Análise das Características Elétricas da Linhas de Transmissão

Função das Linhas de Transmissão

- Transferir potência das usinas geradoras para as regiões de carga
- Interconectar áreas permitindo o despacho econômico da potência em condições de operação normal
- Transferir potência enetre áreas durante condições de emergência

As linhas de transmissão apresentam características elétricas tais como R L C G.

A condutância para LT aéreas representa a perda através das correntes parasitas nas cadeias de isoladores e caminhos ionizados pelo ar. Estas perdas são muito pequenas e a condutância pode ser desprezada.

Linha de Transmissão Aérea

Uma linha de transmissão é formada por :

- Torres;
- Condutores de fase ;
- Cabos Pára-Raios;
- Isoladores.

Elas podem ser linhas de :

- Circuito simples;
- Circuito duplo;
- Circuito múltiplo.

A **seleção econômica** do nível de tensão é função da potência a ser transmistida e da distância da transmissão.

Após a seleção os condutores são otimizados para minimizar as perdas (RI2) na linha, o ruído audível e a rádio interferência.

As tensões nas linhas são padronizadas.

- 69 kV; 138 kV;
- 230 kV; 345 kV; 440 kV; 500 kV; (EAT)
- 765 kV (UAT)

Existem linhas experimentais de 1000 e 1200 kV – transporte de grandes blocos de energia (> 3GW).

Os condutores de fase normalmente são do tipo ACSR (alumínio com alma de aço) – proporcionam alta resistência mecânica.

Os condutores são formados por cabos encordoados para terem maior flexibilidade.

Para tensões acima de 230 kV normalmente se utilizam mais de um condutor por fase (feixe).

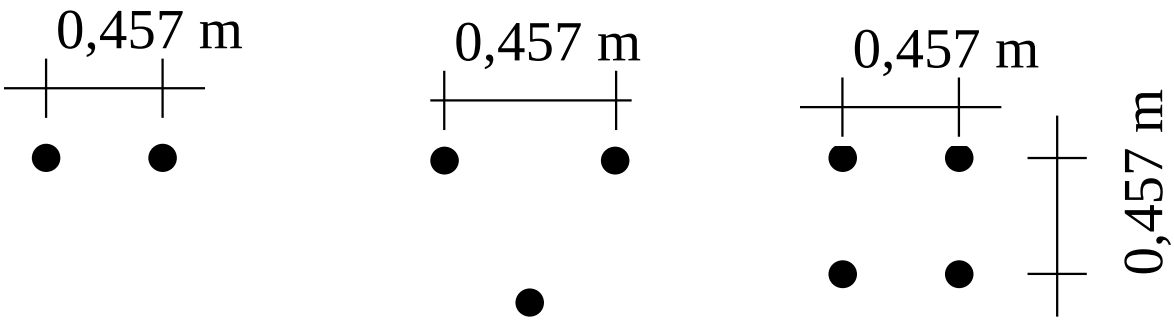
Os feixes convencionais são normalmente formados por 02 – 03 e 04 sub-condutores dispostos em geometria regular.

Estão sendo estudadas linhas para transportar grandes blocos de energia que irão utilizar 8 – 10 – 12 sub-condutores. Estes feixes podem ter geometria especial, obtidas da otimização do campo elétrico e magnético em torno dos condutores.

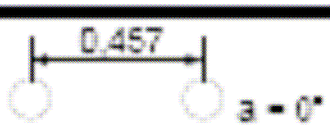
O feixe aumenta o raio efetivo da fase equivalente e divide a corrente da fase entre os sub-condutores.

Valores Típicos

- Alturas dos condutores de fase
- Altura dos cabos P.R.
- Distância entre fases
- Distância entre cabos P.R.
- Distância entre sub-condutores
- Vão



Dados Linha de Transmissão 345 kV

Dados dos cabos da linha 345 kV	
Condutor de fase: Rail	
N° de condutores em feixe.	2
Distância dos feixes (m)	
Diâmetro do condutor externo (m)	0,0281432
Resistência a 60 Hz (Ω/km)	0,08004972
Resistividade do solo (Ω.m)	2000

