

3.1 Introdução

3.2 Rede de Transmissão no Brasil

3.2.1 Sistema de Transmissão no Ceará – Rede Básica

3.3 Componentes de uma LT

3.3.1 Condutores

3.3.2 Isoladores

3.3.3 Estruturas

3.4 Projeto e Especificação de Linhas de Transmissão

3.5 Modelos de Linha de Transmissão

3.5.1 Linha de Transmissão como Quadripolo

3.5.2 Associação de Quadripolos

3.5.3 Linha de Transmissão de Parâmetros Concentrados

3.5.4 Circuito Pi Equivalente de Linhas de Transmissão

3.5.5 Circuito Pi Nominal de Linhas de Transmissão

3.5.6 Circuito de Linhas de Transmissão Curtas

3.5.7 Linhas Sem Perdas

3.5.8 Linha de Transmissão Eletricamente Curta

3.5.9 Limite de Estabilidade em Estado Permanente

3.5.10 Potência Natural ou SIL – *Surge Impedance Loading*

3.5.11 Compensação de Linhas de Transmissão

3.6 Considerações de Planejamento e Projeto de uma Linha de Transmissão

3.6.1 Impactos Devido À Ocupação do Solo

3.6.2 Impactos Devidos aos Efeitos Elétricos

3.6.3 Impacto Visual

3.1 Introdução

Linhas de Transmissão (LT) são condutores através dos quais energia elétrica é transportada de um ponto transmissor a um terminal receptor. As linhas de transmissão e distribuição de energia elétrica são exemplos típicos.

Os sistemas de transmissão proporcionam à sociedade um benefício reconhecido por todos: o transporte da energia elétrica entre os centros produtores e os centros consumidores.

Formas comuns de linhas de transmissão são:

- Linha aérea em corrente alternada ou em corrente contínua com condutores separados por um dielétrico.
- Linha subterrânea com cabo coaxial com um fio central condutor, isolado de um condutor externo coaxial de retorno.
- Trilha metálica, em uma placa de circuito impresso, separada por uma camada de dielétrico de uma folha metálica de aterramento, denominado microtrilha (*microstrip*).

As linhas de transmissão podem variar em comprimento, de centímetros a milhares de quilômetros. As linhas com centímetros de comprimento são usadas como parte integrante de circuitos de alta frequência, enquanto que as de milhares de quilômetros para o transporte de grandes blocos de energia elétrica.

As frequências envolvidas podem ser tão baixas quanto 50 Hz ou 60 Hz para linhas de transporte de grandes blocos de energia ou tão altas como dezenas de GHz para circuitos elétricos utilizados na recepção e amplificação de ondas de rádio.

Em frequências muito altas (VHF), o sistema de transmissão utilizado pode ser os guias de ondas. Estes podem estar na forma de tubos metálicos retangulares ou circulares, com a energia elétrica sendo transmitida como uma onda caminhando no interior do tubo. Guias de ondas são linhas de transmissão na forma de apenas um condutor.

A teoria básica de LTs pode ser aplicada a qualquer das modalidades de linhas mencionadas. Entretanto, cada tipo de linha possui propriedades diferentes que dependem de:

- Frequência,

- Nível de tensão,
- Quantidade de potência a ser transmitida,
- Modo de transmissão (aéreo ou subterrâneo),
- Distância entre os terminais transmissor e receptor, etc.

Os assuntos aqui tratados estão direcionados para linhas de transmissão de potência. O sistema de transmissão de energia elétrica compreende toda rede que interliga as usinas geradoras às subestações da rede de distribuição.

Eletricidade é em geral transmitida a longas distâncias através de linhas de transmissão aéreas. A transmissão subterrânea é usada somente em áreas densamente povoadas devido a seu alto custo de instalação e manutenção, e porque a alta potência reativa produz elevadas correntes de carga e dificuldades no gerenciamento da tensão.



Figura 3.1 Sistema de Transmissão de Energia Elétrica.

3.2 Rede de Transmissão no Brasil

O mapa das linhas de transmissão pertencentes ao Sistema Interligado Nacional – SIN é mostrado na Fig. 3.2. O sistema de transmissão da usina binacional de Itaipu é composto por cinco linhas de transmissão com extensão de 900 km, sendo três linhas em corrente alternada e 750 kV e duas em corrente contínua de ± 600 kV. Através das linhas em cc o Brasil importa do Paraguai a energia gerada em 50 Hz em Itaipu. Com as usinas do rio Madeira, Santo Antônio e Jirau, linhas de transmissão serão construídas para o Acre,

Rondônia e Mato Grosso em 230 kV, além de dois circuitos paralelos de 2.375 km de extensão em ± 600 kV que ligarão as regiões Norte (de Porto Velho) e Sudeste (a Araraquara – SP) do país. Linhas em 500 kV interligam a usina de Tucuruí situada no Pará ao sudeste do país.

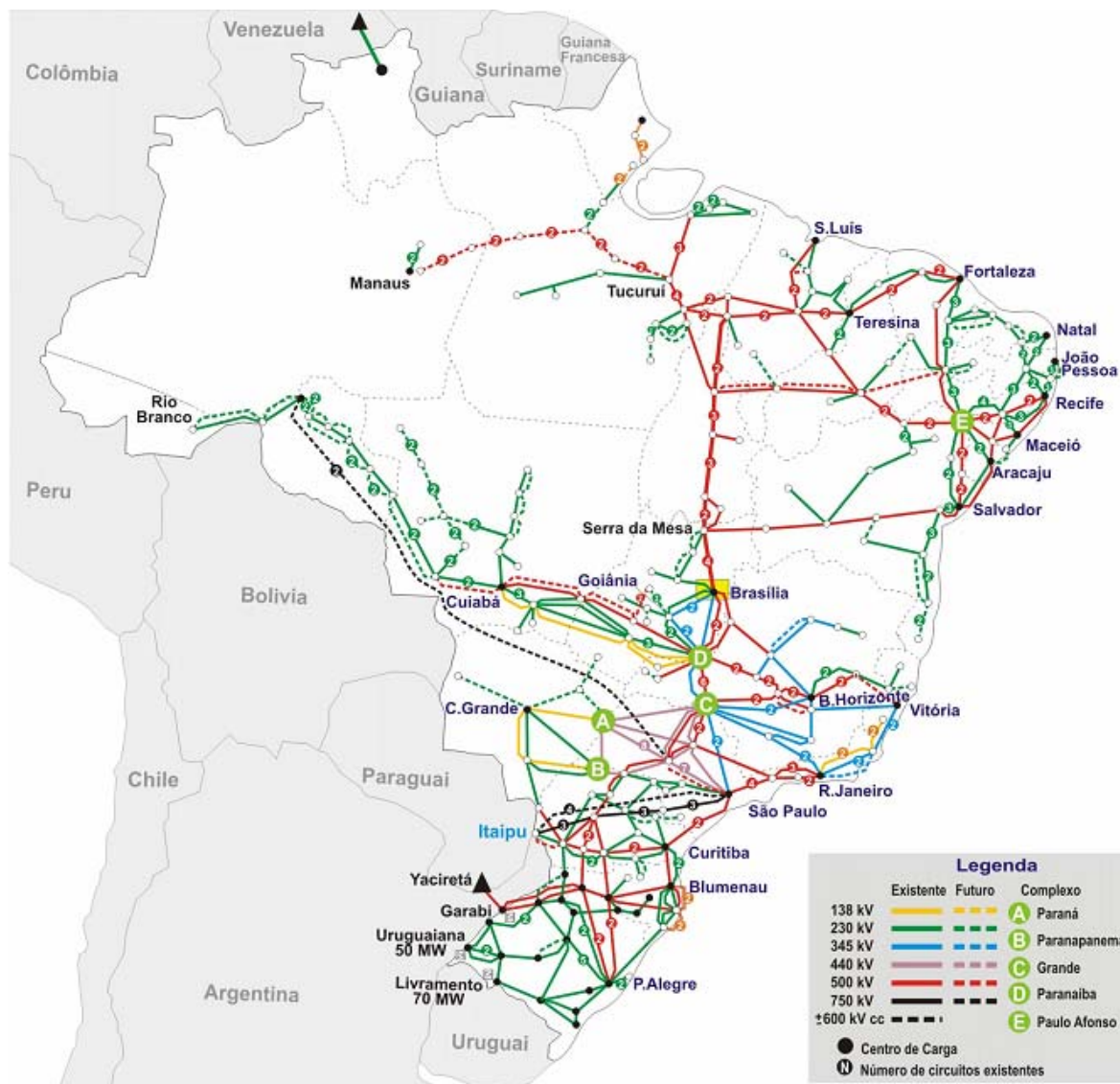


Figura 3.2 Sistema de Transmissão Brasileiro.

3.2.1 Sistema de Transmissão no Ceará – Rede Básica

O Estado do Ceará é suprido através de linhas de transmissão da rede básica em 500 kV e 230 kV, como ilustrado na Fig.3.3.

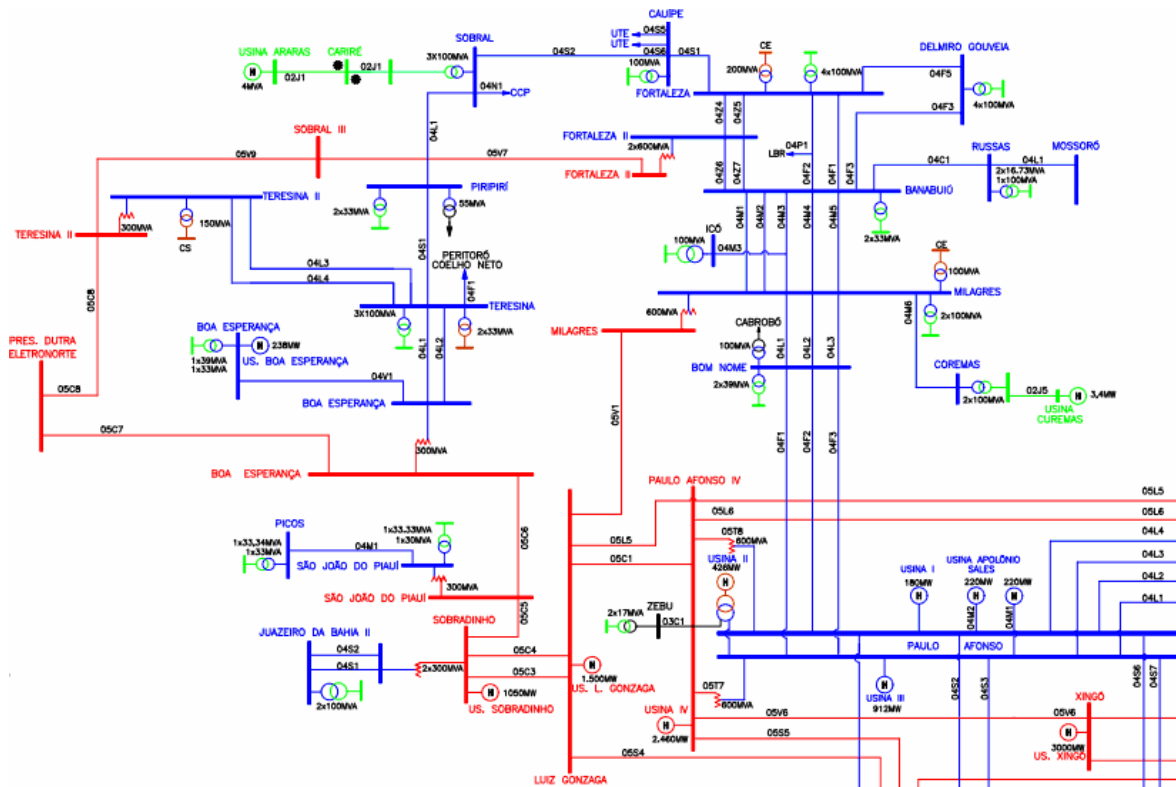


Figura 3.3 Sistema de Transmissão que alimentam o estado do Ceará.

- (i) Linha de transmissão de 500kV derivada da Usina Hidroelétrica de Luiz Gonzaga, passando pelas subestações de Milagres, Quixadá e Fortaleza II;
- (ii) Linha de transmissão de 500kV derivada da Subestação Presidente Dutra, passando pelas subestações de Teresina II circuitos I e II, Sobral III e Fortaleza II;
- (iii) Três linhas de transmissão de 230kV derivadas do complexo das Usinas de Paulo Afonso, passando pelas subestações de Bom Nome, Milagres, Icó (via derivação da linha de transmissão 04 M3 entre as subestações de Milagres e Banabuiú), Banabuiú, Russas (via anel fechado entre as subestações Banabuiú, Mossoró e Russas), Delmiro Gouveia e Fortaleza I;
- (iv) Duas linhas de transmissão de 230kV derivadas da Usina Hidroelétrica de Boa Esperança, passando pelas subestações Teresina I;
- (v) Linha de transmissão derivada da subestação de Teresina I, passando pelas subestações de Piriipiri, Sobral II e Cauipe;
- (vi) Três linhas de transmissão derivadas da subestação de Cauipe, sendo que uma linha é destinada para a subestação de Fortaleza I e duas para subestação de Fortaleza II.

Da subestação de Fortaleza II parte um circuito duplo em 230 kV para subestação de Fortaleza I.

Da subestação de Fortaleza I parte um circuito duplo em 230 kV, com 7 km de extensão, até a subestação Delmiro Gouveia. Atualmente, um desses circuitos está conectado à linha de transmissão 230 kV Banabuiú – Fortaleza, formando a linha de transmissão Banabuiú – Delmiro Gouveia.

