão indutiva.

4.5 – Representação de Outros Componentes do Sistema como Quadripolos

O estudo e a influência dos equipamentos terminais ou das cargas de uma linha de transmissão podem ser feita através de quadripolos representativos de cada equipamento como segue:

Impedância em série – esse componente pode ser representado pela matriz (4.42):

$$[a] = \begin{bmatrix} 1 & \dot{Z} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.42)$$

e a admitância em paralelo:

$$[a] = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \dot{Y} & 1 \end{bmatrix}. \quad (4.43)$$

Transformadores – eles podem ser representados por seus circuitos equivalentes “T” e “gama”, fornecendo as seguintes matrizes:

Circuito “T”

$$\begin{bmatrix} \left(1 + \frac{\dot{Z}_t \dot{Y}_t}{2}\right) & \dot{Z}_t \left(1 + \frac{\dot{Z}_t \dot{Y}_t}{4}\right) \\ \dot{Y}_t & \left(1 + \frac{\dot{Z}_t \dot{Y}_t}{2}\right) \end{bmatrix}. \quad (4.44)$$

Circuito “gama” – os circuitos “gama” para transformadores são representados na Fig 4.5 a seguir.

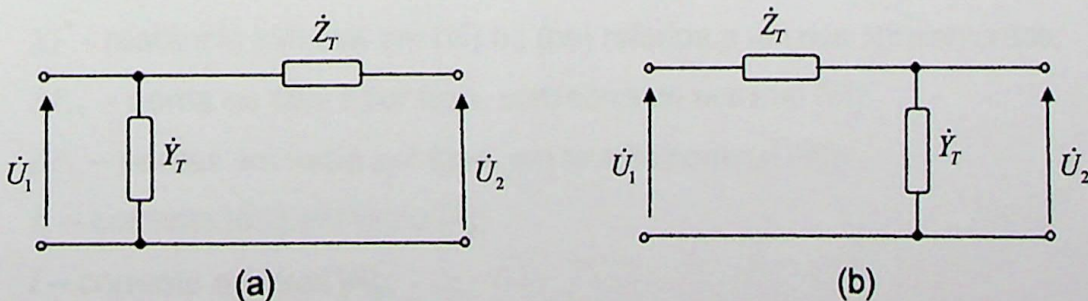


Figura 4.5 – Esquemas de conexões “gama” de transformadores.

Para a conexão (a) da Fig 4.5 a matriz correspondente é

$$[a] = \begin{bmatrix} 1 & \dot{Z}_t \\ \dot{Y}_t & 1 + \dot{Z}_t \dot{Y}_t \end{bmatrix} \quad (4.45)$$

e para a (b) a matriz correspondente é:

$$[a] = \begin{bmatrix} 1 + \dot{Z}_t \dot{Y}_t & \dot{Z}_t \\ \dot{Y}_t & 1 \end{bmatrix}. \quad (4.46)$$

Sendo que a determinação das admitâncias e impedâncias do transformador devem ser obtidas dos dados de placa e de ensaios normalizados e lembrando das relações:

$$\begin{aligned} \dot{Z}_t &= R_t + jX_t \quad [ohm] \\ \dot{Y}_t &= G_t - jB_t \quad [ohm] \end{aligned} \quad (4.47)$$

se R_t , X_t , G_t e B_t são obtidas de:

$$R_t = \frac{\Delta P_{cc}}{I^2} \quad [\Omega] \quad (4.48)$$

$$X_t = X_t^* \frac{U^2}{N} \quad [\Omega] \quad (4.49)$$

$$G_t = \frac{\Delta P_o}{U^2} \quad [\Omega] \quad (4.50)$$

$$B_t = \frac{I_m}{U} \quad [\text{siemens}] \quad (4.51)$$

$$I_m = \sqrt{I_o^2 - I_w^2} = \sqrt{I_o(1 - \cos \phi_o)} \quad (4.52)$$

onde: U – tensão nominal entre fases [kV];

N – potência nominal trifásica [kVA];

X_T^* - reatância indutiva em (%) ou (pu) referida a um dos enrolamentos;

ΔP_{cc} – perda no cobre por fase, com corrente nominal [W];

ΔP_o – perdas em vazio por fase, em tensão nominal [W];

I_o – corrente total em vazio [A];

I – corrente nominal [A];

$\cos \Phi_o$ – fator de potência em vazio.

4.6 – Compensação de Linhas de Transmissão

Para que uma linha de transmissão possa funcionar, é necessário alimentar seus campos elétricos e magnéticos com energia reativa de proporção relativa ao regime de carga na qual opera. Tal energia reativa deve ser fornecida pelo sistema gerador que a alimenta e seu valor depende do comprimento da linha e classe de tensão.

Uma linha longa operando com pequenas cargas ou a vazia, comporta-se como um capacitor representando para o sistema alimentador como um gerador de energia reativa. Por outro lado, operando com cargas altas ou próximas do curto-circuito, a linha comporta-se como um indutor, absorvendo energia reativa.

Há, no entanto, um ponto de equilíbrio no qual a linha deixa de absorver energia reativa que é quando opera com potência natural e nesse caso o fator de potência é constante ao longo de todo seu comprimento.

Dependendo do valor da potência ativa a ser entregue ao receptor, a linha poderá ou não dispor de reativo suficiente para não só atender a demanda requerida, como também para consumo próprio, necessário para manter o valor de tensão desejado no receptor. Por outro lado, a linha poderá dispor de excesso de reativo, forçando-a a manter tensões indesejavelmente altas junto ao receptor. O transporte de reativos pela linha dá origem a correntes mais elevadas causando maiores perdas.

Por tudo isso, vê-se que a necessidade do controle das potências reativas junto ao receptor é de importância primordial nesse tipo de transmissão, principalmente para linhas longas.

A compensação de energia reativa junto aos terminais das linhas visa solucionar dois tipos de problemas: necessidade de geração de reativo para o sistema alimentado e eventualmente para a própria linha, bem como a absorção do excesso de energia reativa da linha.

Basicamente, dispõe-se de dois tipos de equipamentos dedicados a fazer este trabalho de compensação que são os compensadores rotativos e os estáticos. Os primeiros são constituídos principalmente por motores síncronos, enquanto que, os segundos, por bancos de capacitores e reatores indutivos, associados ou separados.

Tais equipamentos modificam o circuito elétrico das linhas de transmissão,

possibilitando a neutralização do efeito do excesso de reatância indutiva ou capacitiva, ou mesmo de ambas. Também é possível modificar artificialmente o comprimento elétrico da linha. Os parágrafos a seguir discutem as formas de realizar compensação em linhas de transmissão.

- Compensação em Derivação

Empregando-se reatores indutivos para compensar as reatâncias capacitivas naturais de linha, procura-se principalmente, neutralizar o Efeito Ferranti, que é o aumento da tensão no receptor com relação à tensão no transmissor, com a ligação de reatores indutivos com indutância variável em ambas as extremidades da linha, conforme mostra o circuito unifilar representado na Fig 4.6 a seguir.

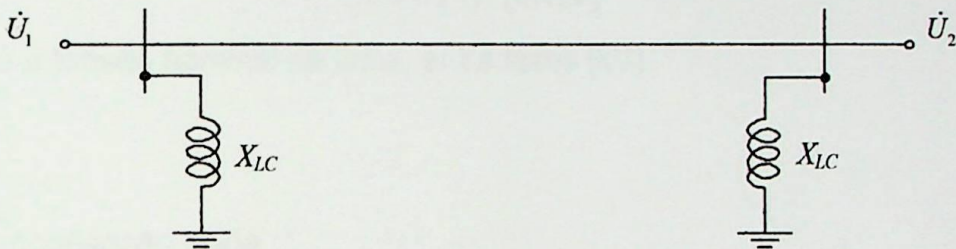


Figura 4.6 – Esquema unifilar de linha compensada^[6].

Com o desenvolvimento de acordo com a associação de quadripolos obtém-se (4.53), onde $A=I$, pois representa a relação em módulo e fase das tensões U_{1o} e U_{2o} quando a linha opera a vazio.

$$\begin{aligned} \dot{A} &= \dot{A}_1 + \dot{B}_1 \dot{Y} & \dot{C} &= \dot{C}_1 + \dot{A}_1 \dot{Y} + \dot{D}_1 \dot{Y} + \dot{B}_1 \dot{Y} \\ \dot{B} &= \dot{B}_1 & \dot{D} &= \dot{D}_1 + \dot{B}_1 \dot{Y} \end{aligned} \quad (4.53)$$

Uma compensação completa será conseguida com:

$$\dot{A}_1 + \dot{B}_1 \dot{Y} = 1 \quad (4.54)$$

da qual obtém-se:

$$\dot{Y} = \frac{1 - \dot{A}_1}{\dot{B}_1} \quad (4.55)$$

ou uma compensação parcial com:

$$\frac{k - \dot{A}_1}{\dot{B}_1} \quad (4.56)$$

na qual k é o valor da relação U_{1o}/U_{2o} desejada.

Somente a componente reativa de Y deverá ser compensada, ou seja, não é

necessário compensar a parte real já que é a componente ativa da corrente de carga da linha, que para tanto seria necessário injetar corrente no ponto de compensação.

Os reatores utilizados possuem a resistência elétrica normalmente muito menor que a reatância indutiva, podendo ser desprezada. Assim pode-se escrever:

$$y' - jy'' = \frac{k - (a' + ja'')}{Be^{j\beta_B}} = \frac{k - a'}{B} e^{-j\beta_B} + j \frac{a''}{B} e^{-j\beta_B} \quad (4.57)$$

que operando e igualando imaginários:

$$y'' = \frac{k - a'}{B} \operatorname{sen} \beta_B + \frac{a''}{B} \operatorname{cos} \beta_B \text{ [siemens/fase]}. \quad (4.58)$$

Desta forma, as capacidades trifásicas dos reatores indutivos a serem instalados nas extremidades da linha serão calculados por (4.59).

$$Q_c = U_{\Delta}^2 \cdot y'' \text{ [MVar]} \quad (4.59)$$

onde: U_{Δ} é a tensão nominal da linha, entre fases [kV].

• Compensação Série

A linha de transmissão consome energia reativa indutiva do alimentador para a manutenção dos campos magnéticos da linha; essa energia perdida na forma de queda de tensão nas linhas é devido à reatância indutiva e a resistência dos parâmetros série da linha, que também são responsáveis pelo ângulo de potência e estabilidade tanto estática como dinâmica dela.

A redução destes efeitos pode ser conseguida através da instalação de capacitores em série com as indutâncias da linha, que além disso trás, entre outras, a vantagem da melhor regulação da linha, ajudam a manter o equilíbrio da energia reativa e melhoram a distribuição de cargas e perdas globais no sistema.

Neste caso, a parte a ser compensada é somente aquela da reatância indutiva, consegue-se a compensação com a anulação da componente imaginária da constante B do quadripolo resultante da associação série da linha com capacitores. O valor da reatância capacitiva necessária pode ser calculado através das constantes generalizadas da linha e após desenvolvimento da associação série para a compensação no meio da linha, de onde encontra-se:

$$\dot{B} = \dot{B}_1 \dot{A}_2 + \dot{D}_1 \dot{B}_2 + \dot{D}_1 \dot{A}_2 \dot{Z} \quad (4.60)$$

ou

$$b' + jb'' = 2[b_1'a_1' + jb_1'a_1'' + jb_1''a_1'] + [(a_1')^2 + 2ja_1'a'' - (a_1'')^2(jx_c)] \quad (4.61)$$

que operando e igualando imaginários:

$$b'' = 2(b_1'a_1'' + b_1''a_1') + x_c[(a_1')^2 - (a_1'')^2] \quad (4.62)$$

donde:

$$x_c = -\frac{2(b_1'a_1'' + b_1''a_1')}{(a_1')^2 - (a_1'')^2} [\Omega]. \quad (4.63)$$

A potência reativa fornecida pelo banco de capacitores será:

$$Q_c = 3x_c I_L^2 [\text{MVAR}] \quad (4.64)$$

onde I_L é a corrente em regime permanente da linha em [kA].

Agora, se instalado junto às extremidades, sua capacidade poder ser calculada a partir da equação (4.65):

$$\dot{B} = \dot{B}_1 + \dot{A}_1 \dot{Z}_{cc} + \dot{D}_1 \dot{Z}_{cc} + \dot{C}_1 \dot{Z}_{cc}^2 \quad (4.64)$$

que pode ser colocado na forma de (4.65)

$$b' + jb'' = (b_1' + jb_1'') + 2(a_1' + ja_1'')(r_c' + jx_c'') + (c_1' + jc_1'')(r_c' + jx_c'')^2, \quad (4.65)$$

desenvolvendo e igualando reais e imaginários, tem-se:

$$b'' = b_1'' + 2a_1'x_c'' - c_1''(x_c'')^2, \quad (4.66)$$

$b''=0$ para uma compensação total, então:

$$x_c = \frac{+2a_1' \pm \sqrt{(2a_1')^2 + 4c_1''b_1''}}{2c_1''}. \quad (4.67)$$

Deve-se aceitar apenas a raiz negativa de (4.67), pois se trata de reatância capacitiva.

A instalação dos capacitores em série também afeta os valores das constantes A e C , que no caso da compensação se fazer no meio da linha podem ser calculadas por (4.68) e no caso de se fazer em suas extremidades podem ser calculadas por (4.69).

$$\dot{A} = \dot{A}_1^2 + \dot{C}_1 \dot{B}_1 + \dot{C}_1 \dot{A}_1 (-jx_c) \quad (4.68)$$

$$\dot{A} = \dot{A}_1 + \dot{C}_1 (-jx_c) \quad (4.69)$$

4.7 – Cálculo da Reatância Indutiva e da Indutância das Linhas de Transmissão.

Como foi visto até aqui, os parâmetros elétricos das linhas de transmissão tem influência fundamental no desempenho do transporte de energia, portanto sua determinação também é fundamental e necessária.

Para a determinação dos fluxos magnéticos, indutâncias e indutâncias mútuas que seguem nos próximos parágrafos tem-se como conhecido as relações fundamentais que regem esses fenômenos interna e externamente ao condutor. O foco dos estudos está dirigido para a determinação desses parâmetros considerando-se linhas de transmissão trifásicas simples, com mais de um condutor por fase, com cabo para-raio, etc.

4.7.1 – Cálculo do Fluxo de Acoplamento entre Dois Condutores

Considerando dois condutores cilíndricos, retilíneos e paralelos A e B isolados e separados entre si pela distância d [m], conforme mostra a Fig 4.7. Conduzindo as correntes I_a e I_b e de raios r_a e r_b , respectivamente.

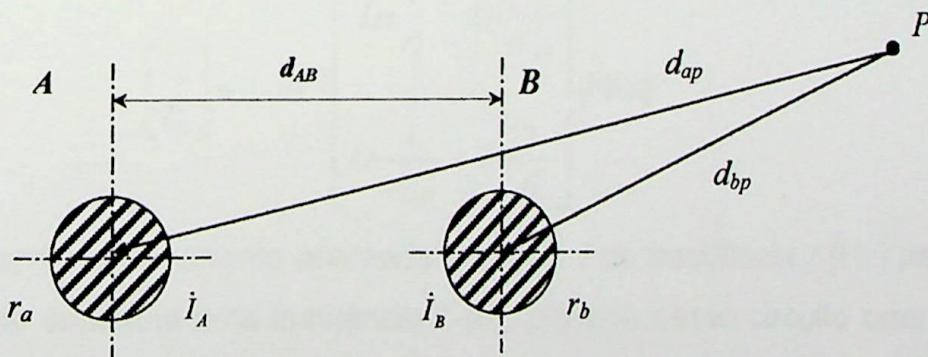


Figura 4.7 – Sistema de dois condutores paralelos^[6].

Considerando também que o condutor A é enlaçado pelo fluxo produzido pela própria corrente I_a interna e externamente. O fluxo externo considerado é aquele que se estende da superfície do condutor até um ponto qualquer P , situado a distância d_{aP} do condutor A , muito maior que o raio r_a . Nessas condições pode-se escrever:

$$\phi_{aPa} = 2 \cdot 10^{-7} \dot{I}_a L_n \frac{d_{aP}}{r'_a} [\text{V.s/m}]. \quad (4.70)$$

O condutor A será igualmente enlaçado pelo fluxo que a corrente I_b produz externamente ao condutor B , que se estende igualmente a P causando:

$$\phi_{aPb} = 2 \cdot 10^{-7} \dot{I}_b L_n \frac{d_{bP}}{d_{AB}} [\text{V.s/m}]. \quad (4.71)$$

O fluxo enlaçante total será a soma de (4.70) e (4.71), e admitindo os dois condutores ser um circuito de tal forma que $I_b = -I_a$, obtém-se (4.72) após a manipulação dos termos logarítmicos.

$$\phi_{aP} = 2 \cdot 10^{-7} \left(\dot{I}_a L_n \frac{1}{r'_a} + \dot{I}_b L_n \frac{1}{d_{AB}} + \dot{I}_a L_n \frac{d_{aP}}{d_{bP}} \right) [\text{V.s/m}]. \quad (4.72)$$

Considerando agora, que o ponto P se afaste da A e B ao ponto em que a razão d_{aP}/d_{bP} tende a unidade, pode-se escrever na forma matricial o sistema de fluxos do acoplamento de dois condutores, conforme mostra (4.73):

$$\begin{bmatrix} \phi_a \\ \phi_b \end{bmatrix} = 2 \cdot 10^{-7} \begin{bmatrix} L_n \frac{1}{r'_a} & L_n \frac{1}{d_{AB}} \\ L_n \frac{1}{d_{AB}} & L_n \frac{1}{r'_b} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \end{bmatrix} [\text{V.s/m}] \quad (4.73)$$

e, portanto, a indutância destes condutores será calculada por (4.74) a seguir.

$$\begin{bmatrix} L_a \\ L_b \end{bmatrix} = 2 \cdot 10^{-7} \begin{bmatrix} L_n \frac{1}{r'_a} & L_n \frac{1}{d_{AB}} \\ L_n \frac{1}{d_{AB}} & L_n \frac{1}{r'_b} \end{bmatrix} [\text{H/m}]. \quad (4.74)$$

Quando uma corrente alternada senoidal I de freqüência f [Hz] percorre um circuito que contenha uma indutância L [H], provoca nesse circuito uma queda de tensão dada pela expressão:

$$\Delta \dot{U} = 2\pi f L I [\text{V}]. \quad (4.75)$$

Analogamente, se I_a e I_b percorrem os condutores A e B , então as quedas de tensão poderão ser calculadas por:

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{U}_a \\ \Delta \dot{U}_b \end{bmatrix} = 4 \cdot 10^{-7} \cdot \pi \cdot f \begin{bmatrix} \text{Ln} \frac{1}{r'_a} & \text{Ln} \frac{1}{d_{AB}} \\ \text{Ln} \frac{1}{d_{AB}} & \text{Ln} \frac{1}{r'_b} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \end{bmatrix} [\text{V}]. \quad (4.76)$$

Outro caso a ser considerado é quando o segundo condutor é o solo, neste caso assume-se que um condutor A , de raio r_a , cilíndrico e retilíneo, suspenso a uma altura h [m] sobre o solo e ainda assumindo que o solo que está sendo considerado como o segundo condutor, é perfeito e está em paralelo ao condutor A . Este condutor no solo encontra-se a uma profundidade da superfície do solo igual a altura do condutor A sobre o mesmo. Esse condutor denomina-se *condutor-imagem*.

O fluxo que enlaça esses condutores é dado por:

$$\phi_a = 2 \cdot 10^{-7} \dot{I}_a \text{Ln} \frac{2h}{r'_a} [\text{V.s/m}]. \quad (4.77)$$

Quando houver dois condutores de retorno pelo solo nas mesmas condições dos casos anteriores, os fluxos das linhas são dados por:

$$\begin{bmatrix} \phi_a \\ \phi_b \end{bmatrix} = 2 \cdot 10^{-7} \begin{bmatrix} \text{Ln} \frac{2h_a}{r'_a} & \text{Ln} \frac{D_{AB}}{d_{AB}} \\ \text{Ln} \frac{D_{AB}}{d_{AB}} & \text{Ln} \frac{2h_b}{r'_b} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \end{bmatrix} [\text{V.s/m}]. \quad (4.78)$$

Pela definição de indutância, tem-se a matriz das indutâncias dada em (4.78) a seguir:

$$[L] = 2 \cdot 10^{-7} \begin{bmatrix} \text{Ln} \frac{2h_a}{r'_a} & \text{Ln} \frac{D_{AB}}{d_{AB}} \\ \text{Ln} \frac{D_{AB}}{d_{AB}} & \text{Ln} \frac{2h_b}{r'_b} \end{bmatrix} [\text{H/m}]. \quad (4.79)$$

As alturas até aqui utilizadas são para o caso do condutor estar em um perfeito paralelismo com o solo, mas na realidade o condutor ao ser suspenso toma forma aproximada de catenária de forma que a altura sobre o solo é variável. Deve-se, então levar em conta esse fato e corrigir a altura para efeito de cálculos elétricos. Tal correção é dada pela fórmula seguinte.

$$h_i = H_i - 0,7f_i [\text{m}] \quad (4.79)$$

onde: H_i é a altura do condutor sobre o solo no ponto de sua suspensão, junto à

estrutura [m] e,

f_i é a flecha de um condutor ou cabo genérico i estimada para um vão médio da linha e sob condições de temperatura média, no estado final [m].