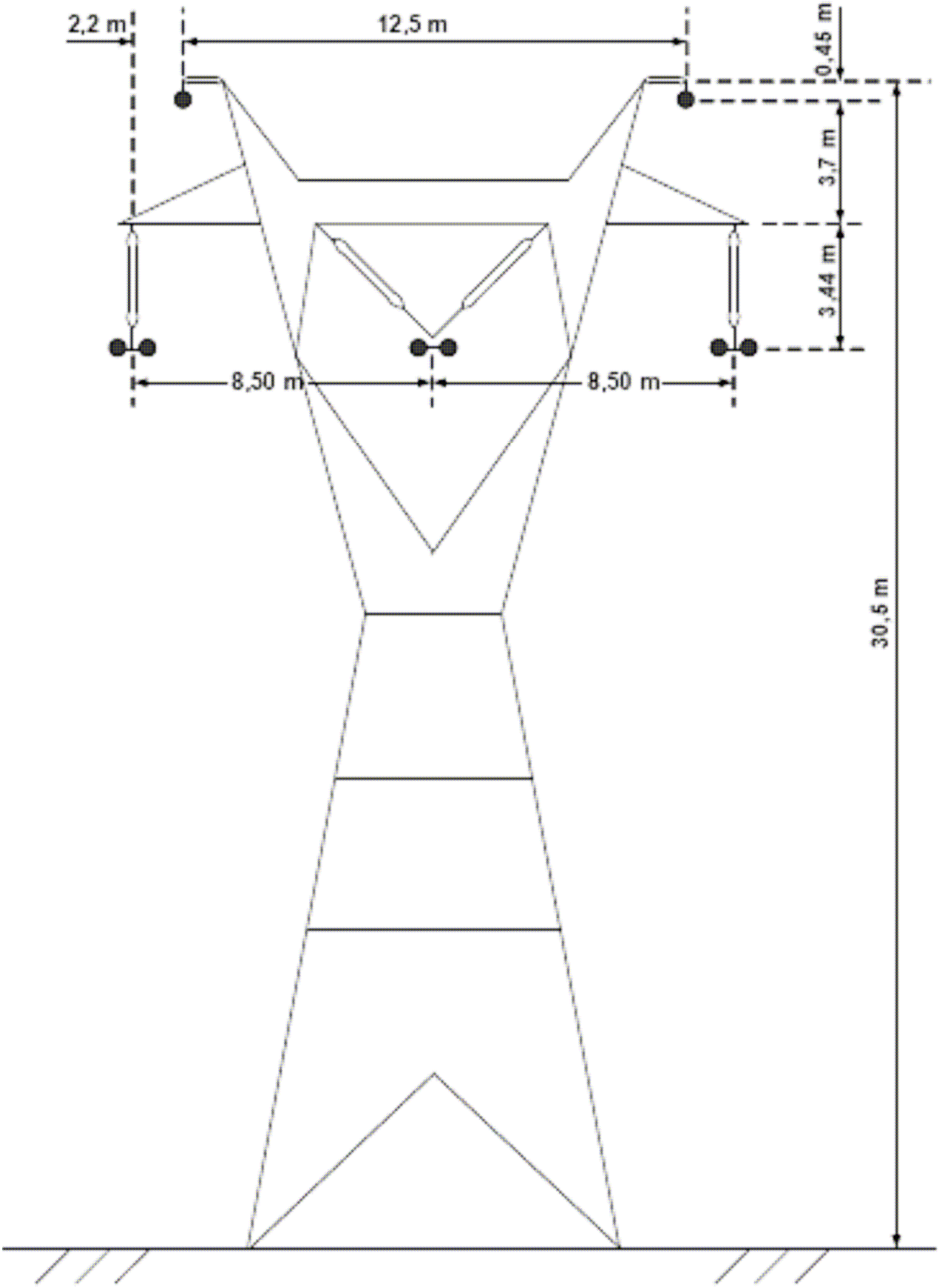
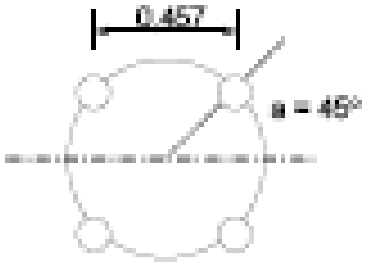


Figura 6.1: Silhueta de torre da linha de 345 kV.

Parâmetros elétricos

		Linha Convencional
Sequência Zero	R (Ω/km)	0,3487
	X_0 (Ω/km)	1,5495
	Y_0 (µF/km)	3,354
Sequência Positiva	R (Ω/km)	0,0306
	Xd (Ω/km)	0,3753
	Yd (µS/km)	4,517

Dados dos cabos da Linha 500 kV	
Condutor de fase tipo: Rail	
N° de condutores em feixe.	4
Distância dos feixes (m)	
Diâmetro do condutor externo (m).	0,02959
Diâmetro do condutor interno (m).	0,00739
Resistência a 60 Hz (Ω/km)	0,0594
Temperatura (°)	75
Permeabilidade magnética relativa	1
Permissividade Relativa	1
Flecha a meio vão (m)	13,43

ıbela 6.6: Características do condutor pára-raios no sistema de 500 k

Condutor pára-raios: EHS 3/8''	
Diâmetro do condutor externo (m).	0,009144
Diâmetro do condutor interno (m).	0
Resistência a 60 Hz (Ω/km)	4,188
Temperatura (°)	45
Permeabilidade magnética relativa	70
Permissividade magnética relativa	1
Flecha a meio vão (m)	6,4
Resistividade do solo	2000 Ω.m