3.3 Componentes de uma LT

Os componentes básicos de uma linha de transmissão aérea são: Condutores, Isoladores, Estrutura de Suporte, e Pára-raios.

3.3.1 Condutores

Características necessárias para condutores de LTs:

- Alta condutibilidade elétrica.

A resistência elétrica de um condutor depende:

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (3.1)$$

- Natureza e pureza do material condutor, que determina a sua resistividade ρ [$\Omega \cdot m$].
- Comprimento, o encordoamento aumenta em cerca de 1 a 2% o comprimento dos condutores com um aumento de resistência da mesma ordem.
- Seção transversal útil
- Temperatura
- Freqüência
- Baixo custo.
- Boa resistência mecânica.
- Baixo peso específico.
- Alta resistência à oxidação e corrosão.

Os materiais condutores mais empregados para as LTs são:

- Cobre – depois do ferro, o cobre é o metal de maior uso na indústria elétrica.
- Alumínio – possui propriedades mecânicas e elétricas que o tornam de fundamental importância em certas aplicações da engenharia

elétrica. As jazidas de bauxita (bauxita → alumina → alumínio) são maiores que as de cobre.

A) Cobre

A.1 Obtenção do Cobre:

- Fonte primária: minérios
- Pureza dos minérios de cobre: 3,5% a 0,5%
- Pureza do cobre para fins elétricos: 99,99%

A.2 Classes de Cobre:

- Cobre eletrolítico: classe de cobre mais puro (99,99%, $\rho=0,01639\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$).
- Cobre recozido: adotado como o cobre padrão nas transações comerciais ($\rho=0,01724\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$) e normalmente usado em escala industrial.
- Cobre semiduro.
- Cobre duro: usados em alimentadores (97,3% de condutibilidade)
- Cobre duro telefônico.

A.3 Características do Cobre

- Cor avermelhada, o que o distingue de outros metais que, com exceção do ouro, são geralmente cinzentos com diversas tonalidades.
- Depois da prata é o melhor condutor de corrente elétrica e calor.
- Muito dúctil e maleável.
 - A ductibilidade é a propriedade de um material de sofrer deformações permanentes numa determinada direção sem atingir a ruptura. Indica a maior ou menor possibilidade do material ser estirado ou reduzido a fios.
 - A maleabilidade é a capacidade do material de sofrer grandes deformações permanentes, em todas as direções, sem atingir a ruptura.
- Quando estirado a frio duplica sua resistência mecânica e dureza.
- Não é atacado pela água pura a qualquer temperatura.

- Resiste bem à ação da água, de fumaças, sulfatos, carbonatos, sendo atacado pelo oxigênio do ar e, em presença deste, ácidos, sais e amoníaco podem corroer o cobre.
- Os agentes atmosféricos (óxido de enxofre – SO₂) formam em sua superfície uma película verdosa, constituída por sulfato de cobre, formando uma camada protetora, o que reduz o processo de oxidação a 1μ/ano, aproximadamente, mas prejudica os contatos elétricos devido à alta resistividade.
- Quando aquecido em presença do ar, à temperatura acima de 120° C, forma uma película de óxido (camada escura).

A.4 Vantagens do Cobre

- Baixa resistividade (0,0172Ωmm²/m do Cu recozido).
- Características mecânicas favoráveis.
- Baixa oxidação – oxidação lenta perante elevada umidade em relação a diversos outros metais; oxidação rápida a temperatura acima de 120° C.
- Fácil deformação a frio e a quente.
- Alta resistência à corrosão.
- Permite fácil soldagem.

B) Alumínio

B.1 Obtenção do Alumínio

Fonte primária: minérios de bauxita que é transformada em alumina (óxido de alumínio) e então por um processo de redução obtém-se o alumínio.

B.2 Características do Alumínio

- Cor branca prateada
- Pequena resistência mecânica
- Grande ductibilidade e maleabilidade
- A soldagem não é fácil
- Grande afinidade pelo oxigênio do ar
- É atacado pelo ácido sulfúrico, ácido clorídrico, ácido nítrico diluído e por soluções salinas.

O alumínio é inferior ao cobre tanto elétrica quanto mecanicamente e estão separados eletroquimicamente por 2 V.

A Tabela 3.1 apresenta dados comparativos entre o cobre e alumínio para igual resistência ôhmica.

Tabela 3.1 Dados Comparativos entre Cobre e Alumínio

	Alumínio	Cobre
Relação entre áreas	1,64	1
Relação entre diâmetros	1,28	1
Relação entre pesos	0,50	1

C) Ligas Metálicas e Condutores Compostos

- Ligas de Cobre: *copperweld*
- Ligas de Alumínio: *allumoweld*.
- ACSR (*Aluminium Core Steel Reinforced*) ou CAA (Cabos de Alumínio-Aço)

Um aumento no diâmetro externo nos condutores compostos de aço-alumínio, comparado ao do condutor de cobre de mesma condutividade, é uma vantagem em linhas de transmissão uma vez que se tem reduzida a possibilidade de descarga corona devido ao decréscimo do campo elétrico na superfície do condutor ($V = \int E \cdot dr$).

A utilização quase que exclusiva de condutores de alumínio com alma de aço, no Brasil, vem sendo, de longa data, objeto de questionamentos. A motivação fundamental reside no fato de que as condições climáticas brasileiras são mais amenas do que as encontradas no hemisfério norte, já que neve e gelo não constituem problemas mensuráveis e que as velocidades máximas de vento nunca atingem os níveis de tufões ou ciclones.

Nesse sentido, é relevante que condutores mais leves, com maiores relações alumínio/aço, ou mesmo outros tipos de condutores, como por exemplo, o alumínio puro ou liga de alumínio, tenham a sua utilização avaliada, uma vez que resultariam em menores esforços estruturais e possíveis reduções do custo global das linhas de transmissão.

O espaçamento entre condutores de uma linha de transmissão aérea depende da tensão da linha e de seu comprimento. A indutância e capacitância dependem do espaçamento. O arranjo do espaçamento pode ser horizontal, vertical ou triangular. O espaçamento equivalente aproximado de linhas é dado na Tabela 3.2 para níveis de tensão praticados no Reino Unido.

Tabela 3.2 Espaçamento equivalente entre condutores.

Tensão linha-linha kV	Espaçamento equivalente m
11	1
33	1,3
66	2,6
110	5
132	6
166	8
230	10,2

A Figura 3.4 mostra a relação entre o espaçamento equivalente dos condutores versus a tensão de linha.

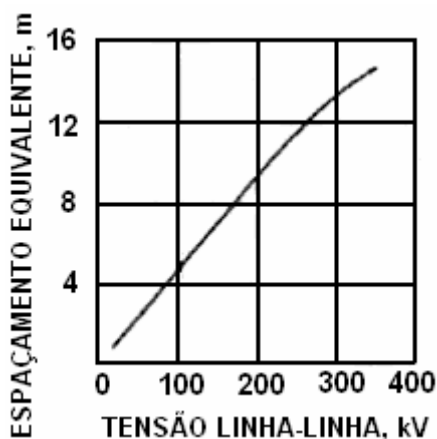


Fig.3.4 Espaçamento de condutores.

Para condutores acima de 230 kV, podem ser considerados feixes de condutores como alternativa a um único condutor por fase. Podem ser usados dois, três ou quatro sub-condutores pertencentes à mesma fase e a separação entre os sub-condutores pode ser ajustada de acordo com a reatância requerida e considerações de corona.

3.3.2 Isoladores

Com relação aos condutores, os isoladores têm a função de:

- Suspensão
- Ancoragem (fixar)
- Separação

Os isoladores são sujeitos a solicitações mecânicas e elétricas.

- Solicitações Mecânicas:

- Forças verticais pelo peso dos condutores
- Forças horizontais axiais para suspensão
- Forças horizontais transversais pela ação dos ventos



Figura 3.5 Cadeias de isoladores sujeitas a esforços verticais e horizontais.

– Solicitações Elétricas:

- Tensão nominal e sobretensão em frequência industrial
- Oscilações de tensão de manobra
- Transitórios de origem atmosférica

Os isoladores devem oferecer uma alta resistência para correntes de fuga de superfície e ser suficientemente espesso para prevenir ruptura sob as condições de tensão que devem suportar.

Para aumentar o caminho de fuga e, portanto a resistência de fuga, os isoladores são construídos com curvas e saias.

A) Configuração de isoladores:

- Isoladores de pino



Figura 3.6 Isolador de Pino em Porcelana.

- Isoladores de disco - usados para tensões acima de 70 kV. O número de isoladores depende da tensão: 110kV (4 a 7 discos), 230 kV (13 a 16 discos). Tensões acima de 500 kV usam feixes de isoladores.



Figura 3.7 Isolador de Disco em Porcelana e Vidro.

- Isoladores de suspensão



Figura 3.8 Isoladores Poliméricos Tipo Suspensão.

- Isoladores tipo pilar de subestação e de linha (*station & line post insulators*)



Figura 3.9 Isoladores tipo Pilar de Subestação e de Linha.

B) Material:

- Porcelana vitrificada
- Vidro temperado
- Polímeros em borracha de:
 - EPDM (Etileno Propileno Dieno Monomérico)
 - Silicone

B.1 Porcelana vitrificada

Os materiais cerâmicos se caracterizam, em geral, pelo preço baixo, por um processo de fabricação relativamente simples, e por características elétricas ou dielétricas, térmicas e mecânicas vantajosas que podem apresentar quando o processo de fabricação é bem cuidado.

Composição da cerâmica:

- Argila } – responsáveis pelas características mecânicas.
- Caolim }
- Quartzo – componente que influi termicamente; quanto maior sua porcentagem, maior é a temperatura suportada pela porcelana.
- Feldspato – componente que define o comportamento isolante como rigidez dielétrica, fator de perdas, etc.

O recobrimento com verniz, cuja base é a mesma da porcelana, se destina a vitrificar a superfície externa da porcelana que, embora não porosa, apresenta certa rugosidade que pode ser prejudicial durante o uso da porcelana em corpos isolantes, sujeitos à deposição de umidade, poeira, etc. O verniz ao recobrir o corpo da porcelana torna-o liso e brilhante, com o que se eleva a resistência superficial de isoladores ao ar livre.

B.2 Vidro

O vidro é basicamente composto de óxido de silício e óxido de boro, nas formas SiO_2 e B_2O_3 ; acrescenta-se a esses dois uma grande série de aditivos, tais como os óxidos alcalinos K_2O e Na_2O , que influem, sobretudo no valor da temperatura de fusão do material.

Os diversos componentes do vidro variam as características do vidro em função da composição. Também tratamentos térmicos posteriores (têmpera) influem acentuadamente em particular no que se refere a suas características mecânicas. A têmpera do vidro adquire importância particular na área dos isoladores, tipo disco e pedestal, devido à presença de esforços mecânicos acentuados. Pela têmpera, a camada externa do vidro sofre uma contração acentuada, o que faz predominarem na “casca” externa, os esforços de compressão.

B.3 Polímeros

Características dos Polímeros:

- Excelente hidrofobicidade.
- Excelente resistência ao trilhamento elétrico (*tracking*).
- Excelente desempenho sob poluição – o perfil e a maior distância de escoamento do isolador permitem reduzir a corrente de fuga e, portanto as perdas de energia.

- Resistente ao efeito de erosão mesmo quando o isolador estiver submetido a uma forte poluição.
- Impenetrabilidade – podem ser lavados sob alta pressão.
- Resistência ao envelhecimento devido aos raios ultravioleta, temperatura, poluição, ozônio, com alta durabilidade.
- Resistente ao arco elétrico.
- A maleabilidade das aletas de borracha, associada à elevada resistência do núcleo central e a silhueta delgada garante incomparável desempenho destes isoladores em regiões de vandalismo.
- Instalação rápida, simples e de menor custo.
- Pesa até 13 vezes menos que uma cadeia de isoladores convencionais.

Comparação entre isoladores de Vidro, Porcelana e Polimérico:

Tabela 3.2 Cadeia de Isoladores

Tensão da Linha (kV)	Número de Isoladores Convencionais por Cadeia	Peso da cadeia (kgf)		Peso médio do isolador polimérico (kgf)
		Vidro	Porcelana	
69	5	18,5	33,5	3,0
138	9	33	60	4,7
230	16	61	107	9,8
500	24	91	160	17,5

Tabela 3.3 Isoladores *Line Post*

Tensão da Linha (kV)	Peso do Isolador Porcelana	Peso do Isolador Polimérico
69	45	15
138	76	24

3.3.3 Estruturas

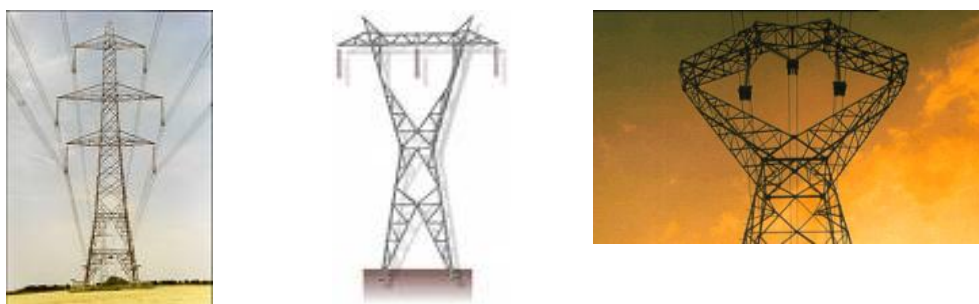


Figura 3.10 Torres de Transmissão de Energia.

