



Modelo Elétrico de Linhas de Transmissão

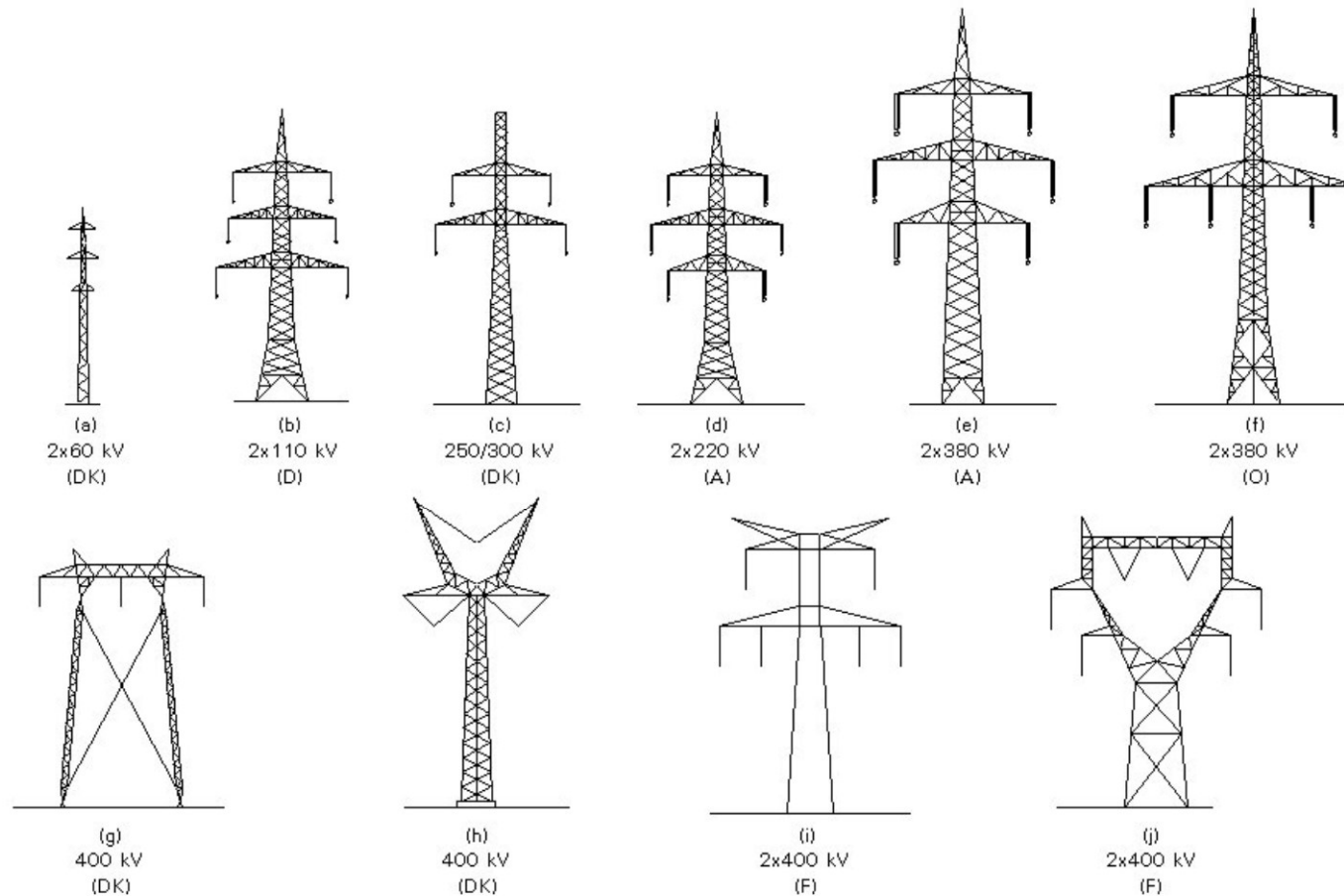
Resistência

Helon David de Macêdo Braz
helon@cear.ufpb.br



Características: **Tensões** diferentes implicam em torres com **dimensões** diferentes

<http://creazyengineers07.blogspot.com/2010/09/high-voltage-transmission-towers.html>



Note: Tower (c) carries a DC transmission line. Towers drawn approximately to the same scale.

Figure 2 Examples of overall design of suspension towers from different countries.

Linhas de Transmissão (LTs): Características



Características: Grandezas envolvidas

Cálculo elétrico de linhas de transmissão - Notas de aula

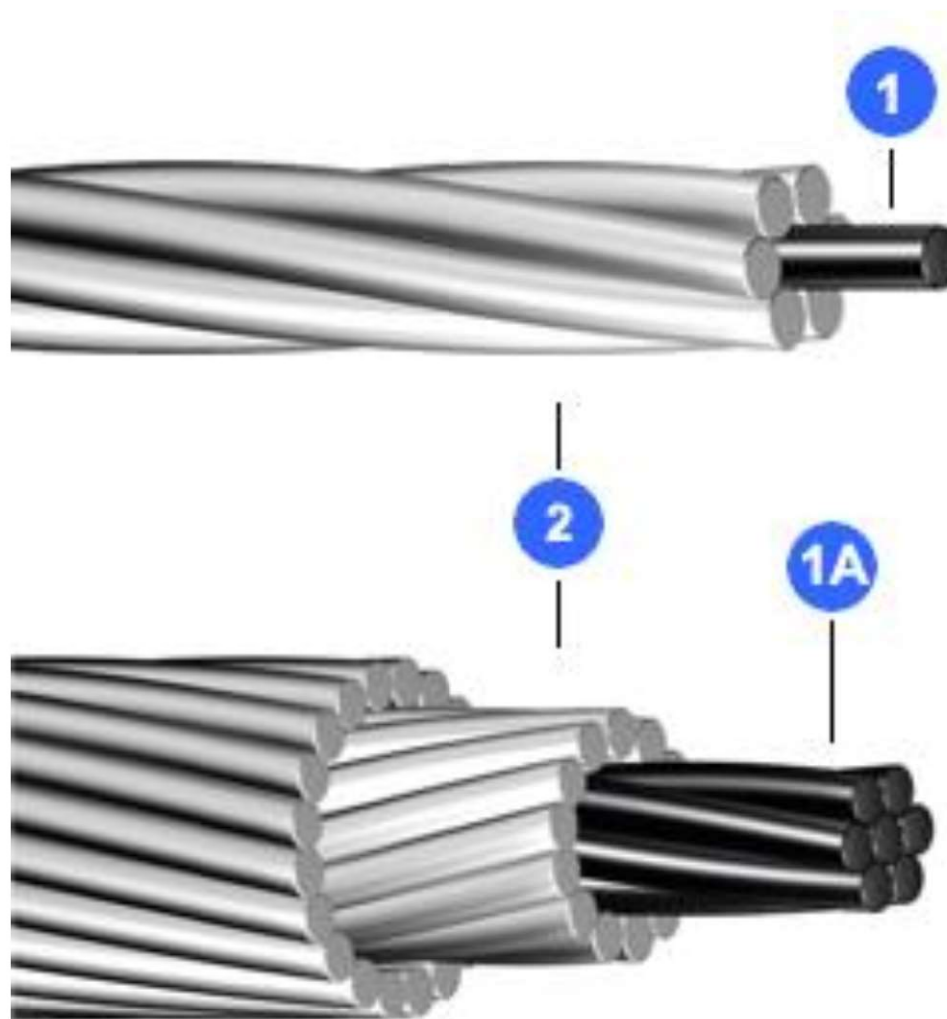
© Carlos Kleber da Costa Arruda*
CEFET-RJ

Potência transmitida	230 kV: 200 MW 345 kV: 500 MW 500 kV: 1 GW 750 kV: 2 GW
Comprimentos	Vão típico: 300-500 m Vão de travessia: 1000-2000 m LT "curta": < 100 km Comprimento máximo sem subestação intermediária: 300 km Linha de meia-onda: 2250 km
Altura de torre	Linha de transmissão: 30-50 m Vão de travessia: 100-300 m
Temperatura no cabo	Limite nominal: 70-90°C Limite de emergência: 100-130°C Limite para cabos especiais: 200°C
Distâncias de isolamento (eficaz, fase-neutro)	500 kV: 2 m 500 kV (com considerações usuais de projeto): 5-8 m
Peso linear de cabos	ACSR Linnet (336 MCM): 688 kg/km ACSR Rail (954 MCM): 1600 kg/km ACSR Thrasher (2312 MCM): 3760 kg/km
Campo elétrico	Máximo no solo (limite da faixa): 4,2 kV/m Máximo no solo (ocupacional): 8,33 kV/m Superfície do cabo: 20 kV/cm Disruptiva: 30 kV/cm



Características: São usados **cabos nus, geralmente com alumínio**

<https://www.induscabos.com.br/portfolio-item/fios-e-cabos-de-aluminio-nu-caa-acsr/>





Características: O número de isoladores depende da tensão:

Table 4-6 from the USDA-RUS Bulletin 1724e300

Table 4-6: Minimum Quantity of Suspension Insulators

Nominal System Phase-to-Phase Voltage kV	BIL kV	Minimum Quantity of Suspension Insulators*
7.5	95	1
14.4	110	2
23	150	2
34.5	200	3
46	250	4
69	350	5
115	550	8
138	650	9
161	750	10
230	900	12
230	1050	14
345	1300	20

*For standard 14.6- x 25.4-centimeter (5 ¾- x 10-inch) suspension insulators.



Características: cadeia de isoladores define o tipo → Passagem ou Ancoragem

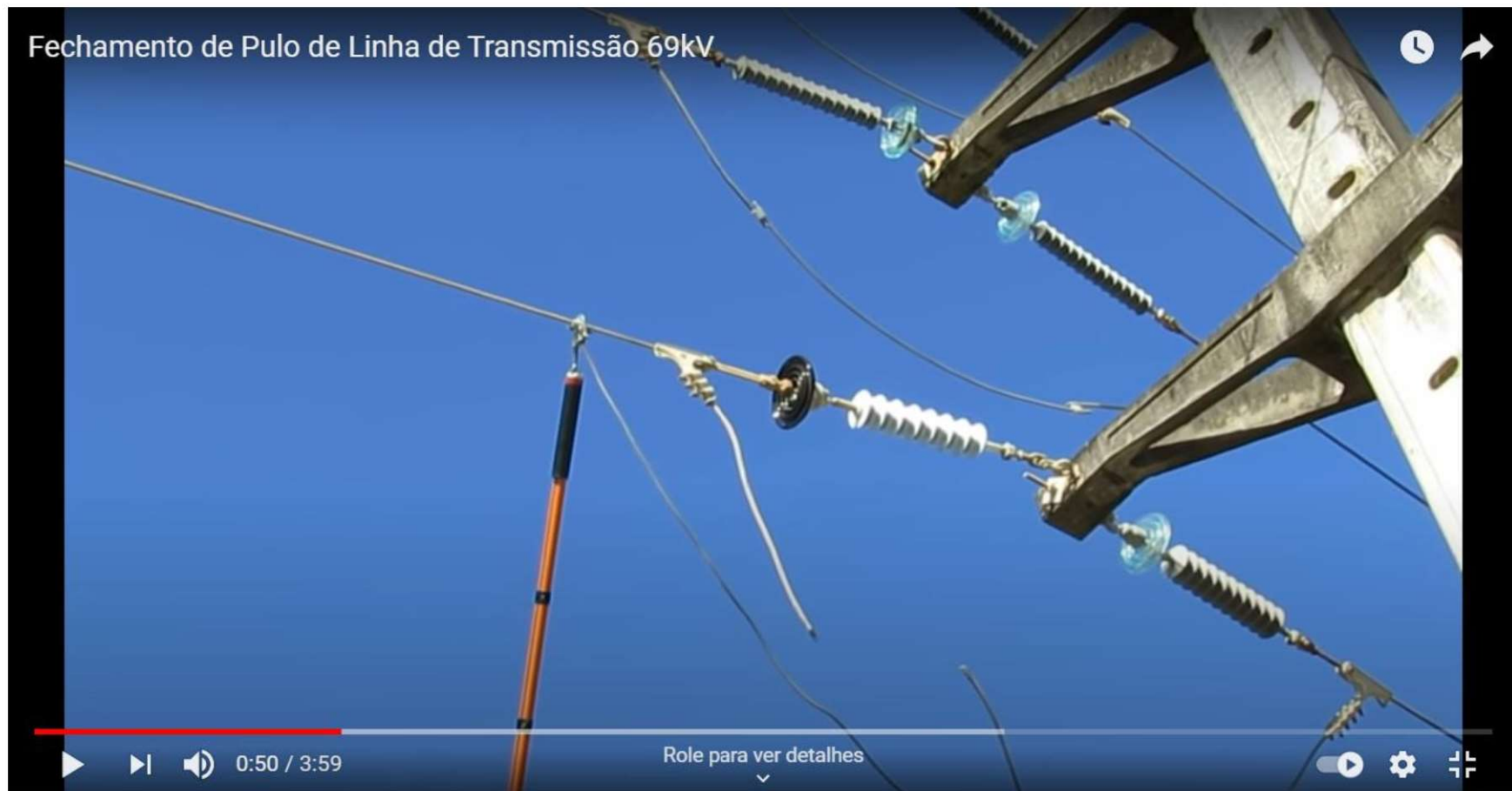
<https://electronics.stackexchange.com/questions/222546/high-voltage-three-phase-transmission-lines>





Características: cadeia de isoladores define o tipo → Detalhe “Pulo”