Quando um sistema é composto de n condutores A, B, C, \dots, N , de raios $r_a, r_b, r_c, \dots, r_n$, paralelos entre si e ao solo ideal, pode-se escrever (4.80) nas mesmas condições feitas no caso anterior:

$$[L] = k \begin{bmatrix} Ln \frac{2h_a}{r'_a} & Ln \frac{D_{AB}}{d_{AB}} & Ln \frac{D_{AC}}{d_{AC}} & \dots & Ln \frac{D_{AN}}{d_{AN}} \\ Ln \frac{D_{AB}}{d_{AB}} & Ln \frac{2h_b}{r'_b} & Ln \frac{D_{BC}}{d_{BC}} & \dots & Ln \frac{D_{BN}}{d_{BN}} \\ Ln \frac{D_{AC}}{d_{AC}} & Ln \frac{D_{BC}}{d_{BC}} & Ln \frac{2h_c}{r'_c} & \dots & Ln \frac{D_{CN}}{d_{CN}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Ln \frac{D_{AN}}{d_{AN}} & Ln \frac{D_{BN}}{d_{BN}} & Ln \frac{D_{CN}}{d_{CN}} & \dots & Ln \frac{2h_n}{r'_n} \end{bmatrix} \text{ [H/m]}. \quad (4.80)$$

Se nos cálculos que o efeito da presença do solo puder ser suprimido, a equação acima se torna:

$$[L] = k \begin{bmatrix} Ln \frac{1}{r'_a} & Ln \frac{1}{d_{AB}} & Ln \frac{1}{d_{AC}} & \dots & Ln \frac{1}{d_{AN}} \\ Ln \frac{1}{d_{AB}} & Ln \frac{1}{r'_b} & Ln \frac{1}{d_{BC}} & \dots & Ln \frac{1}{d_{BN}} \\ Ln \frac{1}{d_{AC}} & Ln \frac{1}{d_{BC}} & Ln \frac{1}{r'_c} & \dots & Ln \frac{1}{d_{CN}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Ln \frac{1}{d_{AN}} & Ln \frac{1}{d_{BN}} & Ln \frac{1}{d_{CN}} & \dots & Ln \frac{1}{r'_n} \end{bmatrix} \text{ [H/m]}. \quad (4.81)$$

O valor de k das fórmulas (4.80) e (4.81) muda com a freqüência e ainda, para se obter as reatâncias indutivas em Ohm por quilometro, a constante deverá ser:

$$k' = 12,5667 \cdot f \cdot 10^{-4} \quad (4.82)$$

tornando a equação das reatâncias indutivas em:

$$[x_L] = k'[F] [\Omega/\text{km}]. \quad (4.83)$$

Pela observação das matrizes $[F]$ de (4.80) e (4.81) vê-se que são simétricas e com sua formação bem definida, porém uma notação mais simples servirá para introduzir os *coeficientes de campo*.

Sejam:

$$f_{ii} = k Ln \frac{2h_i}{r'_i} \text{ [H/km]} \quad (4.84)$$

os termos chamados de *coeficientes de campo próprios* que compõe a diagonal e

$$f_{ij} = k Ln \frac{D_{ij}}{d_{ij}} [\text{H/km}] \quad (4.85)$$

os termos chamados *coeficientes de campo mútuos*, que compõe os termos fora da diagonal. A matriz de (4.81) tornar-se-á:

$$[F] = \begin{bmatrix} f_{aa} & f_{ab} & f_{ac} & \dots & f_{an} \\ f_{ab} & f_{bb} & f_{bc} & \dots & f_{bn} \\ f_{ac} & f_{bc} & f_{cc} & \dots & f_{cn} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ f_{an} & f_{bn} & f_{cn} & \dots & f_{nn} \end{bmatrix}. \quad (4.86)$$

Portanto, as quedas de tensão indutivas ao longo da linha podem ser calculadas por:

$$[\Delta \dot{U}] = \omega [F] [I] [\text{V/km}] \quad (4.87)$$

onde: $[\Delta U]$ é o vetor das quedas de tensão em $[\text{V/km}]$;

$$\omega = 2\pi f;$$

$[F]$ é a matriz dos coeficientes de campo e

$[I]$ é o vetor das correntes nos condutores em $[\text{A}]$.

A maioria dos condutores empregados em linhas de transmissão são formados pelo encordoamento de vários fios sólidos compondo o condutor conforme visto no Cap 3, essa solução é para atender a problemas de natureza mecânica e elétrica.

As formas destes condutores requerem que os coeficientes de campo sejam corrigidos para serem empregados nas equações (4.80) e (4.81) de modo a refletir essas condições dos condutores. A correção pode ser feita através de (4.77), considerando-se que a corrente distribui-se uniformemente por todos os fios que compõe o cabo.

Considerando um circuito composto de um condutor A e de seu retorno B . O condutor A é composto de n fios elementares $1, 2, 3, \dots, n$, cada qual conduzindo a parcela I/n $[\text{A}]$ da corrente total. O condutor B é composto por m fios elementares, a, b, c, \dots, m , que conduzem cada qual $-I/m$ $[\text{A}]$. O sinal negativo indica que a corrente em B tem sentido oposto àquele do condutor A . Desprezando-se o efeito da presença do solo e de acordo com (4.73), pode-se escrever para os fios do condutor

A, com a condição que:

$$f_{11}=f_{22}=f_{33}=\dots$$

$$f_{aa}=f_{bb}=f_{cc}=\dots$$



(4.88)

já que os diâmetros são os mesmos:

$$\begin{bmatrix} \phi_{1B} \\ \phi_{2B} \\ \phi_{3B} \\ \vdots \\ \phi_{nB} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & f_{13} & \dots & f_{1n} \\ f_{12} & f_{11} & f_{23} & \dots & f_{2n} \\ f_{13} & f_{32} & f_{11} & \dots & f_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ f_{n1} & f_{n2} & f_{n3} & \dots & f_{11} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{i} \\ \dot{i} \\ \dot{i} \\ \vdots \\ \dot{i} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} f_{a1} & f_{b1} & f_{c1} & \dots & f_{m1} \\ f_{a2} & f_{b2} & f_{c2} & \dots & f_{m2} \\ f_{a3} & f_{b3} & f_{c3} & \dots & f_{m3} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ f_{an} & f_{bn} & f_{cn} & \dots & f_{mn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{i} \\ \dot{i} \\ \dot{i} \\ \vdots \\ \dot{i} \end{bmatrix} \quad (4.89)$$

Utilizando-se da definição de indutância e desenvolvendo (4.89) chega-se a:

$$[L] = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & f_{13} & \dots & f_{1n} \\ f_{12} & f_{11} & f_{23} & \dots & f_{2n} \\ f_{13} & f_{32} & f_{11} & \dots & f_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ f_{n1} & f_{n2} & f_{n3} & \dots & f_{11} \end{bmatrix} - \frac{n}{m} \begin{bmatrix} f_{a1} & f_{b1} & f_{c1} & \dots & f_{m1} \\ f_{a2} & f_{b2} & f_{c2} & \dots & f_{m2} \\ f_{a3} & f_{b3} & f_{c3} & \dots & f_{m3} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ f_{an} & f_{bn} & f_{cn} & \dots & f_{mn} \end{bmatrix} \quad (4.90)$$

Uma vez que a distância entre os fios que compõe cada um dos condutores é muito pequenas, comparadas a distância entre os condutores e estão todos em paralelo, a indutância do cabo pode ser calculada por:

$$L_A = 2 \cdot 10^{-7} L_n \frac{D_m}{D_{sA}} \text{ [H/m]} \quad (4.91)$$

e analogamente para o condutor B:

$$L_B = 2 \cdot 10^{-7} L_n \frac{D_m}{D_{sB}} \text{ [H/m]}. \quad (4.92)$$

Os fluxos serão dados por:

$$\phi_A = 2 \cdot 10^{-7} \dot{i}_a L_n \frac{D_m}{D_{sA}} \text{ [V.s/m]} \quad (3.93)$$

e

$$\phi_B = 2 \cdot 10^{-7} I_b \text{Ln} \frac{D_m}{D_{sB}} [\text{V.s/m}] \quad (4.94)$$

onde os valores de D_{sA} e D_{sB} são os *raios médios geométricos (RMG)* dos condutores, que podem ser interpretados como sendo os raios de cilindros fictícios capazes de produzir fluxos externos de mesmo valor que os fluxos totais produzidos pelos condutores reais correspondentes. O raio médio geométrico pode ser calculado por (4.95) dada a seguir:

$$D_s = 0,7788r [\text{m}]. \quad (4.95)$$

Se as distâncias entre os fios dos condutores forem muito pequenas em relação a distância entre os eixos dos condutores, então as (4.93) e (4.94) podem ser simplificadas para:

$$\phi_i = 2 \cdot 10^{-7} I_i \text{Ln} \frac{d_{ij}}{D_{si}} [\text{V.s/m}] \quad (4.96)$$

Para o cálculo da indutância dos condutores que possuem uma forma qualquer, o conceito de raio médio geométrico pode ser entendido como segue para os diversos tipos de barramentos.

- Barra de seção retangular, com largura a [m] e espessura b [m]:

$$D_s = k(a+b) \quad (4.97)$$

sendo k assumido valores de 0,2231 a 0,2237, dependendo da relação entre a e b .

- Barra de seção anular de raio interno r_i e raio externo r_e :

$$\text{Ln} D_s = \text{Ln} r_e - \frac{r_i^4}{r_e^2 - r_i^2} \text{Ln} \frac{r_e}{r_i} + \frac{3r_i^2 - r_e^2}{4(r_e^2 - r_i^2)}. \quad (4.98)$$

Os coeficientes da campo serão escritos conforme (3.99), com a introdução do conceito de *RMG*.

$$f_{ii} = 2 \cdot 10^{-7} \text{Ln} \frac{1}{D_s} [\text{H/m}] \quad (4.99)$$

4.7.2 – Cálculo das Indutâncias e Reatâncias Indutivas de Linha Trifásica Simples, sem Cabos Pára-Raios

Considerando uma linha trifásica, sem pára-raios e circuito simples, com os condutores a , b e c de fase, percorridos pelas correntes I_a , I_b e I_c . As correntes neste caso são equilibradas. Os fluxos máximos do sistema descrito são calculados por:

$$\begin{aligned} \phi_{aMAX} &= I_{MAX} \left[f_{aa} - \frac{1}{2}(f_{ab} + f_{ac}) \right] \\ \phi_{bMAX} &= I_{MAX} \left[f_{bb} - \frac{1}{2}(f_{ab} + f_{bc}) \right] \\ \phi_{cMAX} &= I_{MAX} \left[f_{cc} - \frac{1}{2}(f_{ac} + f_{bc}) \right] \end{aligned} \quad [\text{V.s/m}] \quad (4.100)$$

e pela definição de indutância, tem-se:

$$L_a = f_{aa} - \frac{1}{2}(f_{ab} + f_{ac}) [\text{H/m}] \quad (4.101)$$

$$L_b = f_{bb} - \frac{1}{2}(f_{ab} + f_{bc}) [\text{H/m}] \quad (4.102)$$

$$L_c = f_{cc} - \frac{1}{2}(f_{ac} + f_{bc}) [\text{H/m}]. \quad (4.103)$$

As indutâncias calculadas em (4.101), (4.102) e (4.103) são chamadas de *indutâncias aparentes* das três fases da linha e são aquelas “vistas” pelo alimentador da linha.

As correntes que fluirão por essas indutâncias causarão quedas de tensões em cada uma das fases calculáveis por:

$$\begin{aligned} \Delta \dot{U}_a &= \dot{I}_a j \omega L_a [\text{V}] \\ \Delta \dot{U}_b &= \dot{I}_b j \omega L_b [\text{V}] \\ \Delta \dot{U}_c &= \dot{I}_c j \omega L_c [\text{V}]. \end{aligned} \quad (4.104)$$

O equilíbrio do sistema $L_a=L_b=L_c$ somente será estabelecido se os coeficientes de campo próprios e mútuos forem iguais, de modo que:

$$f_{aa} = f_{bb} = f_{cc} = \bar{f}_{aa}$$

e

$$f_{ab} = f_{bc} = f_{ac} = \bar{f}_{ab},$$

para se obter:

$$L_s = \bar{f}_{aa} - \bar{f}_{ab} [\text{H/m}]. \quad (4.105)$$

Na (4.105) L_s recebe o nome de *indutância de serviço* e é a indutância de seqüência positiva do sistema.

Para as linhas de circuito simples cuja disposição dos condutores é de um triângulo equilátero de lado d [m], a indutância de serviço é calculada por:

$$L_s = L_{11} = 4,6052 \cdot 10^{-4} \log \frac{d}{D_s} \text{ [H/km]}. \quad (4.106)$$

Com a finalidade de alcançar o equilíbrio eletromagnético da linha de transmissão, uma alternativa é realizar a transposição dos condutores da linha que consiste em dividir a linha, ou trechos dela, em três partes de igual comprimento e transpor os condutores no final de cada segmento, de forma que a corrente de uma fase seja transportada em 1/3 do comprimento da linha em cada uma das posições relativas da estrutura.

A queda de tensão total resultante da soma das quedas de tensão associadas a um terço do comprimento total da linha será dada por:

$$[\Delta \dot{U}] = j \frac{\omega}{3} \{ [F_1] + [F_2] + [F_3] \} [I]. \quad (4.107)$$

Nas matrizes $[F]$ de (4.107), todos os termos dos coeficientes de campo próprios das diagonais são iguais, bem como os coeficientes de campo mútuos fora das diagonais, isso permite definir os coeficientes de campo médios dados por:

$$\bar{f}_{aa} = 2 \cdot 10^{-4} Ln \frac{2h_m}{D_s} \text{ [H/m]} \quad (4.108)$$

e

$$\bar{f}_{ab} = 2 \cdot 10^{-4} Ln \frac{D_{mi}}{D_m} \text{ [H/m]} \quad (4.109)$$

onde: $D_m = \sqrt[3]{d_{ab} d_{bc} d_{ac}}$ é a distância média geométrica entre condutores;

$D_{mi} = \sqrt[3]{D_{ab} D_{bc} D_{ac}}$ é a distância média geométrica entre os condutores e as imagens dos outros condutores e

$h_m = \sqrt[3]{h_a h_b h_c}$ é a altura média geométrica entre condutores.

A matriz das indutâncias da linha transposta será:

$$[F] = \begin{bmatrix} \bar{f}_{aa} & \bar{f}_{ab} & \bar{f}_{ab} \\ \bar{f}_{ab} & \bar{f}_{aa} & \bar{f}_{ab} \\ \bar{f}_{ab} & \bar{f}_{ab} & \bar{f}_{aa} \end{bmatrix} \quad (4.110)$$

e a reatância indutiva de seqüência positiva será calculada por:

$$x_{Ls} = 2 \cdot 10^{-4} \omega \left(Ln \frac{D_m}{D_s} + Ln \frac{2h_m}{D_{mi}} \right) \quad (4.111)$$

4.7.3 – Cálculo das Indutâncias e Reatâncias Indutivas de Linha Trifásica Simples, com Cabos Pára-Raios

Considerando numa linha de transmissão trifásica de circuito simples com cabo pára-raio R montado acima dos condutores A , B e C , onde seus coeficientes de campo são definidos por (4.99), as quedas de tensão podem ser calculadas por:

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{U}_a \\ \Delta \dot{U}_b \\ \Delta \dot{U}_c \\ \Delta \dot{U}_r \end{bmatrix} = j\omega \begin{bmatrix} f_{aa} & f_{ab} & f_{ac} & f_{aa} \\ f_{ba} & f_{bb} & f_{bc} & f_{aa} \\ f_{ca} & f_{cb} & f_{cc} & f_{aa} \\ f_{ra} & f_{rb} & f_{rc} & f_{rr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \\ \dot{I}_r \end{bmatrix} \text{ [V/km]} \quad (4.112)$$

Os cabos pára-raios podem ser aterrados em todas as estruturas, configurando o sistema multiterrado, ou podem ser isolados utilizando isoladores de tensão disruptiva baixa oferecendo um caminho para terra quando atingidos por um raio e nesse caso não há correntes induzidas no mesmo.

De qualquer modo, as indutâncias e as reatâncias indutivas não são afetados pela presença deles quando isolados, mas suas extremidades ficam submetidas a uma diferença de potencial dada por:

$$\Delta U_r = j\omega \begin{bmatrix} f_{ra} & f_{rb} & f_{rc} & f_{rr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \\ 0 \end{bmatrix} \text{ [V/km]} \quad (4.113)$$

Agora, para linhas com pára-raios aterrados, através de (4.112) e (4.113) é possível calcular a corrente I_r que circula ao longo da linha, entra e retorna do solo através da estrutura, etc. Essas correntes produzem perdas nos cabos, estruturas e solo e de modo generalizado, as quedas de tensão nos condutores de fase e pára-raio podem ser calculadas por (4.114), valendo para linhas trifásicas com qualquer

número de condutores e cabos pára-raios.

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{U}_F \\ \Delta \dot{U}_R \end{bmatrix} = j\omega \begin{bmatrix} F_{FF} & F_{FR} \\ F_{RF} & F_{RR} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_F \\ \dot{I}_R \end{bmatrix} \text{ [V/km]} \quad (4.114)$$

Após desenvolvimento da equação, verifica-se que para linhas com um cabo pára-raios é necessário introduzir um fator de correção dado por:

$$[\Delta x_1] = j \frac{\omega}{f_{rr}} \begin{bmatrix} f_{ar} \\ f_{br} \\ f_{cr} \end{bmatrix} [f_{ar} \quad f_{br} \quad f_{cr}],$$

que terminará por gerar a seguinte equação:

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{U}_{ca} \\ \Delta \dot{U}_{cb} \\ \Delta \dot{U}_{cc} \end{bmatrix} = j\omega \begin{bmatrix} \frac{f_{ar}^2}{f_{rr}} & \frac{f_{ar}f_{br}}{f_{rr}} & \frac{f_{ar}f_{cr}}{f_{rr}} \\ \frac{f_{ar}f_{br}}{f_{rr}} & \frac{f_{br}^2}{f_{rr}} & \frac{f_{br}f_{cr}}{f_{rr}} \\ \frac{f_{ar}f_{cr}}{f_{rr}} & \frac{f_{br}f_{cr}}{f_{rr}} & \frac{f_{cr}^2}{f_{rr}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \end{bmatrix} \text{ [V/km]}. \quad (4.115)$$

Nas linhas transpostas os fatores de correção serão todos iguais a:

$$\Delta x_L = \omega \left[\frac{k \left(\frac{\sqrt[3]{D_{ar}D_{br}D_{cr}}}{\sqrt[3]{d_{ar}d_{br}d_{cr}}} \right)^2}{Ln \frac{2h_r}{D_{sr}}} \right]. \quad (4.116)$$

E a equação da linha trifásica sem cabos pára-raios equivalente será:

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{U}_a \\ \Delta \dot{U}_b \\ \Delta \dot{U}_c \end{bmatrix} = j\omega \begin{bmatrix} \left(\bar{f}_{aa} - \frac{\bar{f}_{ar}^2}{f_{rr}} \right) & \left(\bar{f}_{ab} - \frac{\bar{f}_{ar}^2}{f_{rr}} \right) & \left(\bar{f}_{ab} - \frac{\bar{f}_{ar}^2}{f_{rr}} \right) \\ \left(\bar{f}_{ab} - \frac{\bar{f}_{ar}^2}{f_{rr}} \right) & \left(\bar{f}_{aa} - \frac{\bar{f}_{ar}^2}{f_{rr}} \right) & \left(\bar{f}_{ab} - \frac{\bar{f}_{ar}^2}{f_{rr}} \right) \\ \left(\bar{f}_{ab} - \frac{\bar{f}_{ar}^2}{f_{rr}} \right) & \left(\bar{f}_{ab} - \frac{\bar{f}_{ar}^2}{f_{rr}} \right) & \left(\bar{f}_{aa} - \frac{\bar{f}_{ar}^2}{f_{rr}} \right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \end{bmatrix} \text{ [M]} \quad (4.117)$$

Utilizando a (4.105) para definir a reatância indutiva de seqüência positiva produz:

$$x_{Ls} = \bar{f}_{aa} - \bar{f}_{ab}$$

ou

$$x_{Ls} = 12,566371 \cdot 10^{-4} f Ln \frac{D_m}{D_s} \text{ [\Omega/km]} \quad (4.116)$$

A equação (4.116) acima mostra que a presença dos cabos pára-raios não

exerce influência nos valores das reatâncias indutivas de seqüência positiva das linhas de transmissão trifásicas.