As dimensões e formas de estruturas de LTs dependem:

- Disposição dos condutores: triangular, horizontal, vertical.
- Distância entre condutores.
- Dimensões e forma de isolamento.
- Número de circuitos.
- Materiais estruturais:
 - Estruturas metálicas de aço revestido com zinco (aço galvanizado) – proteção que atende à maioria das condições de agressividade atmosférica. O revestimento é obtido através de imersão em banho de zinco e as suas principais características – espessura, uniformidade, e aderência – dependem da preparação superficial, temperatura e composição do banho, tempo de imersão, velocidade de remoção da peça e composição do aço.
 - Concreto armado
 - Madeira
 - Fibras de vidro

As torres de transmissão são solidamente aterradas.

3.3.4 Condutores Neutros

Localizados no topo da torre da linha, são usados como escudos (proteção) da linha, interceptando as descargas atmosféricas que do contrário incidiriam diretamente sobre a linha.

Podem ser:

- Solidamente aterrados – forma mais comum.
- Isolados através de isoladores de baixa capacidade de ruptura.

Material dos condutores de blindagem:

- Aço
- Liga de alumínio

A utilização de fibra ótica em cabos pára-raios (OPGW – *Optical Ground Wire*) quer seja incorporada ao núcleo do cabo, ou espiralada externamente, constitui numa modalidade de co-utilização do sistema de transmissão e comunicação nos serviços de telefonia e transmissão de dados.

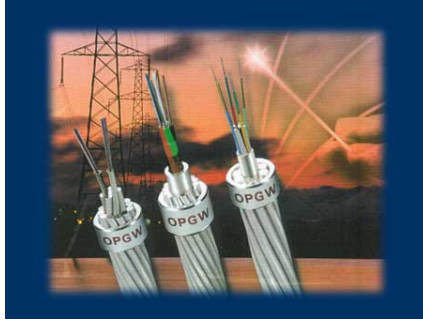


Figura 3.11 Cabos Pára-Raios com Fibra Óptica para Transmissão de Sinais de Comunicação.

A grande vantagem dessa associação reside na alta confiabilidade na transmissão e recepção via fibra óptica e na quantidade potencial de canais disponíveis.

3.4 Projeto e Especificação de Linhas de Transmissão

Os dados básicos usados no projeto de uma linha de transmissão são, normalmente, a potência a ser transmitida e a distância entre os pontos emissor e receptor. As principais especificações para uma linha aérea c.a. são: frequência, potência a ser transmitida em kW ou MW, fator de potência no terminal receptor, distância da linha em km, a queda de tensão permitida sob condição de plena carga em relação à tensão no receptor, as perdas possíveis na linha, as limitações de perda por corona por km e eficiência da linha; a variação de temperatura a qual a linha estará sujeita, a possível faixa de servidão, força do vento e carregamento de gelo, etc..

Após o projeto da linha de transmissão, os seguintes dados são usados para a construção da linha: bitola dos condutores, espaçamento de condutores, número de isolados por cadeia, bitola do condutor neutro, a localização do condutor neutro na torre, a tração permitida nos condutores, flexa para diferentes distâncias entre torres, resistência de aterramento, etc.

3.5 Modelos de Linha de Transmissão

As linhas de transmissão ac possuem resistência, indutância e capacitância uniformemente distribuídas ao longo da linha. A resistência consome energia, com perda de potência de $R I^2$. A indutância armazena energia no campo magnético devido à circulação de corrente. A capacitância armazena energia no campo elétrico devido a diferença de potencial.

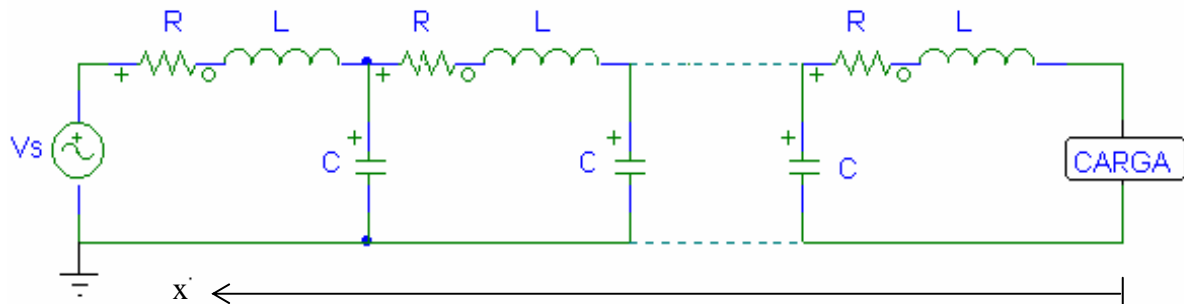


Figura 3.12 Circuito Equivalente Monofásico de Linha de Transmissão com Parâmetros Distribuídos.

As equações gerais das linhas de transmissão em corrente alternada, senoidal, operando em regime permanente e com parâmetros distribuídos são:

$$\begin{aligned} V(x) &= \cosh(\gamma x) \cdot V_r + Z_c \cdot \sinh(\gamma x) \cdot I_r \\ I(x) &= \frac{1}{Z_c} \cdot \sinh(\gamma x) \cdot V_r + \cosh(\gamma x) \cdot I_r \end{aligned} \quad (3.2)$$

em que

$V(x)$, $I(x)$ Tensão fase-neutro e corrente de linha em qualquer ponto da linha, medido a partir do terminal receptor.

V_r , I_r Tensão fase-neutro e corrente de linha no terminal receptor.

Z_c Impedância característica da linha, $Z_c = \sqrt{z/y}$ [Ω], em que z e y são a impedância série e admitância *shunt* da linha por unidade de comprimento.

γ Constante de propagação que define a amplitude e fase da onda ao longo da linha, $\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{zy}$ [m^{-1}], em que α é a constante de atenuação [Néper/m] e β constante de fase [rad/m].

A expressão matemática que define γ :

$$\gamma = \sqrt{z \cdot y} = \sqrt{(r + j\omega L)(g + j\omega C)} = \alpha + j\beta \quad [m^{-1}] \quad (3.3)$$

em que

$$\alpha = \text{Re}(\gamma) = \sqrt{\frac{1}{2} \left[(rg - \omega^2 LC) + \sqrt{(r^2 + \omega^2 L^2)(g^2 + \omega^2 C^2)} \right]} \quad [\text{Néper}^1/\text{m}] \quad (3.4)$$

¹ Néper (1550-1617), matemático inglês que estabeleceu o conceito de logaritmo.

$$\beta = \text{Im}(\gamma) = \sqrt{\frac{1}{2} \left[(\omega^2 LC - rg) + \sqrt{(r^2 + \omega^2 L^2)(g^2 + \omega^2 C^2)} \right]} \quad [\text{rad/m}] \quad (3.5)$$

Outra unidade de atenuação, comumente empregada em telecomunicações, é o decibel que é obtido em função das potências de transmissor e receptor ($\alpha = (1/L) 10 \log(P_s/P_r)$ [db/km], sendo L o comprimento da linha).

As ondas viajantes em uma LT são atenuadas com mudança de ângulo à medida que se propagam ao longo da linha. A causa primária são as perdas na energia da onda devido à resistência, dispersão, dielétrico, e perda corona.

A solução das equações em $V(x)$ e $I(x)$ permite relacionar tensões e correntes em qualquer ponto da linha em função de seus valores terminais de tensão V_r e corrente I_r no terminal receptor.

3.5.1 Linha de Transmissão como Quadripolo

As equações gerais de uma LT com parâmetros distribuídos podem ser escritas na forma matricial como:

$$\begin{bmatrix} V(x) \\ I(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma x) & Z_c \sinh(\gamma x) \\ \frac{1}{Z_c} \sinh(\gamma x) & \cosh(\gamma x) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_r \\ I_r \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

A equação matricial representa o modelo de um quadripolo com duas portas (entrada/saída), quatro variáveis (V_t , I_t , V_r , I_r) e com as constantes do quadripolo dadas por:



Figura 3.13 Quadripolo Representativo de uma Linha de Transmissão.

$$\begin{aligned}
 A &= \cosh(\gamma x) \quad [\text{p.u.}] \\
 B &= Z_C \cdot \sinh(\gamma x) \quad [\Omega] \\
 C &= \frac{1}{Z_C} \cdot \sinh(\gamma x) = \frac{B}{Z_C^2} \quad [\text{S}] \\
 D &= A \quad [\text{p.u.}]
 \end{aligned}
 \tag{3.7}$$

Os parâmetros $ABCD$ são conhecidos como constantes genéricas do quadripolo equivalente de uma LT de parâmetros distribuídos. Se o circuito interior do quadripolo é constituído apenas por elementos passivos, o quadripolo diz-se passivo.

Dada às condições de simetria de uma LT, ou seja, seus terminais podem ser invertidos (entrada \rightarrow saída e saída \rightarrow entrada) sem alterar o comportamento do sistema a que pertence, tem-se que $A=D$. Assim, o quadripolo equivalente de uma LT é simétrico e satisfaz à condição:

$$AD - BC = 1 \tag{3.8}$$

A representação da linha como quadripolo é totalmente adequada para o cálculo de seu desempenho, do ponto de vista de seus terminais transmissor e receptor.

3.5.2 Associação de Quadripolos

Em geral é interessante ter um único quadripolo para dois ou mais elementos em cascata ou em paralelo, como por exemplo, uma linha entre dois transformadores localizados nos terminais transmissor e receptor da linha.

A Figura 3.14 apresenta a associação de três quadripolos em cascata cujo equivalente é dado como a seguir.

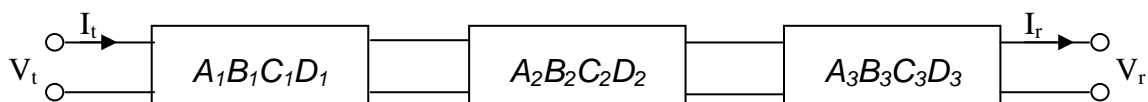


Figura 3.14 Associação em Cascata de Quadripolos.

Para o primeiro quadripolo tem-se que:

$$\begin{bmatrix} V_t \\ I_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{r1} \\ I_{r1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{t2} \\ I_{t2} \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

Note que as variáveis de saída do quadripolo 1 são iguais às variáveis de entrada do quadripolo 2, i.é.:

$$\begin{aligned} V_{r1} &= V_{t2} \\ I_{r1} &= I_{t2} \end{aligned} \quad (3.10)$$

Para o segundo quadripolo tem-se que:

$$\begin{bmatrix} V_{t2} \\ I_{t2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{r2} \\ I_{r2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{t3} \\ I_{t3} \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

Uma vez mais tendo que a saída do quadripolo 2 é igual à entrada do quadripolo 3.

$$\begin{aligned} I_{r2} &= I_{t3} \\ V_{r2} &= V_{t3} \end{aligned} \quad (3.12)$$

Para o terceiro quadripolo tem-se que:

$$\begin{bmatrix} V_{t3} \\ I_{t3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_3 & B_3 \\ C_3 & D_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_r \\ I_r \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Fazendo-se as devidas substituições de 3.13 em 3.11 e em 3.9, resulta:

$$\begin{bmatrix} V_t \\ I_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_3 & B_3 \\ C_3 & D_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_r \\ I_r \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

Tem-se então que as constantes genéricas resultantes da associação em cascata dos quadripolos da Figura 3.13 são dadas por:

$$A_R = [(A_1 A_2 A_3 + A_1 B_2 C_3) + (A_3 B_1 C_2 + B_1 C_3 D_2)]$$

$$\begin{aligned}
 B_R &= [(A_1 A_2 B_3 + B_1 B_3 C_2) + (A_1 B_2 D_3 + B_1 D_2 D_3)] \\
 C_R &= [(A_2 A_3 C_1 + A_3 C_2 D_1) + (B_2 C_1 C_3 + C_3 D_1 D_2)] \\
 D_R &= [(A_2 B_3 C_1 + B_3 C_2 D_1) + (B_2 C_1 D_3 + D_1 D_2 D_3)]
 \end{aligned}
 \tag{3.15}$$

Em uma associação de dois quadripolos em cascata, as constantes genéricas resultantes são definidas por:

$$\begin{aligned}
 A_R &= A_1 A_2 + B_1 C_2 \\
 B_R &= A_1 B_2 + B_1 D_2 \\
 C_R &= A_2 C_1 + C_2 D_1 \\
 D_R &= B_2 C_1 + D_1 D_2
 \end{aligned}
 \tag{3.16}$$

Em caso de dois quadripolos em paralelo a representação gráfica é mostrada na Fig.3.15 e as constantes genéricas do quadripolo equivalente são:

$$A_R = \frac{A_1 B_2 + A_2 B_1}{B_1 + B_2} \quad B_R = \frac{B_1 B_2}{B_1 + B_2} \quad D_R = \frac{B_2 D_1 + B_1 D_2}{B_1 + B_2}
 \tag{3.17}$$

C_R pode ser obtido a partir de $(A_R D_R - B_R C_R) = 1$.

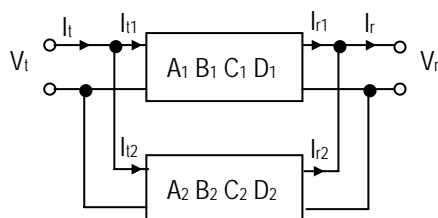


Figura 3.15 Associação de Quadripolos em Paralelo.

Exemplo 2.1

Dois circuitos de transmissão são definidos pelas seguintes constantes genéricas $ABCD$.

$A_1 = 1 \text{ pu}$	$A_2 = 0,9 \angle 2^\circ \text{ pu}$
$B_1 = 50 \ \Omega$	$B_2 = 150 \angle 79^\circ \ \Omega$
$C_1 = 0 \text{ S}$	$C_2 = 9 \times 10^{-4} \angle 91^\circ \text{ S}$
$D_1 = 1 \text{ pu}$	$D_2 = 0,9 \angle 2^\circ \text{ pu}$

Determine as constantes do circuito resultante da associação em cascata.