<https://youtu.be/8qAMjd5-L8I>



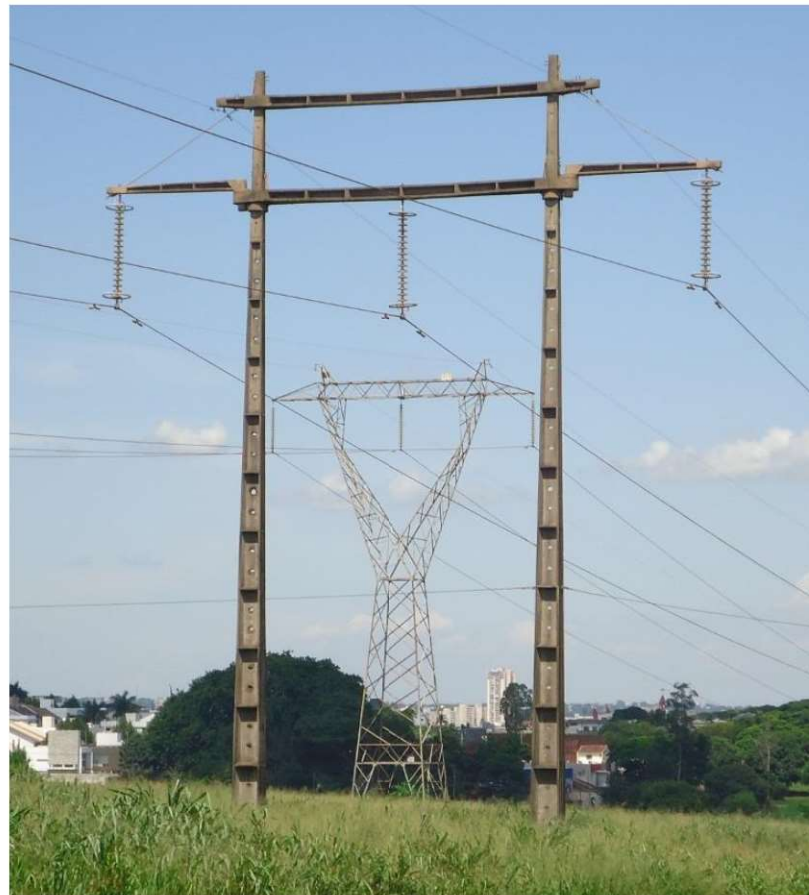
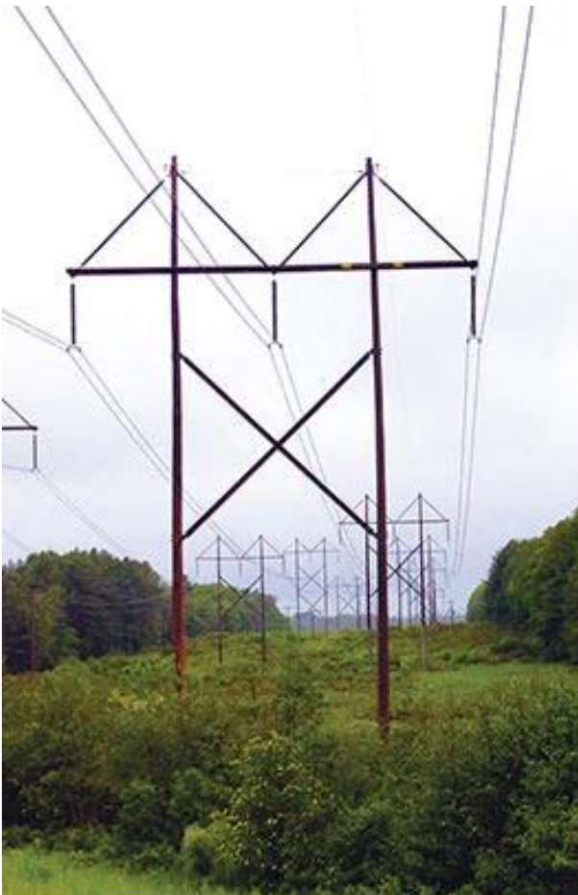
LTs: Características



Características: há opções de material adotado → Madeira, Concreto, Metal, ...

<https://www.flickr.com/photos/92036053@N06/26087668280>

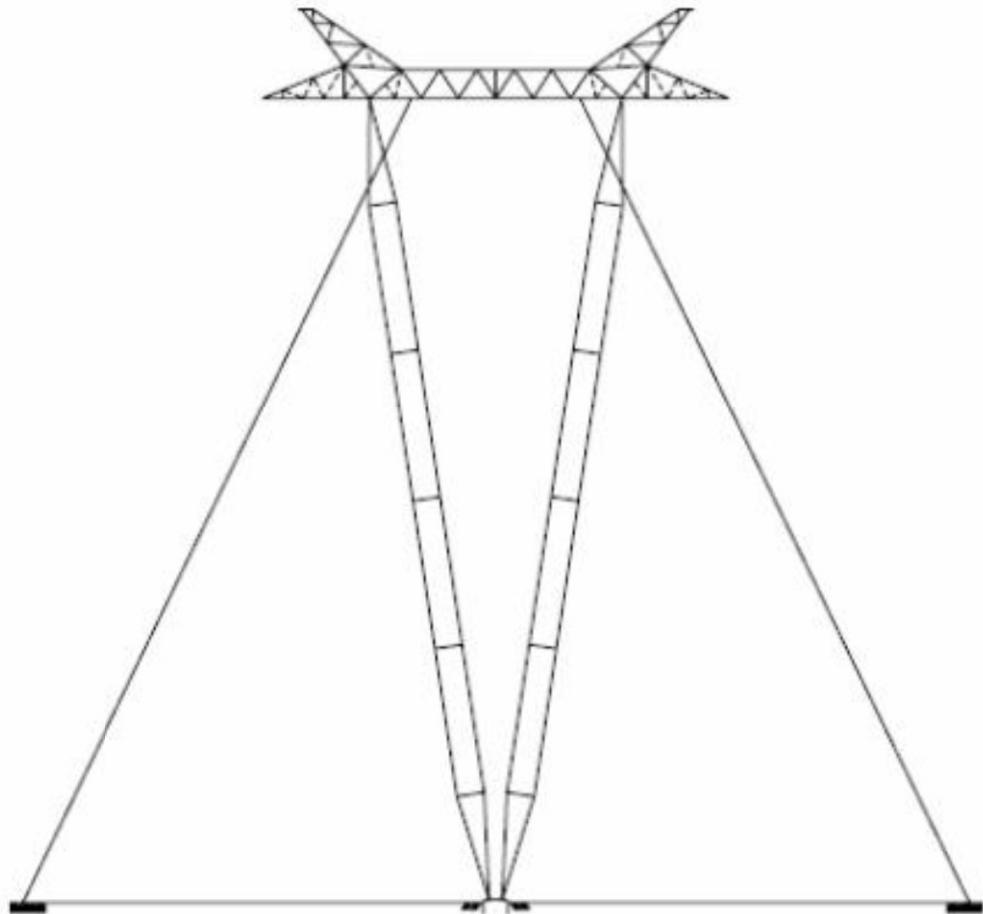
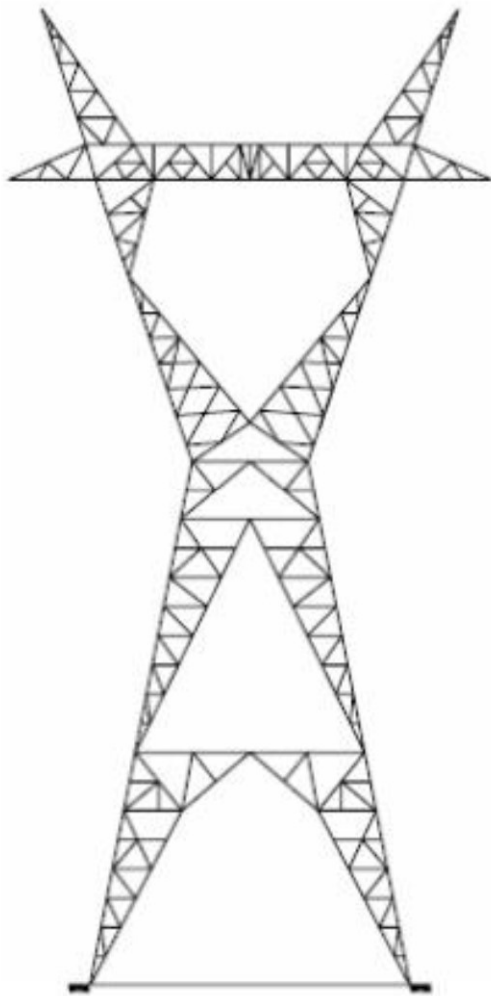
<https://c7.uihere.com/files/632/474/486/power-lines-power-pole-steel-structure-electrical-transmission-lines.jpg>





Características: formato da torre e apoio no solo define → Auto-portante ou Estaiada

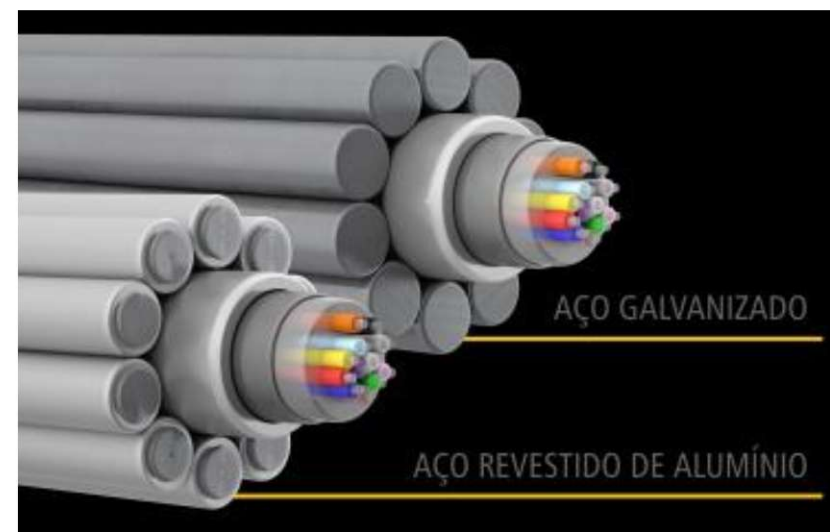
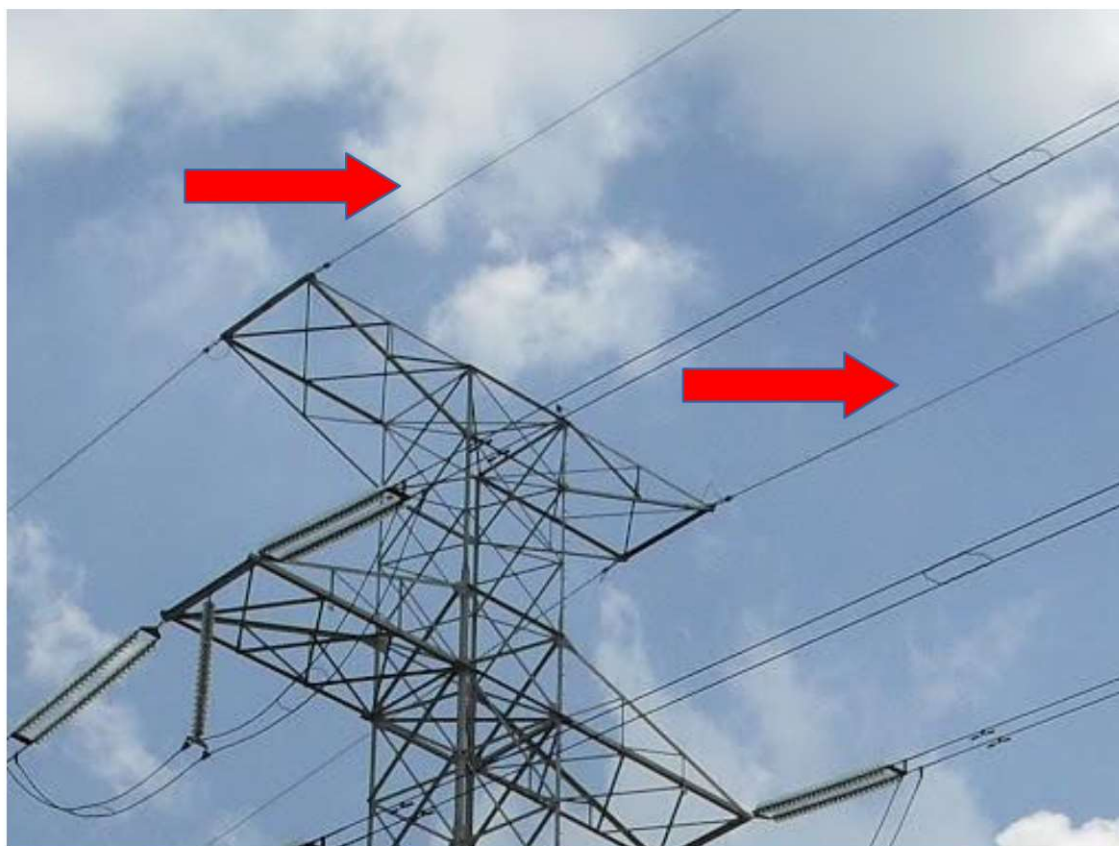
https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/16178/16178_6.PDF





Características: sobre os condutores das fases é possível ver os cabos pára-raios

Pode ser **Convencional** ou **OPGW...**





Características: a curva gerada pelos cabos entre torres é chamada de **catenária**