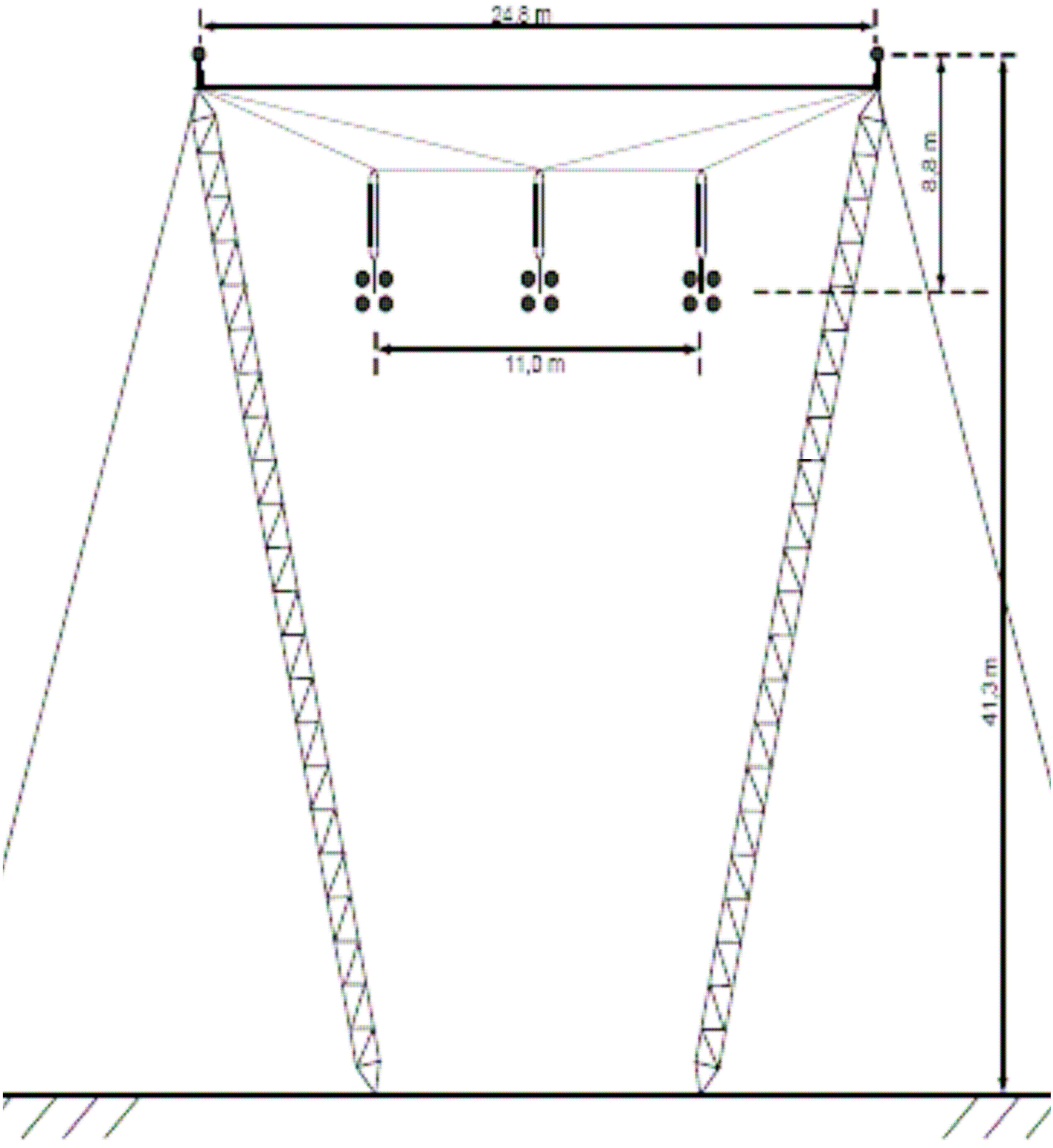


Figura 6.2: Silhueta de torre da linha de 500 kV convencional.

Parâmetros Elétricos		
		Configuração da t
		Convencional
Sequência Zero	R (Ω/km)	0,3235
	X_0 (Ω/km)	1,5504
	Y_0 (µS/km)	2,729
Sequência Positiva	R (Ω/km)	0,0154
	Xd (Ω/km)	0,2670
	Yd (µS/km)	6,13

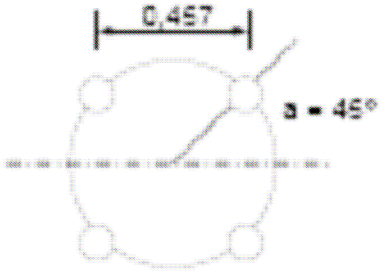
Dados dos cabos da Linha 765 kV	
Condutor de fase tipo: Bluejay	
N° de condutores em feixe.	4
Distância dos feixes (m)	
Diâmetro do condutor externo (m).	0,032
Diâmetro do condutor interno (m).	0,008
Resistência a 60 Hz (Ω/km)	0,0509
Temperatura (°)	75
Permeabilidade magnética relativa	1
Permissividade Relativa	1
Flecha a meio vão (m)	13,43

Tabela 6.16: Características do cabo pára-raios no sistema de 765 kV.