As constantes genéricas resultantes podem ser obtidas por:

$$A_R = A_1 A_2 + B_1 C_2 = 1 \times (0,9 \angle 2^\circ) + 50 \times (9 \times 10^{-4} \angle 91^\circ) = 0,9 \angle 4,86^\circ \text{ pu}$$

$$B_R = A_1 B_2 + B_1 D_2 = 1 \times (150 \angle 79^\circ) + 50 \times (0,9 \angle 2^\circ) = 166,2 \angle 63,7^\circ \Omega$$

$$C_R = A_2 C_1 + C_2 D_1 = (0,9 \angle 2^\circ) \times 0 + (9 \times 10^{-4} \angle 91^\circ) \times 1 = 9 \times 10^{-4} \angle 91^\circ \text{ S}$$

$$D_R = B_2 C_1 + D_1 D_2 = (150 \angle 79^\circ) \times 0 + (1) \times (0,9 \angle 2^\circ) = 0,9 \angle 2^\circ \text{ pu}$$

3.5.3 Linha de Transmissão de Parâmetros Concentrados

Seja uma linha de transmissão representada por parâmetros concentrados segundo o modelo Pi como mostra a Figura 3.16.

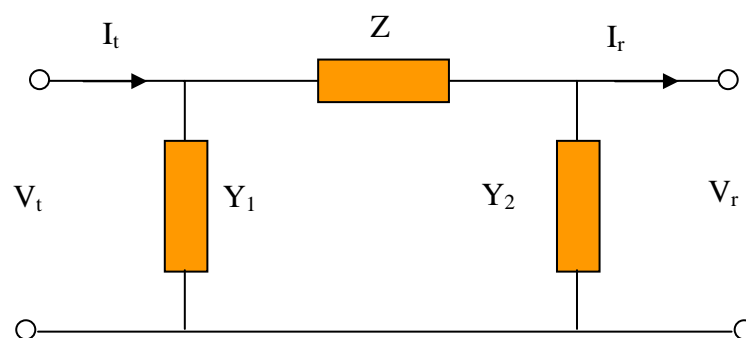


Figura 3.16 Circuito Pi de uma Linha de Transmissão.

Aplicando-se ao circuito Pi da Figura 3.15 a Lei de Kirchhoff para as tensões e correntes tem-se:

$$\begin{aligned} V_t &= V_r + Z(I_r + Y_2 V_r) \\ &= (1 + ZY_2)V_r + ZI_r \end{aligned} \quad (3.18)$$

$$\begin{aligned} I_t &= Y_1 V_t + (Y_2 V_r + I_r) \\ &= Y_1 [V_r + Z(I_r + Y_2 V_r)] + Y_2 V_r + I_r \\ &= [Y_1(1 + ZY_2) + Y_2]V_r + (1 + ZY_1)I_r \end{aligned} \quad (3.19)$$

Assim, os parâmetros genéricos do circuito Pi são:

$$\begin{aligned} A &= 1 + ZY_2 \\ B &= Z \\ C &= Y_1(1 + ZY_2) + Y_2 \\ D &= 1 + ZY_1 \end{aligned} \quad (3.20)$$

Em sendo uma linha de transmissão simétrica, i.é. $Y_1=Y_2$ e igual à metade da admitância *shunt* total, a representação da linha como um circuito Π torna-se:

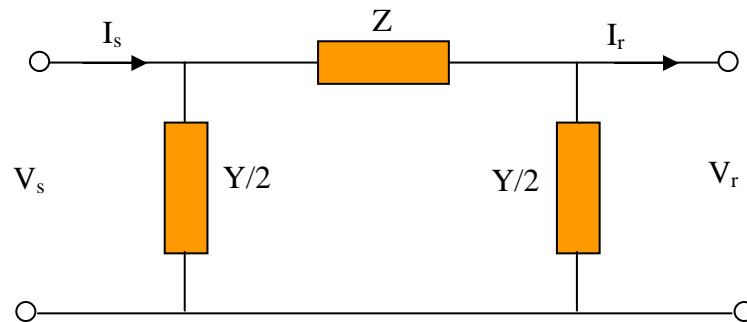


Figura 3.17 Circuito Pi de uma Linha de Transmissão.

e as Equações 3.18 e 3.19 tornam-se:

$$V_t = \left(1 + \frac{ZY}{2}\right) V_r + ZI_r \quad (3.21)$$

$$I_t = Y \left(1 + \frac{ZY}{4}\right) V_r + \left(1 + \frac{ZY}{2}\right) I_r \quad (3.22)$$

Em forma matricial:

$$\begin{bmatrix} V_t \\ I_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(1 + \frac{ZY}{2}\right) & Z \\ Y \left(1 + \frac{ZY}{4}\right) & \left(1 + \frac{ZY}{2}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_r \\ I_r \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

Assim, os parâmetros genéricos do circuito Pi são:

$$A = D = 1 + \frac{ZY}{2} \text{ [p.u.]}$$

$$B = Z \text{ } [\Omega] \quad (3.24)$$

$$C = Y \left(1 + \frac{ZY}{4}\right) \text{ [S]}$$

3.5.4 Circuito Pi Equivalente de Linhas de Transmissão

Da equivalência entre as constantes genéricas da linha de parâmetros distribuídos e aqueles da linha de parâmetros concentrados tem-se que:

$$\begin{aligned}
 1 + \frac{ZY}{2} &= \cosh(\gamma x) \\
 Z &= Z_C \cdot \sinh(\gamma x) \\
 Y \left(1 + \frac{ZY}{4} \right) &= \frac{1}{Z_C} \sinh(\gamma x)
 \end{aligned} \tag{3.25}$$

Explicitando Z e $Y/2$ resulta em valores de parâmetros concentrados obtidos a partir de parâmetros do modelo distribuído, com Z_C sendo a impedância característica da linha, γ a constante de propagação e l o comprimento da linha.

$$\begin{aligned}
 Z &= Z_C \cdot \sinh(\gamma l) \\
 \frac{Y}{2} &= \frac{1}{Z_C} \operatorname{tgh} \left(\frac{\gamma l}{2} \right)
 \end{aligned} \tag{3.26}$$

Os parâmetros concentrados do modelo Π quando definidos a partir dos parâmetros distribuídos da linha é denominado de *Pi Equivalente*. O modelo Pi Equivalente representa o modelo de parâmetros concentrados de uma linha longa ($l > 250$ km).

3.5.5 Circuito Pi Nominal de Linhas de Transmissão

Quando uma linha tem comprimento médio ($250 \text{ km} \leq l < 1000 \text{ km}$), os parâmetros da linha Z e Y podem ser obtidos simplesmente pelo produto da impedância z e admitância y por unidade de comprimento vezes o comprimento l da linha.

$$\begin{aligned}
 Z &= z \cdot l \\
 Y &= y \cdot l
 \end{aligned} \tag{3.27}$$

Neste caso o circuito Pi é denominado de *Pi Nominal*.

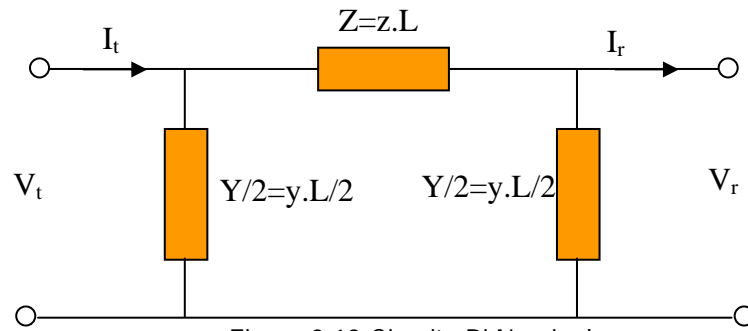


Figura 3.18 Circuito Pi Nominal.

3.5.6 Circuito de Linhas de Transmissão Curtas

Para linhas curtas ($l \leq 100$ km), a capacitância pode ser desprezada e a linha representada por somente uma impedância série $Z = z.l$ como mostrado na Figura 3.19.

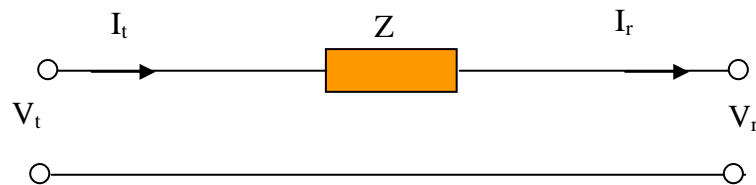


Figura 3.19 Circuito Equivalente de uma Linha de Transmissão Curta.

Neste caso tem-se que:

$$\begin{aligned} I_t &= I_r \\ V_t &= V_r + ZI_r \end{aligned} \quad (3.28)$$

Na forma matricial tem-se:

$$\begin{bmatrix} V_t \\ I_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & Z \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_r \\ I_r \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

e as constantes genéricas dadas por:

$$\begin{aligned} A &= D = 1 \\ B &= Z \\ C &= 0 \end{aligned} \quad (3.30)$$

Nas linhas de transmissão tem-se normalmente que a relação X/R é maior do que 5. Para valores maiores de relação X/R a resistência da impedância série pode ser desconsiderada.

Os circuitos de distribuição são, em geral, modelados como na Figura 3.18, desprezando-se a admitância shunt da linha. Nos circuitos de distribuição a relação X/R é pequena, o que pode levar à desconsideração de X em relação a R.

3.5.7 Linhas Sem Perdas

As linhas normalmente apresentam perdas, no entanto, são projetadas de modo a ter baixas perdas. Para efeito de simplificação, as perdas ativas das linhas serão desprezadas, $r=g=0$, a fim de permitir chamar a atenção sobre as características e ordem de grandeza de parâmetros das LTs de sistemas de potência.

Em uma linha sem perdas, a constante de atenuação resulta em:

$$\alpha = \text{Re}(\gamma) = \sqrt{\frac{1}{2} \left[(rg - \omega^2 LC) + \sqrt{(r^2 + \omega^2 L^2)(g^2 + \omega^2 C^2)} \right]} = 0$$

e a constante de propagação:

$$\gamma = 0 + j(\omega\sqrt{LC}) \quad (3.31)$$

significando que as amplitudes das ondas de tensão e corrente senoidais permanecem constantes ao longo da linha, i.é., sem amortecimento, e que o ângulo de fase muda de $\omega\sqrt{LC}$ rad para cada unidade de comprimento.

As equações gerais das linhas em estado permanente e sem perdas tornam-se:

$$\begin{aligned} V(x) &= \cos(\beta x) \cdot V_r + j\sqrt{\frac{L}{C}} \text{sen}(\beta x) \cdot I_r \\ I(x) &= j\frac{1}{\sqrt{L/C}} \text{sen}(\beta x) \cdot V_r + \cos(\beta x) \cdot I_r \end{aligned} \quad (3.32)$$

a partir da consideração de que:

$$\begin{aligned} \cosh(\alpha + j\beta l) &= \cosh(\alpha) \cdot \cos(\beta l) + j \text{senh}(\alpha) \cdot \text{sen}(\beta l) \\ \text{senh}(\alpha + j\beta l) &= \text{senh}(\alpha) \cdot \cos(\beta l) + j \cosh(\alpha) \cdot \text{sen}(\beta l) \end{aligned} \quad (3.33)$$

resultando para $\alpha=0$

$$\begin{aligned}\cosh(j\beta l) &= \cos(\beta l) \\ \sinh(j\beta l) &= j\text{sen}(\beta l)\end{aligned}\quad (3.34)$$

e

$$Z_c = \sqrt{\frac{r + j\omega L}{g + j\omega C}} = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad [\Omega] \quad (3.35)$$

Com base em (3.32), verifica-se que as constantes genéricas de uma linha sem perdas são dadas por:

$$\begin{aligned}A &= D = \cos(\beta x) \\ B &= j\sqrt{\frac{L}{C}}\text{sen}(\beta x) \\ C &= j\frac{1}{\sqrt{L/C}}\text{sen}(\beta x)\end{aligned}\quad (3.36)$$

O termo βx é denominado de comprimento elétrico da linha.

A Tabela 3.4 sumariza os parâmetros genéricos para os modelos usuais de LTs.

Tabela 3.4 Sumário dos Parâmetros Genéricos ABCD de uma LT.

Parâmetros	A=D	B	C
Unidade	Por Unidade	Ω	S
Linha Curta (<100 km)	1	$Z=z.l$	0
Linha Média: Circuito Π Nominal (100 a 250 km)	$1 + \frac{YZ}{2} = 1 + \frac{(y1)(z1)}{2}$	$Z=z.l$	$Y\left(1 + \frac{YZ}{4}\right) = y1\left(1 + \frac{(y1)(z1)}{4}\right)$
Linha Longa: Circuito Π Equivalente (>250 km)	$\cosh(\gamma l)$	$Z_c \sinh(\gamma l)$	$\frac{1}{Z_c} \sinh(\gamma l)$
Linha longa sem perdas $R=G=0$	$\cos(\beta l)$	$j\sqrt{\frac{L}{C}} \cdot \text{sen}(\beta l)$	$j\sqrt{\frac{C}{L}} \text{sen}(\beta l)$

Para uma linha trifásica equilibrada tem-se que a indutância série e a capacitância em derivação são expressas como:

$$L = \frac{\mu_0}{2\pi} L_n \left(\frac{D}{r} \right) \quad (3.37)$$

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0}{\text{Ln}\left(\frac{D}{r}\right)} \quad (3.38)$$

em que

L	Indutância da linha por unidade de comprimento [H/m]
C	Capacitância da linha por unidade de comprimento [F/m]
D	Distância entre os condutores [m]
r	Raio do condutor [m]
μ_0	Permeabilidade magnética do vácuo, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ [H/m]
ϵ_0	Permissividade do vácuo, $\epsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12}$ [F/m]

Considerando as expressões para L e C como apresentadas em (3.37) e (3.38), a constante de fase de uma linha sem perdas é dada por:

$$\begin{aligned} \beta &= \omega\sqrt{LC} \\ &= \omega\sqrt{\mu_0\xi_0} \\ &= 1,257 \times 10^{-12} \text{ rad} / \text{m} \equiv 72,02 \times 10^{-12} \text{ grau} / \text{m} \end{aligned} \quad (3.39)$$

com a permeabilidade magnética do vácuo igual a $\mu_0=4\pi \times 10^{-7}$ [H/m] e a permissividade do vácuo igual a $\epsilon_0=8,854 \times 10^{-12}$ [F/m].