4.7.4 – Cálculo das Indutâncias e Reatâncias Indutivas de Linhas Trifásicas a Circuito Duplo

As linhas trifásicas com circuito duplo são aquelas em que na mesma estrutura encontram-se instalados os condutores de dois circuitos operando em paralelo.

Considerando, inicialmente duas linhas trifásicas idênticas de circuito simples cujos eixos dos condutores estão em paralelo e a uma distância finita um do outro. Cada condutor transporta metade da potência total, ou seja, cada condutor conduz a metade da corrente de cada fase. Se A, B, C, D, E e F são os condutores de fase e R e S os cabos pára-raios, onde os condutores de fase conduzem I_a, I_b, I_c, I_d, I_e e I_f , a equação dos fluxos de enlaçamento de todos os condutores do sistema é dado por:

$$\begin{bmatrix} \phi_a \\ \phi_b \\ \phi_c \\ \phi_r \\ \phi_s \\ \phi_d \\ \phi_e \\ \phi_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{aa} & f_{ab} & f_{av} & f_{ar} & f_{as} & f_{ad} & f_{ae} & f_{af} \\ f_{ba} & f_{bb} & f_{bc} & f_{br} & f_{bs} & f_{bd} & f_{be} & f_{bf} \\ f_{ca} & f_{cb} & f_{cc} & f_{cr} & f_{cs} & f_{cd} & f_{ce} & f_{cf} \\ \hline f_{ra} & f_{rb} & f_{rc} & f_{rr} & f_{rs} & f_{rd} & f_{re} & f_{rf} \\ f_{sa} & f_{sb} & f_{sc} & f_{sr} & f_{ss} & f_{sd} & f_{se} & f_{sf} \\ \hline f_{da} & f_{db} & f_{dc} & f_{dr} & f_{ds} & f_{dd} & f_{de} & f_{df} \\ f_{ea} & f_{eb} & f_{ec} & f_{er} & f_{es} & f_{ed} & f_{ee} & f_{ef} \\ f_{fa} & f_{fb} & f_{fc} & f_{fr} & f_{fs} & f_{fd} & f_{fe} & f_{ff} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \\ \dot{I}_r \\ \dot{I}_s \\ \dot{I}_d \\ \dot{I}_e \\ \dot{I}_f \end{bmatrix} \quad (4.117)$$

O efeito da presença dos cabos pára-raios e do solo não afetam substancialmente na determinação das reatâncias indutivas e indutâncias de seqüência positiva, podendo, portanto serem desprezados, de modo que as indutâncias aparentes para esse caso são calculadas por:

$$\begin{aligned} L_a &= (f_{aa} + f_{ad}) - \frac{1}{2} [(f_{ab} + f_{ae}) + (f_{ac} + f_{af})] [\text{H/km}], \\ L_b &= (f_{bb} + f_{be}) - \frac{1}{2} [(f_{ab} + f_{bd}) + (f_{bc} + f_{bf})] [\text{H/km}], \end{aligned} \quad (4.118)$$

$$L_c = (f_{cc} + f_{cf}) - \frac{1}{2} [(f_{ac} + f_{cd}) + (f_{bc} + f_{ce})] [\text{H/km}],$$

e para o circuito II, tem-se:

$$L_d = (f_{dd} + f_{ad}) - \frac{1}{2} [(f_{de} + f_{be}) + (f_{bd} + f_{cd})] [\text{H/km}],$$

$$L_e = (f_{ee} + f_{be}) - \frac{1}{2} [(f_{de} + f_{ae}) + (f_{be} + f_{ce})] [\text{H/km}], \quad (4.119)$$

$$L_f = (f_{ff} + f_{cf}) - \frac{1}{2} [(f_{df} + f_{af}) + (f_{ef} + f_{bf})] [\text{H/km}].$$

As indutâncias de seqüência positiva de cada circuito constituem as indutâncias das linhas transpostas e podem ser calculadas pelo valor médio das indutâncias aparentes.

$$L_s = 4,6052 \cdot 10^{-4} \left(\log \frac{\sqrt[3]{d_{ab}d_{bc}d_{ac}}}{D_s} + \log \frac{\sqrt[6]{d_{ae}d_{af}d_{bd}d_{bf}d_{ca}d_{ce}}}{\sqrt[3]{d_{ad}d_{be}d_{cf}}} \right) [\text{H/km}] \quad (4.120)$$

onde o segundo termo de (4.120) é a indutância mútua entre os dois circuitos dada por:

$$M_s = 4,6052 \cdot 10^{-4} \log \frac{\sqrt[6]{d_{ae}d_{af}d_{bd}d_{bf}d_{ca}d_{ce}}}{\sqrt[3]{d_{ad}d_{be}d_{cf}}} [\text{H/km}] \quad (4.121)$$

fazendo: $\sqrt[3]{d_{ad}d_{be}d_{cf}} = D_I$ é a distância média geométrica entre condutores que conduzem as correntes da mesma fase e

$\sqrt[6]{d_{ae}d_{af}d_{bd}d_{bf}d_{ca}d_{ce}} = D_{II}$ é a distância média geométrica entre condutores que conduzem as correntes de faz diferentes.

De modo que (4.120) torna-se:

$$L_s = 4,6052 \cdot 10^{-4} \log \frac{D_m D_{II}}{D_s D_I} [\text{H/km}] \quad (4.122)$$

e a reatância indutiva de seqüência positiva por condutor de uma linha trifásica a circuito duplo será:

$$x_{Ls} = 28,935325 \cdot 10^{-4} f \log \frac{D_m D_{II}}{D_s D_I} [\Omega/\text{km}] \quad (4.123).$$

4.8 – Cálculo da Capacitância, Reatância Capacitiva e Susceptância das Linhas de Transmissão

4.8.1 – Introdução

As diferenças de potencial entre os condutores e entre condutores e solo apresentadas nas linhas de transmissão de energia elétrica energizadas caracterizam a presença de cargas elétricas distribuídas ao longo de toda a linha. Visto por este prisma, as linhas de transmissão comportam-se como um capacitor de vários eletrodos. Devido a essa característica, ao energizar uma linha de transmissão, ela absorve cargas elétricas da fonte para alimentar esses campos elétricos.

O fluxo das cargas elétricas causado pelo carregamento e descarregamento cíclico da linha quando estão sob tensão senoidal, gera uma corrente chamada *corrente de carga* da linha.

Nas linhas aéreas curtas esta corrente é insignificante e pode assumir valores altos para linhas longas. Particularmente em linhas de transmissão com cabos subterrâneos ou submarinos esta característica capacitiva torna-se predominante, devido ao tipo isolamento necessário a estes cabos, comprometendo assim a capacidade de condução de corrente dos cabos e por conseqüência a capacidade útil da linha.

Este capítulo será dedicado ao equacionamento das capacitâncias, susceptâncias e reatâncias capacitivas das linhas de transmissão trifásicas simples e de circuito duplo e considerando ou não a presença dos cabos de pára-raios.

Cada condutor de uma linha está acoplado capacitivamente com os demais condutores que se encontram em sua proximidade, com o próprio solo e com o cabo pára-raios.

As *capacitâncias parciais* são os valores das capacitâncias existentes entre um condutor e os demais condutores do sistema, incluindo o solo.

As capacitâncias fictícias de acoplamento entre um condutor e o neutro de potencial nulo, chamadas *capacitâncias aparentes*, produzem sobre a fonte da linha o mesmo efeito que as capacitâncias acopladas e colocam em evidência o desequilíbrio elétrico das linhas que só pode ser anulado com a transposição dos condutores.

Da capacitância aparente é possível obter a *capacitância de seqüência positiva*, sendo esta última a o valor da capacitância válida para qualquer uma das fases do sistema, considerando-o equilibrado, nos cálculos de desempenho das linhas. Também é possível, a partir das capacitâncias parciais, obter as *capacitâncias de seqüência nula*, empregadas nos cálculos de curto-circuito que envolvem linhas muito longas.

4.8.2 – Cálculo das Capacitâncias das Linhas Trifásicas Simples sem Cabos Pára-raios

Tomando como referência uma linha de transmissão trifásica de circuito simples e sem o cabo pára-raios. Com os condutores nomeados a , b e c , estando com alturas médias acima do solo iguais a h_a , h_b e h_c , respectivamente. As tensões em relação ao solo U_a , U_b e U_c são calculadas por:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_a \\ \dot{U}_b \\ \dot{U}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{aa} & a_{ab} & a_{ac} \\ a_{ab} & a_{bb} & a_{bc} \\ a_{ac} & a_{bc} & a_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{Q}_a \\ \dot{Q}_b \\ \dot{Q}_c \end{bmatrix} [V], \quad (4.124)$$

onde os elementos a_{ii} da diagonal são chamados de *coeficientes de potencial próprio* e calculável por (4.125) e os a_{ij} , que são os elementos fora da diagonal chamados de *coeficientes de potencial mútuo* são calculáveis por (4.126).

$$a_{ii} = k \operatorname{Ln} \frac{2h_i}{r_i} [\text{km/F}]. \quad (4.125)$$

$$a_{ij} = k \operatorname{Ln} \frac{D_{ij}}{d_{ij}} [\text{km/F}], \quad (4.126)$$

onde: $D_{ij} = \sqrt{4h_i h_j + d_{ij}^2}$ é a distância entre o condutor i e a imagem de seu condutor vizinho,

d_{ij} é a distância entre condutores,

$k=18 \times 10^6$ e

r_i é o raio externo do condutor i .

A representação de (4.124) através das capacitâncias é mostrada em (4.127):



$$\begin{bmatrix} \dot{Q}_a \\ \dot{Q}_b \\ \dot{Q}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (C_{ao} + C_{ab} + C_{ac}) & -C_{ab} & -C_{ac} \\ -C_{ab} & (C_{bo} + C_{ab} + C_{bc}) & -C_{bc} \\ -C_{ac} & -C_{bc} & (C_{co} + C_{ac} + C_{bc}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_a \\ \dot{U}_b \\ \dot{U}_c \end{bmatrix} \text{ [C/km]}, \quad (4.127)$$

onde C_{ao} , C_{bo} e C_{co} são as capacitâncias entre os condutores de fase e o solo, referidas a um quilometro de linha e C_{ab} , C_{ac} , etc. são as capacitâncias entre condutores também referidas a um quilometro de linha, tem-se as Q cargas distribuídas sobre um quilometro de superfície de condutor.

Considerando o instante em que ocorre o acoplamento máximo, ou seja, $u_a = U_{amax}$ para a tensão na fase a e analogamente para as outras tensões do sistema normal onde $U_a + U_b + U_c = 0$, tem-se as equações individuais para as cargas máximas dadas por:

$$\begin{aligned} Q_{aMAX} &= \left[C_{ao} + \frac{3}{2}(C_{ab} + C_{ac}) \right] U_{MAX} \\ Q_{bMAX} &= \left[C_{bo} + \frac{3}{2}(C_{ab} + C_{bc}) \right] U_{MAX} \\ Q_{cMAX} &= \left[C_{co} + \frac{3}{2}(C_{ac} + C_{bc}) \right] U_{MAX} \end{aligned} \quad (4.128)$$

e lembrando que $C = Q/U$ [F], então tem-se:

$$\begin{aligned} C_a &= C_{ao} + \frac{3}{2}(C_{ab} + C_{ac}) \text{ [F / km]} \\ C_b &= C_{bo} + \frac{3}{2}(C_{ab} + C_{bc}) \text{ [F / km]} \\ C_c &= C_{co} + \frac{3}{2}(C_{ac} + C_{bc}) \text{ [F / km]} \end{aligned} \quad (4.129)$$

que são as capacitâncias equivalentes de uma linha trifásica em regime senoidal.

Fica evidente por (4.129) que as capacitâncias não são iguais e mostra o desequilíbrio eletrostático nas linhas de transmissão. Para que haja o equilíbrio, todos os termos de (4.129) devem ser iguais, o que significa que todos os termos da diagonal e todos os termos fora da diagonal da matriz $[A]^{-1}$, ou seja, a matriz de coeficientes de campo invertida de (4.127) terão que ser iguais. Para conseguir tal equilíbrio emprega-se o mesmo procedimento descrito anteriormente, que é a transposição cíclica dos condutores. Sendo assim, considerando uma linha dividida em três trechos de comprimentos idênticos e, para facilitar, com comprimento unitário, encontra-se:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_a \\ \dot{U}_b \\ \dot{U}_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} (a_{aa} + a_{bb} + a_{cc}) & (a_{ab} + a_{bc} + a_{ac}) & (a_{ab} + a_{bc} + a_{ac}) \\ (a_{ab} + a_{bc} + a_{ac}) & (a_{aa} + a_{bb} + a_{cc}) & (a_{ab} + a_{bc} + a_{ac}) \\ (a_{ab} + a_{bc} + a_{ac}) & (a_{ab} + a_{bc} + a_{ac}) & (a_{aa} + a_{bb} + a_{cc}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{Q}_a \\ \dot{Q}_b \\ \dot{Q}_c \end{bmatrix} [M], \quad (4.130)$$

onde se percebe que todos os termos da diagonal são iguais entre si, bem como, os que estão fora da diagonal também.

Na diagonal, tem-se:

$$\bar{a}_{aa} = \frac{1}{3}(a_{aa} + a_{bb} + a_{cc}) \quad (4.131)$$

ou, substituindo os termos dos coeficientes dados por (4.125), trabalhando algebricamente sem esquecer que $r=r_a=r_b=r_c$, tem-se:

$$\bar{a}_{aa} = 18 \cdot 10^6 \text{Ln} \frac{2\sqrt[3]{h_a h_b h_c}}{r} [\text{km/F}]. \quad (4.132)$$

E analogamente, para os termos fora da diagonal:

$$\bar{a}_{ab} = \frac{1}{3}(a_{ab} + a_{ac} + a_{bc}), \quad (4.133)$$

substituindo os coeficientes dados por (4.126) e trabalhando a equação, vem:

$$\bar{a}_{aa} = 18 \cdot 10^6 \text{Ln} \frac{\sqrt[3]{D_{ab} D_{ac} D_{bc}}}{\sqrt[3]{d_{ab} d_{ac} d_{bc}}} [\text{km/F}] \quad (4.134)$$

onde: $\sqrt[3]{D_{ab} D_{ac} D_{bc}} = D_{mi}$ é a distância média geométrica entre um condutor e a imagem de seu vizinho, e

$\sqrt[3]{d_{ab} d_{ac} d_{bc}} = D_m$ é a distância média geométrica entre condutores.

Então, (4.130) torna-se:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_a \\ \dot{U}_b \\ \dot{U}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{a}_{aa} & \bar{a}_{ab} & \bar{a}_{ac} \\ \bar{a}_{ab} & \bar{a}_{bb} & \bar{a}_{bc} \\ \bar{a}_{ac} & \bar{a}_{bc} & \bar{a}_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{Q}_a \\ \dot{Q}_b \\ \dot{Q}_c \end{bmatrix} [M]. \quad (4.135)$$

Ao efetuar a inversão da matriz de (4.135) e substituir os termos da matriz invertida nas expressões das capacitâncias parciais, serão encontradas:

$$C_{ao} = C_{bo} = C_{co} = C_o = \frac{1}{\bar{a}_{aa} + 2\bar{a}_{ab}} [\text{F/km}] \quad (4.136)$$

e

$$C_{ab} = C_{ac} = C_{bc} = \frac{\bar{a}_{ab}}{(\bar{a}_{aa} - \bar{a}_{ab})(\bar{a}_{aa} - 2\bar{a}_{ab})} [\text{F/km}]. \quad (4.137)$$

Define-se \bar{C}_o , de (4.136), como a capacitância média entre condutores e o solo que é a capacitância de seqüência nula de uma linha trifásica de circuito simples.

Ao substituir as capacitâncias por seus valores médios em (4.129) e pela introdução de \bar{C}_o e \bar{C}_{ab} , tem-se:

$$C_s = \frac{1}{\bar{a}_{aa} - \bar{a}_{ab}} \text{ [F/km]}. \quad (4.138)$$

(4.138) calcula a *capacitância de seqüência positiva, ou de serviço*.

4.8.3 - Cálculo das Capacitâncias das Linhas com Condutores Múltiplos

Considerando um condutor múltiplo formado por n subcondutores, posicionados uniformemente sobre o círculo de raio R cujo centro está a uma altura h [m] da superfície do solo, sendo que normalmente $h \gg R$. Os subcondutores são mantidos nessa disposição ao longo do vão, entre as estruturas, através de espaçadores convenientemente distribuídos. Tais espaçadores são feitos de material metálico e, portanto, os potenciais dos subcondutores são iguais e por conseqüência, a distribuição das cargas na superfície dos condutores é uniforme.

Cada condutor terá Q [Coulomb/km] carga unitária distribuída em sua superfície e Q/n [C/km] distribuída em cada subcondutor. O gradiente de potencial U de cada subcondutor em relação ao solo será dado por:

$$\begin{aligned} \dot{U} &= \frac{\dot{Q}}{n} (a_{11} + a_{12} + a_{13} + \dots + a_{1n}) \\ \dot{U} &= \frac{\dot{Q}}{n} (a_{22} + a_{21} + a_{23} + \dots + a_{2n}) \\ \dot{U} &= \frac{\dot{Q}}{n} (a_{33} + a_{31} + a_{32} + \dots + a_{3n}) \\ &\dots\dots\dots \\ \dot{U} &= \frac{\dot{Q}}{n} (a_{nn} + a_{n1} + a_{n2} + \dots + a_{n(n-1)}) \end{aligned} \quad (4.139)$$

Os coeficientes de campo, expresso em função dos condutores e suas imagens, das equações acima podem ser calculadas por (4.126) e (4.127), fazendo $k=4,14468 \cdot 10^7$ e $d_{ij}=s_{ij}$ e manipulando (4.139), tem-se:

$$\dot{U} = \dot{Q} k L n \frac{2h}{\sqrt[n]{r s_{12} s_{13} \dots s_{1n}}} \text{ [kV/m]} \quad (4.140)$$

onde: s_{ij} é a distância entre subcondutores de um condutor da linha.

4.8.4 – Cálculo das Capacitâncias das Linhas Trifásicas Simples com um Cabo Pára-raios

Novamente, tomando como referência a linha de transmissão trifásica de circuito simples do item 4.8.2, mas agora com um cabo pára-raios. Com os condutores nomeados a , b e c , das fases e r , para o cabo pára-raio, estando com alturas médias acima do solo iguais a h_a , h_b , h_c e h_p , respectivamente. As tensões em relação ao solo U_a , U_b , U_c e U_p são calculadas pela expressão que agora traz na matriz dos coeficiente o efeito da presença do cabo pára-raios, como mostrada em (4.141):

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_a \\ \dot{U}_b \\ \dot{U}_c \\ \dot{U}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{aa} & a_{ab} & a_{ac} & a_{ar} \\ a_{ab} & a_{bb} & a_{bc} & a_{br} \\ a_{ac} & a_{bc} & a_{cc} & a_{cr} \\ a_{ar} & a_{br} & a_{cr} & a_{rr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{Q}_a \\ \dot{Q}_b \\ \dot{Q}_c \\ \dot{Q}_r \end{bmatrix} [M]. \quad (4.141)$$

Para o mesmo sistema, a expressão das capacitâncias parciais e dada por:

$$\begin{bmatrix} \dot{Q}_a \\ \dot{Q}_b \\ \dot{Q}_c \\ \dot{Q}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (C_{ao} + C_{ab} + C_{ac} + C_{ar}) & -C_{ab} & -C_{ac} & -C_{ar} \\ -C_{ab} & (C_{bo} + C_{ab} + C_{bc} + C_{br}) & -C_{bc} & -C_{br} \\ -C_{ac} & -C_{bc} & (C_{co} + C_{ac} + C_{bc} + C_{cr}) & -C_{cr} \\ -C_{ar} & -C_{br} & -C_{cr} & (C_{ro} + C_{ar} + C_{br} + C_{cr}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_a \\ \dot{U}_b \\ \dot{U}_c \\ \dot{U}_r \end{bmatrix} \quad (4.142)$$

Do mesmo modo que no caso anterior, os cabos pára-raios podem ser isolados ou multiterrados.