Características: nas travessias de estradas e rios → esferas de sinalização

Em que: diâmetro = ± 60 cm e massa = ± 5 kg

INSTALAÇÃO DE ESFERAS DE SINALIZAÇÃO AÉREA ATRAVÉS DE CORDAS

Marco Antônio do Nascimento *

Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista

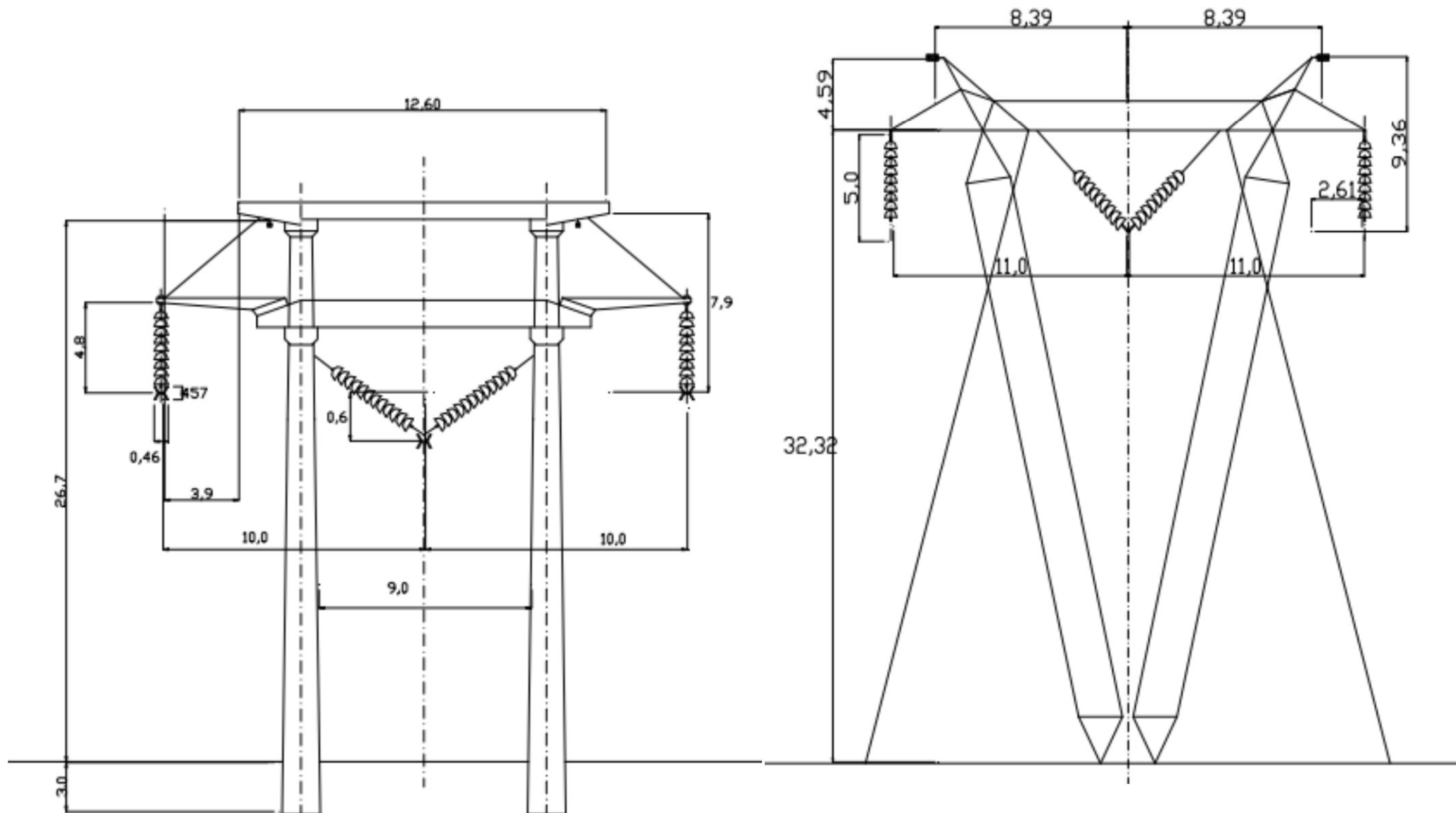


Robótica Aplicada ao SEP
(Sistema Elétrico
de Potência)

© 31/03/2014 Sem categoria



Mais exemplos de torres de transmissão:

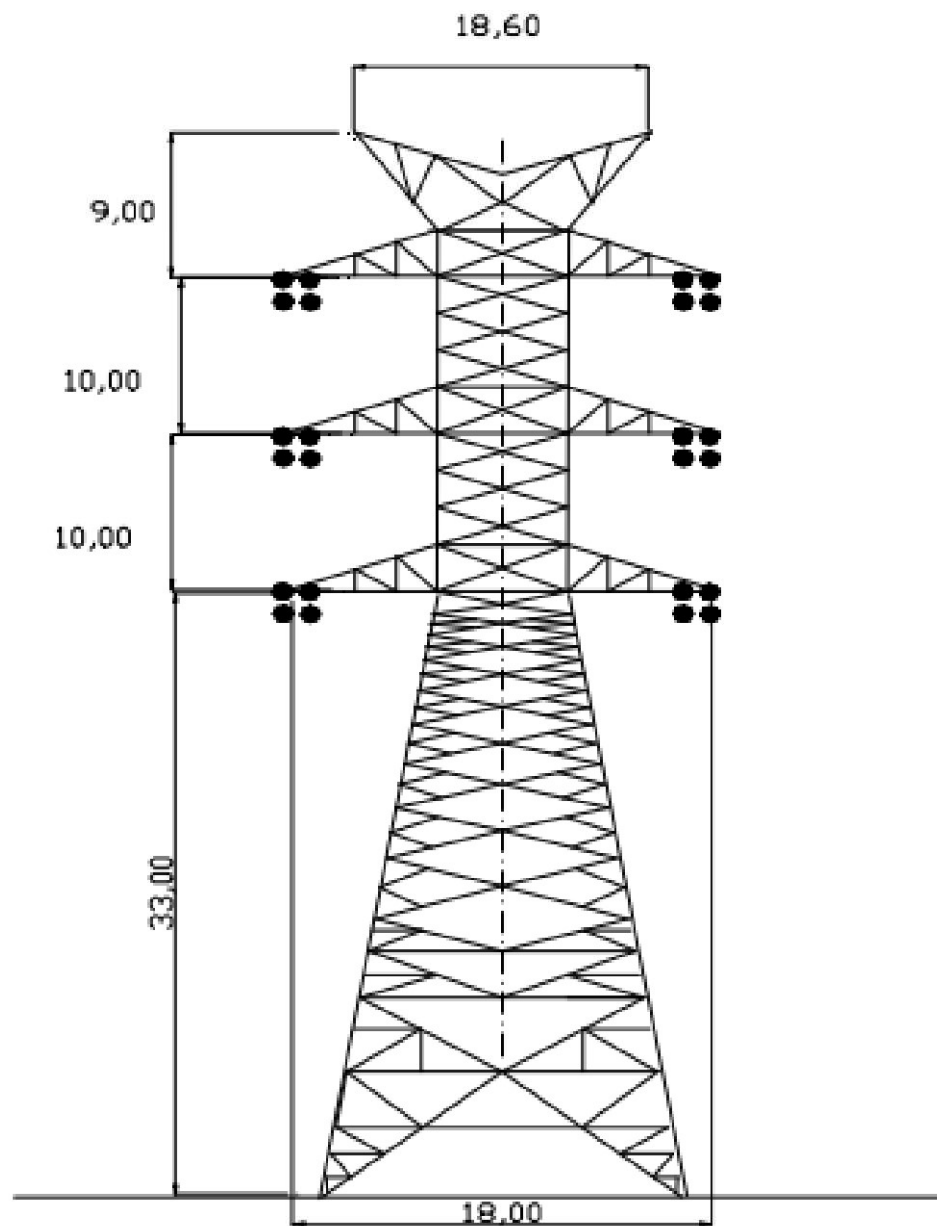
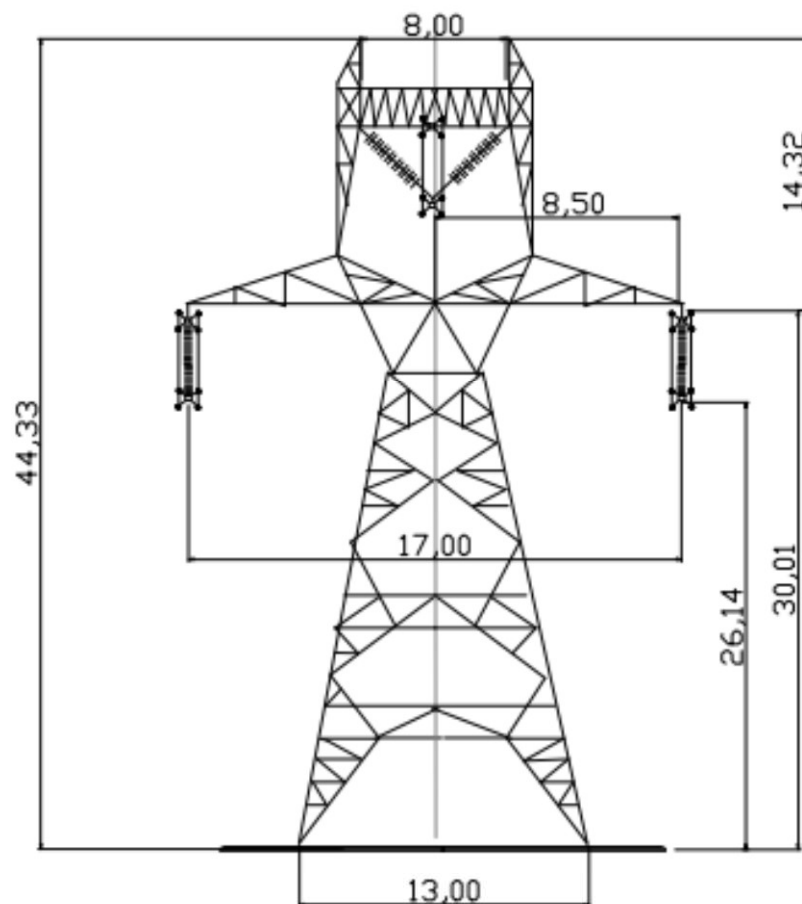




Mais exemplos de torres de transmissão:

Mais de 1 cond/fase...

Algo estranho no desenho da direita?



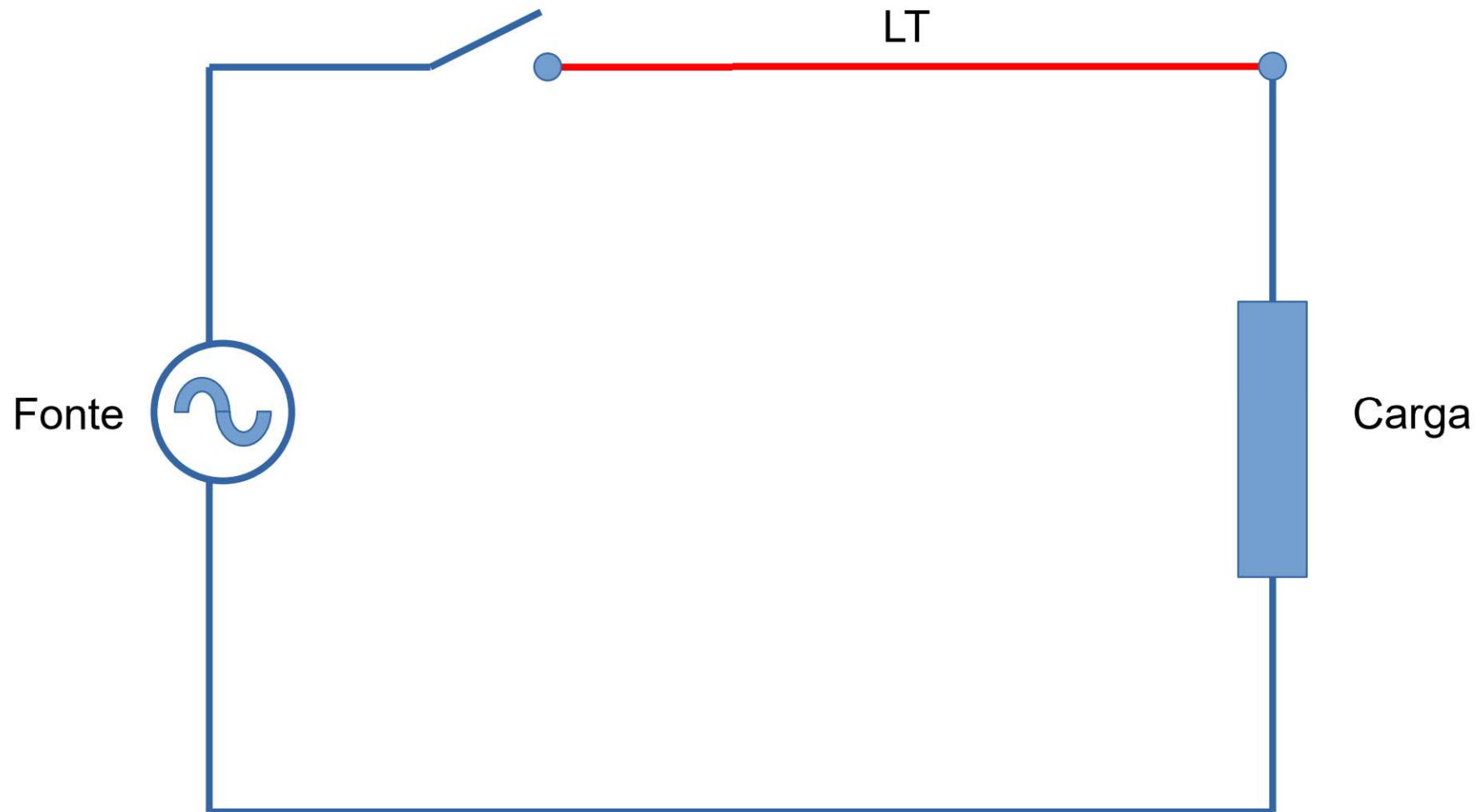


Como a Linha de Transmissão se comporta do ponto de vista elétrico?



Como a Linha de Transmissão se comporta do ponto de vista elétrico?

