



UNICAMP

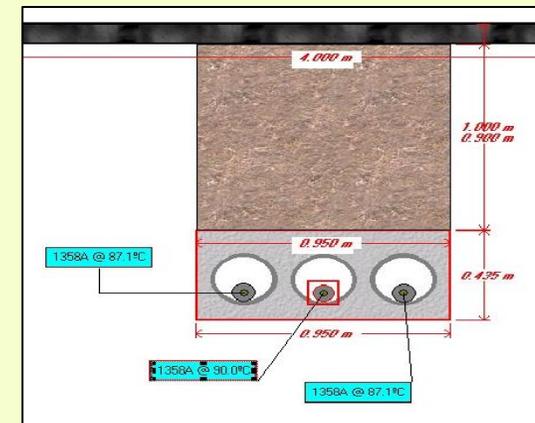


# LINHAS DE TRANSMISSÃO SUBTERRÂNEAS EM HVAC

Disciplina: IT306 - Tópicos em Sistemas de Energia III

Autor: Jesus Enrique Guevara Asorza

Email: [j272296@dac.unicamp.br](mailto:j272296@dac.unicamp.br)



# Sobre o que vamos falar hoje?



- Em que consiste uma linha de transmissão subterrânea e seus elementos.
- Projeto elétrico e mecânico de uma linha de transmissão subterrânea.
- Construção de linhas de transmissão subterrâneas.
- Modelagem para estudos transitórios de linhas de transmissão subterrâneas

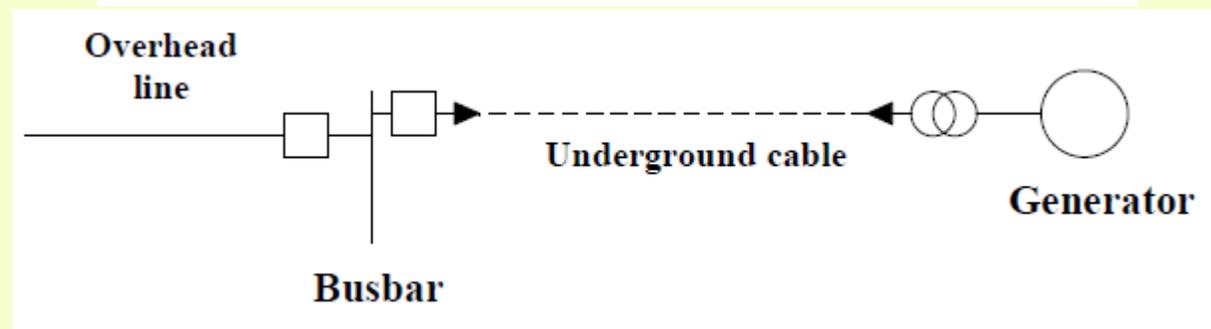
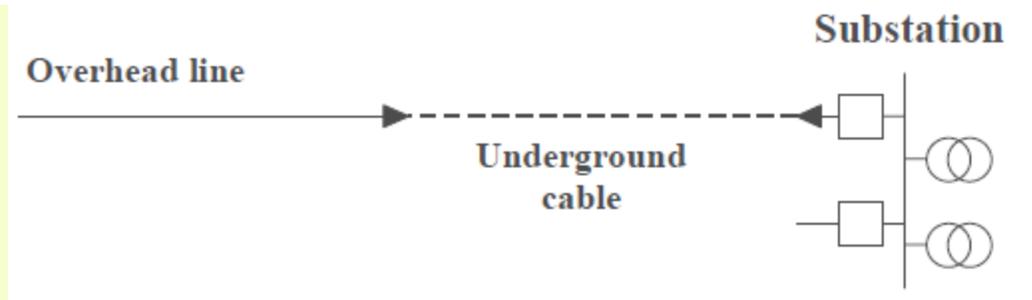
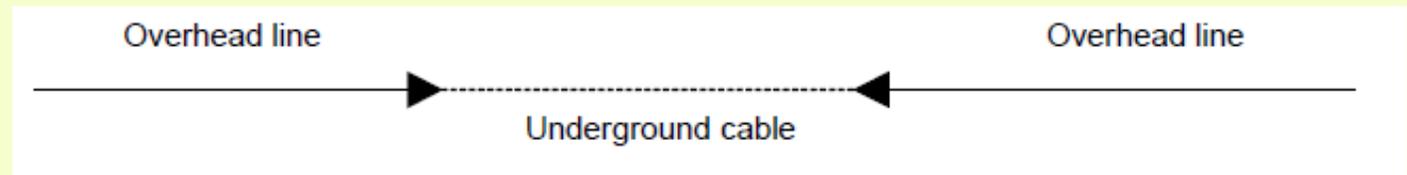
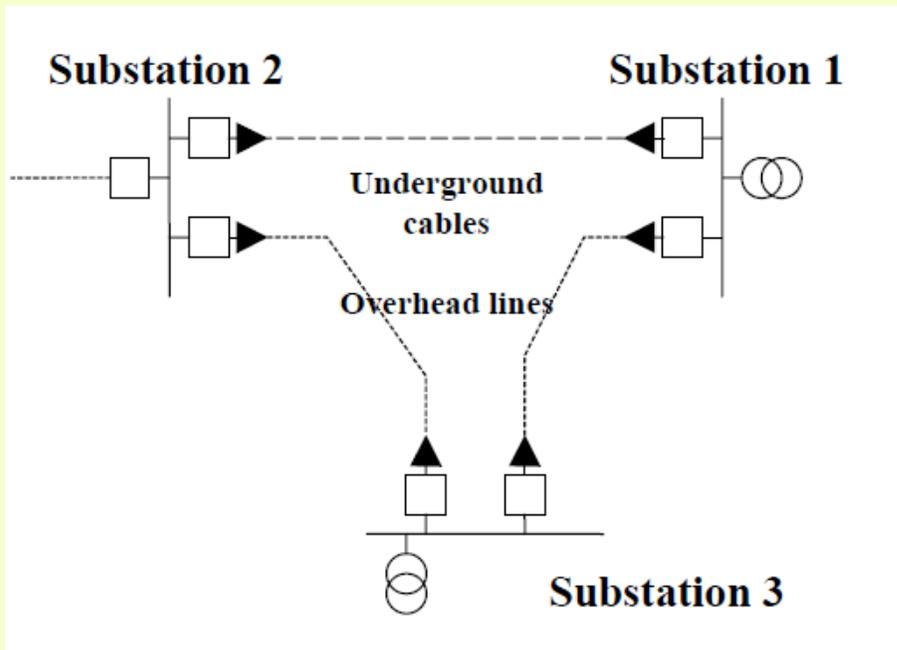
# Sobre o que vamos falar hoje?