No caso do cabo pára-raios ser isolado, nele $Q_r=0$ e será induzido eletrostaticamente uma diferença de potencial que agirá como um divisor de potencial e não afetará os valores de potencial dos condutores de fase.

Agora, no caso do cabo pára-raios ser aterrado haverá cargas Q_r no cabo provenientes do solo e seu potencial é igual ao do solo, ou seja, nulo. Os valores das cargas influenciarão no valor da capacitâncias parciais, aparentes e de seqüência zero e, portanto, não afetarão as capacitâncias de seqüência positiva.

Para o cálculo das capacitâncias dos condutores os coeficientes de potencial próprios e mútuo deverão ser corrigidos, do mesmo modo realizados para o cálculo

das indutâncias dos item anteriores, para levarem em conta a presença desses cabos. A matriz resultante será:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_a \\ \dot{U}_b \\ \dot{U}_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} a_{aa} - \frac{a_{ar}^2}{a_{rr}} & a_{ab} - \frac{a_{ar}a_{br}}{a_{rr}} & a_{ac} - \frac{a_{ar}a_{cr}}{a_{rr}} \\ a_{ab} - \frac{a_{ar}a_{br}}{a_{rr}} & a_{bb} - \frac{a_{br}^2}{a_{rr}} & a_{bc} - \frac{a_{br}a_{cr}}{a_{rr}} \\ a_{ac} - \frac{a_{ar}a_{cr}}{a_{rr}} & a_{bc} - \frac{a_{br}a_{cr}}{a_{rr}} & a_{bb} - \frac{a_{br}^2}{a_{rr}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{Q}_a \\ \dot{Q}_b \\ \dot{Q}_c \end{bmatrix} [V] \quad (4.143)$$

que simplificando a notação, fica:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_a \\ \dot{U}_b \\ \dot{U}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{aa} & A_{ab} & A_{ac} \\ A_{ab} & A_{bb} & A_{bc} \\ A_{ac} & A_{bc} & A_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{Q}_a \\ \dot{Q}_b \\ \dot{Q}_c \end{bmatrix} [V]. \quad (4.144)$$

Para o cálculo das capacitâncias de seqüência positiva por (4.136) e seqüência nula usando-se (4.138) será necessário encontrar os valores médios dos coeficientes de potencial compostos de (4.144), referente às linhas transpostas.

A matriz $[A]$ da linha transposta para o sistema é obtida de forma análoga àquela de (4.135), tem-se assim:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_a \\ \dot{U}_b \\ \dot{U}_c \\ \dot{U}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{a}_{aa} & \bar{a}_{ab} & \bar{a}_{ac} & \bar{a}_{ar} \\ \bar{a}_{ab} & \bar{a}_{bb} & \bar{a}_{bc} & \bar{a}_{ar} \\ \bar{a}_{ac} & \bar{a}_{bc} & \bar{a}_{cc} & \bar{a}_{ar} \\ \bar{a}_{ar} & \bar{a}_{ar} & \bar{a}_{ar} & \bar{a}_{rr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{Q}_a \\ \dot{Q}_b \\ \dot{Q}_c \\ \dot{Q}_r \end{bmatrix} [V] \quad (4.145)$$

onde os coeficientes de potencial \bar{a}_{ar} serão calculados por:

$$\bar{a}_{ar} = 18 \cdot 10^6 \text{ Ln} \frac{\sqrt[3]{D_{ar}D_{br}D_{cr}}}{\sqrt[3]{d_{ar}d_{br}d_{cr}}} [\text{km/F}] \quad (4.146)$$

e os demais coeficientes por (4.133) e (4.134).

Nestas condições, os coeficientes de potencial compostos terão os seguintes valores médios:

$$\bar{A}_{aa} = \bar{a}_{aa} - \frac{\bar{a}_{ar}^2}{a_{rr}}$$

e

$$\bar{A}_{ab} = \bar{a}_{ab} - \frac{\bar{a}_{ar}^2}{a_{rr}},$$

onde se observa que a correção é a mesma para os componentes da diagonal e para os componentes fora da diagonal, de modo que a capacitância de seqüência nula, devido a (4.136) será dada por:

$$\bar{C}_o = \frac{1}{\bar{A}_{aa} + 2\bar{A}_{ab}} = \frac{1}{\bar{a}_{aa} + 2\bar{a}_{ab} - 3\frac{a_{ar}^2}{a_{rr}}} \text{ [F/km]}, \quad (4.147)$$

e a capacitância de seqüência positiva, devido a (4.138) será:

$$C_s = \frac{1}{\bar{A}_{aa} - \bar{A}_{ab}} = \frac{1}{\bar{a}_{aa} - \bar{a}_{ab}} \text{ [F/km]}. \quad (4.148)$$

Como (4.148) é idêntica a (4.138), conclui-se que os cabos pára-raios instalados em linhas transpostas não influenciam no valor das capacitâncias de seqüência positiva.

4.8.5 – Cálculo das Capacitâncias das Linhas Trifásicas Simples com Dois ou Mais Cabos Pára-raios

Para o caso em que uma linha de transmissão trifásica de circuito simples com n cabos de pára-raios instalados, a matriz dos coeficientes de potencial será da ordem $(3+n) \times (3+n)$, que poderá ser reduzida a uma matriz 3×3 equivalente de uma linha sem cabos pára-raios, onde os coeficientes de potencial compostos já incluem o efeito da presença desses cabos. A influência será sentida nas capacitâncias parciais, aparentes e de seqüência nula.

Desse modo, a capacitância de seqüência nula será:

$$C_o = \frac{1}{\bar{a}_{aa} + 2\bar{a}_{ab} - \frac{6\bar{a}_{ar}^2}{a_{rr} + a_{rs}}} \text{ [F/km]} \quad (4.149)$$

onde:

$$\bar{a}_{ar} = k Ln \frac{\sqrt[6]{D_{ar}D_{br}D_{cr}D_{as}D_{bs}D_{cs}}}{\sqrt[6]{d_{ar}d_{br}d_{cr}d_{as}d_{bs}d_{cs}}} \text{ [km/F]} \quad (4.150)$$

e os coeficientes a_{rr} e a_{rs} são definidos por (4.125) e (4.126), respectivamente.

4.8.6 – Cálculo das Capacitâncias das Linhas Trifásicas a Circuito duplo

Considerando a mesma linha de transmissão do item 4.7.4, uma linha trifásica a circuito duplo, ou duas linhas idênticas e paralelas, de circuito simples e com n cabos pára-raios instalados. A matriz dos coeficientes de potencial, gerada nesse caso, será de ordem $(6+n) \times (6+n)$ e dada por:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_a \\ \dot{U}_b \\ \dot{U}_c \\ \dot{U}_r \\ \dot{U}_s \\ \dot{U}_d \\ \dot{U}_e \\ \dot{U}_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{aa} & a_{ab} & a_{av} & a_{ar} & a_{as} & a_{ad} & a_{ae} & a_{af} \\ a_{ba} & a_{bb} & a_{bc} & a_{br} & a_{bs} & a_{bd} & a_{be} & a_{bf} \\ a_{ca} & a_{cb} & a_{cc} & a_{cr} & a_{cs} & a_{cd} & a_{ce} & a_{cf} \\ \hline a_{ra} & a_{rb} & a_{rc} & a_{rr} & a_{rs} & a_{rd} & a_{re} & a_{rf} \\ a_{sa} & a_{sb} & a_{sc} & a_{sr} & a_{ss} & a_{sd} & a_{se} & a_{sf} \\ \hline a_{da} & a_{db} & a_{dc} & a_{dr} & a_{ds} & a_{dd} & a_{de} & a_{df} \\ a_{ea} & a_{eb} & a_{ec} & a_{er} & a_{es} & a_{ed} & a_{ee} & a_{ef} \\ a_{fa} & a_{fb} & a_{fc} & a_{fr} & a_{fs} & a_{fd} & a_{fe} & a_{ff} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{Q}_a \\ \dot{Q}_b \\ \dot{Q}_c \\ \dot{Q}_r \\ \dot{Q}_s \\ \dot{Q}_d \\ \dot{Q}_e \\ \dot{Q}_f \end{bmatrix} \quad (4.151)$$

De (4.151) pode-se obter duas outras equações que fazem referências a cada um dos circuitos e que tem em comum os elementos referentes aos cabos pára-raios.

Se as linhas são iguais física e eletricamente e, portanto simétricas, $[U_I]=[U_{II}]=[U]$ e $[Q_I]=[Q_{II}]=[Q]$ de modo que a equação para o circuito I se torna:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_a \\ \dot{U}_b \\ \dot{U}_c \\ \dot{U}_r \\ \dot{U}_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (a_{aa} + a_{ad}) & (a_{ab} + a_{ae}) & (a_{av} + a_{af}) & a_{ar} & a_{as} \\ (a_{ba} + a_{bd}) & (a_{bb} + a_{bc}) & (a_{bc} + a_{bf}) & a_{br} & a_{bs} \\ (a_{ca} + a_{cd}) & (a_{cb} + a_{ce}) & (a_{cc} + a_{cf}) & a_{cr} & a_{cs} \\ \hline (a_{ar} + a_{dr}) & (a_{br} + a_{er}) & (a_{cr} + a_{fr}) & a_{rr} & a_{rs} \\ (a_{as} + a_{ds}) & (a_{bs} + a_{es}) & (a_{cs} + a_{fs}) & a_{rs} & a_{ss} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{Q}_a \\ \dot{Q}_b \\ \dot{Q}_c \\ \dot{Q}_r \\ \dot{Q}_s \end{bmatrix} \quad (4.152)$$

A matriz principal de (4.152) é a mesma que a matriz para uma linha trifásica a circuito simples, equivalente a uma linha trifásica a circuito duplo sem o cabos pára-raios. Os coeficientes de potencial da matriz são compostos para incluir a influência mútua entre os circuitos I e II.

Os coeficientes de potencial composto para esse sistema são encontrados por:

$$\bar{a}_{aa} = k Ln \frac{2h_m}{r} [\text{km/F}], \quad (4.154)$$

$$\bar{a}_{ab} = k Ln \frac{\sqrt[3]{D_{ab} D_{ac} D_{bc}}}{\sqrt[3]{d_{ab} d_{ac} d_{bc}}} [\text{km/F}], \quad (4.155)$$



$$\bar{a}_{ad} = k Ln \frac{\sqrt[3]{D_{ad} D_{be} D_{cf}}}{\sqrt[3]{d_{ad} d_{be} d_{cf}}} \text{ [km/F]}, \quad (4.156)$$

$$\bar{a}_{ac} = k Ln \frac{\sqrt[6]{D_{ae} D_{af} D_{bd} D_{bf} D_{cd} D_{ce}}}{\sqrt[3]{d_{ae} d_{af} d_{bd} d_{bf} d_{cd} d_{ce}}} \text{ [km/F]}. \quad (4.157)$$

A capacitância de seqüência positiva será, utilizando (4.138):

$$C_s = \frac{1}{k Ln \frac{\sqrt[3]{d_{ab} d_{ac} d_{bc}}}{r} \cdot \frac{\sqrt[6]{d_{ae} d_{af} d_{bd} d_{bf} d_{cd} d_{ce}}}{\sqrt[3]{d_{ad} d_{be} d_{cf}}}} \text{ [F/km]}. \quad (4.158)$$

Calculam-se os valores das capacitâncias de seqüência zero a partir de (4.136) utilizando os coeficientes de potencial compostos médios calculado por:

$$\bar{A}_{aa} = \bar{a}_{aa} + \bar{a}_{ad} - \frac{2\bar{a}_{ar}^2}{a_{rr} + a_{rs}} \text{ [km/F]} \quad (4.159)$$

e

$$\bar{A}_{ab} = \bar{a}_{ab} + \bar{a}_{ae} - \frac{2\bar{a}_{ar}^2}{a_{rr} + a_{rs}} \text{ [km/F]}, \quad (4.160)$$

cujo coeficientes de potencial médios são calculados pelas Eq (4.133), (4.134), (4.156) e (4.157).

Assim, a capacitância de seqüência zero para linhas trifásicas a circuito duplo será calculada por:

$$C_o = \frac{1}{(\bar{a}_{aa} + \bar{a}_{ad}) + 2(\bar{a}_{ab} + \bar{a}_{ae}) - \frac{6\bar{a}_{ar}^2}{a_{rr} a_{rs}}} \text{ [F/km]}. \quad (4.161)$$

4.8.7 – Cálculo das Reatâncias Capacitivas das Linhas de Transmissão

A reatância capacitiva, em derivação, de uma linha de transmissão pode ser definida como:

$$X_c = \frac{1}{2\pi f} \cdot \frac{1}{C^*} \text{ [\Omega.km]} \quad (4.162)$$

ou então, considerando a associação de todos os capacitores C^* no comprimento l [km] da linha, tem-se:

$$X_c = \frac{X_c}{l} = \frac{1}{2\pi f} \cdot \frac{1}{C^* l} [\Omega]. \quad (4.163)$$

A reatância de seqüência zero ou de serviço das linhas de transmissão é definida por:

$$x_{c_x} = \frac{1}{2\pi f} \cdot \frac{1}{C_s} [\Omega.km] \quad (4.164)$$

que substituindo C_s pela sua expressão (4.158) devidamente manipulada a fim de trocar os radicais pelas suas notações equivalentes de distâncias médias geométricas e desdobrando-a em seus termos, resulta em:

$$x_{c_x} = x'_c + x''_c + x'''_c [\Omega.km] \quad (4.165)$$

onde: $x' = 6,596 \times 10^6 \cdot \frac{1}{f} \cdot \log \frac{1}{R_c} [\Omega.km]$ é a reatância capacitiva unitária para o

espaçamento de um metro,

$x'' = 6,596 \times 10^6 \cdot \frac{1}{f} \cdot \log D_m [\Omega.km]$ é o fator de espaçamento capacitivo e

$x''' = 6,596 \times 10^6 \cdot \frac{1}{f} \cdot \log \frac{D_{II}}{D_I} [\Omega.km]$ é a reatância capacitiva unitária entre dois

circuitos.

Em linhas trifásicas a circuito simples, tem-se:

$$x_{c_x} = x'_c + x''_c [\Omega.km] \quad (4.166)$$

onde x'''_c definido acima é nulo.

Nas linhas que contenham n circuitos em paralelo a expressão das reatâncias capacitivas correspondentes ao sistema são definidas por:

$$x_{c_a} = x'_c + x''_c + (x'''_{c(a-b)} + x'''_{c(a-c)} + \dots + x'''_{c(a-n)}) [\Omega.km], \quad (4.167)$$

$$x_{c_b} = x'_c + x''_c + (x'''_{c(b-a)} + x'''_{c(b-c)} + \dots + x'''_{c(b-n)}) [\Omega.km], \quad (4.168)$$

$$x_{c_c} = x'_c + x''_c + (x'''_{c(c-a)} + x'''_{c(c-b)} + \dots + x'''_{c(c-n)}) [\Omega.km] \quad (4.169)$$

onde $x'''_{(i-j)}$ são as reatâncias mútuas unitárias capacitivas entre o circuito i e o circuito j .

4.8.8 – Cálculo da Susceptância Capacitiva de Linhas de Transmissão

Nos circuitos elétricos unifilares utilizados para o equacionamento das linhas de transmissão, as capacitâncias de serviço são representadas por admitâncias em derivação, ou seja, na forma de susceptâncias de serviço. A susceptância é, por definição, o inverso da capacitância, logo,

$$b_c = \frac{1}{x_c} = 2\pi f C_s^* [\text{siemens/km}], \quad (4.170)$$

e, novamente, considerando a associação das l susceptâncias ao longo do comprimento l [km] da linha, vem:

$$B_c = \frac{1}{x_c} = \frac{1}{\frac{1}{2\pi f C^* l}} = 2\pi f C^* l [\text{siemens}]. \quad (4.171)$$

4.8.9 – Cálculo das Reatâncias e Susceptâncias Capacitivas de Seqüência Positiva e Seqüência Zero

Utilizando a (4.135) da qual pode-se escrever simbolicamente:

$$[\dot{U}] = [A][\dot{Q}][M], \quad (4.172)$$

é possível obter as reatâncias capacitivas seqüenciais através da transformação linear direta da matriz $[A]$, encontrando as reatâncias capacitivas de seqüências positiva e negativa.

A multiplicação de cada elemento da matriz $[A]$ por $\frac{1}{2\pi f}$ [s], obtém-se a matriz da capacitâncias $[x_c]$ que possuem dimensão de impedância, de modo que a transformação linear aplicável será:

$$[x_{cseq}] = [a]^{-1} [x_c] [a] \quad (4.173)$$

Substituindo em (4.162) as expressões das capacitâncias de seqüência zero e seqüência positiva dadas por (4.147) e (4.148), que relaciona os coeficientes de potencial médios para as linhas trifásicas simples sem cabos pára-raios equivalente

à linha real considerada. Após substituição e redução da matriz $[A]$ a uma matriz 3x3 da linha equivalente e com a transformação linear direta, tem-se:

$$\begin{bmatrix} x_{c_{00}} & x_{c_{01}} & x_{c_{02}} \\ x_{c_{10}} & x_{c_{11}} & x_{c_{12}} \\ x_{c_{20}} & x_{c_{21}} & x_{c_{22}} \end{bmatrix} = \frac{1}{2\pi f} \cdot \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{aa} & A_{ab} & A_{ac} \\ A_{ab} & A_{bb} & A_{bc} \\ A_{ac} & A_{bc} & A_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}. \quad (4.173)$$

Efetuada as operações indicadas, obtém-se:

$$[x_{cseq}] = \frac{1}{2\pi f} \begin{bmatrix} (\bar{A}_{aa} + 2\bar{A}_{ab}) & A_{01} & A_{02} \\ A_{10} & (\bar{A}_{aa} - \bar{A}_{ab}) & A_{12} \\ A_{20} & A_{21} & (\bar{A}_{aa} - \bar{A}_{ab}) \end{bmatrix} [\Omega \cdot \text{km}], \quad (4.174)$$

cujo elementos que estão fora da diagonal da matriz das reatâncias seqüenciais só tem significado para as linha não transpostas, pois representam os acoplamentos mútuos entre circuitos seqüenciais. Nas linhas transpostas, tais elementos são nulos.

A Eq (4.147) acima consiste no método geral da obtenção das reatâncias capacitivas, sendo aplicável para qualquer configuração de linhas das transmissão. As diferenças que relacionam a presença dos cabos pára-raios ou de mais circuitos na linha estão implícitas na matriz de coeficientes de campos compostos A_{ii} e A_{ij} da linha trifásica simples equivalente.

A partir da expressão da susceptância dada por (4.170) pode-se escrever:

$$[B] = \omega [C] [\text{siemens/km}] \quad (4.176)$$

onde a matriz $[C]$ das capacitâncias pode ser substituída pela matriz inversa dos coeficientes de potencial $[A]^{-1}$ de modo que (4.176) torna-se:

$$[B] = \omega [A]^{-1} [\text{siemens/km}]. \quad (4.177)$$

Analogamente a (4.172), pode-se escrever:

$$[I] = [B][U][A] \quad (4.176)$$

que aplicando, igualmente ao item anterior, a transformação linear para a obtenção da matriz de susceptâncias capacitivas seqüenciais obtém-se:

$$[I_{seq}] = \{[a]^{-1} [B][a]\} [U_{seq}] [A]. \quad (4.177)$$

Portanto,

$$[B_{seq}] = [a]^{-1} [B][a] [\text{siemens/km}], \quad (4.178)$$

que se for subdividida por seu valor expresso em (4.177) chega-se a:

$$[B_{seq}] = \omega \{[a]^{-1} [A]^{-1} [a]\} [\text{siemens/km}]. \quad (4.179)$$

Observa-se em (4.179), que o cálculo das susceptâncias capacitivas das linhas são mais complexas que o cálculo das reatâncias capacitivas, já que se faz necessário realizar a inversão da matriz dos coeficientes de potencial de campo médios.