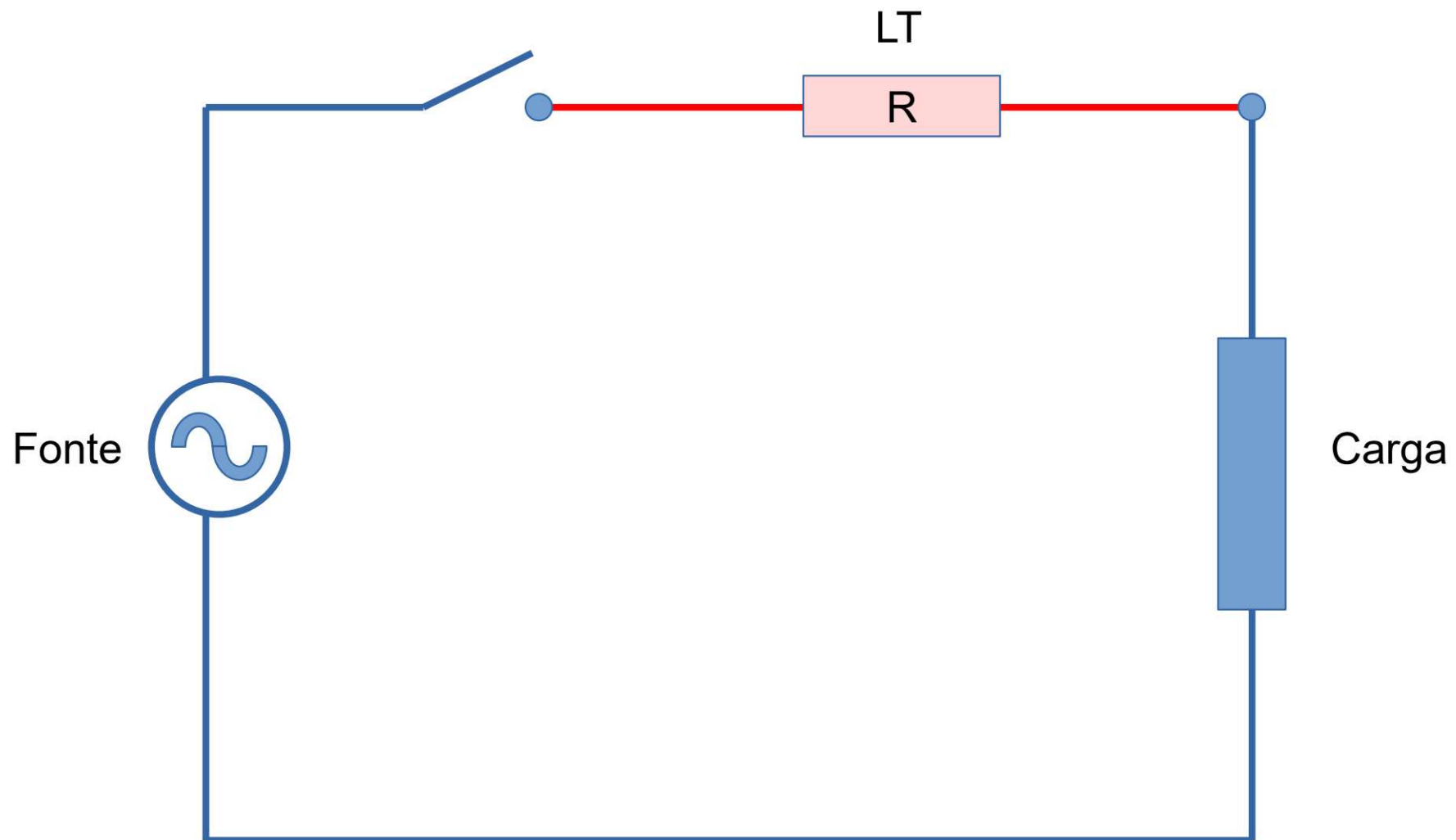
Modelo do fio ideal (rigorosamente, 3 fios):





Como a Linha de Transmissão se comporta do ponto de vista elétrico?

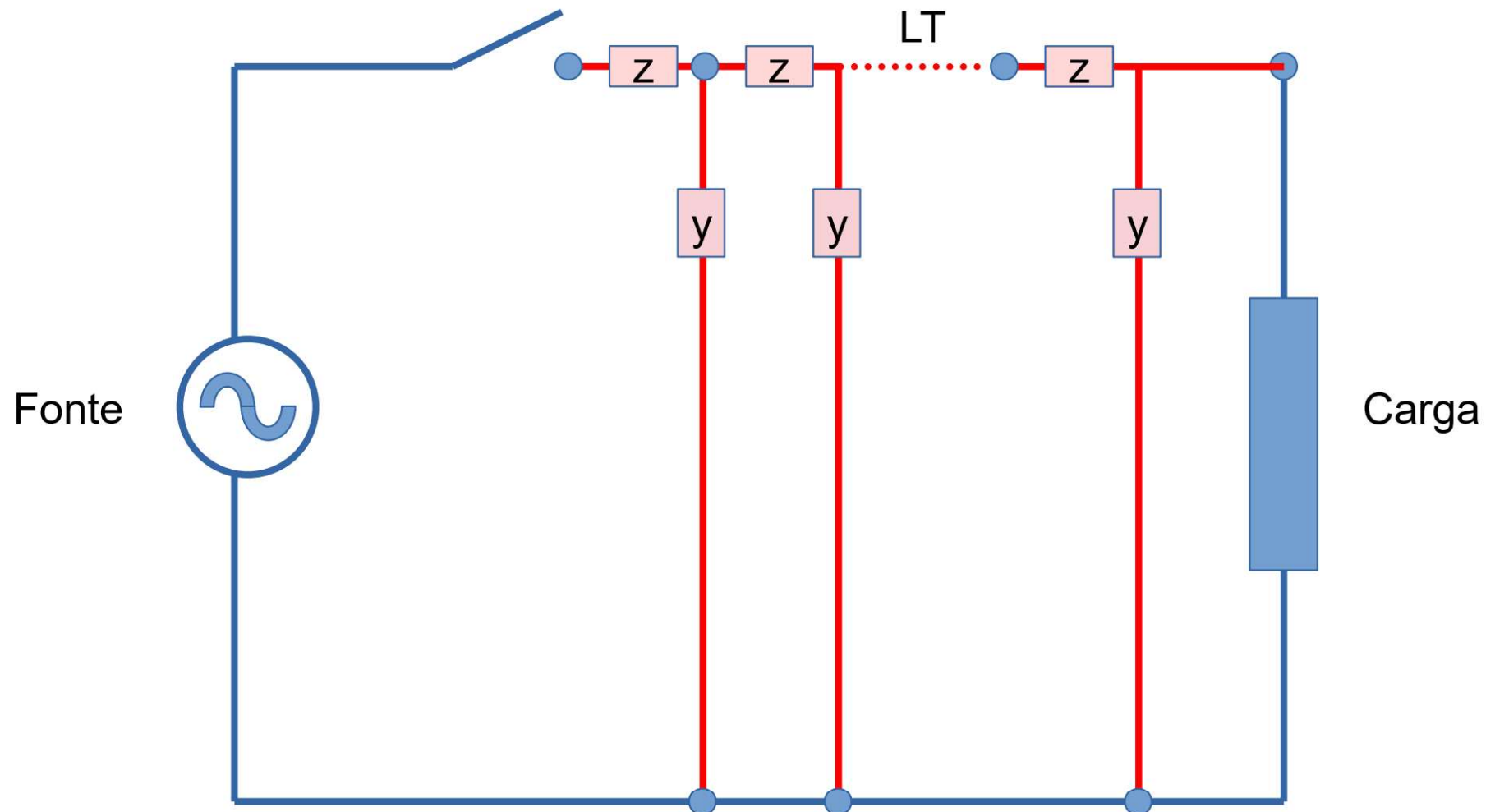
Modelo do fio com resistência (rigorosamente, 3 fios):





Como a Linha de Transmissão se comporta do ponto de vista elétrico?

Modelo Real (Cada segmento tem $L = 1$ m, com z em Ω/m e y em S/m):





Considerando o sistema trifásico e equilibrado, a impedância série que modela a linha de transmissão é z_1 devendo ter:

- **Resistência** em Série de Sequência Positiva

É inerente aos condutores e se manifesta pelo aquecimento provocado pela passagem de corrente, seja ela contínua ou alternada.

- **Reatância** Série de Sequência Positiva

Quando um condutor é percorrido por corrente elétrica, um campo magnético é gerado ao seu redor. Ocorre que, quando a corrente é alternada, o campo gerado é variável no tempo o que provoca tensões induzidas. A indutância série da linha é a constante que relaciona a tensão induzida na LT com a taxa de variação da corrente.

- **Resultado:** $z_1 = r_1 + jx_1$, sendo usual guardar essas grandezas em Ω/km .



Considerando o sistema trifásico e equilibrado, a admitância em derivação (ou shunt) que modela a linha de transmissão é y_1 devendo ter:

- **Condutância** em Derivação de Sequência Positiva

Ocorre devido à corrente de fuga que eventualmente ocorre entre condutores energizados de uma LT e as torres, via cadeia de isoladores; ou entre parte condutiva de cabos isolados e sua própria blindagem, via isolamento. Nas LTs aéreas, corrente de fuga nos isoladores devido a poluição e corrente de fuga entre condutores energizados (Efeito Corona) devido as condições ambientais. Optamos por **desconsiderar**.

- **Susceptância** em Derivação de Sequência Positiva

Em uma LT aérea energizada são observadas diferenças de potencial entre os condutores de fase e entre estes e a terra, tendo o ar como meio isolante. Essas diferenças de potencial se manifestam fisicamente como um efeito capacitivo.

- **Resultado:** $y_1 = jb_1$, sendo usual guardar essas grandezas em **S/km**.



Resistência em Série

Repetindo: **É inerente aos condutores e se manifesta pelo aquecimento provocado pela passagem de corrente, seja ela contínua ou alternada.**

Tipos de **cabos condutores**:

Material → geralmente alumínio, podendo ter ligas adicionadas ou aço com o intuito de melhorar suas características mecânicas. No passado: **cobre**.
Para resistências iguais: alumínio é mais leve, mais barato e gera menos corona.

Estrutura → o termo cabo significa que os condutores são formados por vários fios ou filamentos. As camadas que formam o cabo são enroladas alternadamente e em direções opostas para garantir um cabo compacto com raios por camada iguais. Esse arranjo é preferido para maiores bitolas porque oferece condutores com maior flexibilidade.

Exemplos → ...



Catálogo Técnico

Condutores Elétricos de Alumínio

Technical Catalogue

Aluminum Electrical Conductors

Condutores de Alumínio (CA)

Composto por fios de alumínio 1350 encordoados em coroas concêntricas.

Condutores de Alumínio com Alma de Aço (CAA)

Composto por uma alma de aço formada de um ou mais fios envolvidos por uma ou mais coroas de fios de alumínio 1350.

Condutores de Alumínio Liga (CAL)

Composto por fios de alumínio liga 6201 encordoados em coroas concêntricas.

Condutores de Alumínio Liga 1120 (CAL 1120)

Composto por fios de alumínio liga 1120 encordoados em coroas concêntricas.

Condutores de Alumínio Reforçados com Alumínio Liga (ACAR)

Composto por uma alma de alumínio liga 6201 formada de um ou mais fios distribuídos, envolvidos por uma ou mais coroas de fios de alumínio 1350.

Condutores de Alumínio Liga com Alma de Aço (CALA)

Composto por uma alma de aço de um ou mais fios, envolvida por uma ou mais coroas de fios de alumínio liga 6201.

Condutores de Alumínio Termorresistente (T-CA)

Composto por fios de alumínio liga termorresistente (TAL) encordoados em coroas concêntricas.

Condutores de Alumínio Termorresistente com Alma de Aço (T-CAA)

Composto por uma alma de aço de um ou mais fios, envolvida por uma ou mais coroas de fios de alumínio liga termorresistente (TAL).

All-Aluminum Conductors (AAC)

Made up of concentric-lay-stranded 1350 aluminum wires.

Aluminum Conductors, Steel Reinforced (ACSR)

Made up of a galvanized steel core of one or more wires surrounded by one or more concentric layers of 1350 aluminum wires.

All-Aluminum Alloy Conductors (AAAC)

Made up of concentric-lay-stranded 6201 aluminum alloy wires.

All-Aluminum Alloy Conductors 1120 (AAAC 1120)

Made up of concentric-lay-stranded 1120 aluminum alloy wires.

Aluminum Conductor, Aluminum Alloy Reinforced (ACAR)

Made up of concentric-lay-stranded 6201 aluminum alloy wires surrounded by concentric-lay-stranded 1350 aluminum wires.

Aluminum Alloy Conductors, Steel Reinforced (AACSR)

Made up of galvanized steel core of one or more wires surrounded by one or more concentric layers of aluminum alloy 6201 wires.

Thermal Resistant Aluminum Conductors (T-AAC)

Made up of concentric-lay-stranded aluminum alloy thermal resistant wires.

Thermal Resistant Aluminum Conductors, Steel Reinforced (T-ACSR)

Made up of a galvanized steel core of one or more wires surrounded by one or more concentric layers of aluminum alloy thermal resistant wires.