- **Em que consiste uma linha de transmissão subterrânea e seus elementos.**
- Projeto elétrico e mecânico de uma linha de transmissão subterrânea.
- Construção de linhas de transmissão subterrâneas.
- Modelagem para estudos transitórios de linhas de transmissão subterrâneas

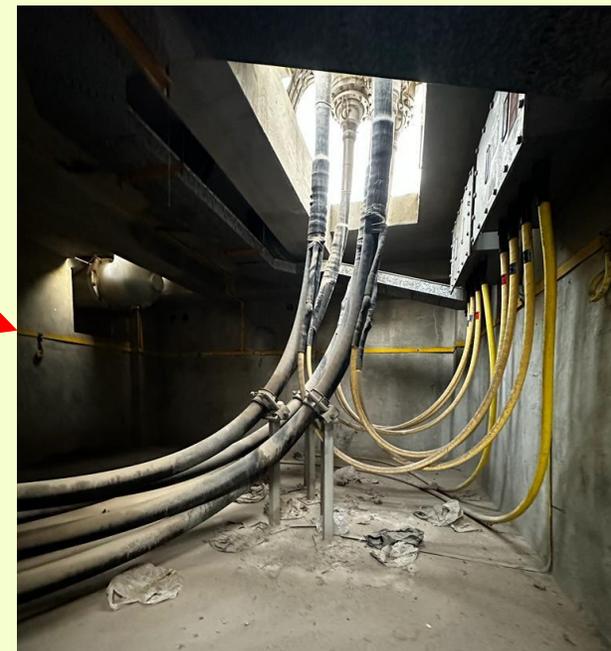
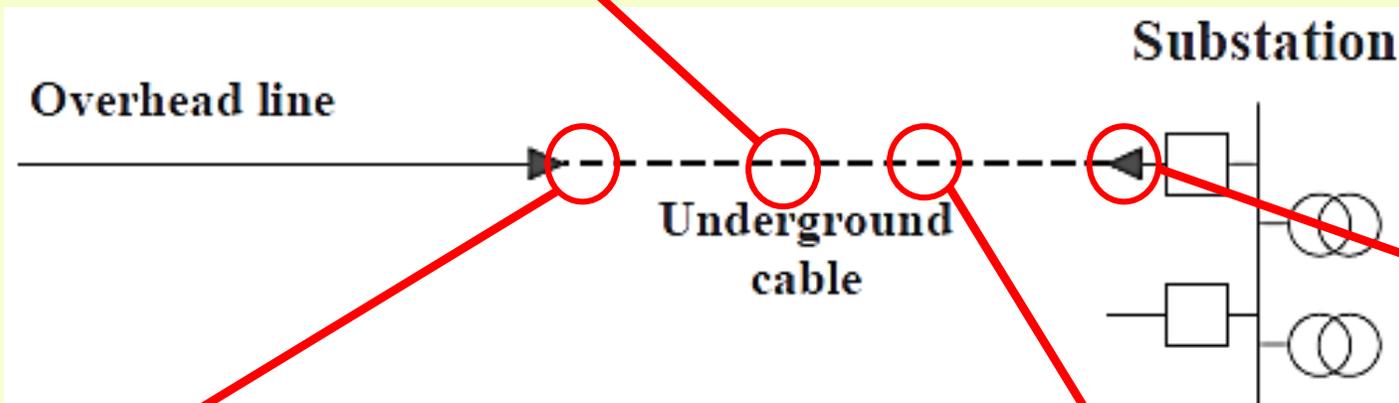
# 1. Linha de transmissão subterrânea

- Solução mais cara. (L.T.S = (5-10)L.T.A em 220 kV).
- Sem espaços para torres ou postes.
- Políticas do país. Sem poluição visual



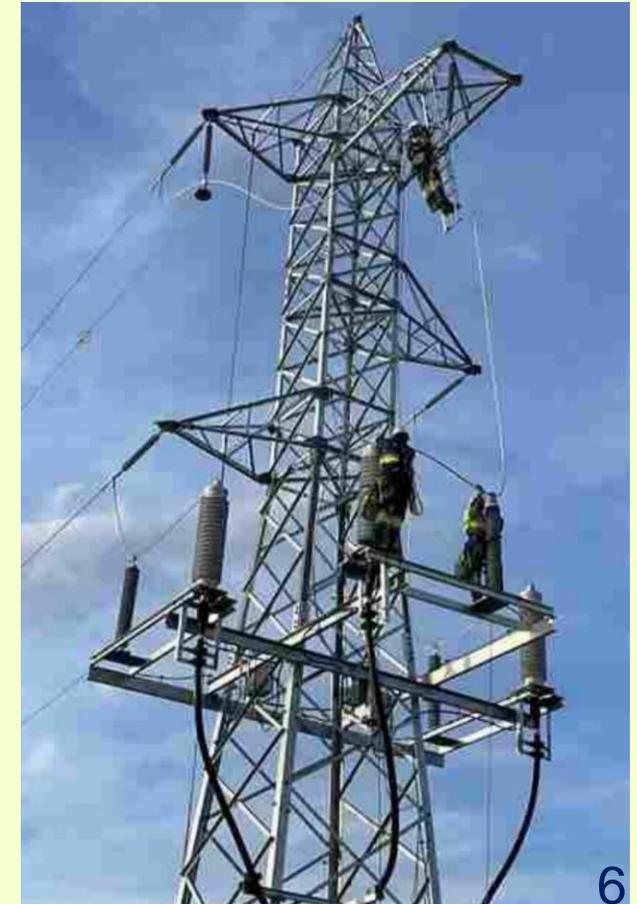
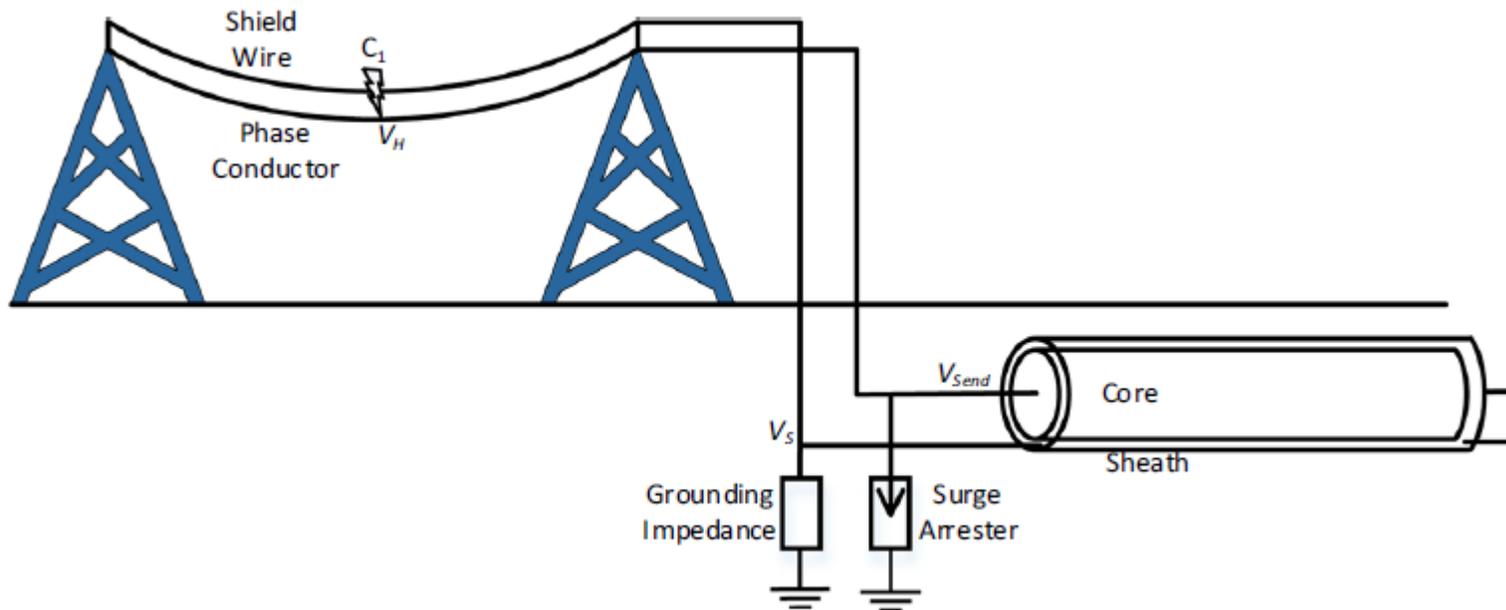