Condutor pára-raios: EHS 3/8''	
Diâmetro do condutor externo (m).	0,009144
Diâmetro do condutor interno (m).	0
Resistência a 60 Hz (Ω/km)	4,188
Temperatura (°)	45
Permeabilidade magnética relativa.	70
Permissividade magnética relativa.	1
Flecha a meio vão (m)	6,4
Resistividade do solo (Ω.m)	2000

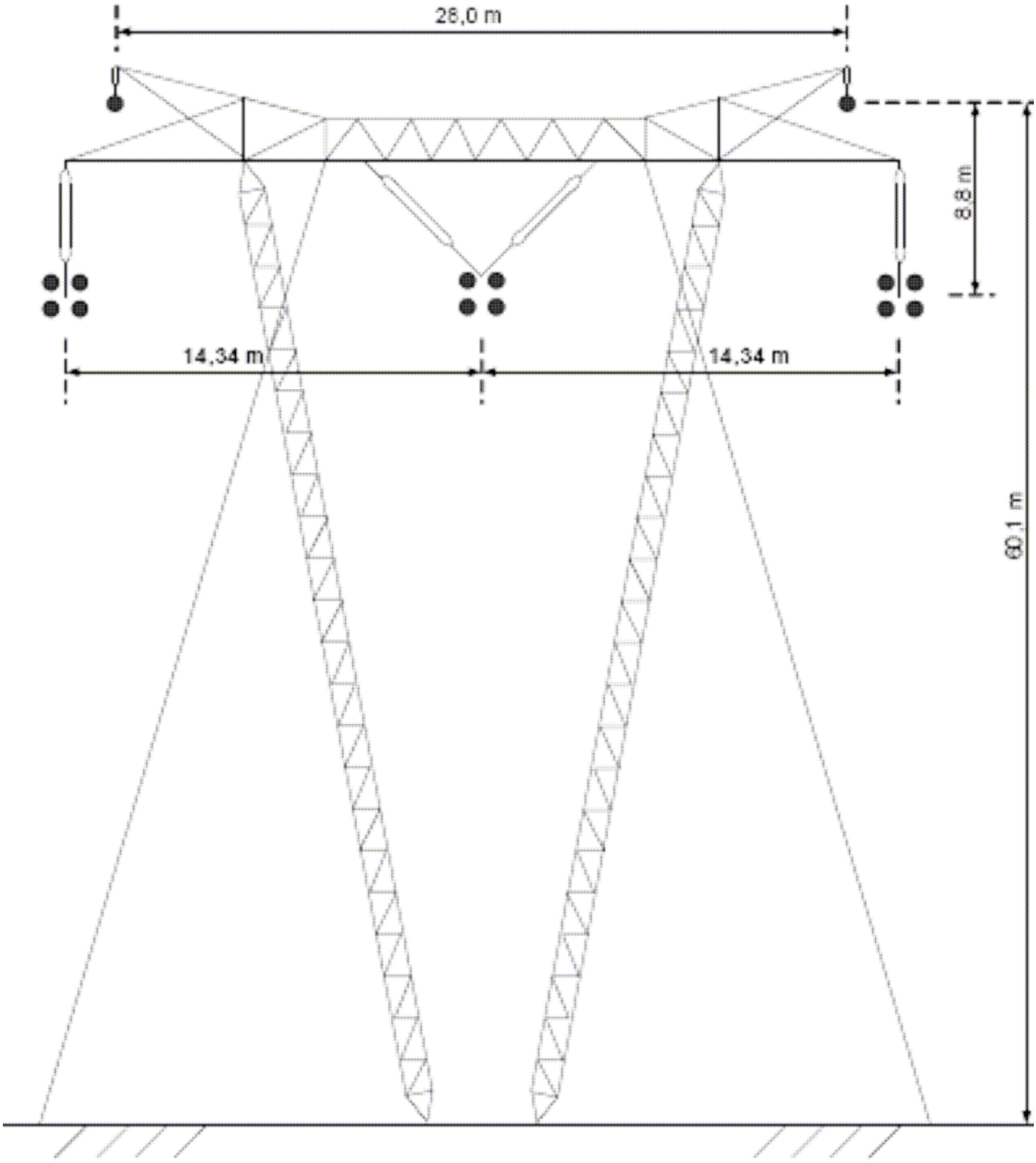


Figura 6.4: Silhueta de torre da Linha de 765 kV.

Tabela 6.17: Parâmetros elétricos no sistema de 765 kV a 60 Hz.