Covered Aluminium Cable



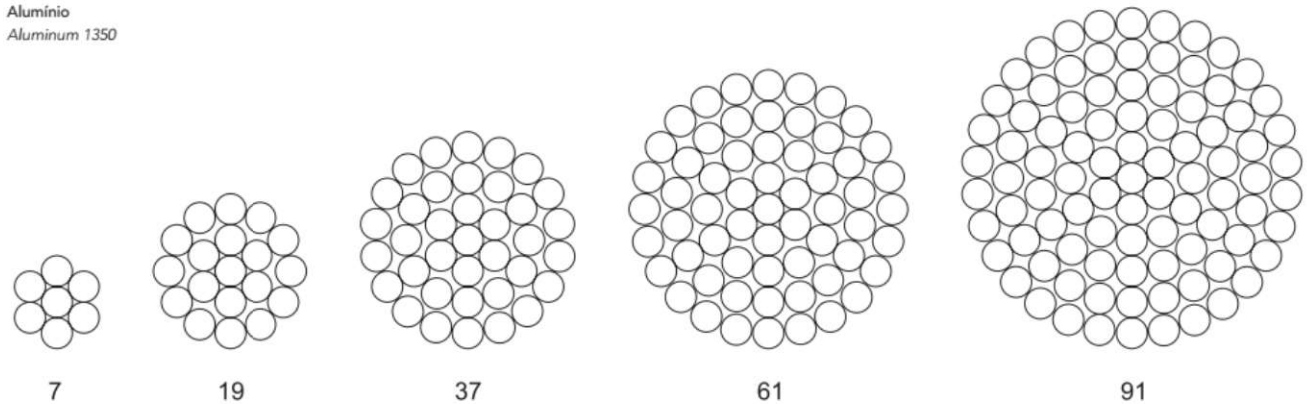
CA - Condutores de Alumínio

AAC - All Aluminum Conductors

CA - Formação Típica | AAC - Typical Stranding

○ Alumínio
Aluminum 1350

Cabo
Peachbell
Rose
Lily
Iris
Pansy
Poppy
Aster
Phlox



Inglês ▾	↔	Português ▾
peachbell	×	peachbell
rose		rosa
lily		lírio
iris		íris
pansy		amor-perfeito
poppy		papoula
aster		áster
phlox		flox



CAA - Condutores de Alumínio com Alma de Aço

ACSR - Aluminum Conductors, Steel Reinforced

CAA - Formação Típica | ACSR - Typical Stranding

○ Alumínio
Aluminum 1350

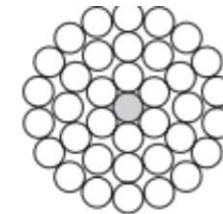
● Aço
Steel



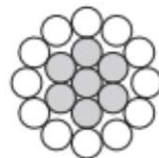
6 Al - 1 Aço
6 Al - 1 Steel



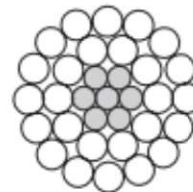
18 Al - 1 Aço
18 Al - 1 Steel



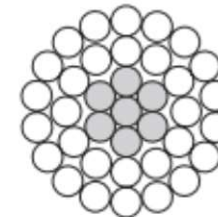
36 Al - 1 Aço
36 Al - 1 Steel



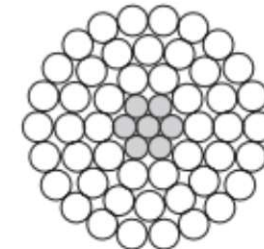
12 Al - 7 Aço
12 Al - 7 Steel



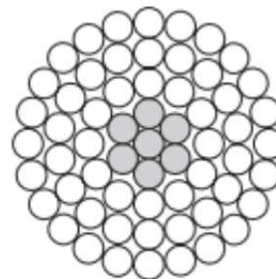
26 Al - 7 Aço
26 Al - 7 Steel



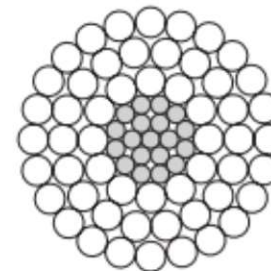
30 Al - 7 Aço
30 Al - 7 Steel



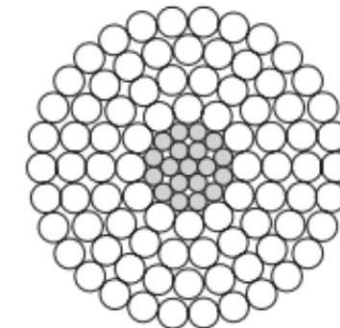
45 Al - 7 Aço
45 Al - 7 Steel



54 Al - 7 Aço
54 Al - 7 Steel



54 Al - 19 Aço
54 Al - 19 Steel



84 Al - 19 Aço
84 Al - 19 Steel



CAA - Condutores de Alumínio com Alma de Aço

ACSR - Aluminum Conductors, Steel Reinforced

Cabo

Turkey

Thrush

Swan

Swallow

Sparrow

Robin

Raven

Quail

Pigeon

Inglês ▾



Português ▾

Turkey

Thrush

Swan

Swallow

Sparrow

Robin

Raven

Quail

Pigeon



Peru

Tordo

Cisne

Andorinha

Pardal

Robin

Raven

Codorna

Pombo

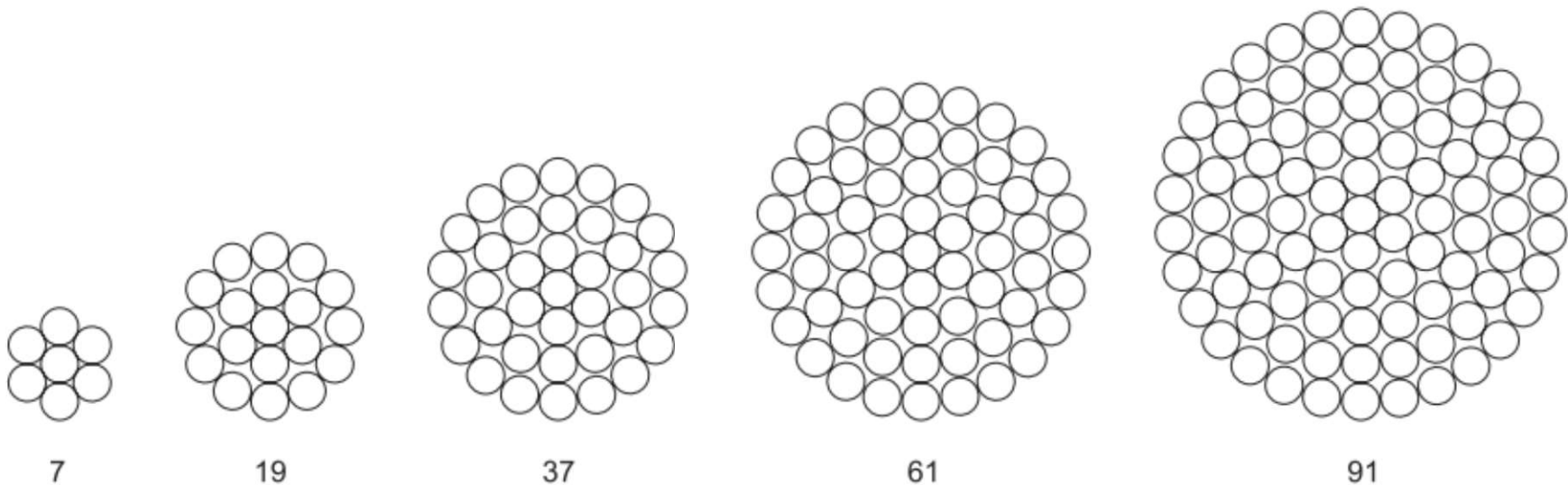


CAL - Condutores de Alumínio Liga e Condutores de Alumínio Liga 1120 (CAL 1120)

AAAC - All-Aluminum Alloy Conductors and All-Aluminum Alloy Conductors 1120 (AAAC 1120)

CAL - Formação Típica | AAAC - Typical Stranding

○ Liga
Alloy 6201





CAL - Condutores de Alumínio Liga e Condutores de Alumínio Liga 1120 (CAL 1120)

AAAC - All-Aluminum Alloy Conductors and All-Aluminum Alloy Conductors 1120 (AAAC 1120)

Cabo	Cabo	Cabo
4 AWG	Akron	Chlorine
63,36 MCM	Alton	Chromium
105,6 MCM	Ames	Fluorine
	Azusa	Helium
	Anaheim	

pt.wikipedia.org > wiki > Akron_(Ohio) ▾

Akron (Ohio) – Wikipédia, a enciclopédia livre

Akron é uma cidade localizada no estado americano do Ohio, no C fundada em 1835, e incorporada em 1865.

População (2010): 199 110 hab. (1 239,35... **Tipo de localida**

[Demografia](#) · [Personalidades locais](#)

Inglês ▾	↔	Português ▾
chlorine	×	cloro
chromium		cromo
fluorine		flúor
helium		hélio



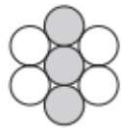
ACAR - Condutores de Alumínio Reforçados com Alumínio Liga

ACAR - Aluminum Conductors, Aluminum Alloy Reinforced

ACAR - Formação Típica | ACAR - Typical Stranding

○ Alumínio
Aluminum 1350

● Liga
Alloy 6201



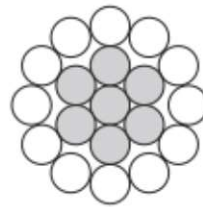
4 - 1350
3 - 6201



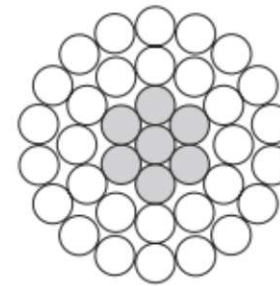
3 - 1350
4 - 6201



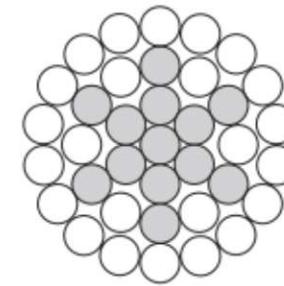
15 - 1350
4 - 6201



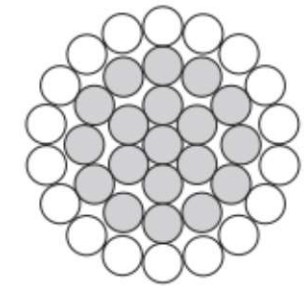
12 - 1350
7 - 6201



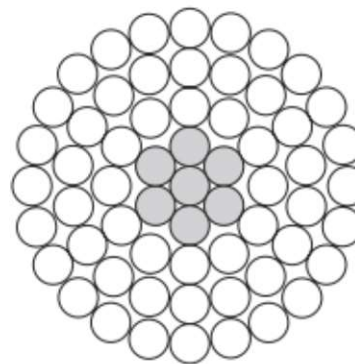
30 - 1350
7 - 6201



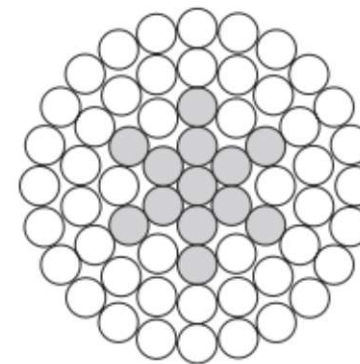
24 - 1350
13 - 6201



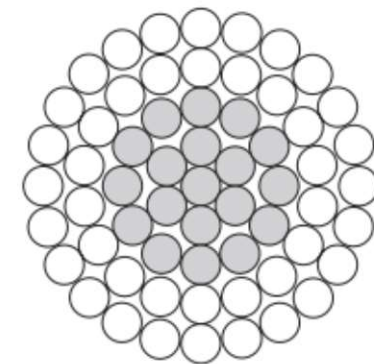
18 - 1350
19 - 6201



54 - 1350
7 - 6201



48 - 1350
13 - 6201



42 - 1350
19 - 6201



ACAR - Condutores de Alumínio Reforçados com Alumínio Liga

ACAR - Aluminum Conductors, Aluminum Alloy Reinforced

AWG/MCM	2750
	3000
	3000
31	3000
4	
49	
2	AWG/MCM

American Wire Gauge (AWG)

CALA - Condutores de Alumínio Liga com Alma de Aço

AACSR - Aluminum Alloy Conductors, Steel Reinforced

T-CA - Condutores de Alumínio Termorresistente e T-CAA - Condutores de Alumínio Termorresistente com Alma de Aço

T-AAC - Thermal Resistant Aluminum Conductors and T-ACSR - Thermal Resistant Aluminum Conductors, Steel Reinforced



Resistência em Série

Resistência efetiva do condutor →

$$R = \frac{\text{Perda Ativa}}{|I|^2} \Omega$$

Resistência para Corrente Contínua (Rcc) →

$$R_{CC} = \frac{\rho l}{A} \Omega$$

No SI:

ρ é a resistividade do material em $\Omega \cdot m$;

l é o comprimento em m; e

A é a área da seção transversal em m^2 .

A resistividade é fornecida tomando como referência alguma temperatura, de modo que o valor calculado será válido nessa temperatura de referência.

Além disso, essa expressão vale para um condutor sólido.



Resistência em Série

Resistência para Corrente Contínua (R_{cc}) → Resistividade

A referência internacional de resistividade ou condutividade é o Cobre Temperado ($\rho = 1.72 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$). Os cabos que são comercializados têm sua condutividade escrita em função dessa referência.

Por exemplo:

Cabos de cobre comercializados têm 97.3% da condutividade da referência;
Cabos de alumínio por sua vez têm 61%.

Como dados para consultas:

Cobre comercializado ($20^\circ C$) → $\rho = 1.77 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$

Alumínio comercializado ($20^\circ C$) → $\rho = 2.8261 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$ (Stevenson)

Na Internet: $\rho = 2.65 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$ (creio que seja puro)

Aço ($20^\circ C$) → $\rho = 13.8 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$ (observe a diferença...)



Resistência em Série

Resistência para Corrente Contínua (R_{cc}) → Resistividade

Outra referência:

Tabela 2: Características físicas de alguns materiais.

	Condutividade IACS (%)	Resistividade ($\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$)	Coefficiente de variação da resistência ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)	Massa específica (g/cm^3)
Alumínio 1350	61,0	0,028264	0,00403	2,705
Alumínio liga 6201	52,5	0,032840	0,00347	2,690
Cobre duro comercial	97,0	0,017775	0,00381	8,89
Cobre padrão IACS	100,0	0,017241	0,00393	8,89
Aço	-	0,17	-	7,9

Cálculo elétrico de linhas de transmissão - Notas de aula

© Carlos Kleber da Costa Arruda*
CEFET-RJ



Resistência em Série

Resistência para Corrente Contínua (R_{cc}) → Fator de correção: k_e

O processo de enrolamento das camadas que formam o cabo usando sentidos alternados faz com que o comprimento dos fios seja ligeiramente maior que o efetivo comprimento do cabo. Essa diferença é da ordem de 1-2%, sendo referenciada por efeito do enrolamento ou spiraling: $k_e = [1.01-1.02]$.

A resistência CC fornecida nos catálogos de fabricantes considera k_e .





Resistência em Série

Resistência para Corrente Contínua (Rcc) → Exemplos de Catálogo

Cabo	AWG/MCM	Área	Formação, Número e Diâmetro dos Fios
		mm ²	Nº x mm
Peachbell	6	13,21	7 x 1,55
Rose	4	21,12	7 x 1,96
Lily	3	26,61	7 x 2,20

Diâmetro Nominal do Cabo	Massa Linear	RMC	Resistência Elétrica CC a 20°C	Capacidade de Corrente 75°C
mm	Kg/Km	kN	Ω/km	A
4,65	36,42	2,50	2,1754	116
5,88	58,23	3,91	1,3605	155
6,60	73,36	4,85	1,0798	179

Para uma LT CC, restaria apenas adequar a temperatura!