O comprimento de onda λ de um sinal alternado é definido como a distância entre dois pontos consecutivos para os quais uma onda tem um mesmo ângulo de fase. Pode ainda ser definido como a distância ao longo da linha necessária para mudar a fase da onda em 2π rad ou 360° .

Quando as ondas de tensão e corrente completam um ciclo, a mudança de fase correspondente é de 2π rad, o que equivale a $x=\lambda$. Assim,

$$\beta x = 2\pi$$

Nestas condições, o comprimento da onda é

$$\lambda = \frac{2\pi}{\beta} = \frac{1}{f\sqrt{LC}} [m] \quad (3.40)$$

Substituindo as expressões para L e C em λ , e considerando uma frequência de 60 Hz, tem-se que:

$$\lambda = \frac{1}{f\sqrt{\mu_0\varepsilon_0}} = 5000 \text{ km} \quad (3.41)$$

A velocidade de propagação de uma onda eletromagnética em uma linha sem perdas é:

$$v = \lambda \cdot f = \frac{2\pi}{\beta} \cdot f = \frac{2\pi}{\omega\sqrt{LC}} \cdot f = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (3.42)$$

o que equivale a:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu_0\varepsilon_0}} = 3 \times 10^5 \text{ km/s} \quad (3.43)$$

Como visto acima, uma linha sem perdas que opera a 60 Hz seu comprimento de onda λ é igual a 5000 km.

Se o comprimento da linha equivale a meio comprimento de onda, i.é., $x=\lambda/2=2500$ km, a relação entre as tensões e correntes de transmissor e receptor é mostrada a seguir.

A tensão no terminal transmissor de uma linha com $x=\lambda/2$ e $\beta = 2\pi/\lambda$ resulta em:

$$\begin{aligned} V(\lambda/2) &= \cos(\pi) \cdot V_r \\ V_t &= -V_r \end{aligned} \quad (3.44)$$

A corrente no transmissor por sua vez é obtida a partir de:

$$\begin{aligned} I(x) &= \cos(\beta x) \cdot I_r + j \left(\frac{1}{\sqrt{L/C}} \right) \text{sen}(\beta x) \cdot V_r \\ I(\lambda/2) &= \cos(\pi) \cdot I_r \\ I_t &= -I_r \end{aligned} \quad (3.45)$$

Assim, as tensões e correntes nos terminais transmissor e receptor para uma linha de comprimento $x=\lambda/2$ são iguais, exceto que defasadas de 180° .

Os parâmetros elétricos de uma linha sem perdas em modelo Pi equivalente são definidos por:

$$Z = j \left(\sqrt{\frac{L}{C}} \right) \text{sen} \left(\frac{2\pi}{\lambda} x \right) \quad (3.46)$$

$$\frac{Y}{2} = j \left(\sqrt{\frac{C}{L}} \right) \text{tg} \left(\frac{\pi}{\lambda} x \right) \quad (3.47)$$

Nas linhas de transmissão para que a impedância série Z seja de natureza indutiva e a admitância *shunt* de natureza capacitiva é necessário que as funções seno e co-seno sejam positivas. Para tanto:

$$\beta x = \frac{2\pi}{\lambda} x \leq \pi$$

e

$$\frac{\beta \cdot x}{2} = \frac{\pi}{\lambda} x \leq \frac{\pi}{2}$$

o que resulta em

$$x \leq \frac{\lambda}{2} \quad (3.48)$$

Isto significa que para linhas cujo comprimento seja maior que metade do comprimento de onda, $x \geq \lambda/2$, a impedância série é capacitiva e a admitância *shunt* é indutiva.

3.5.8 Linha de Transmissão Eletricamente Curta

Uma linha é dita eletricamente curta quando a relação x/λ for suficientemente pequena tal que, sem perda de precisão, se possa considerar:

$$\operatorname{sen}\left(\frac{2\pi}{\lambda}x\right) \cong 2\pi \frac{x}{\lambda} \quad (3.49)$$

ou

$$\operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{\lambda}x\right) \cong \pi \frac{x}{\lambda} \quad (3.50)$$

Sob tais condições os parâmetros da linha sem perdas tornam-se:

$$Z \cong j\left(2\pi \cdot \sqrt{\frac{L}{C}}\right) \frac{x}{\lambda} \cong j\omega Lx \quad (3.51)$$

para $\lambda = \frac{1}{f\sqrt{LC}}$

e

$$\frac{Y}{2} \cong j \frac{\omega C}{2} x \quad (3.52)$$

Verifica-se que para as linhas eletricamente curtas a impedância série é simplesmente obtida multiplicando-se a indutância por unidade de comprimento vezes o comprimento total da linha. A admitância é obtida de forma análoga. Desta forma a linha é dita ser modelada com parâmetros concentrados e Z e $Y/2$ representam os parâmetros do modelo Pi Nominal.

Se a resistência longitudinal e a condutância *shunt* da linha são consideradas, tem-se que

$$Z = rx + j\omega Lx \quad (3.53)$$

$$\frac{Y}{2} = gx + j \frac{\omega C}{2} x \quad (3.54)$$

As considerações de linha eletricamente curta são válidas para valores de x como mostrado na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 Influência do Comprimento da Linha no Modelo de Representação.

l (km)	$\text{sen}\left(\frac{2\pi}{\lambda} x\right)$	$2\pi \frac{x}{\lambda}$	$\Delta\%$	$\text{tg}\left(\frac{\pi}{\lambda} x\right)$	$\pi \frac{x}{\lambda}$	$\Delta\%$
500	0,588	0,628	6,803	0,325	0,314	3,385
400	0,482	0,503	4,367	0,257	0,251	2,334
300	0,368	0,377	2,446	0,191	0,188	1,571
250	0,309	0,314	1,618	0,158	0,157	0,633
200	0,249	0,251	0,803	0,126	0,126	0
100	0,125	0,126	0,800	0,063	0,063	0
80	0,100	0,101	1,000	0,050	0,050	0
50	0,063	0,063	0	0,031	0,031	0

Da tabela apresentada conclui-se que:

1. A impedância e admitância de uma linha com comprimento inferior a 250 km poderão ser calculadas simplesmente como $Z=j\omega Lx$ e $Y/2=j\omega Cx/2$ para um erro inferior a 2%.
2. Para as linhas eletricamente curtas a admitância shunt é composta apenas de susceptância, a condutância é, portanto desconsiderada. A condutância de uma linha representa as perdas por corona e devido às correntes de fuga na superfície dos isoladores.
3. No modelo de uma linha curta a constante genérica C é nula ($C=0$). Como C é definido para uma linha sem perdas como:

$$C = \frac{1}{\sqrt{L/C}} \text{sen}(\beta x) \quad (3.55)$$

se x/λ é suficientemente pequena, então:

$$C = \frac{1}{\sqrt{L/C}} \beta x = \frac{2}{\sqrt{L/C}} \cdot \frac{\pi}{\lambda} \cdot x \quad (3.56)$$

Pela Tabela 3.5 nota-se que para $l=100$ km a relação $(\pi x/\lambda)$ é igual a 0,063, fazendo $C \approx 0$. Portanto, para linhas de comprimento igual ou inferior a 100 km o parâmetro susceptância shunt não é considerado e a linha é representada apenas por uma impedância série.

4. Linhas de comprimento menor ou igual a 100 km são consideradas curtas e linhas de comprimento menor ou igual a 250 km são consideradas de comprimento médio.

A validade para o modelo simplificado de uma linha de transmissão com a eliminação de alguns elementos do modelo Pi depende da magnitude relativa das potências ativas e reativas associadas com a linha, comparada à potência ativa P entregue à carga.

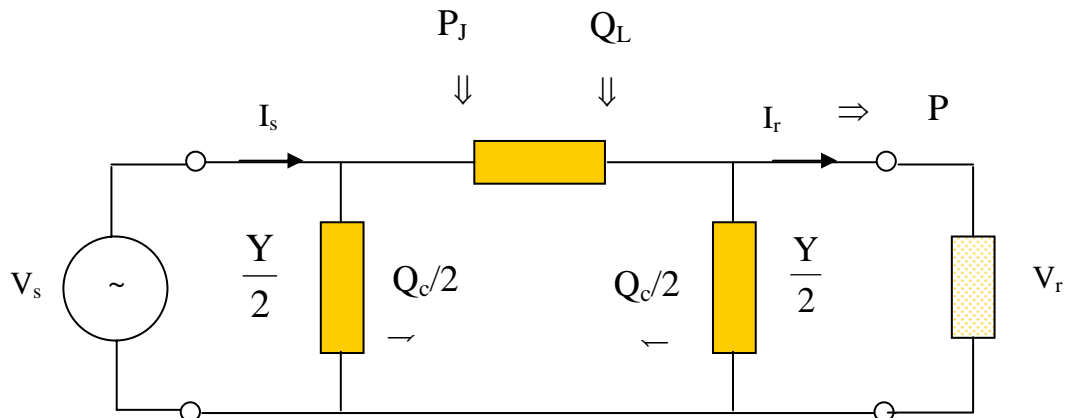


Figura 3.20 Potências Relacionadas a uma Linha de Transmissão.

- P Potência ativa absorvida pela carga
- P_J Potência ativa dissipada na linha, I^2R
- Q_L Potência reativa absorvida pela linha, I^2X_L
- Q_C Potência reativa gerada pela linha, V^2/X_C

Com exceção de P , todas as outras potências são proporcionais ao comprimento da linha. Se uma delas, P_J , Q_L , ou Q_C , for pequena em relação à potência ativa P , pode-se desprezar o elemento de circuito correspondente que a produz.

Linhas de baixa tensão são sempre curtas e porque a tensão é baixa V^2/X_C é sempre desprezado. Portanto, as linhas de baixa tensão podem ser representadas por um circuito sem os componentes em derivação. Se o condutor é curto em comprimento, como os circuitos residenciais, a resistência predomina e a porção indutiva pode ser desprezada.

Linhas de extra-alta tensão são sempre longas, e assim a potência reativa associada com a capacitância da linha e a indutância da linha tornam-se importantes. Além disso, porque a eficiência da linha é alta, segue-se que as perdas I^2R são pequenas. O circuito equivalente pode, portanto ser representado por um circuito sem a componente resistiva série.

Valores típicos de reatância indutiva e capacitiva por quilômetros para linhas trifásicas que operam a 60 Hz são apresentados na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 Impedâncias Típicas para Linha Trifásica, 60 Hz.

Tipo de Linha	x_L [Ω/km]	x_C [Ω/km]
Linha Aérea	0.5	300 000
Cabo Subterrâneo	0.1	3000

Exemplo 2.2

Dada uma linha de transmissão com os parâmetros como abaixo especificados:

$$r=0,065 \Omega/\text{km}$$

$$x_L=0,5 \Omega/\text{km}$$

$$x_C=300.000 \Omega/\text{km}$$

$$l=50 \text{ km}$$

$$V=230 \text{ kV}$$

$$P_{\text{carga}}=300\text{MW}, \text{FPD}=0,92 \text{ indutivo}$$

Determinar:

- Os parâmetros do modelo Pi Nominal.
- Potência reativa gerada pela LT.
- Potência reativa absorvida pela LT.
- Potência dissipada pela LT.
- Percentual de Q_C , Q_L e P_J em relação à potência da carga P .
- Quais as constantes genéricas da LT?