DESCRIÇÃO DO LABORATÓRIO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

CAPÍTULO 5

5.1 - Introdução

O Laboratório de Linhas de Transmissão (LLT) é um pacote computacional que foi desenvolvido para dar apoio aos cursos de graduação da disciplina de Linhas de Transmissão.

Este pacote computacional é composto por diferentes tipos de cálculos que permitem aos alunos adquirir conhecimentos e sensibilidade sobre as principais questões de linhas de transmissão, notadamente, às aéreas. As linhas de transmissão, subtransmissão e distribuição subterrâneas também podem ser tratadas pelo pacote.

Este pacote foi desenvolvido em Visual-Basic pelas suas facilidades de construção de interfaces gráficas amigáveis e de programação de rotinas numéricas. O Anexo 1 apresenta os fundamentos desta linguagem.

O LLT possui um conjunto de janelas que guiam os alunos pelos diversos cálculos, além de oferecer um instrumento para seu aprendizado. A Fig 5.1 apresenta a tela principal do programa, onde os diversos projetos podem ser escolhidos pelos usuários, que são:

- 1) Flecha – cálculos da flecha e tensão mecânica sobre os condutores
- 2) Parâmetros – cálculo dos parâmetros elétricos das linhas: impedância longitudinal e admitância transversal
- 3) Lattice – cálculo sobre a energização das linhas
- 4) Compensação – cálculos das compensações “shunt” e série

- 5) Comportamento – cálculos dos valores de tensão e corrente ao longo da linha
- 6) Cabos – banco de dados sobre os cabos que são utilizados no pacote.



Figura 5.1 – Tela principal do Laboratório de Linhas de Transmissão

5.2 - Projeto Cabos

Escolhendo-se o Projeto Cabos, surge a janela da Fig 5.2, onde se encontram os seguintes dados:

- a) Código do cabo – nome do cabo a ser utilizado
- b) Tipo da estrutura – tipo do condutor, por exemplo, alumínio com alma de aço (CAA)
- c) Bitola – tamanho da secção reta do condutor
- d) Formação – modelo, por exemplo, cabo ou condutor
- e) Número de fios – número de tentos do condutor
- f) Seção de alumínio – Área da secção reta, em mm^2

- g) Seção de liga de alumínio – Área da secção reata, em mm^2
- h) Seção de aço – Área da secção reata, em mm^2
- i) Diâmetro do cabo – medida em mm
- j) Peso – do condutor, em kg/km
- l) Carga de ruptura – do condutor, em kgf
- m) Módulo de Elasticidade Inicial – em kg/mm^2
- n) Módulo de Elasticidade Final – em kg/mm^2
- o) Coeficiente de Dilatação Linear Inicial – em $10^{-6} / ^\circ\text{C}$
- p) Coeficiente de Dilatação Linear Final – em $10^{-6} / ^\circ\text{C}$

Alguns desses dados podem estar faltando e não interferir na execução do pacote, isto no caso do cálculo não necessitar dele.

Como se trata de um banco de dados, pode-se ainda:

- a) Sair – para deixar a janela
- b) Remover – para apagar o cabo da base de dados
- c) Editar – para permitir acessar e modificar os dados de um determinado cabo
- d) Adicionar – para gravar os dados do cabo na base de dados
- e) Anterior / Próximo – para recuar ou avançar na base de dados.

Propriedade	Valor
Código do Cabo	WREN
Tipo de Estrutura	ACSR (CAA)
Bitola	8 AWG
Formação	CABO
Número de Fios	0
Seção de Alumínio [mm^2]	8,37
Seção de Liga de Alumínio [mm^2]	0
Seção de Aço [mm^2]	1,4
Seção Total do Cabo [mm^2]	9,77
Diâmetro do Cabo [mm]	4
Peso [kg/km]	33,9
Carga de Ruptura [kgf]	343
Módulo da Elasticidade Inicial [kg/mm^2]	6820
Módulo da Elasticidade Final [kg/mm^2]	8075
Coeficiente Dilatação Linear Inicial [$10\text{E}-6/^\circ\text{C}$]	18,38
Coeficiente Dilatação Linear Final [$10\text{E}-6/^\circ\text{C}$]	19,1

Sair | Remover | Editar | Adicionar | Anterior | Próximo

Figura 5.2 – Janela do Projeto Cabos.

5.3 - Projeto Flecha

Escolhendo-se o Projeto Flecha, a primeira janela que surge é a apresentada na Fig 5.3, onde se pode determinar o tipo de cabo, já registrado na base de dados. Em seguida, o usuário deve preencher os seguintes dados:

- a) Velocidade do vento – médio na linha, em m/s
- b) Temperatura EDS – temperatura ambiente, em °C
- c) Percentual de tensão de ruptura – em %
- d) Tempo de “creep” (ou fluência) – em anos
- e) Temperatura de “creep” – em °C
- f) Temperatura mínima de análise – em °C
- g) Temperatura máxima de análise – em °C
- h) Incremento da temperatura – em °C
- i) Vão entre torres mínimo – em m
- j) Vão entre torres máximo – em m
- l) Incremento do vão – em m

Parâmetro	Valor
Tipo de Cabo	WREN
Velocidade do Vento [m/s]	120
Temperatura EDS [°C]	15
Percentual de Tensão de Ruptura [%]	18
Tempo de Creep "Fluência" [anos]	10
Temperatura de Creep [°C]	20
Temperatura Mínima de Análise [°C]	0
Temperatura Máxima de Análise [°C]	80
Incremento da Temperatura [°C]	10
Vão entre Torres Mínimo [m]	100
Vão entre Torres Máximo [m]	200
Incremento do Vão [m]	10

Figura 5.3 – Janela Inicial do Projeto Flecha

Preenchidos os dados, avança-se para a próxima janela, Fig 5.4, onde se pode optar por estabelecer os cálculos para variações regulares de vão ou de

temperatura. Escolhido este item, determina-se o passo de cada variação. Assim, o programa calcula os elementos da tabela: temperatura (°C), flecha inicial (m), flecha final (m), tensão inicial (kgf) e tensão final (kgf).

Temp. [°C]	Flecha Inicial [m]	Flecha Final [m]	Tensão Inicial [kgf]	Tensão Final [kgf]
0	4,12	4,08	63,65	64,33
10	4,21	4,16	62,36	62,99
20	4,29	4,25	61,13	61,73
30	4,37	4,33	59,98	60,55
40	4,45	4,41	58,89	59,43
50	4,53	4,49	57,86	58,37
60	4,61	4,57	56,88	57,36
70	4,69	4,65	55,94	56,41
80	4,76	4,73	55,06	55,5

Figura 5.4 – Janela Intermediária do Projeto Flecha.

Avançando-se surgem os gráficos, plotados a partir dos dados da tabela, como mostrado na Fig 5.5.

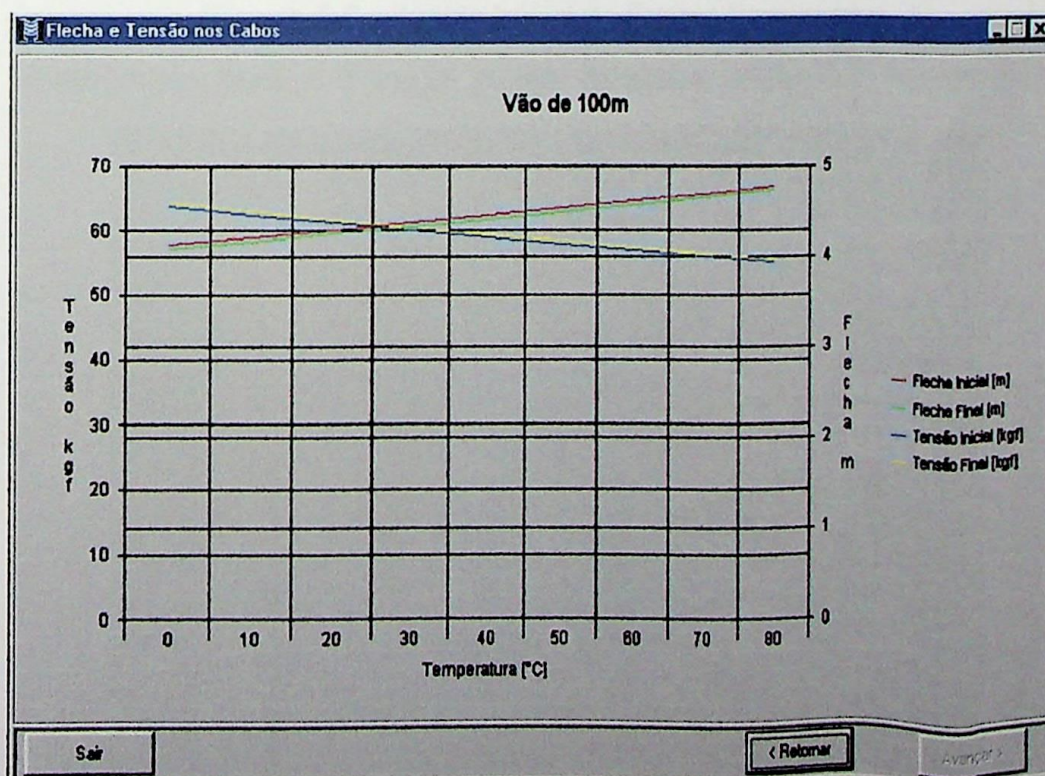


Figura 5.5 – Janela de Gráfico do Projeto Flecha.

5.4 Projeto Parâmetros

Escolhendo-se o Projeto Parâmetros, a primeira janela que surge é a apresentada na Fig 5.6, onde se deve preencher os campos: número de subcondutores por fase, raio do conjunto de subcondutores (em m), número de circuitos trifásicos, número de cabos pára-raios e comprimento da linha.

O LLT foi concebido para trabalhar com circuitos simples ou duplos e para subcondutores com configuração regular (equidistantes dos subcondutores adjacentes).

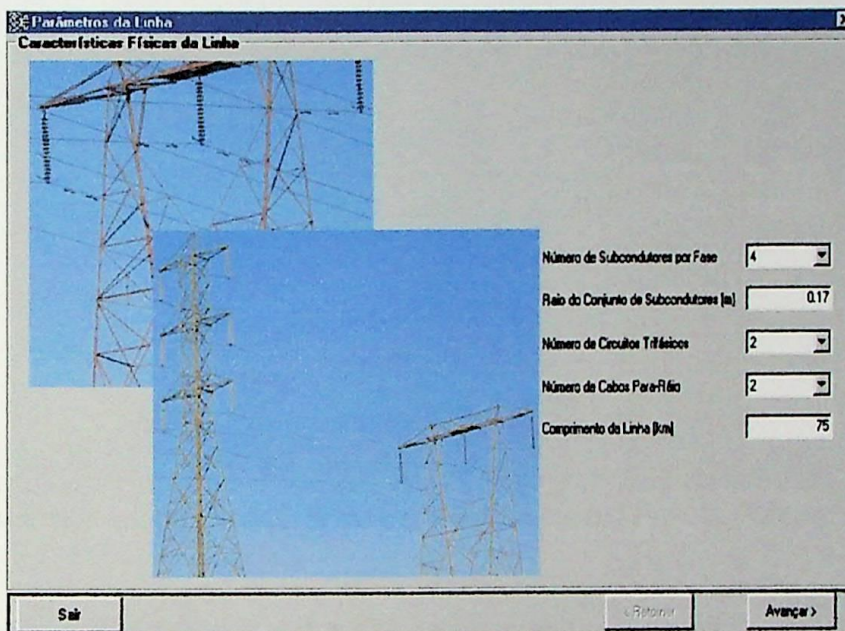


Figura 5.6 - Janela Inicial do Projeto Parâmetros

Avançando para a próxima janela, mostrada na Fig 5.7, contém itens de

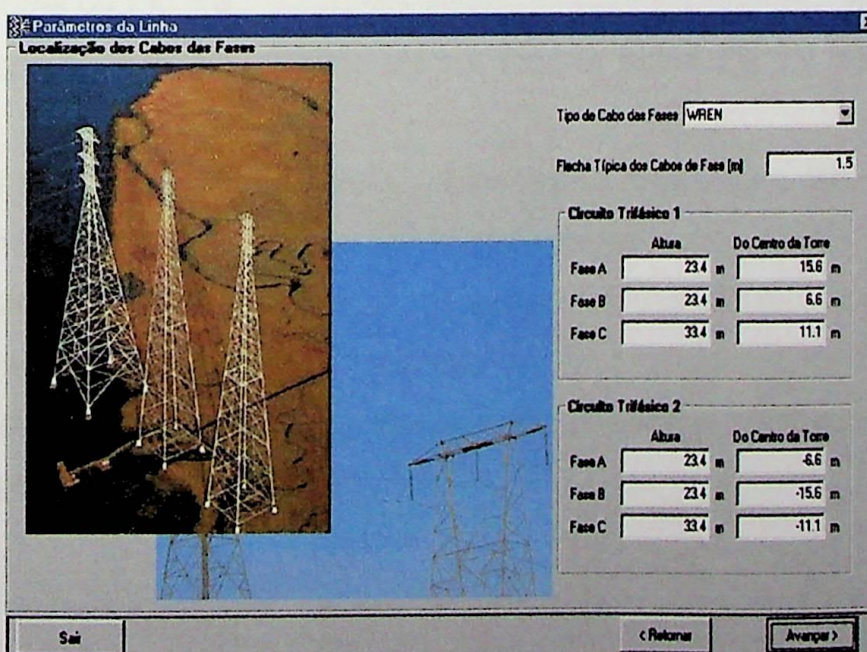


Figura 5.7 – Janela sobre os Condutores para o Projeto Parâmetros.

informações sobre os condutores. Escolhe-se o tipo do condutor (já cadastrado na base de dados), sua flecha típica (em m), e a sua geometria.

Avançando para a próxima janela, mostrada na Fig 5.8, contém itens de informações sobre os cabos pára-raios. Escolhe-se o tipo do condutor (já cadastrado na base de dados), sua flecha típica (em m), e a sua geometria.

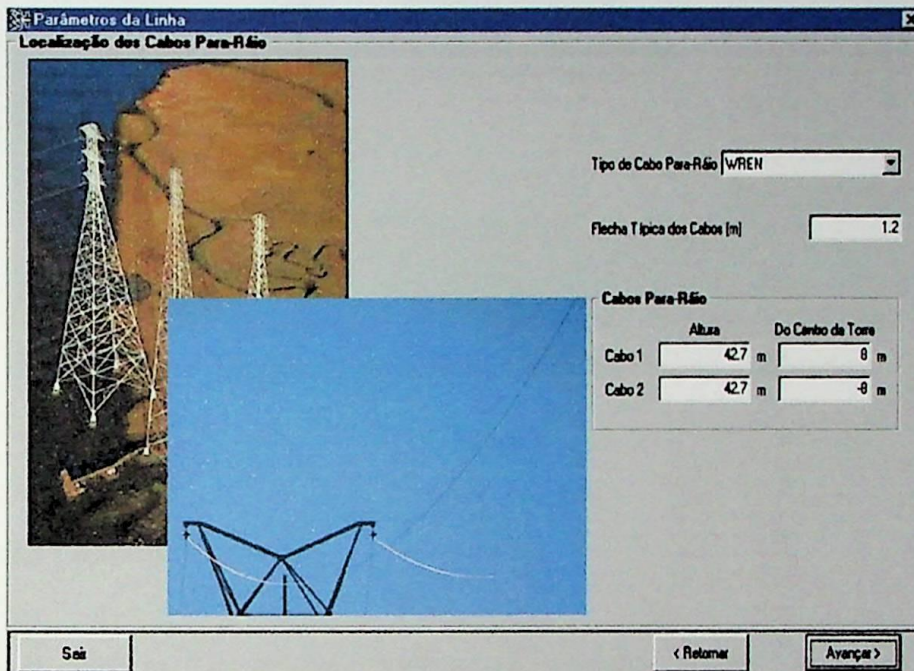


Figura 5.8 – Janela sobre os Para-Raios para o Projeto Parâmetros.

As janelas das Fig 5.7 e 5.8 são abertas de acordo com os dados fornecidos na Fig 5.6, ou seja, se existe apenas um cabo pára-raio, somente um espaço é aberto na janela da Fig 5.8.

Em seguida, o pacote mostra em sua próxima janela, Fig 5.9, os seguintes resultados:

- Parâmetros sem transposição – impedâncias longitudinais (em ohm/km) e admitância transversal (em siemens/km) por fase
- Parâmetros com transposição – impedâncias longitudinais (em ohm/km) e admitância transversal (em siemens/km)
- Quadripolo da linha – constantes generalizadas do quadripolo equivalente da linha.

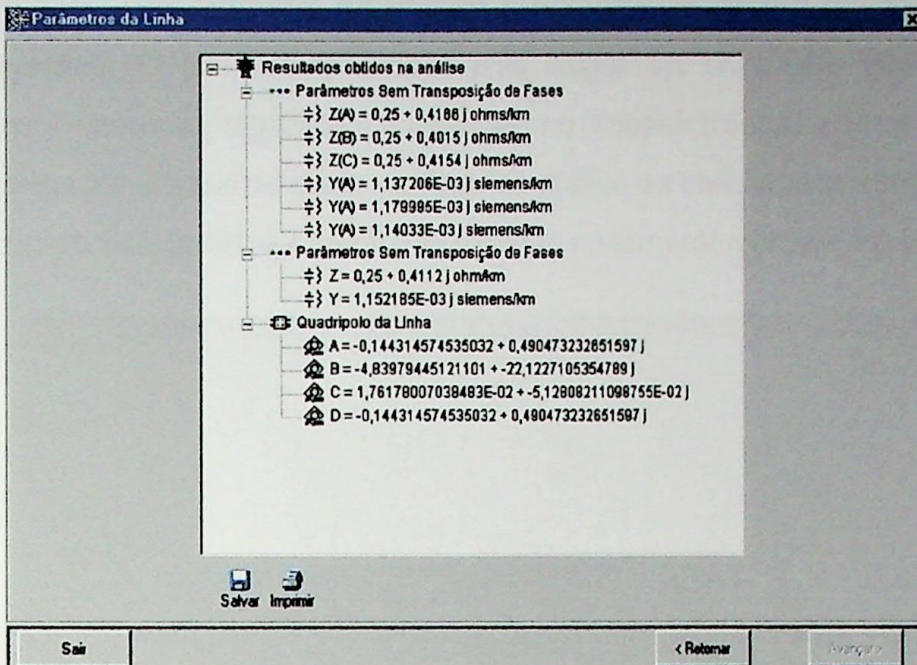


Figura 5.9 – Janela com os Resultados do Projeto Parâmetros.

5.5 - Projeto Lattice

Escolhendo-se o Projeto Lattice, a primeira janela que aparece é a apresentada na Fig 5.10, onde se deve preencher os campos: indutância distribuída (em Henry/km), capacitância distribuída (em Farad/km), impedância terminal (em ohm) e número de períodos para análise.

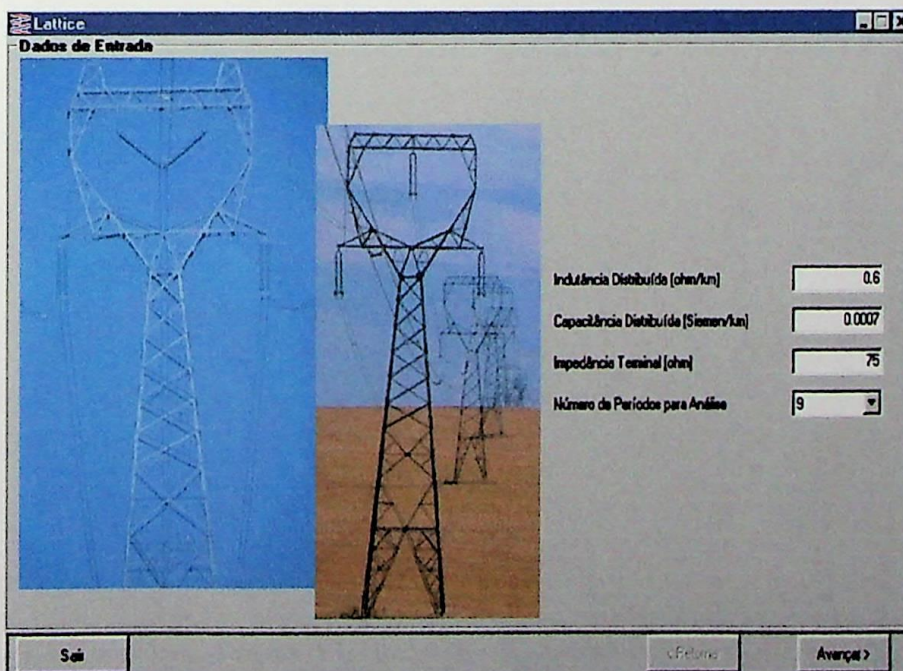


Figura 5.10 - Janela Inicial do Projeto Lattice.