Parâmetros Elétricos		
Configuração da torre em 765 kV - Convencional		
Sequência Zero	R (Ω/km)	0,3478
	X_0 (Ω/km)	1,4015
	Y_0 (μF/km)	3,404
Sequência Positiva	R (Ω/km)	0,0165
	Xd (Ω/km)	0,3651
	Yd (μF/km)	4,759

Valores Típicos

Nível Tensão [kV]	345	500	765
H_{PR} [m]	30	40	60
H_{PR} - H_f [m]	7	10	10
D_{fase} [m]	17	11	29
D_{PR} [m]	12	25	28
R_1 [Ω/km]	0,03	0,015	0,016
X_1 [Ω/km]	0,37	0,27	0,36
R_0 [Ω/km]	0,35	0,32	0,35
R_1 [Ω/km]	1,5	1,5	1,4

Visita Centro Pesquisa Novosibirsk - Sibéria

Tensão ótima de operação

Para se obter a tensão ótima de operação de uma linha de transmissão supõe-se que o campo elétrico na superfície do condutor é, em condições balanceadas, próximo da condição de efeito coroa.

Em função do número de condutores no feixe, raio do condutor, geometria do feixe obtém-se a tensão ótima.

- O aumento do número de condutores no feixe associado ao aumento das dimensões do feixe resulta em aumento do nível da tensão ótima.

Efeito Coroa

O efeito coroa corresponde à ionização da região em torno do condutor.

Este efeito aumenta a “resistência” do condutor, gerando mais perdas (perda por efeito coroa) e aumentando o amortecimento da linha para perturbações transitórias.

A capacitância da linha varia durante a ocorrência do efeito coroa.

Campo elétrico no solo

Define-se um valor limite do campo elétrico sob a linha, a meio do vão, onde os condutores de fase se encontram mais próximos do solo.

Deve-se compor a contribuição de todas as fases para uma determinada tensão de operação escolhida (ou uma gama de tensão a analisar).

O campo elétrico no solo está associado a uma altura mínima do condutor de fase mais próximo do solo. Valor típico : $E_{máx}$ = 10 kV/m

- Raio do condutor tem pouca influência, sendo mais significativo o número de condutores no feixe (geometria do feixe).

Flecha

O cálculo da flecha máxima é realizado considerando diversas condições de carregamento da linha, ou seja, diferentes temperaturas dos cabos, para vão médios definidos.

Valores típicos de vão : 400 – 450 m.

Temperaturas associadas aos carregamentos

- Condutor de fase : 75 – 90 °C
- Cabo P.R. : 45 – 60 °C

Tensão de tração (EDS) – 20 % da tensão de ruptura

- Temperatura EDS
- Condutor de fase : 25 °C
- Cabo P.R. : 25 °C

- Vento máximo/temperatura associada
- 150 km/h – 10 °C

Dados de alguns condutores

Cabo	Peso [kN/km]	T_0 [kN]	α [1/°C]	E [kN/mm^2]
Ruddy	14,8	109,4	19	71,1
Cardinal	18	149,7	19,44	67,6
PR – EHS-A-3/8	4	68,5	11,52	191,2

onde :

T_0 – tensão de ruptura

E – módulo de elasticidade

α - coeficiente de dilatação linear

Passos para obtenção da flecha dos condutores

- Obtém-se a tensão de ruptura EDS
- Calcula-se a flecha associada à tensão de ruptura
- Calcula-se a flecha para as temperaturas desejadas

$$L_2 = L_1 + L_1\alpha(t_2 - t_1)$$

onde L – comprimento do cabo a uma determinada temperatura

- Calcula-se a tensão de ruptura associada ao vento máximo

Considera-se o peso virtual do condutor compondo o peso real com a força resultante da pressão do vento máximo

A tensão associada ao vento máximo deve ser no máximo 30 % da tensão de ruptura do cabo.

Exemplo

RUDDY			
EDS	**20 % carga ruptura**		
Vão [m]	T [°C]	Carga [kN]	Flecha [m]
400	25	21,9	13,56
450	25	21,9	17,16
Vento Máximo	**150 km/h**		
Vão [m]	T [°C]	Carga [kN]	Flecha [m]
400	10	41,8	7,1
450	10	42,18	8,91
Temperaturas máximas			
Vão [m]	T [°C]	Carga [kN]	Flecha [m]
400	75	19,3	15,4
450	75	19,73	19,04
400	90	18,7	15,9
450	90	19,19	19,58

EHS-3/8			
EDS	**20 % carga ruptura**		
Vão [m]	T [°C]	Carga [kN]	Flecha [m]
400	25	13,7	5,78
450	25	13,7	7,32
Vento Máximo	**150 km/h**		
Vão [m]	T [°C]	Carga [kN]	Flecha [m]
400	10	22,52	3,52
450	10	23,24	4,32
Temperaturas máximas			
Vão [m]	T [°C]	Carga [kN]	Flecha [m]
400	45	12,38	6,4
450	45	12,53	8
400	60	11,52	6,88
450	60	11,77	8,52

ATENÇÃO

OBSERVEM QUE A FLECHA DOS CONDUTORES DE FASE É MAIOR DO QUE A DOS CABOS P.R.