Solução

a) Parâmetros do modelo Pi Nominal

Impedância série:

$$\begin{aligned} Z &= (r + j\omega L) \cdot l \\ &= (0,065 + j0,5) \cdot 50 \\ &= 3,25 + j25 = 25,21 \angle 82,59^\circ [\Omega] \end{aligned}$$

Admitância shunt:

$$\begin{aligned} X_C &= -jx_C \cdot l \\ &= -j300 \times 10^3 \times 50 \\ &= -j15 \times 10^6 [\Omega] \end{aligned}$$

$$\frac{Y}{2} = j \frac{1}{2X_C} = j3,34 \times 10^{-8} [S]$$

b) Potência reativa gerada pela linha

No terminal receptor:

$$\begin{aligned} Q_{c,r} &= \frac{Y^*}{2} \cdot V_r^2 \\ &= 3,34 \times 10^{-8} \angle -90^\circ \times \left(\frac{230 \times 10^3}{\sqrt{3}} \right)^2 = -j588,95 [\text{var/fase}] \end{aligned}$$

No terminal transmissor:

$$Q_{c,t} = \frac{Y^*}{2} \cdot V_t^2$$

A tensão no terminal transmissor:

$$V_t = V_r + Z \left(I_r + V_r \cdot \frac{Y}{2} \right)$$

A corrente no terminal receptor que alimenta a carga:

$$\begin{aligned} I_r &= \frac{P}{\sqrt{3} \cdot V_L \times FPD} \angle -\cos^{-1}(FPD) \\ &= \frac{300 \times 10^6}{\sqrt{3} \cdot 230 \times 10^3 \cdot 0,92} \angle -\cos^{-1}(0,92) = 818,55 \angle -23,07^\circ [A] \end{aligned}$$

Assim, a tensão no transmissor:

$$\begin{aligned} V_t &= \frac{230 \times 10^3}{\sqrt{3}} \angle 0^\circ + (25,21 \angle 82,59^\circ) \cdot \left[818,55 \angle -23,07^\circ + \left(\frac{230 \times 10^3}{\sqrt{3}} \angle 0^\circ \right) \cdot 3,34 \times 10^{-8} \angle 90^\circ \right] \\ &= \frac{230 \times 10^3}{\sqrt{3}} \angle 0^\circ + (25,21 \angle 82,59^\circ) \cdot (818,55 \angle -23,07^\circ) \\ &= 132790,56 \angle 0^\circ + 20635,60 \angle 59,52^\circ \\ &= 144357,25 \angle 7,08^\circ [V] \end{aligned}$$

A tensão de linha no terminal transmissor:

$$V_t = 250,034 \angle 37,08^\circ [kV]$$

Note que enquanto a tensão no terminal da carga é de 230 kV, a tensão no transmissor é de 250 kV, 8,7% acima do nominal. Uma linha de 500 kV pode operar com variação de $\pm 10\%$ na tensão sem reatores shunt.

E a potência reativa monofásica no transmissor:

$$\begin{aligned} Q_{C,t} &= \frac{Y^*}{2} \cdot V_t^2 \\ &= 3,34 \times 10^{-8} \angle -90^\circ \cdot (144357,25)^2 \\ &= -j696,02 [\text{var}/\text{fase}] \end{aligned}$$

Portanto, a potência reativa monofásica total gerada pela LT:

$$Q_{C,\text{Total}} = Q_{C,t} + Q_{C,r} = -j(696,02 + 588,95) = -j1284,97 [\text{var}/\text{fase}]$$

c) Potência absorvida pela Rede

$$\begin{aligned} Q_L &= jX_L I^2 \\ &= j25 \cdot (818,55)^2 = j16750,60 [k \text{ var}/\text{fase}] \end{aligned}$$

d) Potência dissipada pela LT

$$\begin{aligned} P_j &= R \cdot I^2 \\ &= 3,25 \cdot (818,55)^2 = 2177,58 [kW] \end{aligned}$$

e) Percentual de Q_C , Q_L e P_j em relação à potência da carga P .

A potência trifásica da carga é de 300 MW, a potência reativa trifásica consumida pela linha 50,25 Mvar indutivo (16,67%), e a potência trifásica dissipada na linha 6,53 MW (2,18%). A potência reativa trifásica gerada pela linha é de 3854,91 var capacitivo, o que é desprezível em relação à potência da carga e como tal a admitância em derivação pode ser desconsiderada. A componente resistiva também pode não ser considerada no modelo de linha de parâmetros concentrados.

P	Q _L	Q _C	P _J
300 MW	50,25 Mvar	3,85 kvar	6,53 MW
Δ%	16,67%	0,001%	2,18%

f) As constantes genéricas da linha são:

$$A = 1 + \frac{ZY}{2} = 1 + \frac{(25,21 \angle 82,59^\circ) \cdot (6,68 \times 10^{-8} \angle 90^\circ)}{2} = 1 \angle 6,22 \times 10^{-6} [pu]$$

$$B = Z = 25,21 \angle 82,59^\circ = 3,25 + j25,0 [\Omega]$$

$$C = Y \left(1 + \frac{ZY}{4} \right) = (6,68 \times 10^{-8} \angle 90^\circ) \left(1 + \frac{(25,21 \angle 82,59^\circ) \cdot (6,68 \times 10^{-8} \angle 90^\circ)}{4} \right)$$

$$= 6,68 \times 10^{-8} \angle 90^\circ \cong 0$$

3.5.9 Limite de Estabilidade em Estado Permanente

A potência real entregue ao terminal receptor de uma linha é dada por:

$$S_r = V_r \cdot I_r^* = P_r + jQ_r \quad (3.57)$$

com a corrente I_r no modelo Pi, definida como:

$$I_r = \frac{V_t - V_r}{Z} - \frac{Y}{2} V_r$$

$$= \frac{|V_t| e^{j\delta} - |V_r|}{|Z| e^{jz}} - \frac{1}{2} |Y| |V_r| e^{jy} \quad (3.58)$$

$$= \frac{|V_t|}{|Z|} \angle (\delta - z) - \frac{|V_r|}{|Z|} \angle (-z) - \frac{1}{2} |Y| |V_r| \angle y$$

Ou, expressa em termos dos parâmetros genéricos do quadripolo:

$$I_r = \frac{V_t - AV_r}{B}$$

$$= \frac{|V_t| \angle \delta - |A| |V_r| \angle a}{|B| \angle b} \quad (3.59)$$

$$= \frac{|V_t|}{|B|} \angle (\delta - b) - \frac{|A| |V_r|}{|B|} \angle (a - b)$$

em que δ representa a diferença angular entre as tensões de transmissor e receptor, esta última tomada como referência angular, sendo denominado de *ângulo de potência*, e z , y , a e b os ângulos respectivos de Z , Y , A e B .

Assim

$$S_r = |V_r| \left(\frac{|V_t|}{|Z|} \angle(z - \delta) - \frac{|V_r|}{|Z|} \angle z - \frac{1}{2} |Y| |V_r| \angle -y \right) \quad (3.60)$$

Ou

$$S_r = |V_r| \left(\frac{|V_t|}{|B|} \angle(b - \delta) - \frac{|A| |V_r|}{|B|} \angle(b - a) \right) \quad (3.61)$$

As parcelas da potência ativa e reativa, baseadas em (3.60):

$$P_r = |V_r| \left(\frac{|V_t|}{|Z|} \cos(z - \delta) - \frac{|V_r|}{|Z|} \cos(z) - \frac{1}{2} |Y| |V_r| \cos(-y) \right) \quad (3.62)$$

$$Q_r = |V_r| \left(\frac{|V_t|}{|Z|} \text{sen}(z - \delta) - \frac{|V_r|}{|Z|} \text{sen}(z) - \frac{1}{2} |Y| |V_r| \text{sen}(-y) \right) \quad (3.63)$$

Ou baseadas em (3.61)

$$P_r = |V_r| \left(\frac{|V_t|}{|B|} \cos(b - \delta) - \frac{|A| |V_r|}{|B|} \cos(b - a) \right) \quad (3.64)$$

$$Q_r = |V_r| \left(\frac{|V_t|}{|B|} \text{sen}(b - \delta) - \frac{|A| |V_r|}{|B|} \text{sen}(b - a) \right) \quad (3.65)$$

A potência ativa entregue será máxima para $b = \delta$ (note que em sendo $B = Z$, os ângulos z e b são iguais), considerando que as tensões terminais se mantêm constantes bem como os parâmetros da linha.

$$P_r^{\max} = |V_r| \left(\frac{|V_t|}{|Z|} - \frac{|V_r|}{|Z|} \cos(z) - \frac{1}{2} |Y| |V_r| \cos(-y) \right) \quad (3.66)$$

$$Q_r^{\max} = -|V_r| \left(\frac{|V_r|}{|Z|} \text{sen}(z) + \frac{1}{2} |Y| |V_r| \text{sen}(-y) \right) \quad (3.67)$$

Ou

$$P_r^{\max} = |V_r| \left(\frac{|V_t|}{|B|} - \frac{|A||V_r|}{|B|} \cos(b-a) \right) \quad (3.68)$$

$$Q_r^{\max} = |V_r| \left(\frac{|A||V_r|}{|B|} \operatorname{sen}(a-b) \right) \quad (3.69)$$

Para uma linha sem perdas, tem-se que o ângulo z é 90° e assim:

$$\begin{aligned} P_r &= |V_r| \left(\frac{|V_t|}{|X|} \cos(90^\circ - \delta) - \frac{|V_r|}{|X|} \cos(90^\circ) - \frac{1}{2} \omega C l |V_r| \cos(-90^\circ) \right) \\ &= \frac{|V_t||V_r|}{X} \operatorname{sen} \delta \end{aligned} \quad (3.70)$$

$$\begin{aligned} Q_r &= |V_r| \left(\frac{|V_t|}{|X|} \operatorname{sen}(90^\circ - \delta) - \frac{|V_r|}{|X|} \operatorname{sen}(90^\circ) - \frac{1}{2} \omega C l |V_r| \operatorname{sen}(-90^\circ) \right) \\ &= \frac{|V_t||V_r|}{X} \cos \delta - \frac{|V_r|^2}{|X|} + \frac{\omega C l}{2} |V_r|^2 \end{aligned} \quad (3.71)$$

Ou

$$\begin{aligned} P_r &= |V_r| \left(\frac{|V_t|}{|B|} \cos(90^\circ - \delta) - \frac{|A||V_r|}{|B|} \cos(90^\circ - a) \right) \\ &= \frac{|V_t||V_r|}{|B|} \operatorname{sen} \delta - \frac{|A||V_r|^2}{|B|} \operatorname{sen}(a) \end{aligned} \quad (3.72)$$

$$\begin{aligned} Q_r &= |V_r| \left(\frac{|V_t|}{|B|} \operatorname{sen}(90^\circ - \delta) - \frac{|A||V_r|}{|B|} \operatorname{sen}(90^\circ - a) \right) \\ &= \frac{|V_t||V_r|}{|B|} \cos \delta - \frac{|A||V_r|^2}{|B|} \cos a \end{aligned} \quad (3.73)$$

Note que em sendo a linha sem perdas $P_t = -P_r$, ou seja,

$$P_t = -\frac{|V_t||V_r|}{X} \operatorname{sen} \delta \quad (3.74)$$

Ou

$$P_t = \frac{|A||V_r|^2}{|B|} \text{sen}(a) - \frac{|V_t||V_r|}{|B|} \text{sen}(\delta) \quad (3.75)$$

A máxima potência em uma linha sem perdas que pode ser entregue pela linha ocorre para $\delta=90^\circ$, i.é.,

$$P_r^{\max} = \frac{|V_s||V_r|}{X} \quad [\text{W}] \quad (3.76)$$

$$P_r^{\max} = \frac{|V_s||V_r|}{|B|} - \frac{|A||V_r|^2}{|B|} \text{sen}(a) \quad (3.77)$$

P_{\max} representa o limite teórico de estabilidade em estado permanente de uma linha sem perdas. Qualquer tentativa em aumentar δ acima de 90° para aumentar P_r , resulta em efeito contrário, ou seja, P_r diminui, contribuindo para aumento do desequilíbrio entre potência demandada pela carga e entregue à carga, tornando em uma condição de operação instável com atuação seguida da proteção.

3.5.10 Potência Natural ou SIL – *Surge Impedance Loading*

Em uma linha sem perdas a impedância característica Z_c é simplificada para:

$$Z_c = \sqrt{\frac{r + j\omega L}{g + j\omega C}} = \sqrt{\frac{L}{C}} = Z_0 \quad [\Omega] \quad (3.78)$$

tornando-se puramente resistiva. Neste caso, $Z_c=Z_0$ passa a ser denominada de *impedância de surto* ou *impedância natural* da linha.

As linhas de transmissão produzem potência reativa (Mvar) devido à sua capacitância. A potência reativa produzida depende da reatância capacitiva da linha (X_c) e da tensão (kV) a qual a linha é energizada.

Potência reativa também é armazenada nos campos magnéticos das linhas de transmissão. A intensidade dos campos magnéticos é dependente da magnitude da corrente que flui nas linhas e da reatância indutiva da linha (X_L).

A potência natural da linha (SIL) é simplesmente a potência real (com fator de potência unitário) na condição em que a potência M_{var} absorvida é igual à potência M_{var} produzida, ou seja,

$$I^2 X_L = \frac{V^2}{X_C} \quad (3.79)$$

Ou

$$X_L X_C = \frac{V^2}{I^2} \quad (3.80)$$

O que resulta em impedância igual a impedância de surto.

$$\frac{V}{I} = Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (3.81)$$

O significado teórico da impedância de surto é que se uma carga puramente resistiva e igual à impedância de surto da linha fosse conectada aos terminais de uma linha sem perdas, a potência entregue pela linha à carga seria somente útil, a qual é denominada de potência natural. Assim, a potência natural de uma linha é a potência entregue pela linha a uma carga cuja impedância é igual à sua impedância natural, $Z_0 = \sqrt{L/C}$ [Ω].

Considerando que a carga está submetida a uma tensão V_r e apresenta impedância $Z_0 = \sqrt{L/C}$, então:

$$I_r = \frac{V_r}{Z_0} \quad (3.82)$$

e a tensão $V(x)$ torna-se

$$\begin{aligned} V(x) &= \cos(\beta x) \cdot V_r + jZ_0 \operatorname{sen}(\beta x) \cdot \left(\frac{V_r}{Z_0} \right) \\ &= (\cos(\beta x) + j \operatorname{sen}(\beta x)) \cdot V_r \\ &= (e^{j\beta x}) \cdot V_r \end{aligned} \quad (3.83)$$

O coeficiente $e^{j\beta x}$ atua somente sobre o ângulo de fase de V_r , assim a magnitude de $V(x)$ permanece constante ao longo da linha.

$$|V(x)| = |V_r| \quad (3.84)$$

A transmissão à potência natural é dada, portanto sob um perfil horizontal de tensão, i.é., a magnitude de tensão é constante em qualquer ponto da linha.