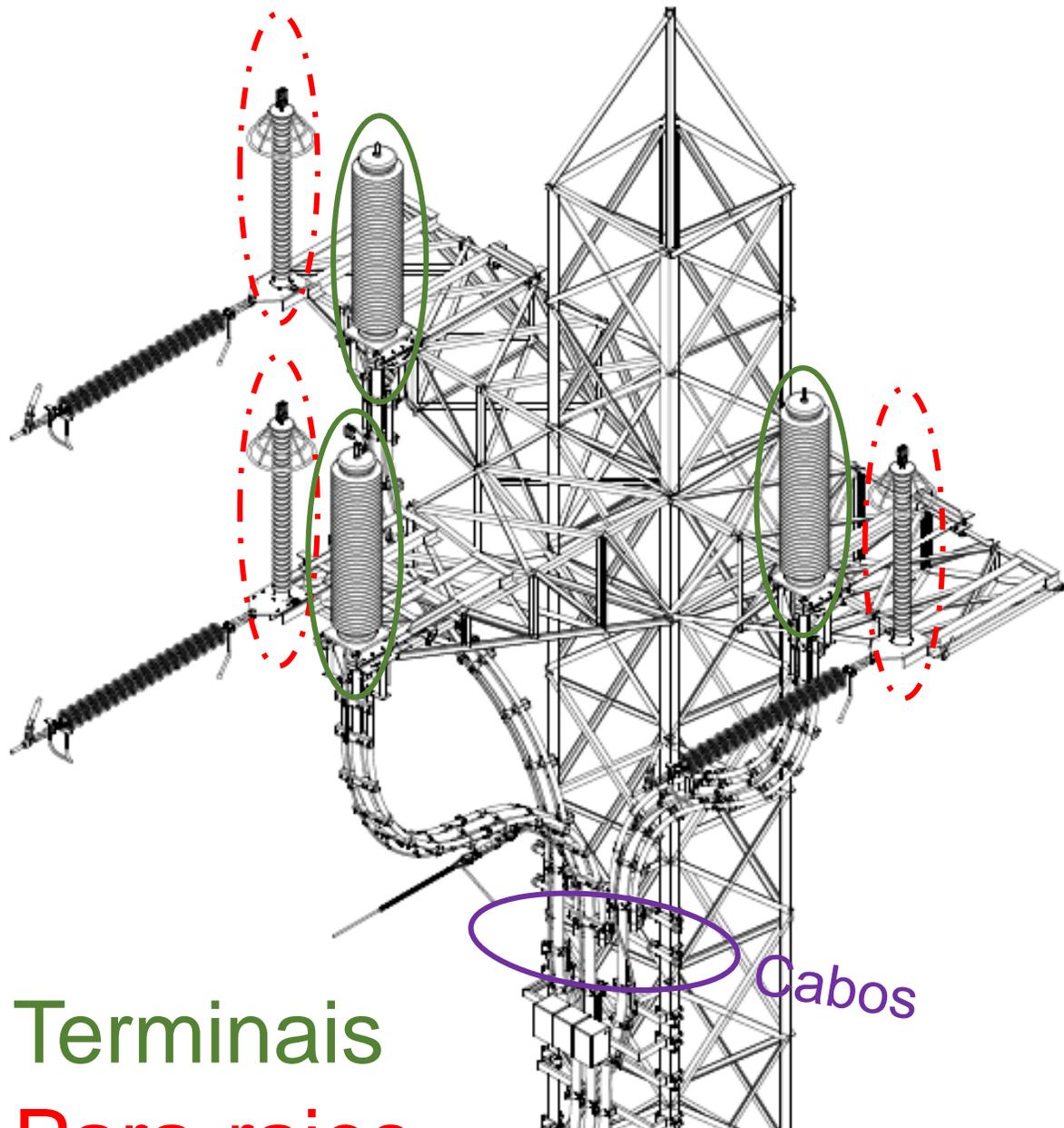
UNICAMP



# 1.1 Torre de transição

No caso de torres/postes de transição, recomenda-se sempre a utilização de para-raios devido à reflexão da onda produzida em caso de energização e/ou descarga atmosférica que se desloca da seção aérea (AAAC, ACAR ou ACSR) em direção à fonte de alimentação. cabo com núcleo de cobre. Seu correto dimensionamento deve ser realizado com estudos em ATP-Draw ou EMTP RV.