O número de períodos de análise é referente ao número de reflexões das ondas viajantes. O período unitário é uma viagem da onda pela linha, então 5 períodos, por exemplo, significam 3 reflexões no receptor e duas no emissor.

Avançado, o usuário pode verificar os gráfico de treliças, apresentado na Fig 5.11, e no plano cartesiano o perfil das tensões no terminal receptor, Fig 5.12.

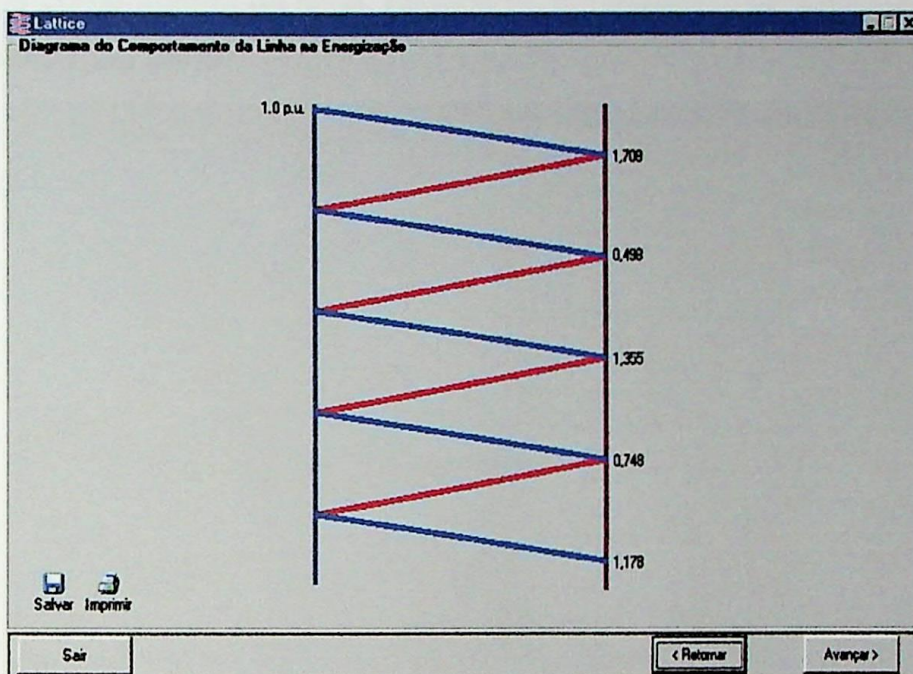


Figura 5.11 – Janela com o Gráfico de Treliças.

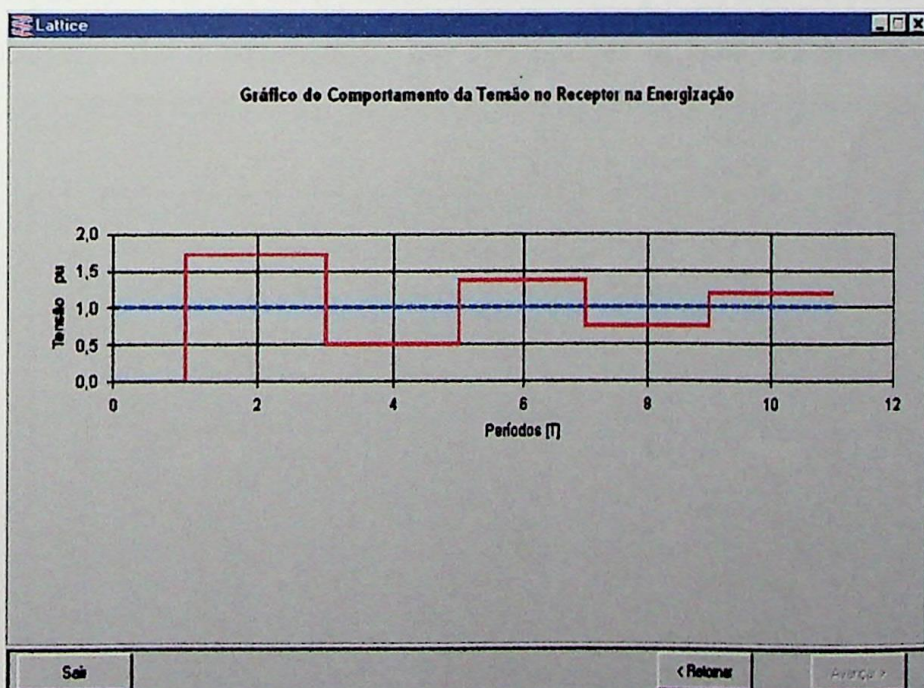


Figura 5.12 – Janela com o Gráfico do Perfil das Tensões no Terminal Receptor.

5.6 - Projeto Compensação

Escolhendo-se o Projeto Compensação, a primeira janela que aparece é a apresentada na Fig 5.13, onde se deve preencher os campos: resistência distribuída (em ohm/km) indutância distribuída (em Henry/km), capacitância distribuída (em Farad/km) e comprimento da linha. Escolhe-se, em seguida, a compensação “shunt” ou a compensação série.

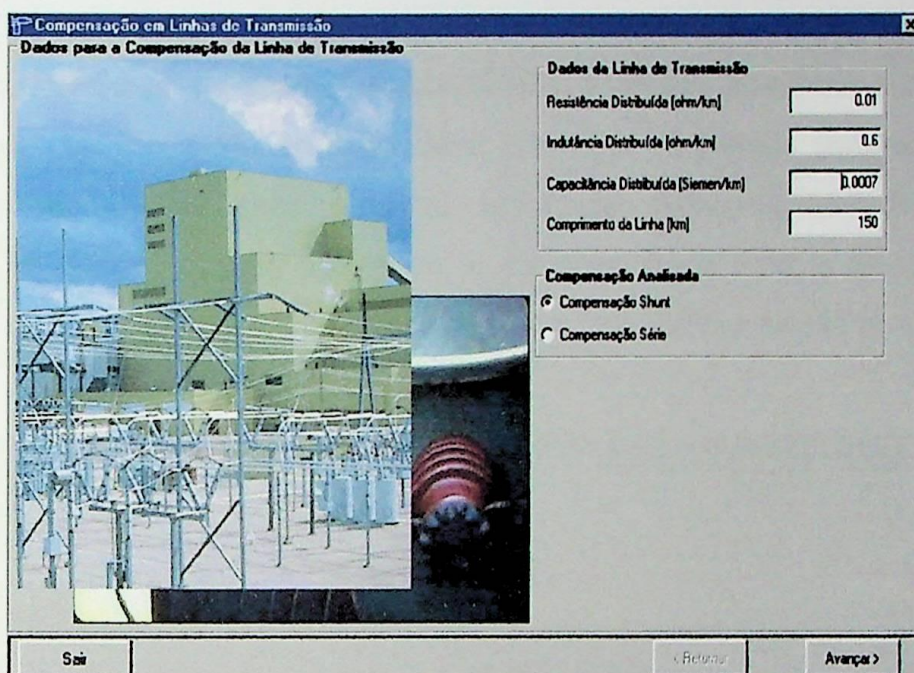


Figura 5.13 – Janela Inicial do Projeto Compensação.

Avançado, encontra-se a janela mostrada na Fig 5.14, onde se pode distribuir as percentagens da compensação em três pontos da linha: no emissor, a uma

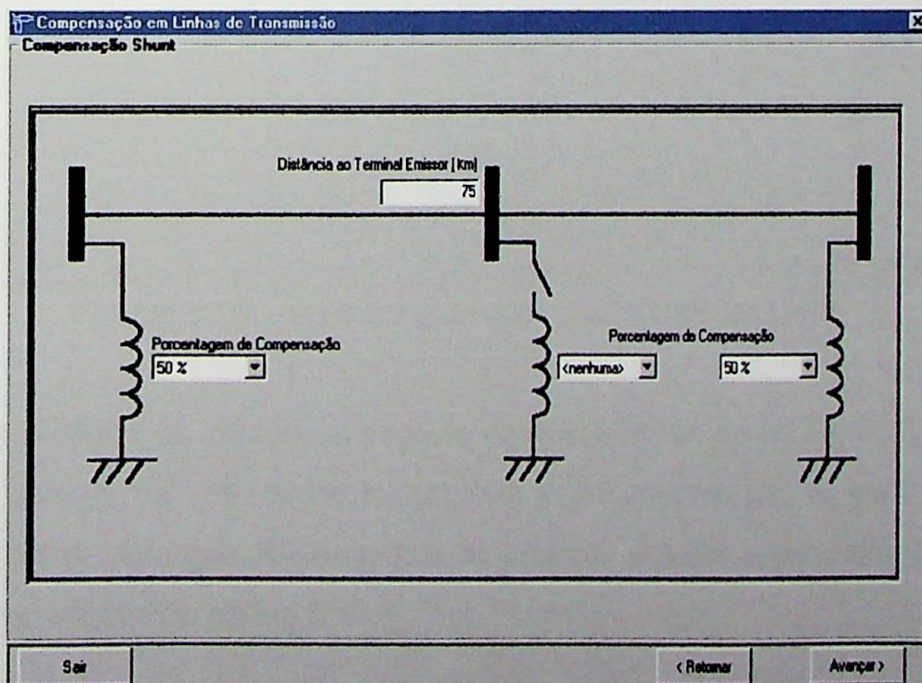


Figura 5.14 – Janela do Projeto Compensação: Definição do Local e Percentagens.



distância do terminal emissor e no receptor. A figura muda sempre que se coloca uma percentagem (diferente de zero, <nenhuma>), fechando ou abrindo a chave relativa ao processo. Uma outra janela mostra o resultado da compensação.

5.7 - Projeto Comportamento

Escolhendo-se o Projeto Comportamento, a primeira janela que aparece é a apresentada na Fig 5.15, onde se deve preencher os campos relativos a linha: resistência distribuída (em ohm/km) indutância distribuída (em Henry/km), capacitância distribuída (em Farad/km) e comprimento da linha; e os relativos à carga: potência ativa (em MW), potência reativa (em MVA_r) e tensão na carga (em kV).

Dados da Linha de Transmissão	
Resistência Distribuída [ohm/km]	0.01
Indutância Distribuída [ohm/km]	0.6
Capacitância Distribuída [Siemen/km]	0.0007
Comprimento da Linha [km]	150

Dados da Carga	
Potência Ativa na Carga [MW]	10
Potência Reativa na Carga [MVA _r]	2
Tensão na Carga [kV]	138

Figura 5.15 – Janela Inicial do Projeto Comportamento.

Preenchidos os dados, avança-se para a próxima janela, Fig 5.16, onde o programa calcula os valores de tensão (em kV) e corrente (em A) para diversos pontos da linha. Avançando-se surgem os gráficos, plotados a partir dos dados da tabela, como mostrado na Fig 5.17.

Distância(km)	Tensão (kV)	Corrente (A)
0,0	137,8	222
7,5	134,6	615
15,0	128,4	1010
22,5	119,0	1383
30,0	106,9	1725
37,5	92,3	2027
45,0	75,5	2281
52,5	57,0	2481
60,0	37,1	2623
67,5	16,6	2704
75,0	6,4	2720
82,5	26,4	2673
90,0	46,7	2562
97,5	66,0	2391
105,0	83,8	2164
112,5	99,6	1886
120,0	113,0	1563
127,5	123,8	1204
135,0	131,7	816
142,5	136,4	410
150,0	138,0	43

Figura 5.16 – Janela com Valores de Tensão e Corrente em Diversos Pontos na Linha.

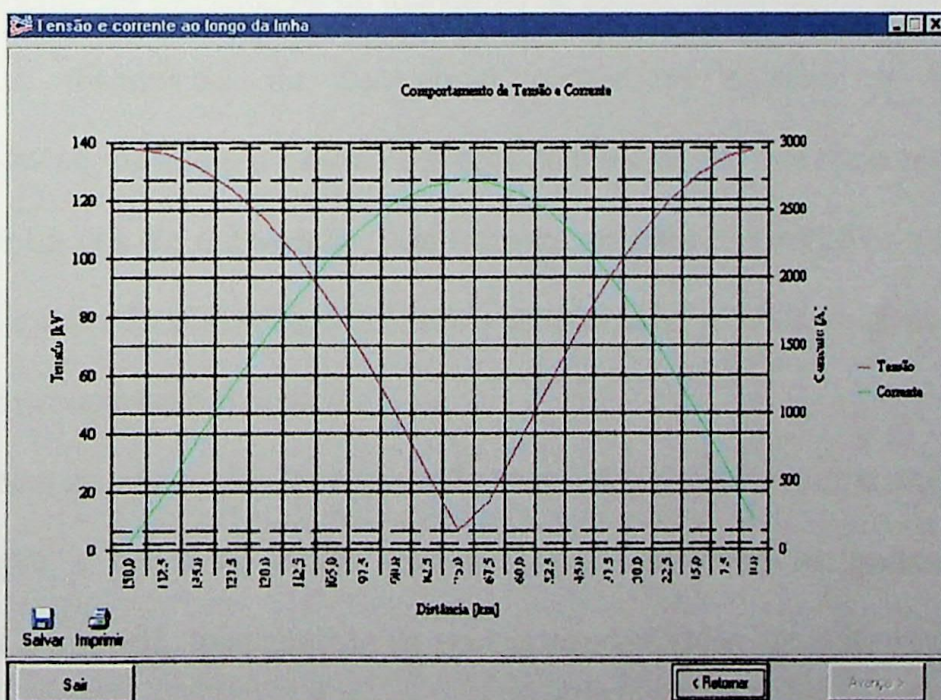


Figura 5.17 – Janela com os Gráficos de Tensão e Corrente ao Longo da Linha.

Novos problemas no âmbito da geração, transmissão e distribuição de energia elétrica no crescente mercado de energia serão garantidos caso não haja uma política de investimentos concretos no setor energético nacional. Mesmo com o crescimento apenas satisfatório da economia, o crescimento da utilização da energia elétrica cresceu mais que o esperado. Justifica-se tal crescimento pelas facilidades e barateamento de tecnologias de fabricação de equipamentos eletro-eletrônicos que coloca a disposição do consumidor quantidades enormes de aparelhos consumidores de energia elétrica a preços bem acessíveis, bem como pela entrada do Brasil na era da automação, cujo emprego em massa de máquinas e robôs é a principal causa da elevação do consumo de energia no setor industrial, assim como o próprio crescimento industrial.

Além da necessidade da geração de quantidades maiores de energia elétrica para suprir a demanda deste novo quadro que se forma, há igualmente, que viabilizar a entrega desse pacote de energia ao consumidor. Aumentar a capacidade de geração de energia elétrica em nosso sistema não será uma solução complicada, mas aumentar a capacidade de transmissão mostra-se como uma tarefa muito difícil e custosa monetariamente. A alocação de novas linhas de transmissão de energia

elétrica é um processo demorado e difícil quando analisado pelos aspectos técnicos, sociais e culturais.

Algumas soluções alternativas à construção de novas linhas são apresentadas no sentido de aproveitar as linhas já construídas. Entre os mais variados estudos estão como exemplo a elevação da tensão de uma linha a circuito duplo de 230kV para circuito simples de 500kV, a substituição dos condutores convencionais por aqueles de ligas termoresistentes que viabilizam a repotencialização da linha, reisolamento das linhas para elevação da tensão e o estudo do aumento da ampacidade dos cabos de energia, entre outros.

Conhecer e dominar o comportamento das linhas de transmissão é a premissa para os estudos mais avançados de melhorias de nossa rede de transmissão. O presente trabalho de pesquisa dos fundamentos teóricos e dos equacionamentos dos modelos de linhas estudados mostrou a complexidade de um sistema que necessita de ferramentas poderosas para sua análise.

O desenvolvimento do programa computacional "Laboratório de Linhas de Transmissão" (LLT), vem justamente auxiliar neste complexo processo de aprendizado do comportamento elétrico e físico das linhas, com sucesso. O LLT desempenha funções esclarecedoras a respeito do funcionamento das linhas tornando-se uma eficiente ferramenta de auxílio nas análises pertinentes aos regimes permanentes e transitórios das linhas para engenheiros e técnicos da área. Nele pode-se observar a mudança dos parâmetros elétricos da linha com a mudança dos parâmetros físicos tais como: espaçamentos entre condutores, altura dos condutores em relação ao solo, pode-se também, analisar o efeito da compensação de energia reativa das linhas, observar as conseqüências e distúrbios na linha após sua energização. Por tudo isso, acredita-se que o trabalho alcançou bons

resultados, tanto da parte do conhecimento dos equacionamentos quanto a respeito do pacote computacional final que respondeu aos objetivos almejados no início dos estudos.

Como desenvolvimentos futuros a este pacote computacional pode-se sugerir algumas idéias, tais como:

A inclusão dos cálculos de capacidade de condução de corrente nos condutores das linhas de transmissão, principalmente para aquelas de instalação subterrânea. Os estudos dedicados a essa parte mostraram que não se trata de uma simples “receita de bolos” e sim de um complexo algoritmo de aproximadamente oitenta fórmulas com mais ou menos setenta variáveis conforme estudado nas referências [7] a [16], dependendo do sistema de instalação utilizado.

Outra grande contribuição a este pacote pode ser a agregação de um sistema de inteligência artificial de sistemas especialistas agindo em conjunto com um sistema de aquisição dos dados de temperatura do condutor, do meio ambiente e da corrente no condutor para serem tratados pelo processo inteligente e assim fazer predições da capacidade de transmissão da linha.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Site Internet: ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico, <http://www.ons.com.br/ons/index.htm>
- [2] DEB, A K.. *Powerline Ampacity System: Theory, Modeling and Applications*. CRC Press LLC, Florida, 2000.
- [3] KING, S. Y., HALFTER, N. A. *Underground Power Cables*. Ed. Longman. (1987?).
- [4] PIRELLI CABOS ELÉTRICOS. *Catálogo Geral – Cabos Energia*. Editora Pirelli. (1987?)
- [5] ABNT/NBR 11301. *Cálculo da Capacidade de Condução de Corrente de Cabos Isolados em Regime Permanente (fator de carga 100%)*. Brasil, Rio de Janeiro: Set 1990.
- [6] FUCHS, R. D.. *Transmissão de Energia Elétrica – Linhas Aéreas*. Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. Segunda Edição. Rio de Janeiro. 1979.
- [7] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION STANDART. *Calculation of the Continuous Current Rating of Cables (100% load factor)*. Publicação 287, Segunda Edição, 1982.
- [8] _____. *Calculation of the Current Rating*. Publicação 287-1-1, Primeira Edição, nov. 1993.
- [9] _____. *Calculation of the Current Rating*. Publicação 287-2-1, Primeira Edição, dez. 1994.
- [10] NEHER, J. H., McGRATH, M. H.. *The Calculation of the Temperature Rise and Load Capability of Cable System*. AIEE Transaction, p. 752-772, out. 1957.
- [11] NEHER, J. H.. *The Determination of Temperature Transient in Cable System by Means of an Analogue Computer*. AIEE Transactions, v.70, 1951, p.1361-1371.
- [12] _____. *A Simplified Mathematical Procedure for Determining the Transient Temperature Rise of Cable System*. AIEE Transactions, p. 712-718, ago 1953.
- [13] _____. *The Temperature Rise of Buried Cables and Pipes*. AIEE Transactions, v.68, p.9-21, 1949.
- [14] _____. *Temperature Rise of Cables in a Duct Bank*. AIEE Transactions, v.68, p.540-549, 1949.
- [15] BULLER, F. H.. *Thermal Transients on Buried Cables*. AIEE Transactions, v.70, p.45-55, 1951.

- [16] PISTORE, T. T.. *Algoritmo para Cálculo da Capacidade de Corrente de Cabos de Potência – Neher-McGrath*. Anais dos Trabalhos de Diploma. Itajubá: IEE - EFEI. 1999.

A FERRAMENTA VISUAL-BASIC

ANEXO 1

Este Anexo mostra alguns elementos importantes da ferramenta computacional utilizada no desenvolvimento do Laboratório de Linhas de Transmissão.