A potência complexa que flui na linha é obtida de:

$$\begin{aligned}
 I(x) &= j\text{sen}(\beta x) \left(\frac{V_r}{Z_0} \right) + \cos(\beta x) \cdot \left(\frac{V_r}{Z_0} \right) \\
 &= (\cos(\beta x) + j\text{sen}(\beta x)) \cdot \left(\frac{V_r}{Z_0} \right) \\
 &= e^{j\beta x} \cdot \left(\frac{V_r}{Z_0} \right)
 \end{aligned} \tag{3.85}$$

A partir da expressão de $S(x)$, tem-se que:

$$\begin{aligned}
 S(x) &= P(x) + jQ(x) = V(x) \cdot I^*(x) \\
 &= e^{j\beta x} V_r \cdot e^{-j\beta x} \left(\frac{V_r}{Z_0} \right)^* \therefore \\
 SIL = P_0 &= \frac{|V_r|^2}{Z_0} [W]
 \end{aligned} \tag{3.86}$$

Assim, a potência reativa que flui em uma linha sem perdas operando à potência natural é nula e a potência real permanece constante entre os terminais transmissor e receptor. Neste regime toda a energia reactiva gerada pela linha é consumida pela própria linha.

A equação de P_0 expressa que a potência natural de uma linha de transmissão é diretamente proporcional ao quadrado da tensão no terminal receptor e inversamente proporcional à impedância característica da linha. Note que a potência natural independe do comprimento da linha, sendo, portanto característico da linha. Quanto maior a capacitância, ou menor a indutância, menor a impedância de surto Z_0 e maior a potência característica ou natural da linha.

Se a tensão de uma linha é duplicada, i.é., $2V_r$, tem-se que a potência natural da linha de tensão duplicada torna-se quatro vezes maior.

$$P_0 = \frac{V_r^2}{Z_0}$$

e

$$P_0' = \frac{(2V_r)^2}{Z_0} = 4P_0 \quad (3.87)$$

Uma outra medida para aumentar a potência natural seria diminuir Z_0 , diminuindo L e/ou aumentando C. Neste caso, significa compensar a linha.

Tabela 3.7 Valores Típicos de Impedância de Surto e Potência Natural para linhas aéreas trifásicas em 60 Hz.

V_{nominal} (kV)	$Z_c = \sqrt{L/C}$ (Ω)	$SIL = V_{\text{nom}}^2 / Z_c$ (MW)
69	366-400	12-13
138	366-405	47-52
230	365-395	134-145
345	280-366	325-425
500	233-294	850-1075
765	254-266	2200-2300

Uma linha quando carregada acima de sua SIL ela age como um reator em derivação – absorvendo reativo do sistema, e quando a linha é carregada abaixo de sua SIL ela age como um capacitor em derivação – suprimindo Mvar ao sistema.

A Fig.3.21 ilustra o conceito de SIL. A potência natural da linha considerada no gráfico é de 450 MW. Portanto, se a linha tem um carregamento de 450 MW, a potência Mvar produzida pela linha é exatamente igual à potência Mvar consumida pela linha. Acima da SIL a linha absorve Mvar, tendendo a baixar a tensão. Operar abaixo da SIL a linha produz Mvar, tendendo a elevar a tensão da linha.

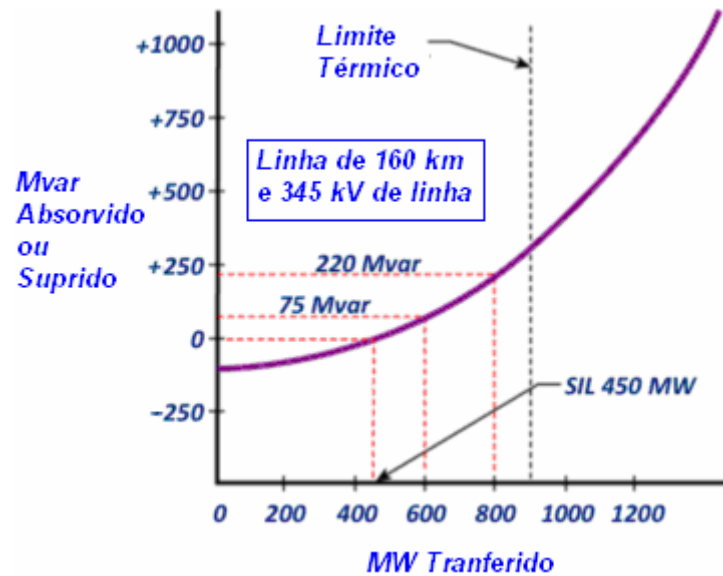


Fig.3.21 Potência Natural em um carregamento de uma linha de transmissão com 450 MW de potência natural.

A capacidade de transmissão de potência de uma linha está relacionada à sua potência natural.

Para uma linha sem perdas a potência entregue ao terminal receptor é definida como

$$P_r = \frac{|V_r||V_t|}{X} \text{sen}\delta = \frac{|V_r||V_t|}{Z_0 \text{sen}(\beta l)} \text{sen}\delta \quad (3.88)$$

Expressando $|V_t|$ e $|V_r|$ em por unidade da tensão nominal da linha, tem-se que:

$$P_r = \left(\frac{|V_t|}{|V_{NOM}|} \right) \left(\frac{|V_r|}{|V_{NOM}|} \right) \left(\frac{|V_{NOM}|^2}{Z_0} \right) \frac{\text{sen}\delta}{\text{sen}(\beta l)}$$

$$= \left[\frac{|V_t|_{pu} \cdot |V_r|_{pu} \cdot SIL}{\text{sen}\left(\frac{2\pi l}{\lambda}\right)} \right] \text{sen}\delta \quad [\text{W}] \quad (3.89)$$

A potência máxima, portanto depende da potência natural da linha como mostra (3.90):

$$P_{\max} = \frac{|V_t|_{pu} \cdot |V_r|_{pu}}{\text{sen}\left(\frac{2\pi l}{\lambda}\right)} \cdot \text{SIL} \quad [\text{W}] \quad (3.90)$$

Aumentar a potência natural de uma linha significa aumentar sua capacidade de transmissão.

Que comprimento de linha corresponde a um menor limite de estabilidade P_{\max} ? Quando $\text{sen}(2\pi l/\lambda)$ for igual a 1. Para tanto:

$$\frac{2\pi}{\lambda} l = 2\pi f \sqrt{\mu_0 \xi_0} \cdot l = \frac{\pi}{2} \quad \therefore l = \frac{1}{4} \cdot \lambda \quad (3.91)$$

Semelhantemente, o comprimento de linha que resulta em um máximo limite de estabilidade em estado permanente corresponde a

$$\frac{2\pi}{\lambda} l = 2\pi f \sqrt{\mu_0 \xi_0} \cdot l = \pi \quad \therefore l = \frac{1}{2} \cdot \lambda \quad (3.92)$$

Assim, P^{MAX} é mínimo para $l=\lambda/4$ ou $l=(3/4)\lambda$ e P^{max} é máximo para $l=\lambda/2$ ou $l=\lambda$.

Linhas cujo comprimento físico seja equivalente a um quarto do comprimento de onda podem ser compensadas de modo a tornarem-se eletricamente mais curtas e, como resultado, aumentar a capacidade de transporte.

Se em um projeto de uma linha compacta (condutores fases mais próximos que em linhas convencionais) é assumido que a distância entre as fases é a metade da distância de uma linha convencional, tem-se que a relação entre a potência natural para a linha convencional P_0 e linha compacta P_0' é dada por:

$$P_0 = \frac{V_r^2}{\sqrt{L/C}} = \frac{V_r^2}{\sqrt{\frac{D}{\mu_0 \epsilon_0 r}}} \quad (3.93)$$

$$P_0' = \frac{V_r^2}{\sqrt{\frac{D}{2\mu_0\epsilon_0 r}}} = \sqrt{2}P_0 = 1,414P_0 \quad (3.94)$$

O mesmo resultado será obtido para a consideração de uma linha de feixe expandido em que o raio equivalente é duplicado. Neste caso, tem-se também que $P_0' = 1,414P_0$. O que corresponde, para as duas condições consideradas, a um aumento de cerca de 40% na potência natural e, como resultado, um aumento de 40% na capacidade de transporte, ou limite de estabilidade da linha.

3.5.11 Compensação de Linhas

Para linhas com grandes comprimentos, acima de 400 km, é necessário o uso de equipamentos de compensação, tais como reactores em paralelo e capacitores em série, para aumentar a capacidade da linha.

Os reactores em paralelo (também chamados de reatores shunt) anulam parcialmente o efeito capacitativo da linha, minimizando o Efeito Ferranti, que ocorre quando a linha opera em carga leve.

3.6 Considerações de Planejamento e Projeto de uma Linha de Transmissão

O planejamento da transmissão de energia a grandes distâncias requer uma análise ampla de aspectos que consideram:

- Cenários de mercado.
- Cenários de geração.
- Quantidade de potência ativa a transmitir.
- Desenvolvimento tecnológico – novas tecnologias.
- Desenvolvimento industrial – tecnologias disponíveis para o uso.
- Engenharia – pessoal e máquinas necessários à implantação das alternativas selecionadas.
- Custo da linha.
- Meio ambiente – estética, interação com o meio ambiente, e facilidade para instalação/manutenção.

As linhas causam distúrbios no meio ambiente ao longo de suas rotas e nas áreas em que são implantadas.

Estudo de Impacto Ambiental – EIA e o respectivo Relatório de Impacto Ambiental – RIMA são necessários ao licenciamento de linhas de transmissão para avaliação do impacto sócio-ambiental do empreendimento. A seguir, os diversos impactos que podem ser causados pelas linhas de transmissão e pelas subestações.

3.6.1 Impactos Devido À Ocupação do Solo

A largura das faixas de segurança ou de servidão² das linhas é função das distâncias verticais e horizontais entre os condutores e entre estes e o solo, e também dos níveis permitidos de campo elétrico e magnético ao nível do solo. Usualmente, se estabelece restrições à ocupação do solo nestas faixas, o que pode envolver o remanejamento de seus ocupantes.

A exploração da faixa de servidão de uma linha é obtida mediante a declaração de utilidade pública de uma faixa de terra. A declaração, com finalidade de servidão administrativa, permitirá às empresas realizar a instalação da estrutura de transmissão mediante acordo de uso da terra com seus respectivos proprietários.

Durante a fase de construção, os impactos são devidos à:

- Abertura de estradas de acesso
- Implantação do canteiro de obras
- Desobstrução da faixa
- Escavações para as fundações
- Montagem das estruturas
- Lançamento dos cabos condutores

Essas atividades envolvem movimentação de terra, trânsito de máquinas e equipamentos e, dependendo do tipo de terreno, desmatamentos e desmonte de rochas. Caso não sejam adequadamente planejadas e monitoradas, podem provocar erosão dos solos e, temporariamente interrupção de tráfego, transtorno às populações vizinhas devido ao ruído e à poeira, destruição de *habitats* naturais, etc.

² *Faixa de servidão*: porção de área de largura variável, com ou sem vegetação, definida a partir das características da Linha de Transmissão, visando garantir a operação, inspeção e manutenção adequada da Linha de Transmissão.

As subestações por sua vez são pontos terminais transmissores e receptores de linhas de transmissão e de alimentadores. Os impactos causados por subestações, para onde chegam e de onde partem as linhas de transmissão, são semelhantes àqueles causados pelas LTs.

A área ocupada por uma subestação é função da tensão de transmissão, da potência, da quantidade de vãos para entrada/saída de linhas e da possível existência de instalações de transformação ou de controle de reativos.

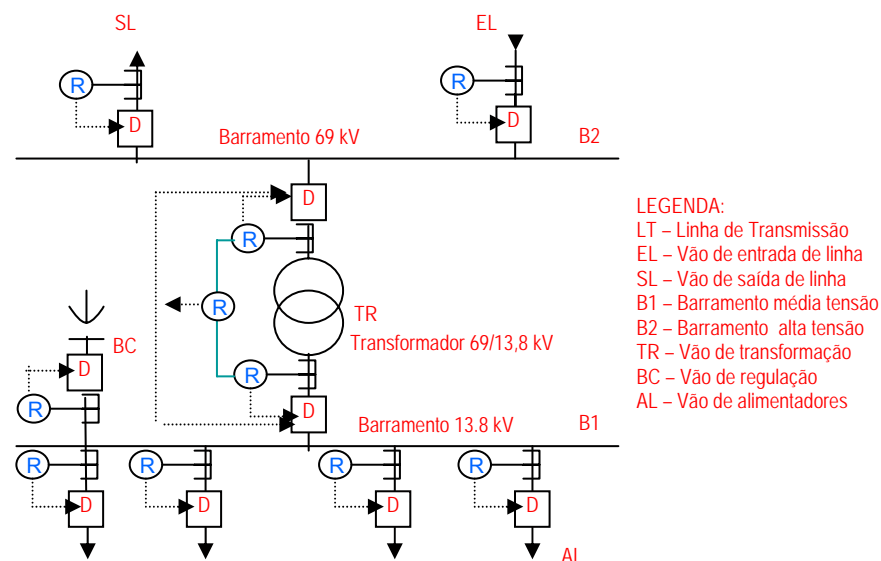


Figura 3.22 Diagrama Unifilar de Subestação.