Aspectos Físicos Básicos

Numa linha de transmissão ocorrem fenômenos de propagação de ondas eletromagnéticas.

Trata-se de fenômeno “guiado” pelos condutores e o solo com campo eletromagnético concentrado em torno dos condutores, que se atenua transversalmente.

A potência é transmitida no espaço da vizinhança dos condutores com densidade definida pelo vetor de Poynting S dado por

$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H}$$

onde

E – vetor campo elétrico associado à tensão entre os condutores (e entre condutores e solo)

H – vetor campo magnético associado à corrente nos condutores (e no solo).

Vetor de Poynting

Para um único condutor por fase, com distância entre fases >> raio do condutor, os campos E e H, na vizinhança do condutor, são aproximadamente ortogonais e atenuam-se com 1/r , onde r – distância ao eixo do condutor.

Pode-se concluir que S atenua-se com $1/r^2$ e o fluxo de energia no espaço ocorre dominantemente na proximidade imediata dos condutores.

Propagação de ondas

A análise exata da propagação de ondas é bastante complexa, devido a :

- O solo não é plano nem homogêneo e suas características não são conhecidas com precisão.
- A configuração geométrica da linha é relativamente complexa para efeitos de definição do campo eletromagnético correspondente, se considerarmos a flecha dos condutores, a forma das torres e os isoladores.
- Ocorrência de efeito coroa.
- No caso dos cabos pára-raios deve-se considerar a não linearidade das características magnéticas.

Hipóteses adotadas

É usual fazer algumas simplificações :

- Supor o solo plano e homogêneo.
- Supor que a linha é constituída por condutores paralelos entre si e paralelos ao solo, sendo seus raios muito inferiores às distâncias envolvidas.
- Desprezar o efeito terminais das linhas e das torres no cálculo do campo eletromagnético.
- Simplificar o efeito coroa.
- Supor os cabos P.R. com permeabilidade magnética constante.
- Os cabos de fase, compostos de fios encordoados com alma de aço, são representados por um condutor com seção reta com a forma de coroa circular, onde a corrente na alma de aço é desprezada.

Análise em Regime Permanente das Linhas de Transmissão

A integração das equações de campo foi feita por Carson em 1926.

- Dois condutores cilíndricos i e j de extensão infinita e paralelos entre si, de pequeno diâmetro face a distância entre eles e o solo, paralelos ao solo.
- O solo foi considerado plano, de constante dielétrica nula e condutividade uniforme e constante, invariável à freqüência.
- A condutividade do ar foi suposta uniforme e muito inferior a do solo, podendo ser suposta com condutividade nula, enquanto que no solo a condutividade foi suposta constante e finita.

Campo eletromagnético em torno da LT

$$\bar{E} = E_z$$

Como

$$\mathrm{rot}\,\bar{E} = -\frac{\partial}{\partial t}\bar{H}$$

$$j\omega H_x = -\frac{\partial}{\partial y}E_z$$

$$j\omega H_y = -\frac{\partial}{\partial x}E_z$$

- No ar, o campo magnético é resultante da somatória das componentes do campo devido à corrente no condutor e outra devido à corrente no solo.

- Desenvolvendo as relações entre o campo magnético e o campo elétrico obtém-se relações de **tensão na superfície do condutor** e **corrente no interior do condutor**, representada por **impedância longitudinal da linha**.

- Esta impedância tem uma parcela obtida supondo o solo como um condutor perfeito, de condutividade infinita, e outra parcela considerando que o solo tem condutividade finita. A parcela devido ao solo ideal (condutor perfeito) é composta de duas parcela :

  – Impedância devido ao campo no exterior dos condutores.

  – Impedância devido ao campo no interior dos condutores (uma vez que os raios dos condutores são muito menores do que as distâncias entre os condutores e entre os condutores e o solo).

Parâmetros Longitudinais

A **matriz primitiva longitudinal** corresponde à matriz de **impedância série por unidade de comprimento** de uma linha de transmissão com n condutores (sub-condutores fase e cabos pára-raios).

Esta matriz é formada por :

- Contribuição do condutor
- Contribuição na condição de solo e condutor ideais (condutividade infinita)
- Contribuição do solo (solo com condutividade finita)