Resistência em Série

Resistência para Corrente Contínua (R_{cc}) → Fator de correção: k_e

Atividade Voluntária 1

Calcular k_e para diferentes condutores comercializados... Avaliar se realmente esse valor é da ordem de 1-2%.

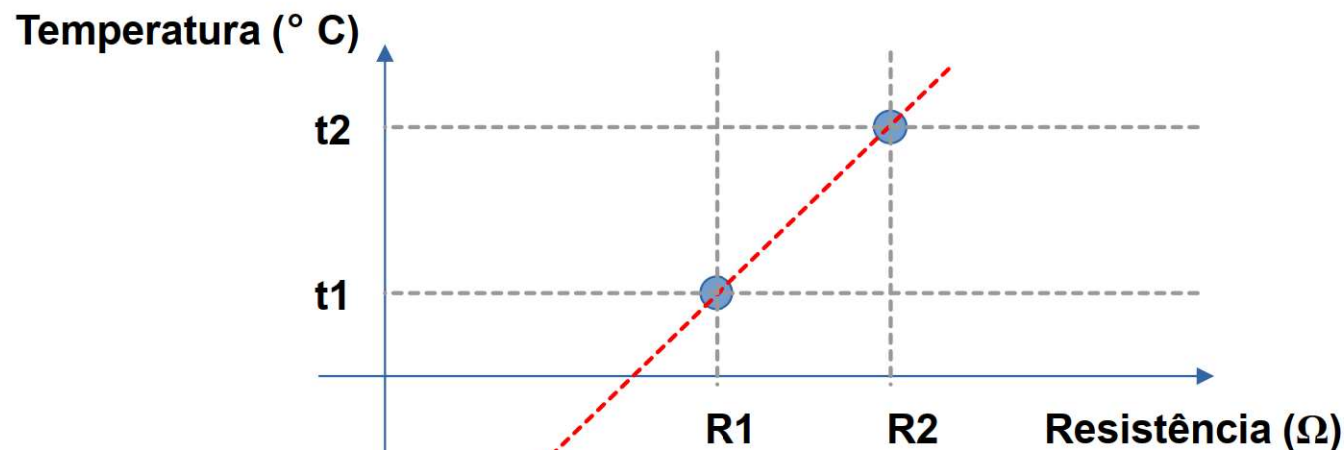
David Facina - 2020.1: hipótese confirmada para o catálogo usado.

Denominação	AWG	mm ²	Diâmetro nominal	Resistência elétrica do catálogo (Ω / km)	Resistência elétrica calculada (Ω / km)	k_e (%)
Peachbell	6	13,30	4,68	2,16762	2,12489	1,971
Rose	4	21,15	5,88	1,36309	1,33622	1,971
Iris	2	33,62	7,41	0,85750	0,84060	1,971
Pansy	1	42,41	8,34	0,67977	0,66638	1,970
Poppy	1/0	53,52	9,36	0,53866	0,52805	1,971
Aster	2/0	67,44	10,50	0,42748	0,41905	1,971



Resistência em Série

Resistência para Corrente Contínua (R_{cc}) → Fator de correção: k_t
Estamos falando em temperatura do cabo.



$$\frac{R_1}{t_1 - T} = \frac{R_2}{t_2 - T}$$

$$R_2 = \frac{t_2 - T}{t_1 - T} R_1$$

Cobre temperado → $T = -234.5^\circ \text{C}$
Cobre comercializado → $T = -241^\circ \text{C}$
Alumínio comercializado → $T = -228^\circ \text{C}$
Aço → $T = -202.22^\circ \text{C}$



Resistência em Série

Resistência para Corrente Contínua (Rcc) → Fator de correção: kt

Relembrando:
$$R_2 = \frac{t_2 - T}{t_1 - T} R_1$$

Se definirmos $\alpha = 1 / (t_1 - T)$, podemos escrever: $T = t_1 - 1/\alpha$

Assim: $R_2 = R_1 * \alpha * (t_2 - t_1 + 1/\alpha)$

Organizando:
$$R_2 = R_1 * (1 + \alpha * (t_2 - t_1))$$

α é definido como coeficiente de variação da resistência por grau Celsius.

Para o Alumínio, com 20 °C como referência: $\alpha = 1 / (20+228) = 0.00403 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$



Resistência em Série

Resistência para Corrente Alternada (R_{CA})

Em adição aos fatores modificadores da resistência elétrica CC apresentados, no sistema CA se tem o **efeito pelicular** (Skin) como fonte de acréscimo de resistência.

A corrente alternada não se distribui uniformemente na seção transversal do condutor, tendendo a ficar contida na sua superfície. Esse efeito é mais significativo quanto maior é a frequência da corrente alternada e quanto maior é a seção transversal do condutor.



Resistência em Série

Resistência para Corrente Alternada (R_{CA}) → Fator de correção: k_p

Na prática, o fator k_p multiplica R_{cc} para gerar R_{ca} .

A resistência CA fornecida nos catálogos já considera k_e e k_p .

Novamente, resta apenas aplicar a devida correção na temperatura: k_t .

Carga de ruptura (kgf)		Resistência elétrica máxima (ohm/km)		Raio médio geométrico (m)	Reatância		Ampacidade (A)	Bitola AWG ou MCM	Condutor
Classe A	Classe B	CC 20°C	CA-60 Hz 75°C		Indutiva (ohm/km)	Capacitiva (Mohm.km)			
10083	9822	0,0942	0,1122	0,00980	0,3488	0,2107	770	605,0	Duck
7110	6987	0,0891	0,1062	0,00927	0,3530	0,2114	775	636,0	Kingbird
6242	6180	0,0892	0,1063	0,00919	0,3537	0,2119	770	636,0	Swift
10291	10005	0,0896	0,1081	0,00997	0,3475	0,2095	780	636,0	Rook
11427	11067	0,0896	0,1075	0,01021	0,3457	0,2089	790	636,0	Grosbeak



Resistência em Série

Resistência → Exemplo 1 (Stevenson 4.1)

Tabelas com características elétricas do condutor AAC Marigold listam $R_{CC} = 0.01558 \, \Omega$ por 1000 pés na temperatura 20°C e $R_{CA} = 0.09560 \, \Omega/\text{mi}$ em 50°C . Trata-se de um cabo com 61 fios e área transversal de 1113000 cmil. Pede-se:

- a) Verifique R_{CC} , supondo que houve um acréscimo de 2% devido ao enrolamento do cabo;
- b) Calcule a razão R_{CA}/R_{CC} para esse exemplo quando $t = 50^\circ \text{C}$;

Reescrevendo com SI:

Tabelas com características elétricas do condutor AAC Marigold listam **$R_{CC} = 0.0511 \, \Omega/\text{km}$** na temperatura 20°C e **$R_{CA} = 0.0594 \, \Omega/\text{km}$** em 50°C . Trata-se de um cabo com 61 fios e área transversal de **$563.957 \, \text{mm}^2$** . Pede-se:

- a) Verifique R_{CC} , supondo que houve um acréscimo de 2% devido ao enrolamento do cabo;
- b) Calcule a razão R_{CA}/R_{CC} para esse exemplo quando $t = 50^\circ \text{C}$;



Tabelas com características elétricas do condutor AAC Marigold listam $R_{cc} = 0.0511 \Omega/\text{km}$ na temperatura 20°C e $R_{ca} = 0.0594 \Omega/\text{km}$ em 50°C . Trata-se de um cabo com 61 fios e área transversal de **563.957 mm²**. Pede-se:

- a) Verifique R_{cc} , supondo que houve um acréscimo de 2% devido ao enrolamento do cabo;
- b) Calcule a razão R_{ca}/R_{cc} para esse exemplo quando $t = 50^\circ \text{C}$;

Resposta:

a) A resposta procurada é obtida pela expressão: $R_{cc} = 1.02 * \rho * L / A$

A resistividade do alumínio é conhecida: $\rho = 2.8261 * 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$

Temos: $R_{cc} = (1.02 * 2.8261 * 10^{-8} * 1000) / (563.957 * 10^{-6})$

Logo:

$$R_{cc} = 0.0511 \Omega/\text{km}$$



Tabelas com características elétricas do condutor AAC Marigold listam $R_{cc} = 0.0511 \Omega/\text{km}$ na temperatura 20°C e $R_{ca} = 0.0594 \Omega/\text{km}$ em 50°C . Trata-se de um cabo com 61 fios e área transversal de **563.957 mm**. Pede-se:

- a) Verifique R_{cc} , supondo que houve um acréscimo de 2% devido ao enrolamento do cabo;
- b) Calcule a razão R_{ca}/R_{cc} para esse exemplo quando $t = 50^\circ \text{C}$;

Resposta:

b) Temos: $R_{cc} 50^\circ\text{C} = k_t * R_{cc} 20^\circ\text{C}$

Com $k_t = (50 + 228) / (20 + 228) = 1.1210$

Logo:

$R_{cc} 50^\circ\text{C} = 1.1210 * 0.0511 = 0.0573 \Omega/\text{km}$

A razão procurada é o próprio $k_p = R_{ca} 50^\circ\text{C} / R_{cc} 50^\circ\text{C}$:

$$k_p = 1.0366$$



Resistência em Série

Resistência → Exemplo 2

Tomando como referência os dados fornecidos a seguir para o cabo CA Peachbell, calcule:

- ke usado para obter Rcc 20°C fornecido.
- kt necessário para corrigir Rcc 20°C para Rcc 75°C.
- kp usado para calcular Rca 75°C a partir de Rcc 75°C.

Condutor	Bitola	Seção transversal (mm²)	Formação do condutor		Diâmetro nominal condutor (mm)	Peso nominal (kg/km)	Carga de ruptura (kgf)	Resistência elétrica (ohm/km)		Raio médio geométrico (m)	Reatância		Ampacidade (A)
	AWG ou kcmil		Nº de fios	Diâmetro (mm)				CC 20°C	CA-60 Hz 75°C		Indutiva (ohm/km)	Capacitiva (Mohm.km)	
Peachbell	6	13,28	7	1,554	4,66	36,6	256	2.1638	2,6440	0,00169	0,4813	0,2893	116



Resposta do Exemplo 2

a) k_e usado para obter R_{cc} 20°C fornecido.

Valor fornecido $\rightarrow R_{cc}$ 20°C = 2.1638 Ω /km

Valor calculado para 20°C sem considerar k_e :

$$R_{cc}' 20^\circ\text{C} = (2.8261 \cdot 10^{-8} \cdot 1000) / (13.28 \cdot 10^{-6}) = 2.1281 \Omega/\text{km}$$

$$\text{Temos: } R_{cc} 20^\circ\text{C} = k_e \cdot R_{cc}' 20^\circ\text{C}$$

$$k_e = 2.1638 / 2.1281 = 1.0168$$

Condutor	Bitola	Seção transversal (mm²)	Formação do condutor		Diâmetro nominal condutor (mm)	Peso nominal (kg/km)	Carga de ruptura (kgf)	Resistência elétrica (ohm/km)		Raio médio geométrico (m)	Reatância		Ampacidade (A)
	AWG ou kcmil		Nº de fios	Diâmetro (mm)				CC 20°C	CA-60 Hz 75°C		Indutiva (ohm/km)	Capacitiva (Mohm.km)	
Peachbell	6	13,28	7	1,554	4,66	36,6	256	2.1638	2,6440	0,00169	0,4813	0,2893	116



Resposta do Exemplo 2

b) k_t necessário para corrigir R_{cc} 20°C para R_{cc} 75°C.

Temos que: $k_t = (t_2 - T) / (t_1 - T)$

Para o alumínio: $T = -228$ °C. Logo:

$$k_t = (75 + 228) / (20 + 228)$$

$$k_t = 1.2218$$

Condutor	Bitola	Seção transversal (mm²)	Formação do condutor		Diâmetro nominal condutor (mm)	Peso nominal (kg/km)	Carga de ruptura (kgf)	Resistência elétrica (ohm/km)		Raio médio geométrico (m)	Reatância		Ampacidade (A)
	AWG ou kcmil		Nº de fios	Diâmetro (mm)				CC 20°C	CA-60 Hz 75°C		Indutiva (ohm/km)	Capacitiva (Mohm.km)	
Peachbell	6	13,28	7	1,554	4,66	36,6	256	2.1638	2,6440	0,00169	0,4813	0,2893	116



Resposta do Exemplo 2

c) k_p usado para calcular $R_{ca} 75^\circ\text{C}$ a partir de $R_{cc} 75^\circ\text{C}$.

Temos: $R_{cc} 75^\circ\text{C} = k_t * R_{cc} 20^\circ\text{C} \rightarrow R_{cc} 75^\circ\text{C} = 1.2218 * 2.1638 \rightarrow$

$R_{cc} 75^\circ\text{C} = 2.6437 \Omega/\text{km}$

Temos: $R_{ca} 75^\circ\text{C} = k_p * R_{cc} 75^\circ\text{C} \rightarrow k_p = 2.6440 / 2.6437$

$k_p = 1.0001$

Condutor	Bitola	Seção transversal (mm²)	Formação do condutor		Diâmetro nominal condutor (mm)	Peso nominal (kg/km)	Carga de ruptura (kgf)	Resistência elétrica (ohm/km)		Raio médio geométrico (m)	Reatância		Ampacidade (A)
	AWG ou kcmil		Nº de fios	Diâmetro (mm)				CC 20°C	CA-60 Hz 75°C		Indutiva (ohm/km)	Capacitiva (Mohm.km)	
Peachbell	6	13,28	7	1,554	4,66	36,6	256	2.1638	2,6440	0,00169	0,4813	0,2893	116



Resistência em Série

Resistência → Exemplo 3

Tomando como referência os dados fornecidos a seguir para o cabo CA Bluebonnet, calcule:

- ke usado para obter $R_{cc} 20^{\circ}\text{C}$ fornecido.
- kt necessário para corrigir $R_{cc} 20^{\circ}\text{C}$ para $R_{cc} 75^{\circ}\text{C}$.
- kp usado para calcular $R_{ca} 75^{\circ}\text{C}$ a partir de $R_{cc} 75^{\circ}\text{C}$.