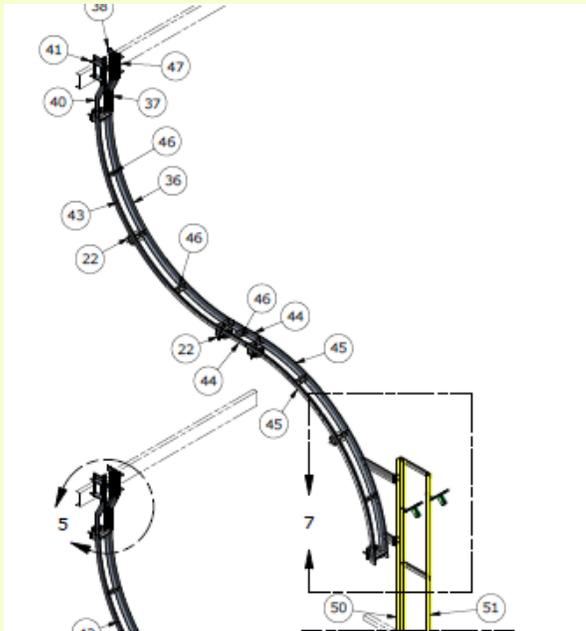
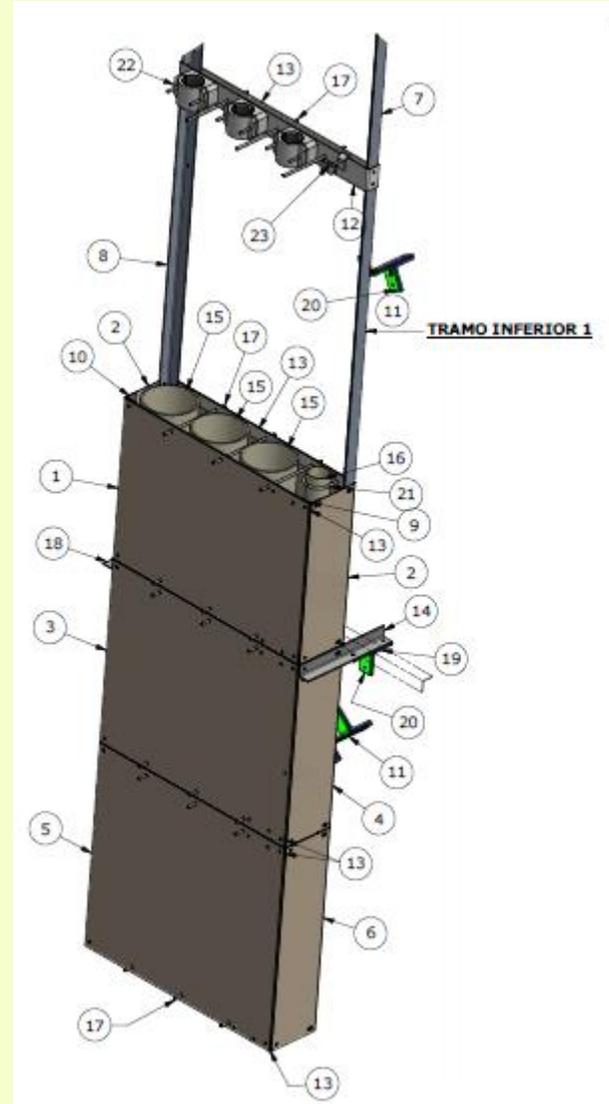
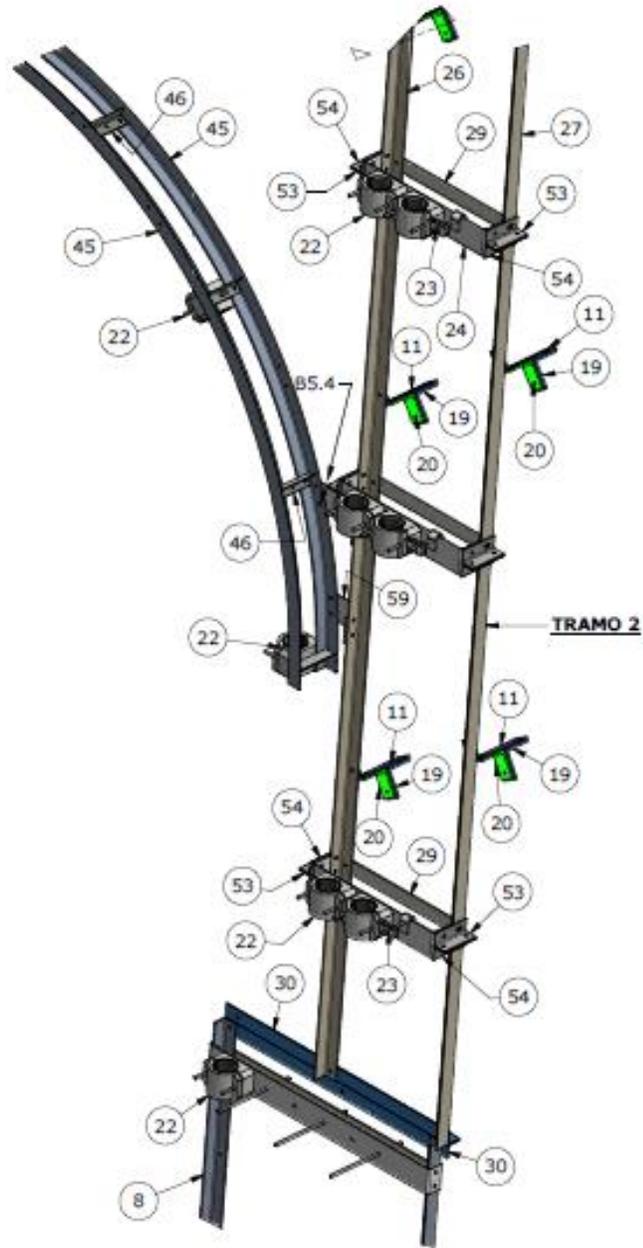
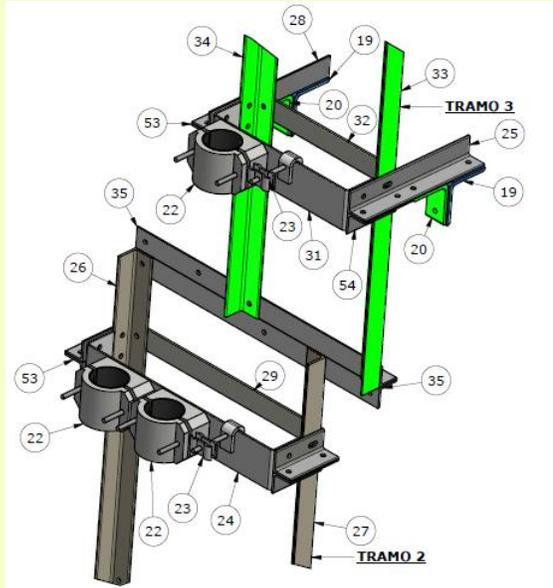
Terminais  
Para-raios