A.1 Iniciando o Visual Basic 5.0

Para iniciar um programa em Visual Basic 5.0, basta clicar em Iniciar – Programas – **Visual BASIC 5.0**, como mostrado na Fig A.1

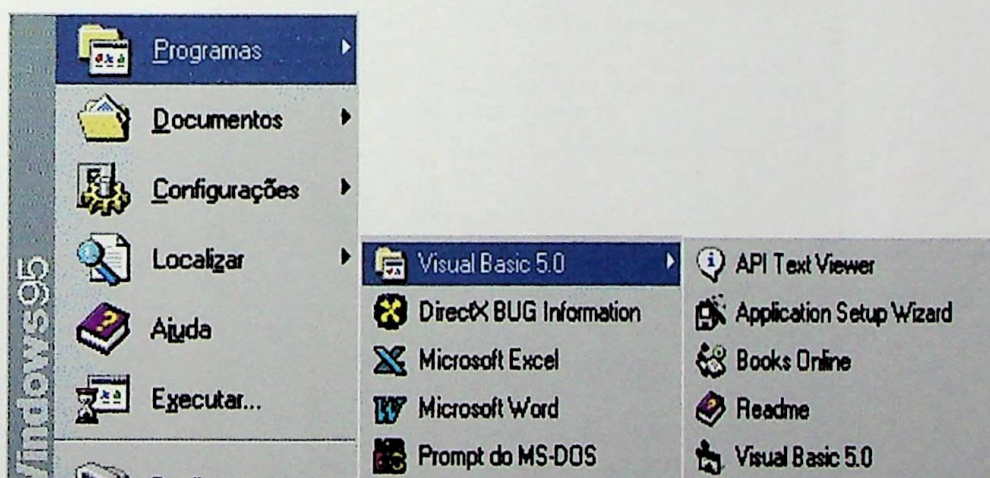


Figura A.1 – Iniciando um Programa em Visual Basic.

Na Fig A.1, observa-se que o Grupo do **VB 5.0** tem cinco itens:

a) “API Text Viewer” - onde se pode visualizar as APIs do Windows: suas constantes, declarações e tipos de dados. O mais importante desse utilitário é

que podemos selecionar qualquer parte daqui e copiar e colar no Código do projeto do VB, como mostrado na Fig A.2.

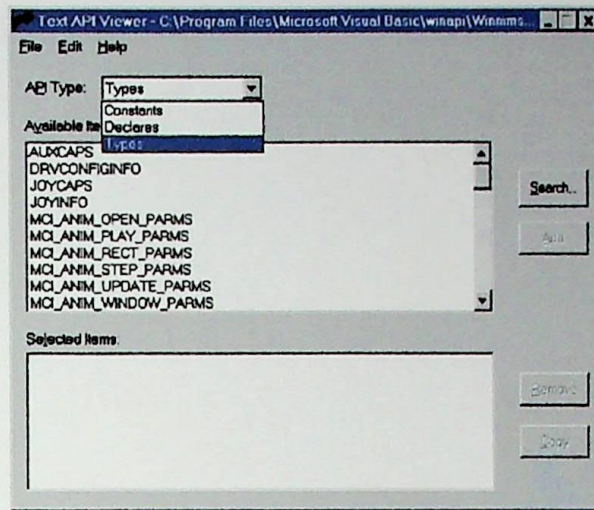


Figura A.2 – Janela “API Text Viewer”.

b) “Application Setup Wizard” - este utilitário é o assistente responsável pela geração dos discos (disquete ou Cd) instaladores do programa desenvolvido no VB. Também chega a gerar o executável, se assim o desejar (Fig A.3).

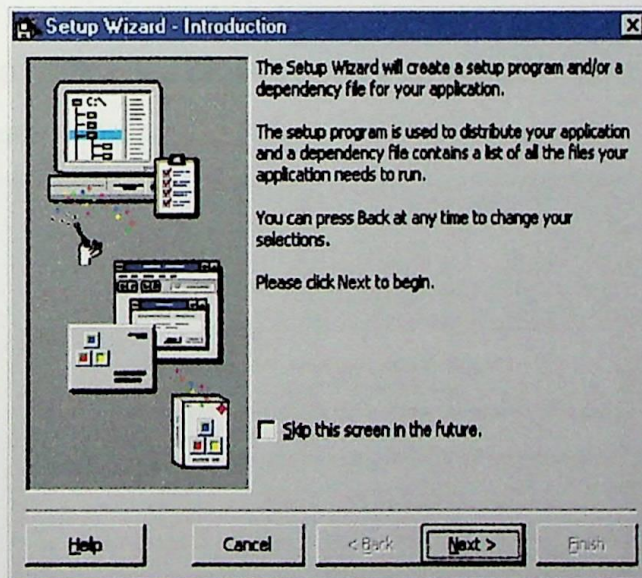


Figura A.3 – Janela “Application Setup Wizard”

c) “Crystal Report” - é o gerador de relatórios do VB. Desenvolvido pela Seagate (a mesma dos HDs) ele agiliza o desenvolvimento de relatórios, tornando essa tarefa menos trabalhosa que sua construção através de

Código. Pode estar no Grupo do VB ou não, depende da instalação. Esta janela é mostrada na Fig A.4.

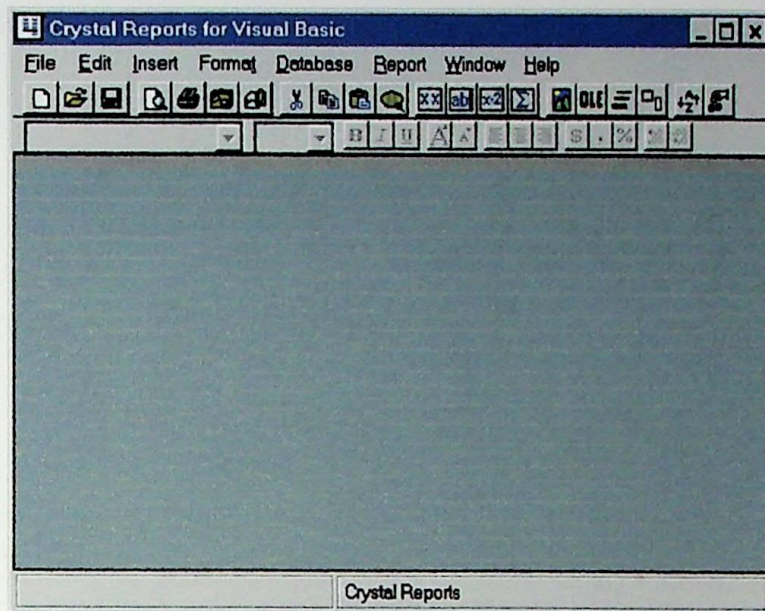


Figura A.4 – Janela “Crystal Report”.

- d) “Books Online” - são arquivos de Help existentes no CD de instalação e que podem ser Instalados ou não no disco rígido e consultados através deste item.
- e) “Read Me” - arquivo de Help que traz inúmeras informações importantes, como pode ser visto na Fig A.5.

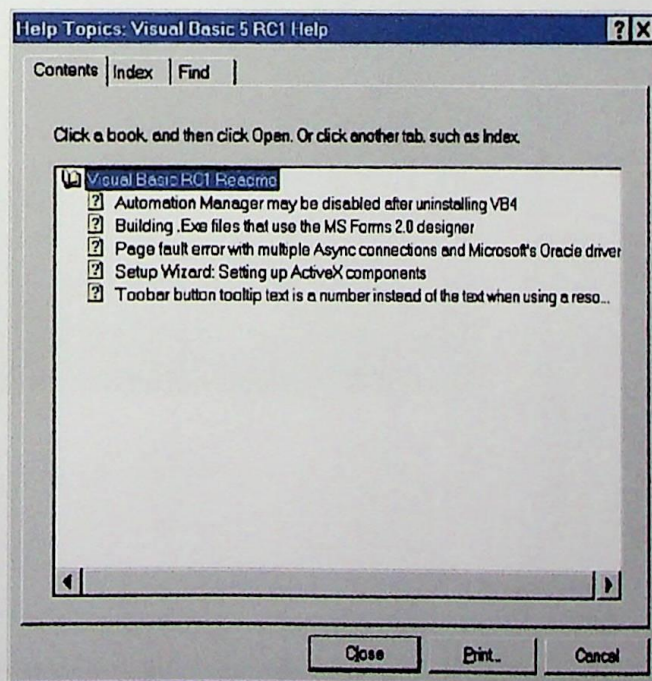


Figura A.5 – Janela “Read Me”

f) Visual Basic 5.0 - O quinto item é o próprio VB 5.0, que ao ser ativado abre a janela abaixo, onde se deve escolher o tipo de projeto que se deseja criar ou abrir um existente. A Fig 4,6 mostra esta janela.

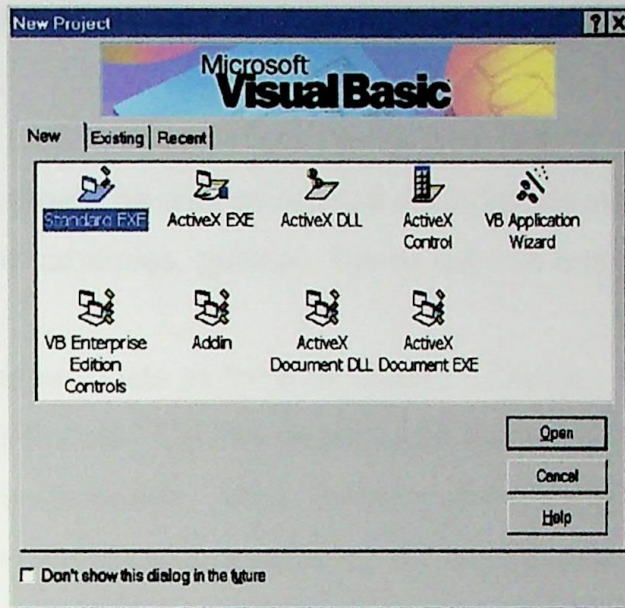


Figura A.6 – Janela VB5.0

Após escolher a opção padrão **Standard EXE** aparece a tela mostrada na Fig A.7, que é o ambiente de programação do Visual Basic 5.0 Edição Interprise.

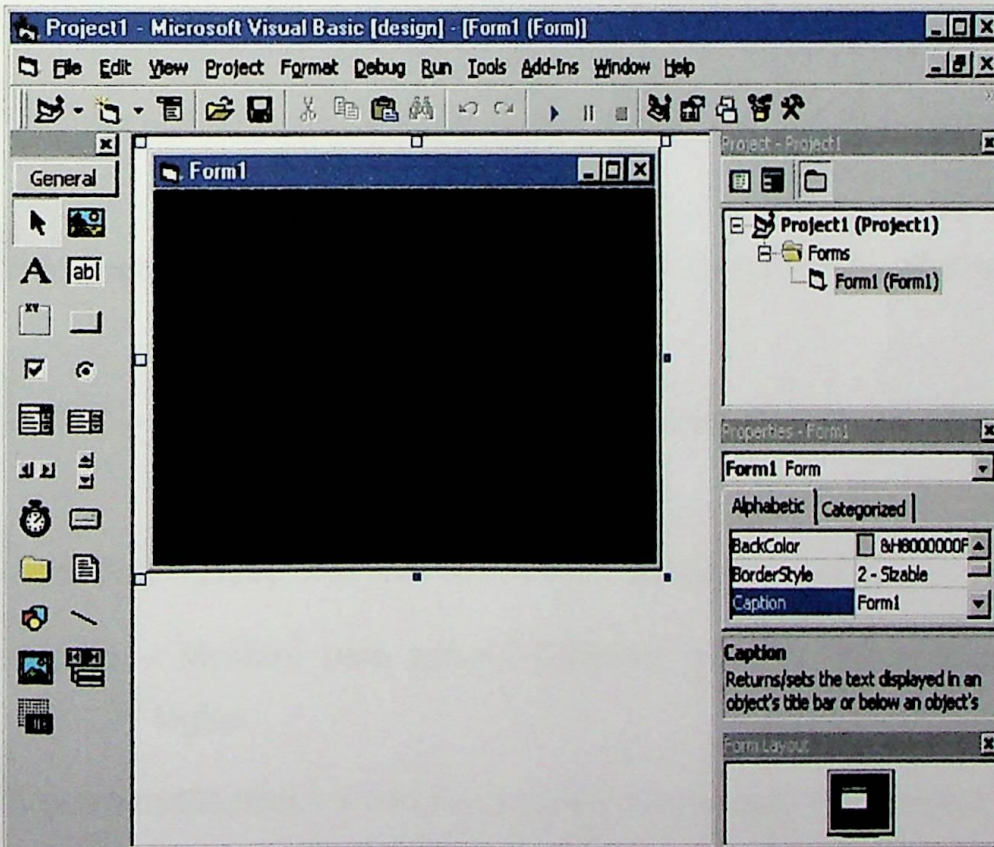


Figura A.7 – Ambiente de Programação

Todas as janelas acima (**Principal, Toolbox, Projeto, Propriedades e Formulário**) são exibidas por default.

- a) **Toolbox** - Providencia um conjunto de ferramentas que se utiliza durante o projeto para colocar controles dentro de seu form (janela de interface com o usuário).
- b) **Menu Bar** - Mostra os comandos usados para construir a sua aplicação.
- c) **Form** - É a janela na qual se constrói a interface da sua aplicação. No form se adiciona controles, gráficos, figuras que cria a aparência final de uma aplicação.
- d) **Project Window** - Lista os forms, **Módulos de Código**.
- e) **Properties Window** - Lista as propriedades existentes para um form ou outro controle selecionado. Uma property (propriedade) é um valor ou característica associada a um objeto tais como tamanho, caption ou cor.

A.2 Janelas do Compilador

A.2.1 Toolbox



Pointer – Não é um **Controle**, mas uma ferramenta que serve para mover e dimensionar **Controles**;



PictureBox – Exibir figuras ou ícones nos **Formulários**. Também responde ao **Evento** click.



Label – Etiqueta ou rótulo, exibe um texto que não pode ser editado pelo usuário. Uso: Títulos.




TextBox – Exibe uma área onde o usuário pode digitar texto.





Frame – Moldura para agrupar **Controles** para que funcionem de forma lógica.




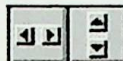
CommandButton – Botão de Comando. Executa ação ao ser clicado.


 **CheckBox** – Pode assumir valores falso ou verdadeiro. Em um mesmo **Formulário** vários **CheckBoxes** podem assumir o valor verdadeiro ao mesmo tempo.


 **OptionButton** – Pode também assumir valores falso/verdadeiro, mas em um mesmo **Formulário** somente um **OptionButton** pode assumir o valor verdadeiro.


 **ComboBox** – Combina caixa de texto com caixa de listagem. O usuário pode digitar a informação como também pode encolher da lista.


 **ListBox** – Exibe uma lista de itens que o usuário pode selecionar.


 **ScrollBar** Horizontal e Vertical – Permite selecionar com o mouse um determinado valor numa faixa de valores.


 **Timer** – Controla intervalos de tempo determinados pelo programador.


 **DriveListBox** – Exibe uma lista de drives onde o usuário pode selecionar um.

 **DirListBox** – Exibe uma lista de diretórios (pastas) e permite que o usuário selecione um.

 **FileListBox** – Idem para arquivos.

 **Shape** – Adiciona diversas formas geométricas ao **Formulário**.

 **Line** – Adiciona linhas a **Formulários**.

 **Image** – Exibe figuras ou ícones e funciona como um **CommandButton** quando clicado.

Data – É o **DataControl**, que permite conectar-se a um **Banco de Dados** existente para extrair e manipular as informações contidas neste.

OLE – Incorpora objetos de outros aplicativos em um **Formulário**.



A.2.2 "Project Window"

As características do ambiente Windows (interface gráfica, janelas, objetos, **Eventos**, mouse, ícones, botões, etc.) são trabalhadas no **Visual BASIC**. O ponto de partida do para o desenvolvimento do **Visual BASIC** é uma janela – o **Formulário**. Realmente uma janela é a interface entre o programa e o usuário. Ela interage com o usuário.

Um **PROJETO** é um conjunto de arquivos que compõem a aplicação. Estes arquivos que compõem a aplicação podem ser visualizados na janela Projeto do VB (Project Window) (Fig A.8).

Para poder compartilhar **Código** em todo o projeto deve-se colocar este **Código** em um **Módulo** e declarar a **Procedure** como **Global**.

O ambiente de programação do **Visual BASIC** provém inúmeras ferramentas para auxiliar no desenvolvimento de aplicações gráficas: Formulários, Caixa de Ferramentas (Controles), Paleta de Cores, Propriedades, **Eventos** predefinidos, Janela de **Módulo** interativa e com help on-line, Object Browser, API Viewer, Setup Wizard, etc.

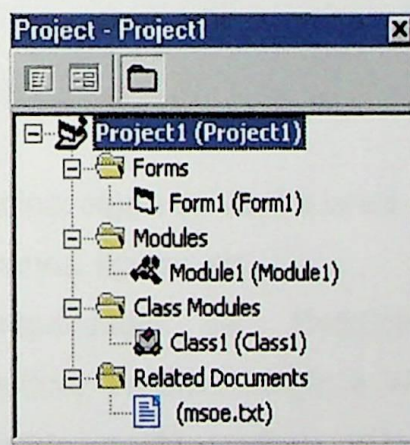


Figura A.8 – "Project Window".

A.2.3 Properties Window

Esta é uma janela muito útil (economiza muitas linhas de Código e a cada versão vem mais rica).

Todas estas propriedades indicadas (nome, cor de frente, cor de fundo, título, aparência, caixa de controle, habilitada, etc.) são referentes a um objeto, cujo nome aparece na Barra de títulos da janela (Form1 no caso da janela ao lado), como na Fig A.9.

A combobox que contém o nome do objeto e o tipo de grupo pertence é chamada de **Object Box**. Possibilita a escolha dos componentes pertencentes ao form apresentado na janela de edição.

A inferior, que pode ser selecionada por ordem Alfabética ou Categoria, é chamada **Setting Box**. É nessa parte da Properties Window que são ajustadas as propriedades do objeto selecionado.

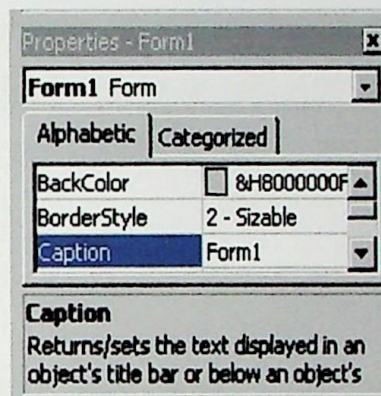


Figura A.9 – “Properties Windows”.

A.2.4 Janela Principal de Edição

O Formulário é o principal objeto do VB, é a janela que forma a interface com o usuário. Contém botões, menus, figuras, etc.

Suas principais Propriedades são: BackColor, BorderStyle, Caption, ControlBox, Max e MinButton, Enabled, Height e Width, Icon, MousePointers, Top, StartUp Position, Visible e WindowState (0-Normal, 1-Minimizada e 2-Maximizada).

A.3 Criando Aplicações

Diferença entre uma Aplicação Tradicional e outra Event-Driven ou seja ativada por **Eventos** ou Orientada a Objetos:

a) Em uma aplicação tradicional ou programada de forma procedural, a aplicação por si só controla que porções do **Código** serão executadas. A execução começa na primeira linha de **Código** e segue um caminho pré-definido através de toda a aplicação, chamando subrotinas conforme for sendo necessário.

b) Em uma aplicação controlada por **Eventos** ou event-driven, uma ação do usuário ou do sistema, ativa um procedimento associado a este **Evento**. Assim a ordem através do qual o seu **Código** de programa é executado depende de quais **Eventos** ocorram, que por sua vez estes **Eventos** dependem das ações tomadas pelo usuário. Esta é a essência das Interfaces Gráficas e da Programação Ativada por **Eventos**.

Os passos para a criação de uma aplicação são: (a) Criar a interface, (b) Selecionar as propriedades dos controles e (c) Escrever o Código.