Condutor	Bitola	Seção transversal (mm²)	Formação do condutor		Diâmetro nominal condutor (mm)	Peso nominal (kg/km)	Carga de ruptura (kgf)	Resistência elétrica (ohm/km)		Raio médio geométrico (m)	Reatância		Ampacidade (A)
	AWG ou kcmil		Nº de fios	Diâmetro (mm)				CC 20°C	CA-60 Hz 75°C		Indutiva (ohm/km)	Capacitiva (Mohm.km)	
Bluebonnet	3.500,0	1772,94	127	4,216	54,81	4983.9	26549	0.0165	0,0250	0,02125	0,2904	0,1717	2304



Resposta do Exemplo 3

a) k_e usado para obter R_{cc} 20°C fornecido.

Valor fornecido $\rightarrow R_{cc}$ 20°C = 0.0165 Ω /km

Valor calculado para 20°C sem considerar k_e :

$$R_{cc}' 20^\circ\text{C} = (2.8261 * 10^{-8} * 1000) / (1772.94 * 10^{-6}) = 0.0159 \Omega/\text{km}$$

Temos: R_{cc} 20°C = $k_e * R_{cc}' 20^\circ\text{C} \rightarrow$

$$k_e = 0.0165 / 0.0159 = 1.0377$$

Condutor	Bitola	Seção transversal (mm²)	Formação do condutor		Diâmetro nominal condutor (mm)	Peso nominal (kg/km)	Carga de ruptura (kgf)	Resistência elétrica (ohm/km)		Raio médio geométrico (m)	Reatância		Ampacidade (A)
	AWG ou kcmil		Nº de fios	Diâmetro (mm)				CC 20°C	CA-60 Hz 75°C		Indutiva (ohm/km)	Capacitiva (Mohm.km)	
Bluebonnet	3.500,0	1772,94	127	4,216	54,81	4983.9	26549	0.0165	0,0250	0,02125	0,2904	0,1717	2304



Resposta do Exemplo 3

b) k_t necessário para corrigir R_{cc} 20°C para R_{cc} 75°C.

Temos que: $k_t = (t_2 - T) / (t_1 - T)$

Para o alumínio: $T = -228$ °C. Logo:

$$k_t = (75 + 228) / (20 + 228) \rightarrow$$

$$k_t = 1.2218$$

Condutor	Bitola	Seção transversal (mm²)	Formação do condutor		Diâmetro nominal condutor (mm)	Peso nominal (kg/km)	Carga de ruptura (kgf)	Resistência elétrica (ohm/km)		Raio médio geométrico (m)	Reatância		Ampacidade (A)
	AWG ou kcmil		Nº de fios	Diâmetro (mm)				CC 20°C	CA-60 Hz 75°C		Indutiva (ohm/km)	Capacitiva (Mohm.km)	
Bluebonnet	3.500,0	1772,94	127	4,216	54,81	4983.9	26549	0.0165	0,0250	0,02125	0,2904	0,1717	2304



Resposta do Exemplo 3

c) k_p usado para calcular $R_{ca} 75^\circ\text{C}$ a partir de $R_{cc} 75^\circ\text{C}$.

Temos: $R_{cc} 75^\circ\text{C} = k_t * R_{cc} 20^\circ\text{C} \rightarrow R_{cc} 75^\circ\text{C} = 1.2218 * 0.0165 \rightarrow$

$R_{cc} 75^\circ\text{C} = 0.0202 \Omega/\text{km}$

Temos: $R_{ca} 75^\circ\text{C} = k_p * R_{cc} 75^\circ\text{C} \rightarrow k_p = 0.0250 / 0.0202$

$$k_p = 1.2376$$

Condutor	Bitola	Seção transversal (mm²)	Formação do condutor		Diâmetro nominal condutor (mm)	Peso nominal (kg/km)	Carga de ruptura (kgf)	Resistência elétrica (ohm/km)		Raio médio geométrico (m)	Reatância		Ampacidade (A)
	AWG ou kcmil		Nº de fios	Diâmetro (mm)				CC 20°C	CA-60 Hz 75°C		Indutiva (ohm/km)	Capacitiva (Mohm.km)	
Bluebonnet	3.500,0	1772,94	127	4,216	54,81	4983.9	26549	0.0165	0,0250	0,02125	0,2904	0,1717	2304



Resistência em Série

Atividade Voluntária 2

Calcular k_p para diferentes condutores CA comercializados...
Avaliar a relação de k_p com a área do cabo.



Resistência em Série

Resistência → Exemplo 4

Tomando como referência o cabo CAA Duck, calcule:

- a) k_e usado para obter R_{cc} 20°C fornecido.
- b) k_t necessário para corrigir R_{cc} 20°C para R_{cc} 75°C.
- c) k_p usado para calcular R_{ca} 75°C a partir de R_{cc} 75°C.

Os dados estão no próximo slide.

Observe que esse cabo é CAA (ACSR)!



Resistência → Exemplo 4: Dados

Condutor	Bitola	Seção transversal (mm ²)		Formação do condutor				Diâmetro nominal (mm)		Peso nominal (kg/km)			Porcentagem no peso total (%)	
	AWG ou kcmil	Alumínio	Total	Alumínio		Aço		Alma de aço	Total	Alumínio	Aço	Total	Alumínio	Aço
				Nº de fios	Diâmetro (mm)	Nº de fios	Diâmetro (mm)							
Duck	605,0	306,67	346,42	54	2,689	7	2,689	8,07	24,20	849,7	310,5	1160,1	73,2	26,8

Carga de ruptura (kgf)		Resistência elétrica (ohm/km)		Raio médio geométrico (m)	Reatância		Ampacidade (A)	Bitola	Condutor
Classe A	Classe B	CC 20°C	CA-60 Hz 75°C		Indutiva (ohm/km)	Capacitiva (Mohm.km)		AWG ou kcmil	
10075	9802	0,0942	0,1122	0,00980	0,3488	0,2107	859	605,0	Duck



Resposta do Exemplo 4

a) k_e usado para obter R_{cc} 20°C fornecido.

Valor fornecido $\rightarrow R_{cc}$ 20°C = 0.0942 Ω/km

Valor calculado para 20°C sem considerar k_e :

Alumínio $\rightarrow R_{cc1}$ 20°C = $(2.8261 * 10^{-8} * 1000) / (306.67 * 10^{-6})$

R_{cc1} 20°C = 0.0922 Ω/km

Aço $\rightarrow R_{cc2}$ 20°C = $(13.8 * 10^{-8} * 1000) / ((346.42 - 306.67) * 10^{-6})$

R_{cc2} 20°C = 3.4717 Ω/km



Resposta do Exemplo 4

a) k_e usado para obter R_{cc} 20°C fornecido.

Essas resistências estão em paralelo:

$$R_{cc'} 20^\circ\text{C} = (0.0922 * 3.4717) / (0.0922 + 3.4717)$$

$$R_{cc'} 20^\circ\text{C} = 0.0898 \, \Omega/\text{km}$$

Temos: $R_{cc} 20^\circ\text{C} = k_e * R_{cc'} 20^\circ\text{C} \rightarrow$

$$k_e = 0.0942 / 0.0898 = 1.0490$$



Resposta do Exemplo 4

b) k_t necessário para corrigir R_{cc} 20°C para R_{cc} 75°C.

Temos que: $k_t = (t_2 - T) / (t_1 - T)$

Na parte condutiva de alumínio: $T = -228$ °C. Logo:

$$k_{t1} = (75 + 228) / (20 + 228) = 1.2218$$

Na parte condutiva de aço: $T = -202.22$ °C. Logo:

$$k_{t2} = (75 + 202.22) / (20 + 202.22) = 1.2475$$



Resposta do Exemplo 4

c) k_p usado para calcular R_{ca} 75°C a partir de R_{cc} 75°C.

Temos:

Para o Alumínio $\rightarrow R_{cc1}$ 75°C = $k_{t1} * R_{cc1}$ 20°C = $1.2218 * 1.0490 * 0.0922$

R_{cc1} 75°C = 0.1182 Ω /km

Para o Aço $\rightarrow R_{cc2}$ 75°C = $k_{t2} * R_{cc2}$ 20°C = $1.2475 * 1.0490 * 3.4717$

R_{cc2} 75°C = 4.5432 Ω /km

Essas resistências estão em paralelo:

$$R_{cc} \text{ 75°C} = (0.1182 * 4.5432) / (0.1182 + 4.5432) = 0.1152 \text{ } \Omega/\text{km}$$



Resposta do Exemplo 4

c) k_p usado para calcular $R_{ca} 75^\circ\text{C}$ a partir de $R_{cc} 75^\circ\text{C}$.

Temos: $R_{ca} 75^\circ\text{C} = k_p * R_{cc} 75^\circ\text{C} \rightarrow k_p = 0.1122 / 0.1152$

$$k_p = 0.9740$$

Aparentemente, há algo errado!

O procedimento parece correto, mas algum dado de entrada considerado pode estar diferente do que esse fabricante usa...

O exemplo é didático. Nesse caso, prevalece o valor do fabricante pois representa o que foi observado no cabo real.

**Na verdade, o exemplo 5 adiante utiliza uma abordagem melhor...
Considera apenas a parte de alumínio do condutor!**



Resistência em Série

Resistência → **Exemplo 5**

Repetindo o exemplo 4 desconsiderando a alma de aço.

Tomando como referência os dados fornecidos no slide anterior para o cabo CAA Duck, calcule:

- a) k_e usado para obter R_{cc} 20°C fornecido.
- b) k_t necessário para corrigir R_{cc} 20°C para R_{cc} 75°C.
- c) k_p usado para calcular R_{ca} 75°C a partir de R_{cc} 75°C.



Resposta do Exemplo 5

a) k_e usado para obter R_{cc} 20°C fornecido.

Valor fornecido $\rightarrow R_{cc}$ 20°C = 0.0942 Ω/km

Valor calculado para 20°C sem considerar k_e :

$$R_{cc}' 20^\circ\text{C} = (2.8261 * 10^{-8} * 1000) / (306.67 * 10^{-6}) = 0.0922 \Omega/\text{km}$$

Temos: R_{cc} 20°C = $k_e * R_{cc}' 20^\circ\text{C} \rightarrow$

$$k_e = 0.0942 / 0.0922 = 1.0217$$



Resposta do Exemplo 5

b) k_t necessário para corrigir R_{cc} 20°C para R_{cc} 75°C.

Temos que: $k_t = (t_2 - T) / (t_1 - T)$

Logo:

$$k_t = (75 + 228) / (20 + 228) = 1.2218$$



Resposta do Exemplo 5

c) k_p usado para calcular R_{ca} 75°C a partir de R_{cc} 75°C.

Temos: R_{cc} 75°C = $k_t * R_{cc}$ 20°C = $1.2218 * 0.0942 = 0.1151 \Omega/\text{km}$

Lembrando que R_{ca} 75°C = $k_p * R_{cc}$ 75°C $\rightarrow k_p = 0.1122 / 0.1151$

$$k_p = 0.9748$$

O erro persiste! Como efeito colateral bom, ficou claro que o cálculo usando apenas a parte condutiva de Alumínio tem boa precisão!

Próxima versão: fazer esse exemplo com dados de outro fabricante.

O próprio catálogo indica que adota $T = -228^\circ \text{C}$.

Especificações	Fio de alumínio duro (1350-H19)	Fio de cobre duro comercial	IACS (Padrão Internacional de Cobre Recozido)	Fio de aço zincado para alma de cabos de alumínio
Coeficiente de variação da resistência por grau C a 20°C	0,00403	0,00381	0,00393	-



Até agora, os cálculos envolveram estratégias para calcular a resistência correta de um condutor. Foram levados em consideração vários fatores...

Supondo que se tenha o catálogo do fabricante, o usuário precisa acertar o valor de resistência associado ao tipo de corrente da LT: CC ou CA.

Em seguida, precisa aplicar a correção de temperatura para obter a resistência na temperatura de operação da LT.

Mas...

É correto afirmar que a resistência de sequência positiva da LT é igual a resistência do condutor utilizado?



É correto afirmar que a resistência de sequência positiva da LT é igual a resistência do condutor utilizado?

Sim e Não.

Um exemplo pode ajudar...

LTs: Exemplos R



Considere uma LT CA trifásica operando equilibrada com temperatura 65 °C.
Há **1 cond/fase** do tipo Duck. Qual o valor da resistência r_1 da LT?

Condutor	Bitola	Seção transversal (mm ²)		Formação do condutor				Diâmetro nominal (mm)		Peso nominal (kg/km)			Porcentagem no peso total (%)	
	AWG ou kcmil	Alumínio	Total	Alumínio		Aço		Alma de aço	Total	Alumínio	Aço	Total	Alumínio	Aço
				Nº de fios	Diâmetro (mm)	Nº de fios	Diâmetro (mm)							
Duck	605,0	306,67	346,42	54	2,689	7	2,689	8,07	24,20	849,7	310,5	1160,1	73,2	26,8

Carga de ruptura (kgf)		Resistência elétrica (ohm/km)		Raio médio geométrico (m)	Reatância		Ampacidade (A)	Bitola	Condutor
Classe A	Classe B	CC 20°C	CA-60 Hz 75°C		Indutiva (ohm/km)	Capacitiva (Mohm.km)		AWG ou kcmil	
10075	9802	0,0942	0,1122	0,00980	0,3488	0,2107	859	605,0	Duck



Considere uma LT CA trifásica operando equilibrada com temperatura 65 °C. Há **1 cond/fase** do tipo Duck. Qual o valor da resistência r_1 da LT?

Vamos por etapas:

1) Qual a resistência do condutor?