Cabos



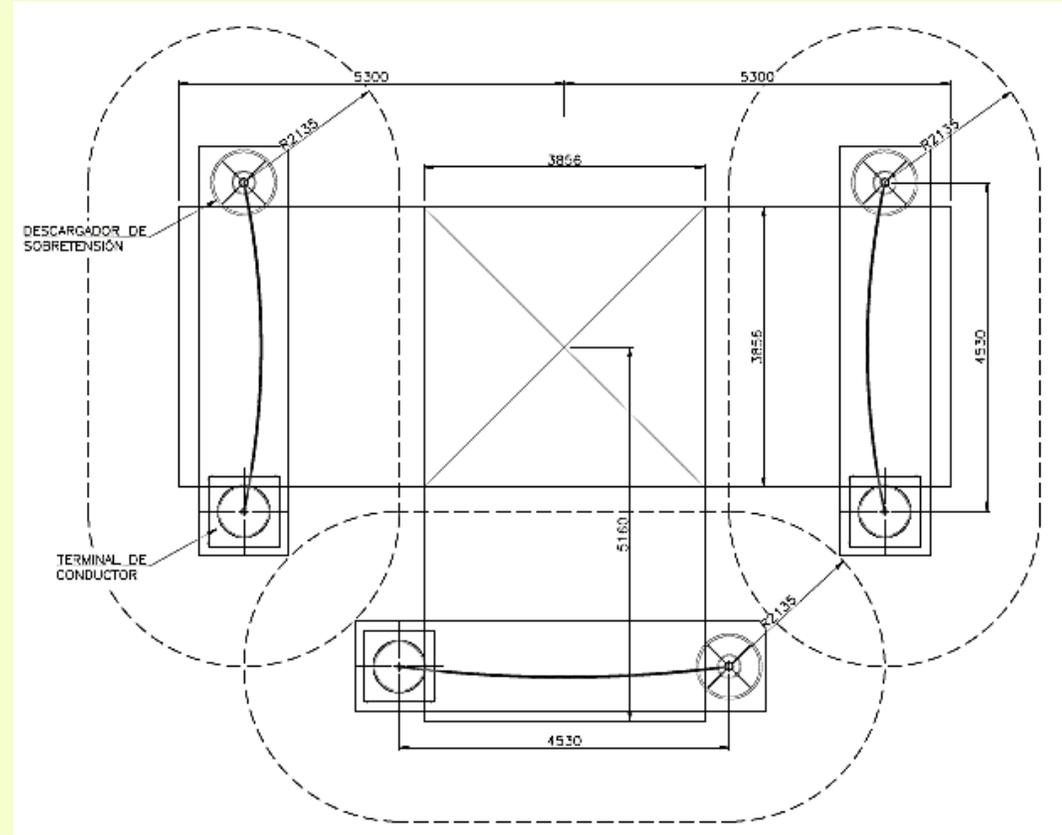
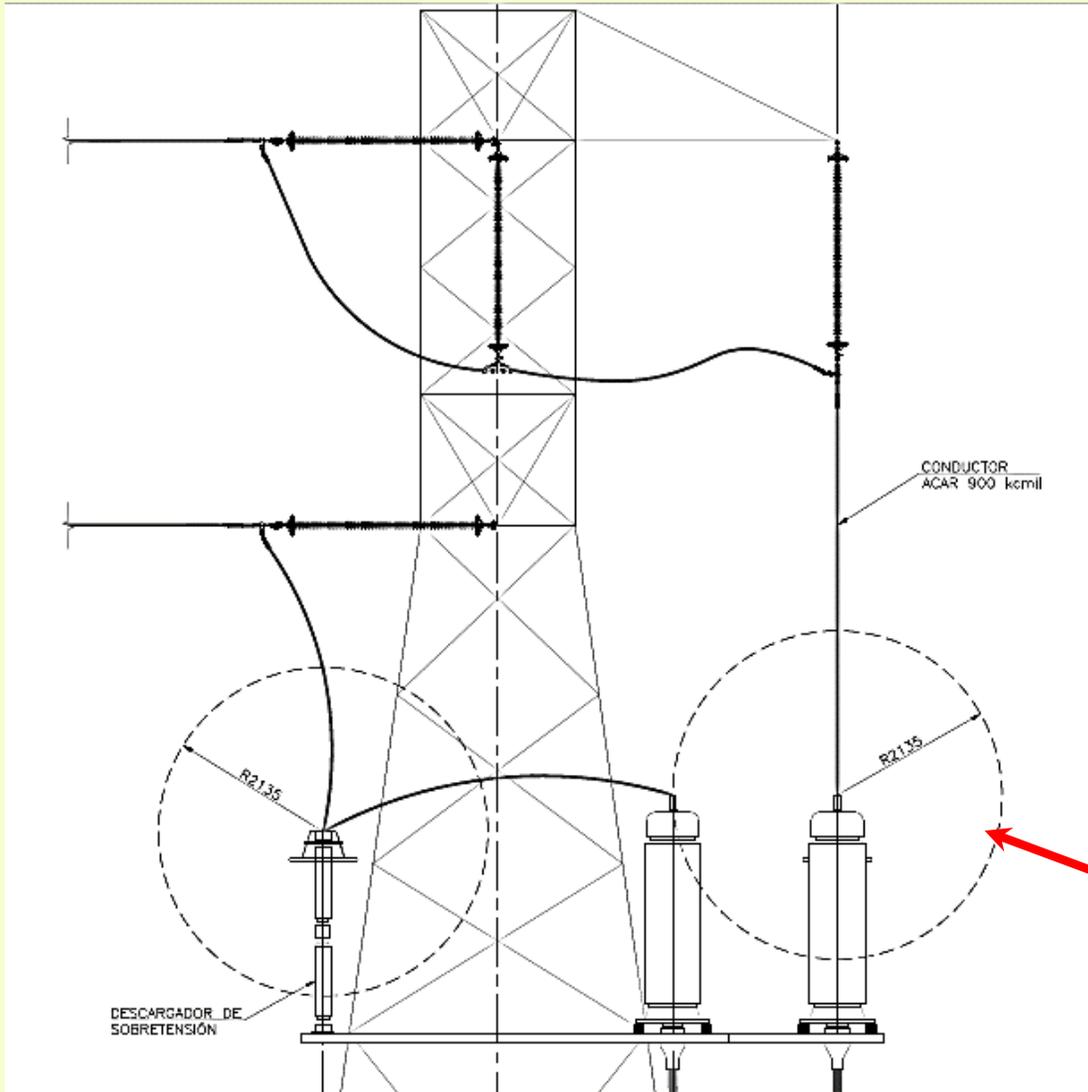