(a) Criar a Interface

O primeiro passo na construção de uma aplicação **Visual BASIC** é desenhar os objetos que irão compor a interface. Para inserir o controle no seu form:

1. Clique no botão do controle dentro da toolbox.
2. Mova a seta do mouse para dentro da área do form, a seta vira uma cruz.
3. Ponha a cruz no ponto dentro do form onde irá ficar o canto superior esquerdo do controle escolhido
4. Arraste a cruz até que o controle fique do tamanho desejado (arrastar significa apertar o botão esquerdo do mouse e mante-lo apertado enquanto o objeto é movido com a mudança de posição do mouse)
5. Solte o botão do mouse e o controle aparecerá no form. Caso você dê um duplo clique num Controle da ToolBox ele será desenhado automaticamente em tamanho padrão e no centro do **Form**.

(b) Selecionar as Propriedades dos Controles

Propriedades são características que um objeto pode ter. Existem as comuns (p.e.: name) e as particulares a cada objeto.

O próximo passo é setar (colocar valores de inicialização) as propriedades dos objetos que você criou. A janela Properties proporciona uma maneira fácil de inicializar as propriedades para todos os objetos do form . Para abrir a janela de propriedades , escolha o comando Properties Window no menu View ou então clique no botão Properties na Barra de Ferramentas (Toolbar) ou tecla **FA**.

OBJECT BOX - Mostra o nome do objeto selecionado. Clique a seta a direita do box para selecionar o form ou nome de controle a partir da lista de objetos presentes no form atual.

SETTINGS BOX - Permite que você edite a inicialização da propriedade selecionada na lista de propriedades. Algumas inicializações podem ser trocadas clicando-se na seta sublinhada existente a direita do box ; será mostrada então uma lista de opções . Você poderá clicar em um item da lista para selecioná-lo.

LISTA DE PROPRIEDADES - A coluna esquerda mostra todas as propriedades para um objeto selecionado, a coluna da direita mostra a inicialização atual para cada uma das propriedades.

(c) Escrever o Código

MÓDULOS – são objetos que contêm código de programação (procedures, variáveis, constantes, tipos de dados, etc).

A janela de **Código** é o local onde você escreve o **Código Visual BASIC** para a sua aplicação. **Código** consiste em sentenças da linguagem , constantes e declarações. Usando a janela de **Código** (Code Window) , você pode rapidamente ver e editar qualquer parte do seu **Código** dentro de sua aplicação.

Para abrir a janela de **Código** você deve clicar duas vezes no form ou no controle para o qual você deseja escrever **Código** ou então a partir da janela Project , selecione o nome do form e clique no botão View Code.

A.4 Janela de Código (Code Window)

A janela de **Código** (Code Window) contém os seguintes elementos :

Object Box (Object) - Mostra o nome do objeto selecionado. Clique na seta a direita para mostrar a lista de todos os objetos associados a este form.

Procedures List Box (Proc) - Lista os procedimentos existentes para um objeto. O Box mostra o nome do procedimento selecionado - no exemplo acima Click. Clique na seta à direita do Box para mostrar todo o procedimento associado a este objeto.

O **CÓDIGO** (ou programa) em uma aplicação **Visual BASIC** é dividido em pequenos blocos chamados **procedures** (procedimentos). Um **event procedure** (procedimento associado a um **Evento**) contém **Código** que é executado quando um **Evento** ocorre (como por exemplo, quando o usuário clica em um botão), como mostrado na Figura A.10.

Cada controle tem uma parte do código associada a si. Existem controles que tem apenas propriedades sem a necessidade de código (acontece muito com os Labels), sem qualquer código.

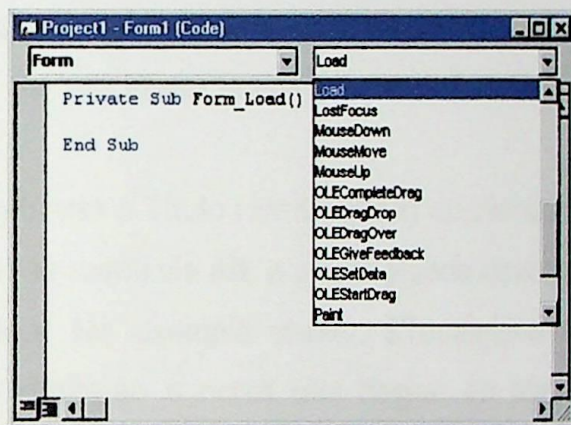


Figura A.10 – Janela de Código.

A.5 Criando um “Event Procedure”

1. No Object Box, selecione o nome do objeto no form ativo (form que atualmente tem o foco).
2. Na Procedure List Box, selecione o nome do **Evento** desejado. No exemplo acima a procedure Click já estava selecionada, já que ela é a procedure default para o botão de comando. Note que uma máscara (template) para a escrita do **Código** para este **Evento** está sendo mostrada na janela de **Código**
3. Digite o **Código** desejado entre as sentenças **Private Sub** e **End Sub** e a procedure se parecerá com o texto abaixo.

```
Private Sub Command1_Click ( )
```

```
Text1.text = "Hello World!"
```

```
End Sub
```

A.6 Criação de Menus

Menus são criados usando a janela Menu Design. Adiciona-se itens ao menu em tempo de projeto pela criação de controles de menu e selecionando propriedades que definirão sua aparência.

Para a criação de um **Menu** devemos ir ao menu **Tools – Menu Editor** ou teclar **Ctrl+E**.

Começamos digitando o Título (em **Caption**) do Menu mais à esquerda. Caso desejemos acessar esse menu via **Alt** e a letra grifada devemos inserir o **&** antes da letra que será grifada. No exemplo abaixo: **&Testemenu** (que aparecerá como **T**estemenu). Depois digita-se o nome (em **Name**) do Menu para referência em **Código**. Os outros itens não são obrigatórios. A Fig A.11 mostra esta janela.

Clicar em **Next** para entrar um novo Menu ou item de Menu. Caso seja um item de Menu devemos clicar na seta para a direita quando aparecerão três pontinhos a esquerda do título do item que ficará abaixo do nome do Menu.

Os Menus e os itens de Menus podem ser referenciados em **Código** através do **Evento Click**, que deve ser feito no **Formulário** após teclarmos em **OK**.



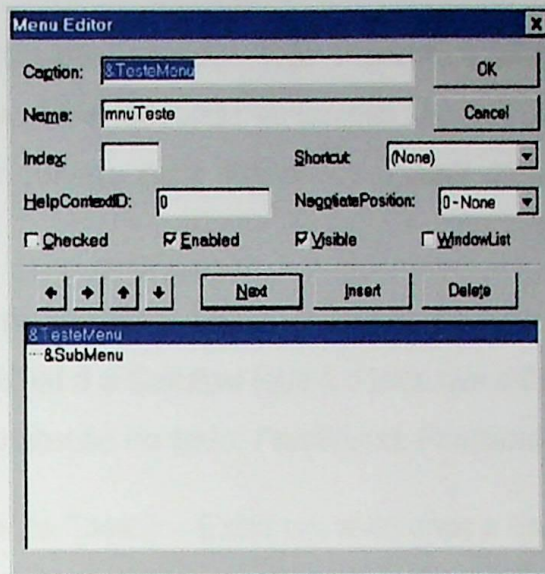


Figura A.11- Janela de Criação de Menu.

A.7 Conectando Formulários

A adição de novos formulários na sua aplicação é feito através da opção File na barra de menu , comando New Form ou clicando no Botão **Form**.


Comandos para controle do form :

Load form - Carrega o form mas o deixa invisível.

Form.Show [modo] - Mostra o form se ele estiver invisível, se ele não estiver carrega então ele primeiro carrega o form e depois o mostra , estilo refere-se a se o form que fez a carga do próximo form , fica parado até a desativação do novo form (modo =0 ou modeless) ou se continua a sua execução sem se importar com o próximo form (modo=1 ou modal).

Unload form - O form é descarregado da memória e a sua execução é encerrada.

A.8 Controles, Métodos, Eventos e Propriedades

 **CommandButton** (Botão de Comando) – É um dos **Controles** mais utilizados em programas do **Windows**, não apenas em **VB**. Sua função principal é executar comandos quando clicado. O **Evento Click** é o mais importante para ele. As **Propriedades** **Caption**, **Name**, **Enabled** são importantes entre outras. A propriedade **Enabled** indica se o botão responderá ao **Evento Click** ou não.



PictureBox (Caixa de Imagem) - Este **Controle** é utilizado para exibir figuras nos **Formulários** e também responde ao **Evento Click**. A propriedade **Picture** é a que abre a caixa de diálogo para indicarmos o **path** do ícone ou da figura que queremos exibir.



Label (Etiqueta ou Rótulo) – Exibir um texto onde o usuário não possa alterar. Sua propriedade principal é a **Caption** (que é o texto que o **Controle** exibirá). Outras **Propriedades** de formatação do texto: **FontName, FontBold, Alignment, etc.**



TextBox (Caixa de Texto) – Exibir um texto onde o usuário possa editar. Sua propriedade principal é o **Text** (que é o texto que o **Controle** contém). As **Propriedades** de formatação do texto são idênticas ao **Label**.



CheckBox (Caixa de Verificação) – Útil quando necessitamos informar ao sistema que determinadas informações são verdadeiras ou falsas. Em um mesmo **Formulário** vários **CheckBoxs** podem assumir o valor verdadeiro ao mesmo tempo. Algumas **Propriedades**: **Visible, Enabled e Caption**.



OptionButton (Botão de Opção ou botão de rádio) – Com este **Controle** somente uma das opções pode assumir o valor verdadeiro em um mesmo conjunto. Para Ter mais de um conjunto verdadeiro temos que utilizar o **Controle Frame**.



ListBox (Caixa de Listagem) – Exibir e selecionar uma lista de itens. As **Propriedades ListCount e ListIndex** são utilizadas para identificar os itens da lista. Os **Métodos AddItem e RemoveItem** são utilizados para adicionar e remover itens.



ComboBox (Caixa de Combinação) – Combinação de uma **TextBox** com uma **ListBox**. Pode-se editar um texto na parte superior ou selecionar um item da lista. **Propriedades** idênticas as da **ListBox**.



ScrollBar (**Barra de Rolagem**) Vertical e Horizontal - Estes controles assumem valores máximos ou mínimos de acordo com as **propriedades Max e Min**, respectivamente. Estes controles podem receber um deslocamento pequeno (**propriedade SmallChange**), que ocorre quando se clica nas setas e um deslocamento grande (**propriedade LangeChange**), que ocorre quando se clica na barra. O **controle** recebe o valor da posição atual.



Timer (Temporizador) – Útil para se controlar intervalos de tempo. **Evento** mais importante é o **Timer** e a propriedade mais importante é o **Interval** (que determina em milisegundos o intervalo de tempo d **controle**).



Shape (Formas Geométricas) – Adiciona figuras geométricas aos **Formulários**. Com a **Propriedade Shape** escolhemos o tipo de figura (forma). Outras **Propriedades** **BorderColor**, **BorderStyle** e **BackColor**.



Line (Linha) – Adicionar linhas geométricas a formulários. **Propriedades** **BorderColor**, **BorderWidth**, **BorderStyle**, **X1**, **X2**, **Y1** e **Y2**.



Image (Imagem) – Exibe ícones ou figuras e também responde ao **Evento Click**. Diferentemente do **Controle Picture** este controle tem a **Propriedade Stretch** que ajusta o tamanho da imagem para preencher a moldura.



Data Control – Conectar-se a um **Banco de Dados** para extrair e manipular informações deste **BD**. **Propriedades** mais importantes **DatabaseName** e **RecordSource**. Controles como **TextBox** podem ser vinculados a um **DataControl** através das **Propriedades DataField** e **DataSource**.

A.9 Eventos Comuns

O **Visual BASIC** apresenta alguns **Eventos** de objetos que são usados freqüentemente, e se apresentam na maior parte dos objetos de um form. Abaixo segue uma relação dos principais e suas respectivas funções:

- **Click**: É um **Evento** que executa determinadas ações especificadas pelo programador quando alguém clica sobre alguma coisa.
- **Dblclick**: Executa determinadas ações especificadas pelo programador quando alguém clica duas vezes sobre algum objeto.
- **Resize**: executa algum comando pré estabelecido quando o usuário redimensiona o form.
- **Load**: executa ordens sempre que o programa for carregado na memória.
- **Gotfocus**: quando um objeto, um botão por exemplo, apenas ganha o foco, sem executar as suas funções em outros **Eventos**.

- **Lostfocus**: quando o foco passa para um outro objeto. Quando um objeto perde o foco.
- **KeyPress**: quando é pressionada alguma tecla, geralmente em caixas de texto, são acionados determinados comandos.
- **Mousemove**: sempre que se move o ponteiro do mouse, algo será ativado. Um exemplo prático, são os protetores de tela, que são desativados quando mexemos o mouse.

A.10 Propriedades Gerais

As principais propriedades dos objetos do **Visual BASIC**, que estão presentes em praticamente todos os objetos do **Visual BASIC**, são as seguintes:

- **Caption** - Nos botões, form, e frames, altera o seu título a ser exibido no form.
- **Enabled** - Presente em todos os objetos, permite que os objetos sejam acessados, caso ela esteja definida como False.
- **Visible** - Torna o objeto invisível caso esta propriedade esteja configurada como False.
- **Font** - presente em objetos como textbox, label, botões command e botões check e option. Permite que seja alterada a fonte de um objeto. Que agora no VB5 configura tudo sobre fonte.
- **Name** - altera o nome do objeto, para fins de referência durante a programação.
- **Forecolor, Backcolor** - define a cor da fonte e do fundo de uma textbox e uma label, por exemplo.
- **Propriedades do form**: *Height* (altura do form), *Weight* (largura do form), *Maxbutton* (ativa ou desativa a presença do botão Maximizar), *Minbutton* (ativa ou desativa presença do botão Minimizar), *Left* (altera a distância do form a partir da extrema esquerda do vídeo) e *Top* (altera a distância do form a partir do topo do vídeo).

Em geral, todas as propriedades dos objetos presentes no **Visual BASIC** são bastante intuitivas, no que se refere aos seus nomes. Isto pode ser notado claramente nas propriedades **Visible**, **Enabled**, **Name**, entre outras.

Bem, já que sabendo o que são **Classes**, **Propriedades**, **Métodos**, **Eventos** e **Objetos**, vamos usá-los! Inicie o **VB**. Você certamente já notou que o **VB** cria uma janela automaticamente. Bem, esta janela é um objeto. Você pode ver suas

propriedades na janela "Properties" (se esta janela não estiver visível, use o menu View / Properties ou a tecla F4). Na verdade nem todas as propriedades estão listadas.

Note que a janela Properties tem, logo abaixo da barra de título, uma "caixa de seleção" dizendo "Form1 Form". Esta caixa lista todos os objetos colocados na janela ativa. O texto em negrito "Form1" indica o nome do objeto. O texto ao lado, "Form", indica a classe à qual pertence o objeto. Logo abaixo há a lista das propriedades. À esquerda ficam os nomes das propriedades e a direita os seus respectivos valores.

Verifica-se que no **VB** a janela é chamada de Form (a partir de agora uma janela que você criar será chamada de Form). Então, quer ver os **Eventos** que um Form possui? Dê-lhe um duplo clique. Abre-se uma janela de edição. Aliás, em janelas como estas que o seu programa será escrito. No topo desta janela há duas "caixas de seleção"; a primeira ("Object:") lista os objetos que estão na janela. A Segunda ("Proc:"), lista todos os **Eventos** do objeto. Dando um duplo clique no form, a janela de edição se abrirá. O **Evento** "Load" do Form estará selecionado. Já haverá 2 linhas incluídas: "Private Sub Form_Load()" e "End Sub". "Private" por default é coisa do VB4 em diante.

Aquela 1ª linha inicia um subprocedimento; a Segunda termina o mesmo subprocedimento. Qualquer coisa que colocada entre aquelas duas linhas será executado quando aquele form for carregado na memória (porque o **Evento** é o Load-Carrega).

A.11 O Código em Basic

As variáveis no Visual Basic são semelhantes as demais linguagens de programação. Definem texto, números reais e inteiros, matrizes e variáveis lógicas.

O nome da variável deve seguir as seguintes regras para evitar problemas de compilação ou mesmo confusão durante a montagem de um programa:

- a) Não pode haver repetição de nomes;
- b) Deve começar com uma letra;
- c) Não pode conter espaços, pontos, vírgulas e outros caracteres do tipo: !, \$, %.

d) Deve ter, no máximo, 255 caracteres.

A declaração de uma variável pode ser feita da seguinte maneira:

<Especificador> "nome da variável" [vetor] as <tipo da variável>

Especificador:

Dim – É o mais comum especificador de variável, define que a variável é pertencente a uma rotina ou formulário (janela), em relação ao 'C' é tratada como uma variável dinâmica para uso comum.

Redim – Redimensiona um vetor ou matriz de variáveis dinâmicas (Dim) para um novo tamanho podendo ou não manter os dados já inseridos nessa variável.

Private – Variável estática de uso interno ou privado, limitando seu acesso ao formulário ou módulo que pertence. Outros módulos podem possuir variáveis privadas com mesmo nome sem ocorre problemas entre essas variáveis.

Public – Variável de uso público, pode ser vista de outros módulos ou formulários para troca de informações. Esse especificador é mais usado em módulos de classe para definir propriedades dos mesmos.

Global – É também de uso público, mas todo o programa tem acesso a ela, diferentemente às variáveis públicas de módulos de classe que se transformam em propriedades da classe. É usado para variáveis de uso geral pelo programa.

A.12 Chamadas de Programas Executáveis

É uma forma mais fácil de conectar o Visual Basic com outros programas compilados em outras linguagens, mas também **não é**, de forma alguma, profissional ou veloz, além disso, são necessárias modificações na estrutura o programa em outra linguagem para um melhor funcionamento nesse uso.

A conexão desses programas deve ser feita através o prompt do Windows, como se fosse utilizar a forma MS-DOS, ou através de leitura de arquivos texto de entrada e saída de dados. Por isso existe o comprometimento da velocidade de execução do programa, visto que, a escrita do arquivo no HD a sua leitura para o programa compilado em outra linguagem, escrever o arquivo de saída e posterior leitura pelo Visual Basic, dependendo das dimensões do arquivo, necessita para

execução um grande tempo. Em DLLs as transferências de informação ocorrem pela memória, não necessitando de tempo físico do HD.

A.13 Leitura e Escrita em Arquivos

O Visual Basic possui três tipos de acesso a arquivo: randômico, seqüencial ou binário.

Acesso Randômico - Um arquivo aberto como *random access* é assumido como sendo composto de uma série de registros (records) de tamanho idêntico. Apesar de um registro corresponder a um único tipo de dados, podem existir tipos de dados definidos pelo usuário que podem ser usados para criar registros compostos de numerosos campos, onde cada um deles podem ter diferentes tipos de dados. O comprimento de cada registro necessita ser informado como parâmetro para o comando *Open* usado para abrir o arquivo para acesso randômico, ou então o Visual Basic assumirá o tamanho de 128 bytes. O comprimento é utilizado para calcular a posição do registro dentro do arquivo. Tudo que você precisa para acessar um registro em particular é especificar o número do registro.

Acesso Seqüencial - O acesso seqüencial é projetado para uso com arquivos texto. Cada caracter no arquivo representa um caracter do texto ou seqüência de formatação de texto, como por exemplo um salto de linha (*newline*). Arquivos seqüenciais permite que você use procedimentos especialmente projetados para escrita e leitura de linhas ou strings de texto. Isto facilita o trabalho com arquivos produzidos por um editor de texto, isto é arquivos com dados que não estão divididos em uma série de registros.

Acesso Binário - O acesso binário permite que você use arquivos para guardar dados no formato que você desejar, não são assumidos nenhuns tipos de formato de dados ou necessidades de informar o tamanho do registro. Você precisa saber com exatidão onde seus dados foram escritos para poder recupera-los corretamente. Apesar do acesso binário fornecer poucas funções e procedimentos para ajudar na manipulação de dados, ele providencia grande flexibilidade. Por exemplo ele pode conservar espaço em disco pela construção de registros de tamanho variável.

A.14 Uso do Controle de Acesso a Dados

Com o Data Control você pode criar aplicações que mostram , editam e atualizam informações a partir de diversos tipos de banco de dado. Primeiro você adiciona ao form o Data Control e especifica o banco de dados a utilizar. Após você adiciona os controles tais como text boxes ao form , seta as propriedades de ligação ao banco de dados , através dos quais será feito o acesso ao banco de dados. Quando você executar o programa , estes controles estarão ligados ao banco de dados e automaticamente irão mostrar os dados.

O Visual Basic faz acesso aos bancos de dados , através do mesmo mecanismo de acesso implementado no Microsoft Acess que se encontra embutido no Visual Basic.