Resistência elétrica (ohm/km)	
CC 20°C	CA-60 Hz 75°C
0,0942	0,1122

$$R_{ca} = 0.1122 * (65 + 228) / (75 + 228) = 0.1122 * 0.9670 = \mathbf{0.1085 \text{ ohm/km}}$$



Considere uma LT CA trifásica operando equilibrada com temperatura 65 °C. Há **1 cond/fase** do tipo Duck. Qual o valor da resistência r_1 da LT?

Vamos por etapas:

2) Qual a matriz de resistências ABC?

Cada fase tem 1 condutor.

Também sabemos que não existe resistência de acoplamento.

Sendo assim:

$$\mathbf{R}_{abc} = \begin{bmatrix} 0.1085 & 0 & 0 \\ 0 & 0.1085 & 0 \\ 0 & 0 & 0.1085 \end{bmatrix} \text{ ohm/km}$$



Considere uma LT CA trifásica operando equilibrada com temperatura 65 °C. Há **1 cond/fase** do tipo Duck. Qual o valor da resistência r_1 da LT?

Vamos por etapas:

3) Qual a matriz de resistências 012?

$$Z_{012} = A^{-1} \cdot Z_{abc} \cdot A$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}$$

Sendo assim:

$$\mathbf{R}_{012} = \begin{bmatrix} 0.1085 & 0 & 0 \\ 0 & 0.1085 & 0 \\ 0 & 0 & 0.1085 \end{bmatrix} \text{ ohm/km}$$



Considere uma LT CA trifásica operando equilibrada com temperatura 65 °C. Há **1 cond/fase** do tipo Duck. Qual o valor da resistência r_1 da LT?

Vamos por etapas:

4) Qual a resistência r_1 da LT?

$r_1 = 0.1085 \text{ ohm/km}$

LTs: Exemplos R



Considere uma LT CA trifásica operando equilibrada com temperatura 65 °C.
Há **2 cond/fase** do tipo Duck. Qual o valor da resistência r_1 da LT?

Condutor	Bitola	Seção transversal (mm ²)		Formação do condutor				Diâmetro nominal (mm)		Peso nominal (kg/km)			Porcentagem no peso total (%)	
	AWG ou kcmil	Alumínio	Total	Alumínio		Aço		Alma de aço	Total	Alumínio	Aço	Total	Alumínio	Aço
				Nº de fios	Diâmetro (mm)	Nº de fios	Diâmetro (mm)							
Duck	605,0	306,67	346,42	54	2,689	7	2,689	8,07	24,20	849,7	310,5	1160,1	73,2	26,8

Carga de ruptura (kgf)		Resistência elétrica (ohm/km)		Raio médio geométrico (m)	Reatância		Ampacidade (A)	Bitola	Condutor
Classe A	Classe B	CC 20°C	CA-60 Hz 75°C		Indutiva (ohm/km)	Capacitiva (Mohm.km)		AWG ou kcmil	
10075	9802	0,0942	0,1122	0,00980	0,3488	0,2107	859	605,0	Duck



Considere uma LT CA trifásica operando equilibrada com temperatura 65 °C. Há **2 cond/fase** do tipo Duck. Qual o valor da resistência r_1 da LT?

Vamos por etapas:

1) Qual a resistência do condutor?

Resistência elétrica (ohm/km)	
CC 20°C	CA-60 Hz 75°C
0,0942	0,1122

$$R_{ca} = 0.1122 * (65 + 228) / (75 + 228) = 0.1122 * 0.9670 = \mathbf{0.1085 \text{ ohm/km}}$$



Considere uma LT CA trifásica operando equilibrada com temperatura 65 °C. Há **2 cond/fase** do tipo Duck. Qual o valor da resistência r_1 da LT?

Vamos por etapas:

2) Qual a matriz de resistências ABC?

Cada fase tem 2 condutores.

Também sabemos que não existe resistência de acoplamento.

Sendo assim:

$$\mathbf{R}_{abc} = \begin{bmatrix} 0.1085/2 & 0 & 0 \\ 0 & 0.1085/2 & 0 \\ 0 & 0 & 0.1085/2 \end{bmatrix} \text{ ohm/km}$$



Considere uma LT CA trifásica operando equilibrada com temperatura 65 °C. Há **2 cond/fase** do tipo Duck. Qual o valor da resistência r_1 da LT?

Vamos por etapas:

3) Qual a matriz de resistências 012?

$$Z_{012} = A^{-1} \cdot Z_{abc} \cdot A$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}$$

Sendo assim:

$$R_{012} = \begin{bmatrix} 0.1085/2 & 0 & 0 \\ 0 & 0.1085/2 & 0 \\ 0 & 0 & 0.1085/2 \end{bmatrix} \text{ ohm/km}$$



Considere uma LT CA trifásica operando equilibrada com temperatura 65 °C. Há **2 cond/fase** do tipo Duck. Qual o valor da resistência r_1 da LT?

Vamos por etapas:

4) Qual a resistência r_1 da LT?

$$r_1 = 0.1085/2 = 0.05425 \text{ ohm/km}$$



★ Visão geral criada por IA 

A conversão da matriz de impedância de fase (Z_{abc}) para a matriz de impedância de sequência (Z_{012}) utiliza a transformação de componentes simétricos, baseada na matriz de Fortescue (A). A relação fundamental é dada por:

$$Z_{012} = A^{-1} \cdot Z_{abc} \cdot A$$

1. Matriz de Transformação (A)

A matriz A transforma componentes de sequência em componentes de fase ($f_{abc} = A \cdot f_{012}$), onde $a = 1 \angle 120^\circ = e^{j\frac{2\pi}{3}}$:

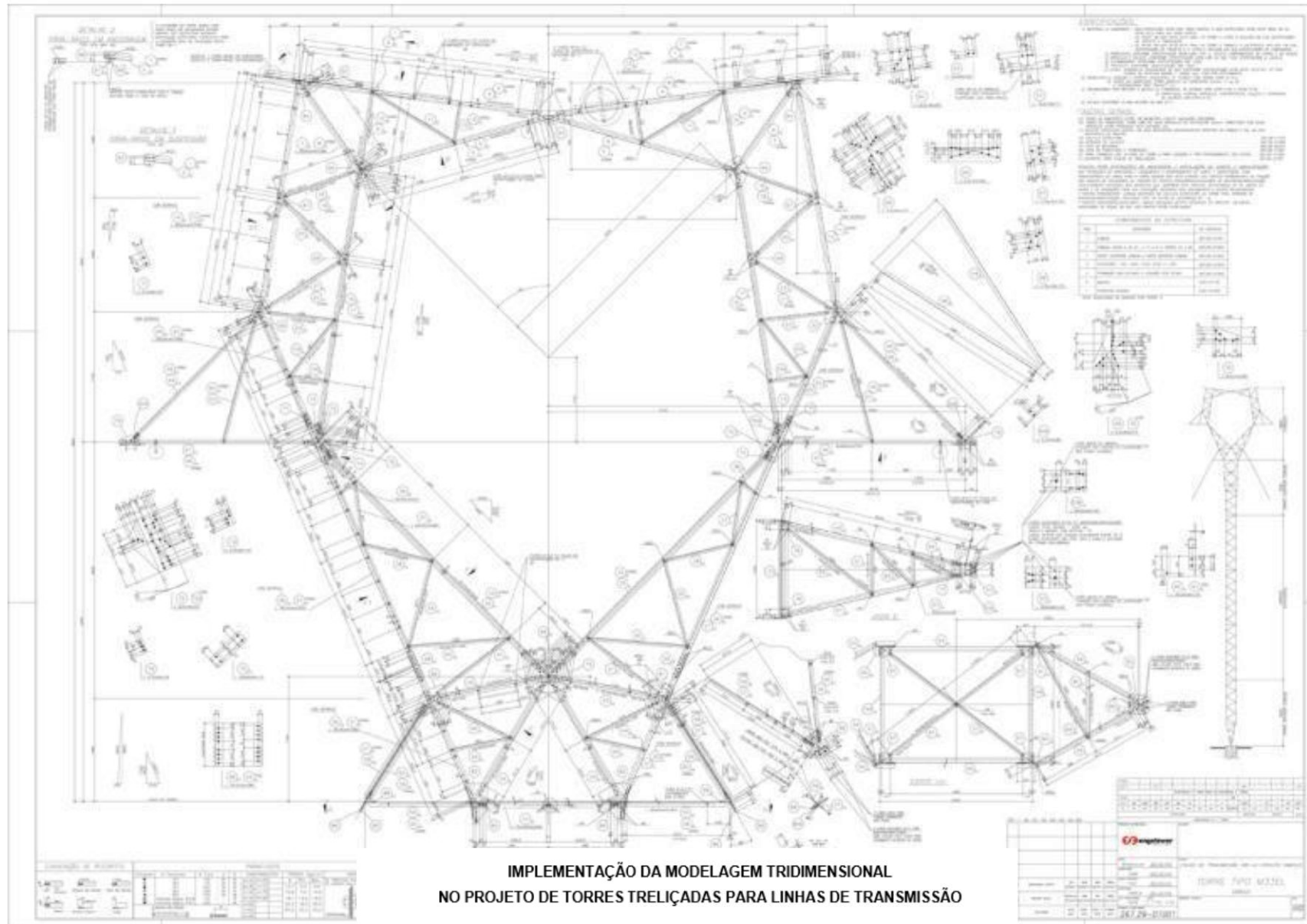
$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}$$

2. Matriz Inversa (A^{-1})

Para converter de fase (abc) para sequência (012), utiliza-se a inversa:

$$A^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix}$$

Curiosidade 1

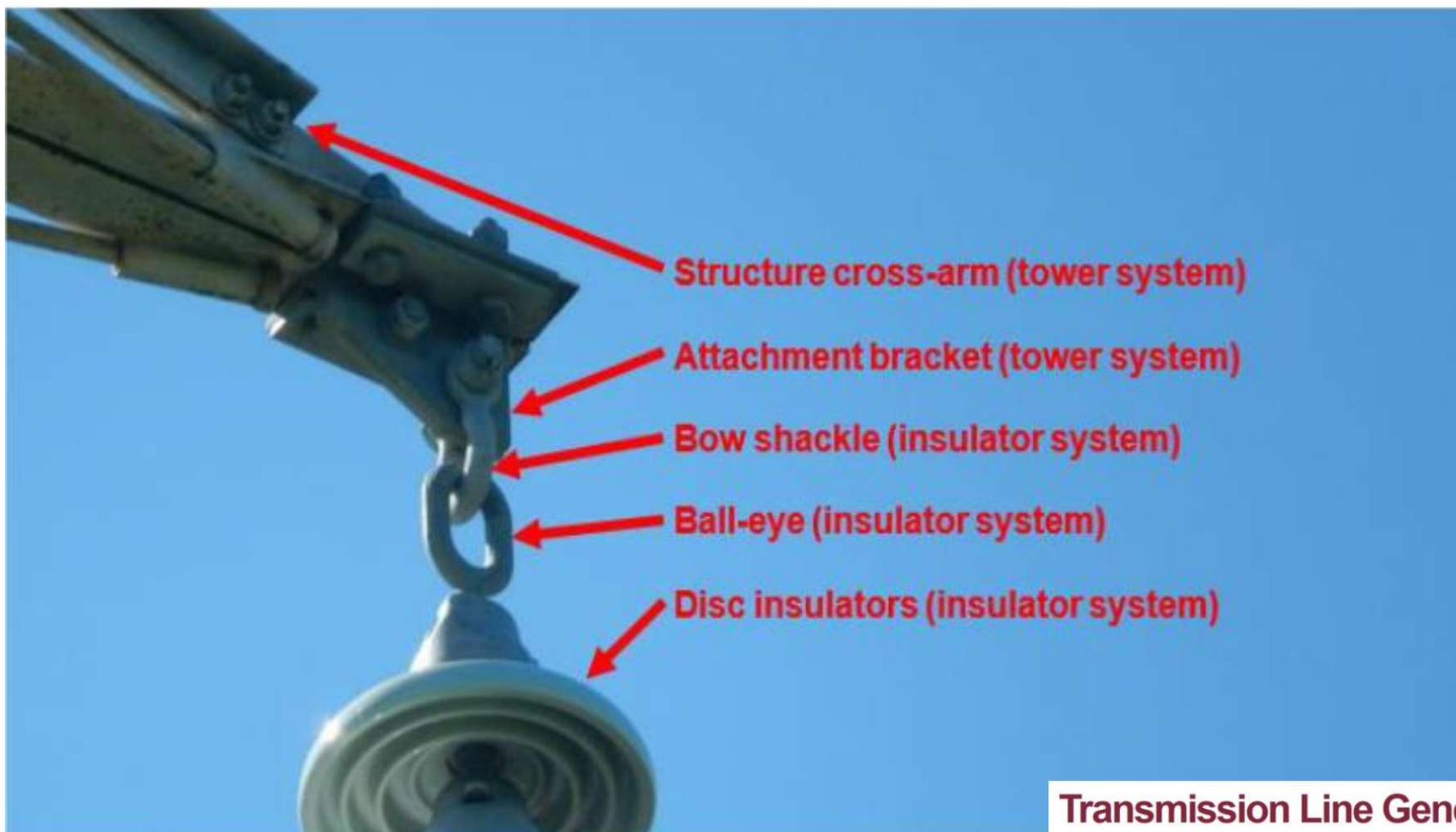


**IMPLEMENTAÇÃO DA MODELAGEM TRIDIMENSIONAL
NO PROJETO DE TORRES TRELIÇADAS PARA LINHAS DE TRANSMISSÃO**

Filipe Guerra Soares
Jean Mark Carvalho Oliveira (*)
Paulo Ricardo R. Liberato da Silva

Pedro Henrique de O. Liberato
Reynaldo Castriota de Mello
Ricardo de O. e B. Perucci
Engetower Engenharia e Consultoria Ltda.

Sírio José Ferreira
Tadeu Rezende
Tiago Corradi Mello



**Transmission Line General
Requirements Including Typical
Overhead Line Structures**

Document Number: 1-03-FR-09

VERSION 1.0 June 2018



Modelo Elétrico de Linhas de Transmissão

Resistência

Helon David de Macêdo Braz
helon@cear.ufpb.br