UNICAMP

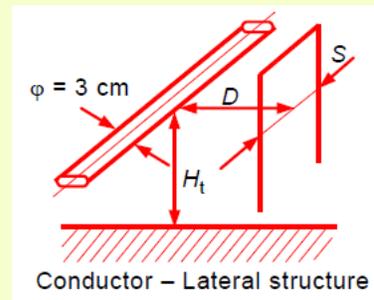
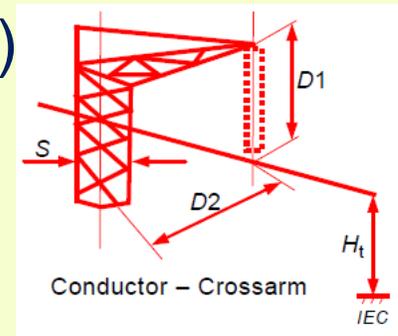




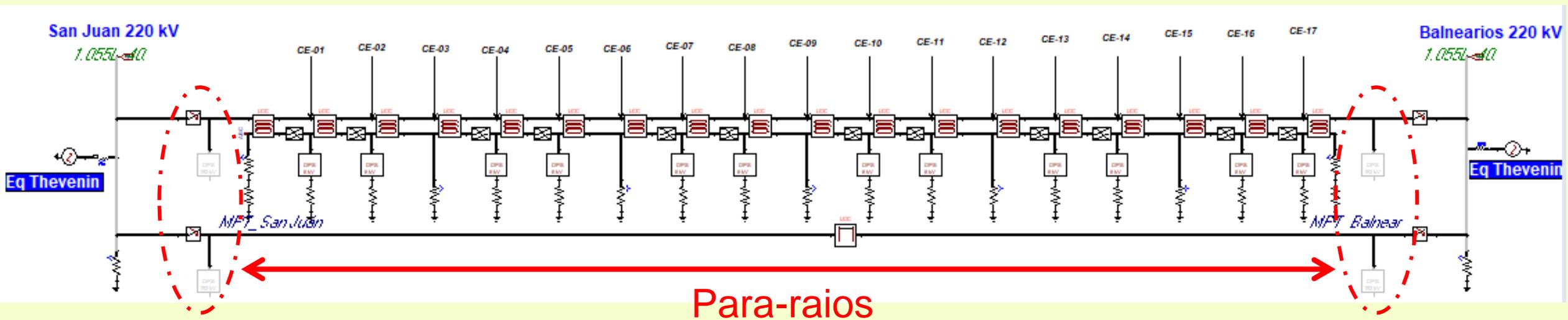
UNICAMP



Distância do arco seco  
(IEC 60071-2)



Deve ser realizado um estudo de coordenação de isolação, considerando os níveis de tensão nas barras, energização e descargas atmosféricas caso existam na área. Para este estudo é necessário utilizar programas como ATP-Draw ou EMTP RV.