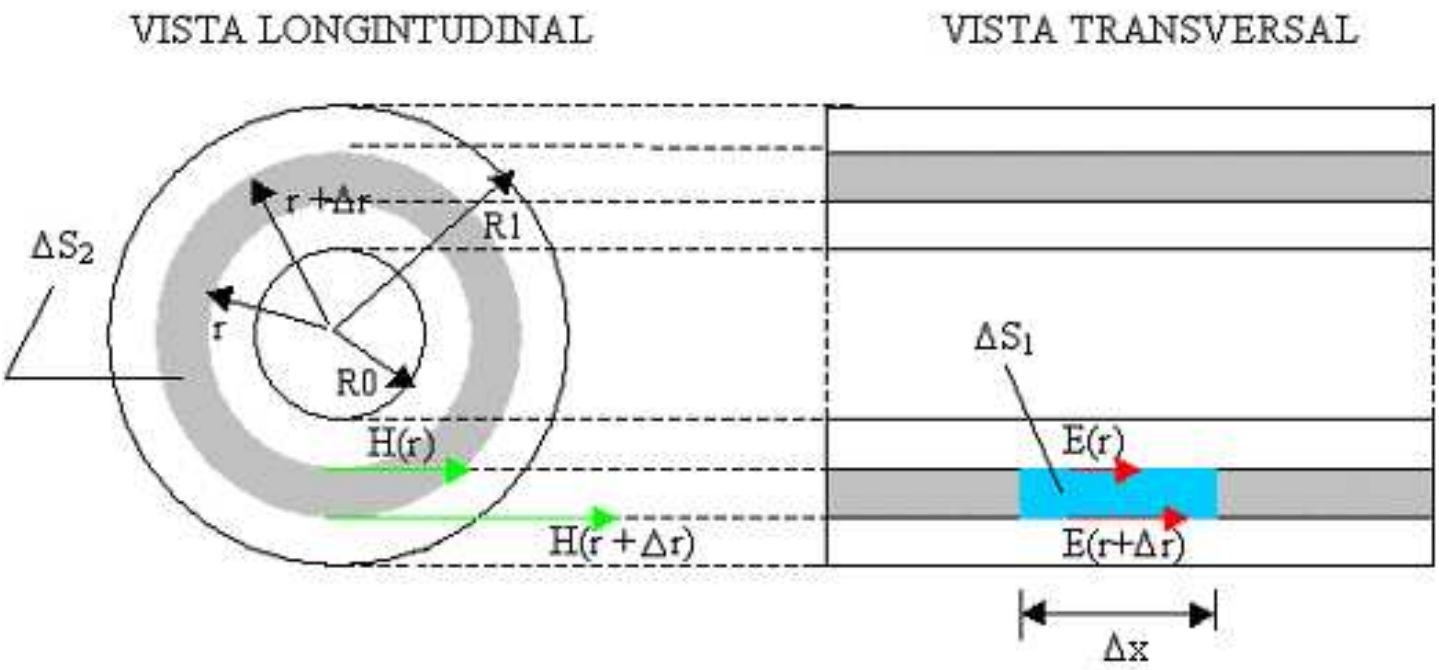
Impedância Interna

A impedância interna por unidade de comprimento de um condutor cilíndrico com seção reta em forma de coroa circular.

- Raio externo R_1 e raio interno R_0

- À medida que a freqüência aumenta, a densidade de corrente concentra-se em maior grau na superfície do condutor e diminui bastante na região central do condutor.
- Este fenômeno é denominado Efeito Pelicular (“Skin Effect”).
- Ele é devido à alteração do fluxo magnético e da densidade de corrente.
- Resulta na modificação da resistência e indutância internas por unidade de comprimento, fazendo com que estas variem em função da freqüência.

Efeito Pelicular



- Componentes longitudinais do campo elétrico e as componentes tangenciais do campo magnético
- Essas grandezas foram supostas senoidais com freqüência angular ω e os comprimentos de onda muito superiores às dimensões transversais.
  - λ para 60 Hz = 5000 km

Analisando os campos

$$\text{rot}\,\bar{E} = -\frac{\partial}{\partial t}\bar{B}$$

$$\text{rot}\,\bar{H} = \bar{J} + \frac{\partial}{\partial t}\bar{D} \cong \bar{J}$$

Equações de Maxwell

$$\bar{D} = \varepsilon\,\bar{E}$$

$$\bar{B} = \mu\,\bar{H}$$

$$\bar{J} = \sigma\,\bar{E}$$

temos

$$\oint_L \vec{E}\cdot d\vec{l} = -j\cdot\omega\cdot\oint_S \vec{B}\cdot d\vec{s} \qquad \Delta S1$$

$$\oint_L \vec{H}\cdot d\vec{l} = \oint_S \vec{J}\cdot d\vec{s} \qquad \Delta S2$$

$$\Delta x \cdot \left[E(r+\Delta r) - E(r)\right] = j \cdot \omega \cdot \left[B(r) \cdot \Delta x \cdot \Delta r\right]$$

$$\Rightarrow \frac{E(r+\Delta r) - E(r)}{\Delta r} = j \cdot \omega \cdot B(r)$$

$$2 \cdot \pi \cdot (r+\Delta r) \cdot H(r+\Delta r) - 2 \cdot \pi \cdot r \cdot H(r) = J \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot \Delta r$$

$$\frac{r \cdot H(r+\Delta r) - r \cdot H(r)}{\Delta r} - \frac{\Delta r \cdot H(r+\Delta r)}{\Delta r} = J \cdot r$$