3.6.2 Impactos Devidos aos Efeitos Elétricos

As perturbações elétricas causadas pelas linhas de transmissão podem ser divididas em três grandes grupos:

- Efeitos dos campos elétricos e magnéticos
- Efeito corona
- Transferência de potencial

a) Efeitos dos Campos Elétricos e Magnéticos

Um condutor elétrico conduzindo corrente criará um campo magnético com linhas concêntricas em torno de seu eixo. Quanto menos magnético for o meio, menor será o nível de indução magnética neste meio. A indução magnética obedece às seguintes condições:

$$B = \mu H = \frac{\Phi}{A} = \frac{\Phi}{\pi r^2} \quad (3.95)$$

em que

- B é a indução magnética
- H é a intensidade de campo magnético
- μ é a permeabilidade magnética do meio
- Φ é o fluxo magnético
- A é a área de circulação do campo magnético

Nota-se que a indução magnética decai com o quadrado da distância até o eixo por onde passa a corrente.

Os campos elétricos e magnéticos podem causar indução de corrente e tensão em objetos metálicos. Nos projetos de linhas e subestações normalmente são tomadas medidas de forma a não acarretar risco à segurança de pessoas que entrem em contato com esses objetos ou que estejam situadas próximas às instalações. A presença destes campos podem também produzir interações com os organismos vivos, através de tensões e correntes induzidas, que tem sido objeto de análise e investigação diante da possibilidade de virem a produzir efeitos adversos nos sistemas biológicos pela exposição de longo prazo.

Segundo o Cigré, a Organização Mundial de Saúde e a *International Radiation Protection Association* (IRPA), as pesquisas até então realizadas não permitem afirmar de forma conclusiva que os campos elétricos e magnéticos normalmente produzidos por instalações elétricas de alta tensão possam ser prejudiciais à saúde das pessoas. Segundo essas organizações, a evidência de que a exposição a campos elétricos e magnéticos de 50/60 Hz possa causar câncer não é convincente e qualquer associação neste sentido permanece questionável. Consideram, entretanto, que o assunto é importante e merece continuar a ser pesquisado.

De acordo com a recomendação do IRPA (uma das entidades mais cautelosas), pessoas podem ficar expostas, por período de tempo indeterminado (24 h/dia), a campos elétricos de até 5 kV/m ou a campos magnéticos de até 0,1mT (miliTesla, $1T=10^3$ Gauss) sem qualquer problema para a saúde.

As Tabelas 3.9 e 3.10 apresentam valores recomendados por diversas organizações internacionais quanto à densidade de corrente³ e seus equivalentes em termos de campo elétrico e magnético [A summary of Standards for Human Exposure to Electric and Magnetic Fields at

³ O limite de densidade de corrente induzida por um campo externo é da ordem de 1000mA/m², valor este que estimula os tecidos nervoso e muscular.

Power Frequencies – JWG 36.01/06]. As organizações arroladas nas Tabelas 3.9 e 3.10 são apresentadas abaixo:

Tabela 3.8 Organizações Internacionais de Pesquisa sobre Efeitos de Campos Elétricos e Magnéticos
Organizações Internacionais

IRPA	International Radiation Protection Association
CENELEC	Comité Européen de Normalisation Electrotechnique
NRPB	National Radiological Protection Board (UK)
BFE	Berufsgenossenschaft der Feinmechanik und Elektrotechnik (Alemanha)
ACGIH	American Conference of Governmental Industrial Hygienists (USA)
ICNIRP	International Commission on Non-Ionising Radiation Protection

O público alvo sujeito à exposição é dividido em duas classes: trabalhadores e público geral. Ao público geral, cada organização aplica um determinado fator de redução para os campos permissíveis, por considerar que esse público compreende indivíduos de todas as idades, susceptibilidades e saúde, e aqueles que estão inadvertidamente sob exposição de campos que pode ser de 24h ao dia por todo o tempo de vida.

Tabela 3.9 Comparação entre Valores Especificados de Campo Elétrico a 50/60 Hz.

	J mA/m ²	Equivalente kV/m	Curta duração kV/m	8 ou 24 h/d kV/m
IRPA				
Trabalhadores	10	25	30	10
Público geral	2	5	10	5
CENELEC				
Trabalhadores	10	30	30	10
Público geral	4	12		10
NRPB				
Todos	10	21		12
BFE Trabalhadores:				
Exposição área 1	10	66,7	30/30*	21,3
Exposição área 2	2	13,3		6,67
ACGIH				
Trabalhadores	10	25		25
ICNIRP				
Trabalhadores	10	25		10
Público geral	2	5		5

* 1h/2h por dia de trabalho

Tabela 3.10 Comparação entre Valores Especificados de Campo Magnético a 50/60 Hz.

	mA/m ²	Equivalente mT	Curta duração mT	8 ou 24 h/d mT
IRPA				
Trabalho	10	0,5	0,5	0,5
Público	2	0,1	0,1	0,1
CENELEC				
Trabalho	10	1,6		1,6
Público	4	0,64		0,64
NRPB				
Todos	10	1,6		1,6
BFE (Trabalho)				
Exposição área 1	10	4,24	4,24/2,55*	1,36
Exposição área 2	2	0,848		0,424
ACGIH				
Trabalho	10	0,71		1
ICNIRP				
Trabalho	10	0,5		0,5
Público	2	0,1		0,1

* 1h/2h por dia

Em Fortaleza, o projeto de linha de transmissão em 230 kV atravessando bairros densamente povoados causou à época acirrados embates políticos e judicial quanto ao efeito sobre a população. Simulações computacionais realizadas para a linha de 230 kV chegaram aos seguintes resultados:

- O máximo valor de campo elétrico calculado foi igual a 2,4 kV/m; a recomendação pelo IRPA é igual a 5kV/m.
- O máximo valor de campo magnético calculado foi igual a 0,013 mT; a recomendação pelo IRPA é igual a 0,1 mT.

b) Corona

Existe um gradiente elétrico crítico para o ar que quando excedido resulta em descarga elétrica. Qualquer tentativa de aumento do gradiente resulta em profusa ionização do ar. Tal fenômeno de disruptura é denominado de Corona. O gradiente crítico disruptivo do ar atmosférico E_C é da ordem de 30,5 kV/cm, em atmosfera padrão de 20°C e pressão barométrica de 760 mm de Hg. Em corrente alternada, o valor eficaz do gradiente disruptivo é igual a $E_C=21,6$ kV/cm.

As descargas corona se manifestam quando o campo existente na superfície dos condutores atinge valores suficientemente altos de forma a ionizar o meio isolante em sua volta.

A intensidade do campo elétrico crítico E_C para o qual se dá início a ionização para o ar seco é

$$E_C = 30\delta m \left[1 + \frac{0,3}{\sqrt{\delta r}} \right] \text{ kV/cm} \quad (3.96)$$

em que

$\delta = (3,92b)/T$	Densidade relativa do ar
b	Pressão atmosférica em cm Hg
T	Temperatura absoluta em graus Kelvin
m	Fator de encordoamento m=1, cilindro suave m=0,9 ACSR
r	Raio do condutor em cm

O uso de feixe de condutores por fase tende a produzir um maior raio efetivo por fase e, portanto reduz o nível de intensidade do campo elétrico nas vizinhanças do condutor. Para linhas acima de 230 kV as linhas são construídas em feixes de 2, 3, 4 ou vários condutores por fase.

O fenômeno corona constitui fonte de:

– *Interferência eletromagnética* na rádio-recepção nas faixas de frequências das transmissões em amplitude modulada (AM) (frequências de rádio de 0,2 a 4 MHz, centralizada em $f_0 = 0,8$ MHz - em rádio e televisão; na faixa AM, frequências acima de 50 kHz podem trazer problemas de rádio interferência). Precipitações e umidade aumentam a rádio interferência porque o ar se torna mais susceptível +a disruptura.

– *Ruído audível* (frequências de funcionamento abaixo de 20 kHz podem ocorrer perturbações audíveis). Poluição acústica causada pelo ruído característico provocado pelos eflúvios do corona. Eflúvios de corona também ocorrem em outros componentes das linhas, tais como ferragens e isoladores, porém a intensidade dos ruídos gerados é bastante inferior à dos gerados pelos condutores.

– *Geração de ozônio e óxido de nitrogênio*. Os critérios de projeto, em geral, estabelecem limites para a ocorrência destas descargas, evitando que altas concentrações destes gases afetem a biosfera.

– *Surgimento de cargas espaciais*. Em corrente contínua as descargas corona ocasionam o surgimento de *íons* e *aerosóis*. As

conseqüências da inalação pelos homens e animais destes íons e aerossóis não são ainda provadas cientificamente.

As perdas elétricas em decorrência do efeito corona foram definidas por Peterson para condições de tempo regular, linha monofásica como:

$$P = \frac{3,37 \times 10^{-5} f V^2 F}{\left[\log_{10} (2s/d) \right]^2} \text{ kW/fase/milha} \quad (3.97)$$

em que

- V Tensão eficaz fase-neutro em kV
- f Frequência em Hz
- F Fator corona determinado por teste
- s Espaçamento entre condutores
- d Diâmetro do condutor

A perda de potência é pequena. Para uma linha de 500 kV é de cerca de 1 a 2 kW por km. Entretanto, as perdas por corona aumentam drasticamente quando a linha encontra precipitações de qualquer forma, sendo a geada a pior situação. As perdas podem atingir valores de 30 kW/km, com uma média de 2,4 kW/km para uma linha convencional de 500 kV.

c) Transferência de Potencial

Os curtos circuitos entre fase e terra ocasionam elevações de potencial no entorno das torres de LTs e a possibilidade de transferência de potencial, ocasionando o risco de choques elétricos. Tais efeitos são evitados ou reduzidos mediante projetos adequados, conforme normas de uso corrente.

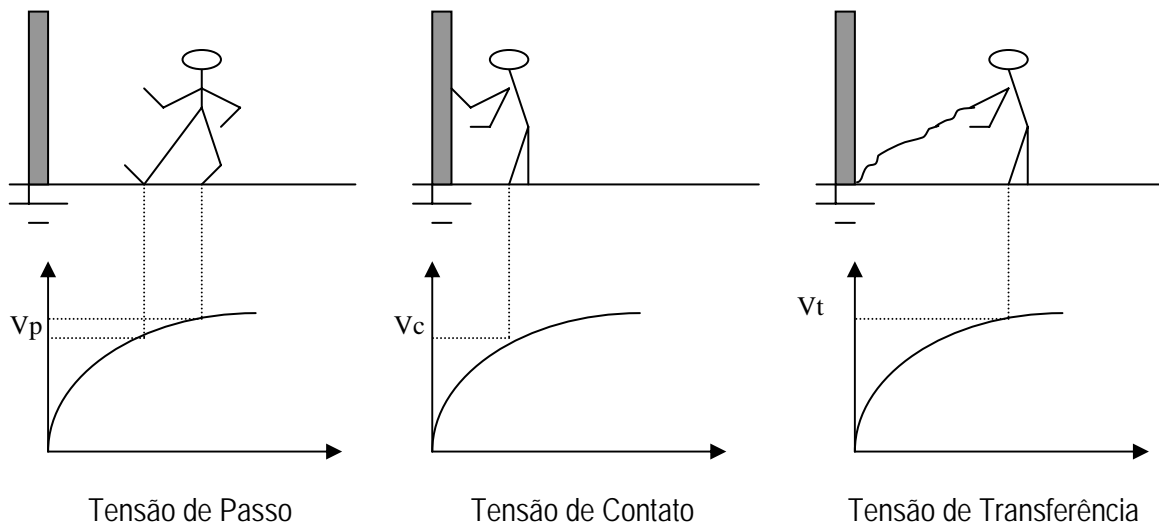


Figura 3.23 Transferência de Potencial.

3.6.3 Impacto Visual

O impacto visual de uma linha de transmissão decorre principalmente da repetição contínua de torres e condutores ao longo da linha de visão.

As subestações produzem impacto visual semelhante +a de uma planta industrial. Este efeito é mais notado quando se trata de área rural, onde as paisagens são menos alteradas. Aliada ao impacto visual da subestação, há o impacto visual da concentração de linhas saindo da subestação.

Na especificação de um sistema de transmissão diversas hipóteses são levadas em consideração, a fim de garantir um padrão de qualidade técnica e econômica. Tais considerações resultam em definições, entre outras de:

- Modo de transmissão: ac ou dc, aéreo ou subterrâneo.
- Nível de tensão
- Número de circuitos em paralelo

O número de circuitos de um tronco de transmissão é intrinsecamente relacionado com a questão da confiabilidade do suprimento. De uma maneira geral, deve-se prever mais de um circuito para o tronco de forma que, caso haja perda de um deles, o suprimento não seja interrompido.

- Equipamentos de compensação de potência reativa série e paralela, etc. A compensação de reativos em linhas de transmissão tem por objetivo:
 - a) Diminuir as perdas
 - b) Diminuir o incremento da circulação de potência reativa na rede
 - c) Melhorar o perfil de tensão
- Seccionamento de linhas

O seccionamento permite que se disponha de pontos intermediários ao longo dos troncos de transmissão aos quais se podem conectar cargas ou usinas. O seccionamento permite o suprimento a cargas locais e enseja a inserção regional do sistema. Algumas soluções tecnológicas apresentam custos elevados ou mesmo impossibilidade nesse sentido. Tecnologias como a meia-onda e a corrente contínua têm vocação para se constituírem em sistemas ponto-a-ponto, muito embora na transmissão em corrente contínua já existam em operação no mundo sistemas multiterminais.
- Pontos de chegada nas regiões receptoras

A chegada de grandes blocos de potência em um mesmo ponto, conseqüência natural da adoção de troncos de alta capacidade, poderá resultar em problemas de absorção da potência pelo sistema receptor, prevendo-se a necessidade de linhas de menor tensão para distribuir a energia para os centros de carga regionais.
- Corredores prováveis