UNICAMP

Não tem  
para-raios

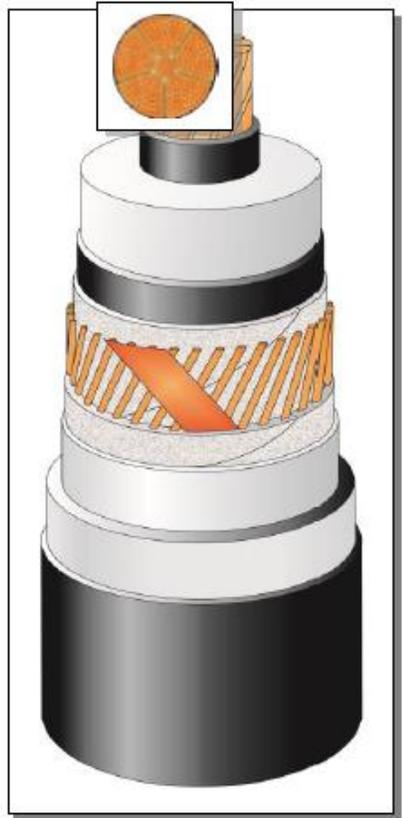
L.T. 60 kV

16/10/2020 10:59  
18L 287235 8650876  
Avenida 1 de Mayo

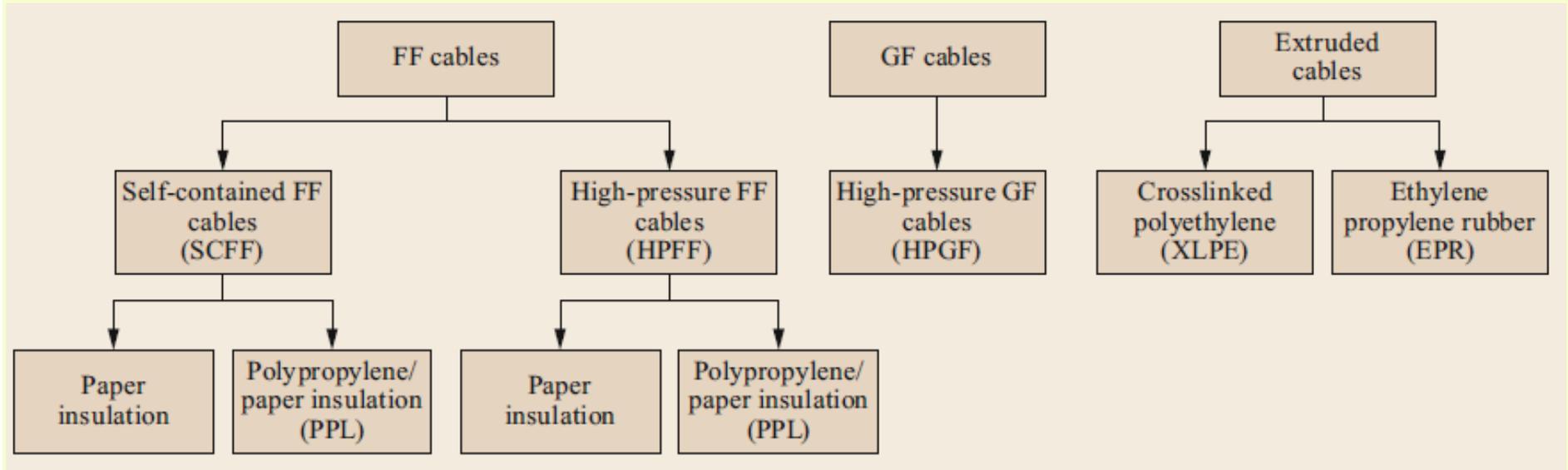


Não tem  
para-raios

# 1.2 Cabo de energia



FF: Fluid-filled



1920



Tempo

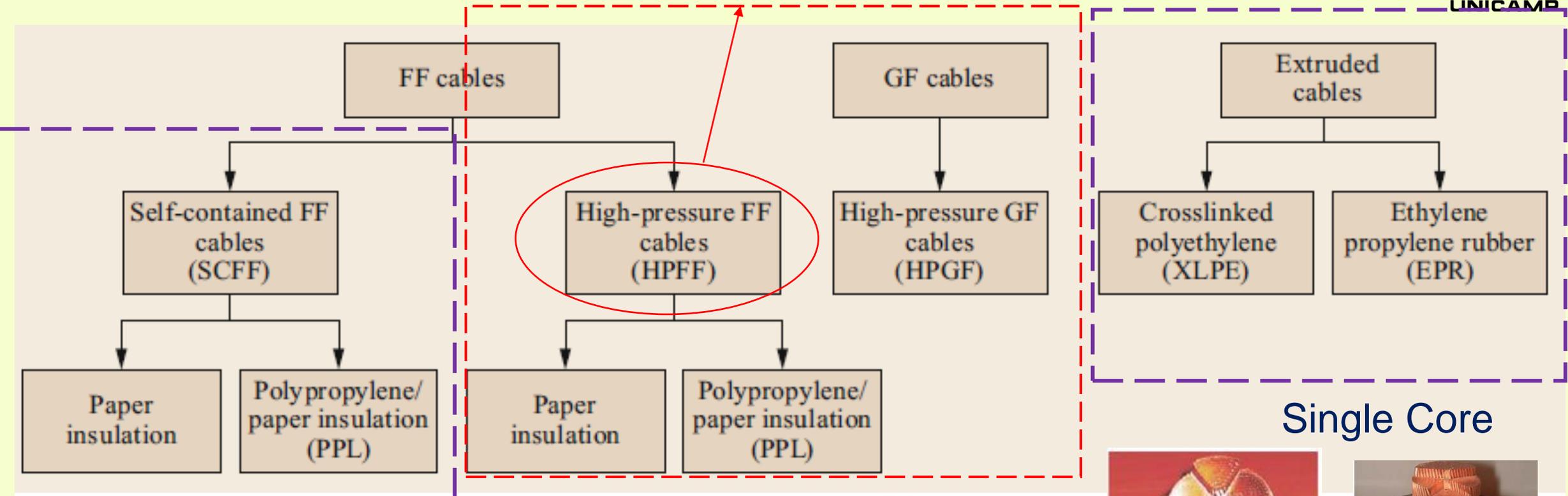
“Evolução do isolamento para suportar níveis mais elevados de tensão”





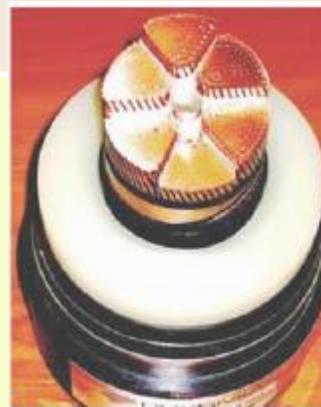
UNICAMP

# HPLF, HPOF, HPGF

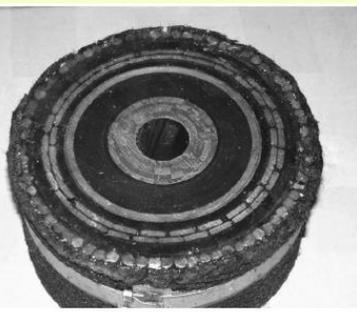


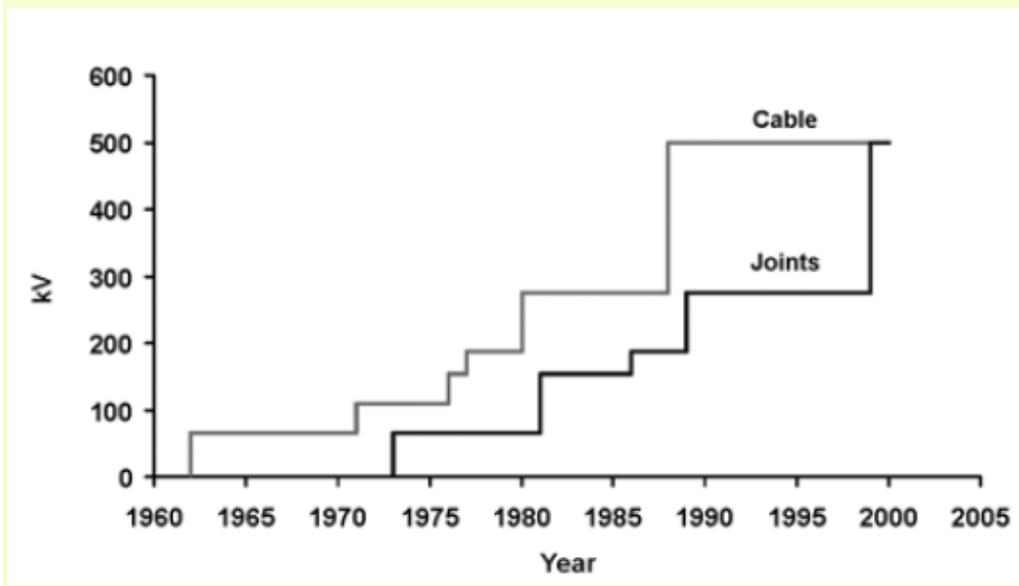
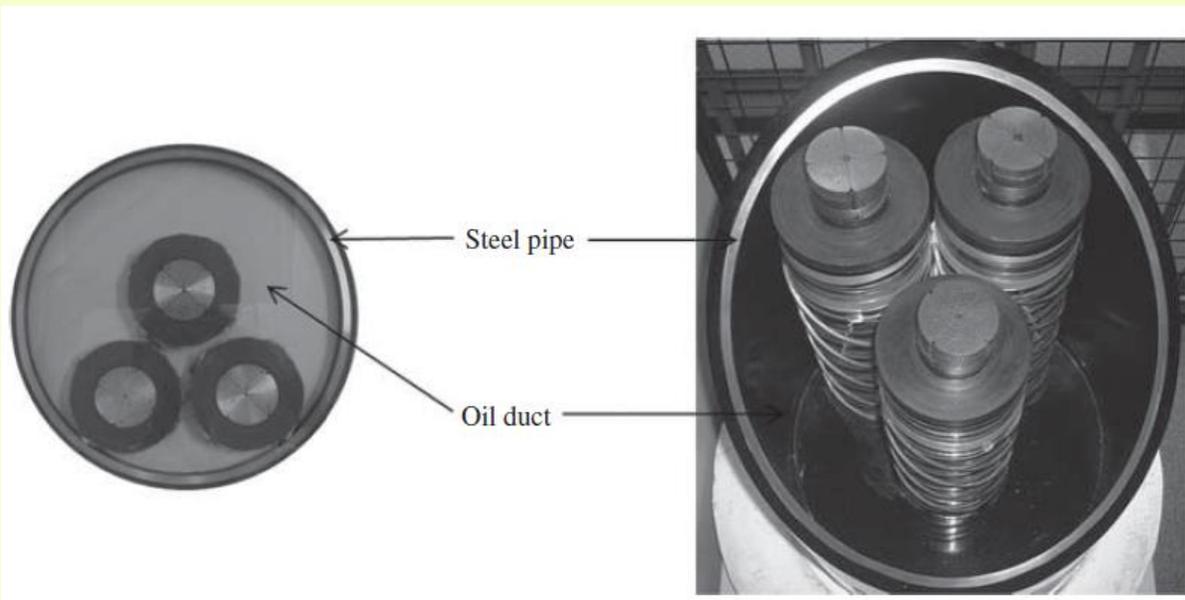
Single Core