Fazendo $\Delta r \rightarrow 0$

$$\frac{\partial E}{\partial r} = j \cdot \omega \cdot \mu \cdot H(r)$$

$$r \cdot \frac{\partial H(r)}{\partial r} + H(r) = \sigma \cdot E \cdot r$$

chega – se à equação diferencial e como $E = E(r)$

$$r^2 \cdot \frac{d^2 E}{dr^2} + r \cdot \frac{dE}{dr} - j\omega \cdot \mu \cdot \sigma \cdot r^2 \cdot E = 0$$

para $\rho = r \cdot \sqrt{j\omega \cdot \mu \cdot \sigma}$

$$\rho^2 \cdot \frac{d^2E}{d^2\rho} + \rho \cdot \frac{dE}{d\rho} - \rho^2 \cdot E = 0$$

com solução

$$E(\rho) = C1 \cdot I0(\rho) + C2 \cdot K0(\rho)$$

Como $$H = \frac{1}{j \cdot \omega \cdot \mu} \frac{dE}{dr}$$

$$H(\rho) = \frac{1}{j\omega \cdot \mu} \cdot \left[C1 \cdot I1(\rho) - C2 \cdot K1(\rho)\right] \frac{d\rho}{dr}$$

$$H(\rho) = \sqrt{\frac{\sigma}{j\omega \cdot \mu}} \cdot \left[C1 \cdot I1(\rho) - C2 \cdot K1(\rho)\right]$$

Condições de contorno – C1 e C2

- As correntes para $r < R_0$ são nulas e o campo magnético é nulo para $r = R_0$ e :

$$\rho 0 = R0 \cdot \sqrt{j\omega \cdot \mu \cdot \sigma}$$

$$H = 0 = \sqrt{\frac{\sigma}{j\omega \cdot \mu}} \cdot [C1 \cdot I1(\rho_0) - C2 \cdot K1(\rho_0)] \therefore \frac{C1}{C2} = \frac{K1(\rho_0)}{I1(\rho_0)}$$

onde $\rho_0 = R_0 \sqrt{j\omega \cdot \mu\sigma}$

- As correntes no condutor são nulas para $r < R_0$; A corrente no condutor é dada por :

$$I = \int_S \bar{J} \cdot \bar{ds} = \int_S \sigma.E \, ds = \int_{R_0}^{R_1} \sigma \, E \, 2\pi \, r \, dr = \sigma \, E \, 2\pi \int_{R_0}^{R_1} r \, dr$$

como $\rho = r\sqrt{j\omega\mu\sigma}$

$$r = \frac{\rho}{\sqrt{j\omega\mu\sigma}} \therefore \frac{dr}{d\rho} = \frac{1}{\sqrt{j\omega\mu\sigma}}$$

Impedância interna

•A relação entre o campo elétrico longitudinal na superfície exterior do condutor e a corrente I será a impedância longitudinal do condutor por unidade de comprimento Zc

$$Zc = Rc + j \cdot Xc =$$

$$\sqrt{\frac{j \cdot \omega \cdot \mu}{\sigma}} \cdot \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R1} \cdot \frac{I0(\rho 1) \cdot K1(\rho 0) + K0(\rho 1) \cdot I1(\rho 0)}{I1(\rho 1) \cdot K1(\rho 0) - I1(\rho 0) \cdot K1(\rho 1)}$$

I_0, I_1, K_0 e K_1 são funções de Bessel.

σ é a condutividade do condutor.

μ é a permeabilidade magnética do condutor

Zc para corrente contínua

Cabos Pára-Raios

•Fazendo R_0, e, portanto, ρ_0 tender a zero, Zc tende a impedância interna por unidade de comprimento de um cilindro homogêneo de raio R_1 (cabo P.R.)

$$Zc = Rc + j \cdot Xc = \sqrt{\frac{j\omega \cdot \mu}{\sigma}} \cdot \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_1} \cdot \frac{I_0(\rho_1)}{I_1(\rho_1)}$$

Condutor de fase – CC

•Para ω pequeno, de modo que $|\rho_0|$ e $|\rho_1|$ sejam pequenos

$$Zc = Rc = \frac{1}{\sigma} \cdot \frac{1}{\pi R_1^{\,2} - \pi R_0^{\,2}}$$

Zc para baixas freqüências

•Quando a densidade de corrente no condutor possa ser considerada uniforme

$$Zc = Rc + j \cdot Xc =$$

$$\frac{1}{\sigma} \cdot \frac{1}{\pi R_1^{\,2} - \pi R_0^{\,2}} +$$

$$\frac{\mu\, j\omega}{\pi R_1^{\,2} - \pi R_0^{\,2}} \left[\frac{R_0^{\,4}}{2(R_1^{\,2} - R_0^{\,2})} \ln\left(\frac{R_1}{R_0}\right) + \frac{1}{8} R_1^{\,2} - \frac{3}{8} R_0^{\,2} \right]$$

1ª. parcela – resistência em CC (ou para jω muito pequeno)

2ª. parcela – reatância para jω muito reduzido, densidade de corrente no condutor suposta uniforme.