Pipe type

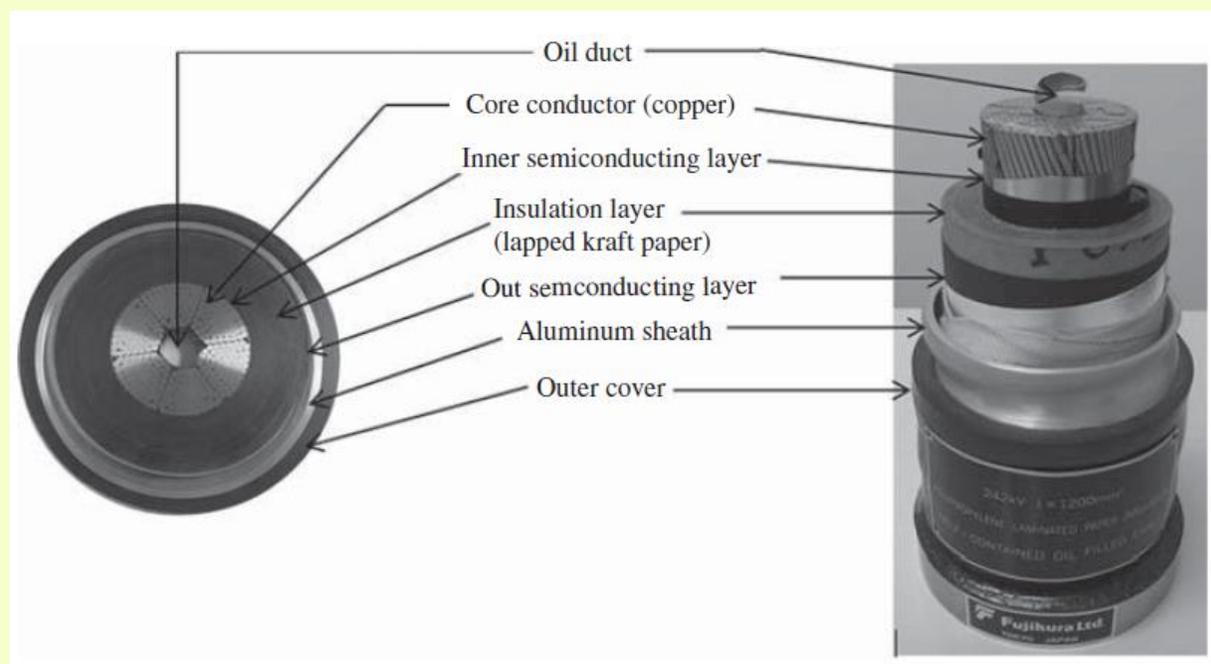


225 kV HPFF Cable



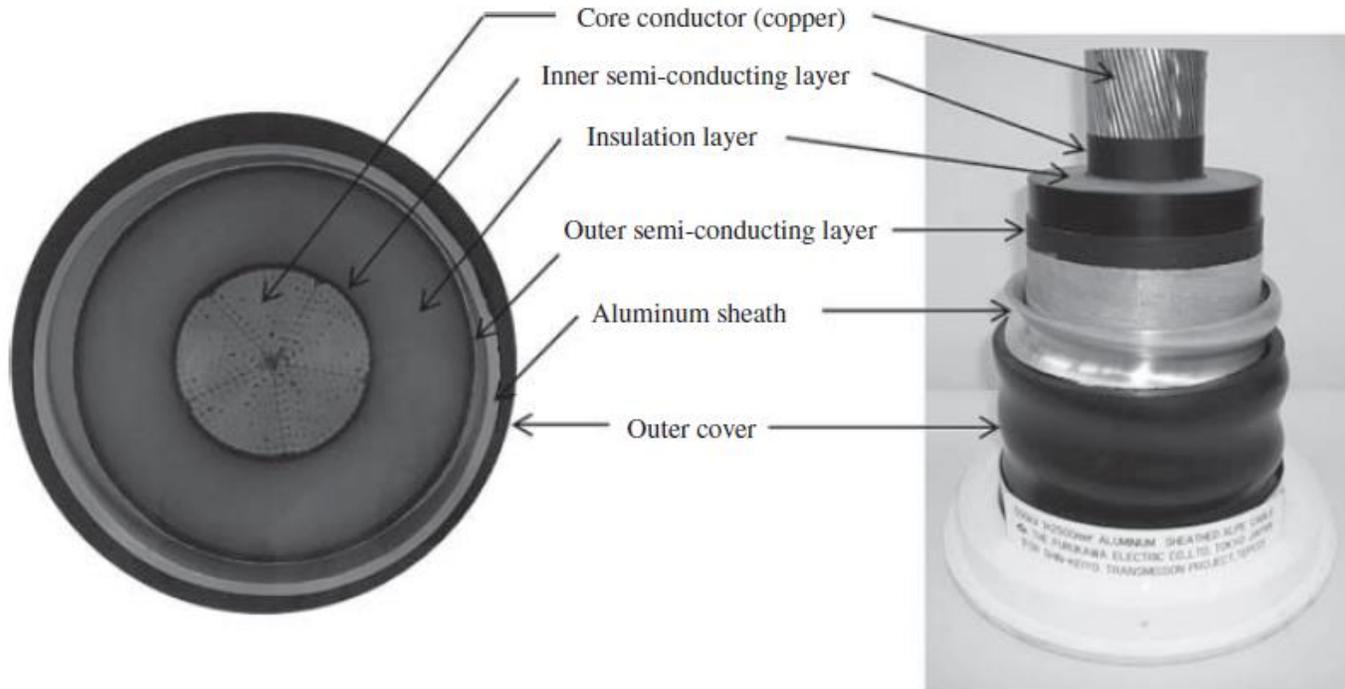


# HPOF



# SCOF

# 1.2.1 Extruded cables



Partes principais:

1. Núcleo
2. Isolamento
3. Blindagem
4. Cobertura

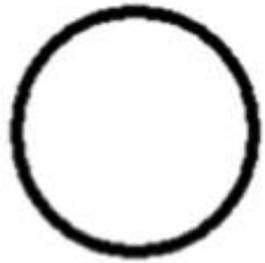
Propertles	XLPE	EPR
Density, g/cm <sup>3</sup>	0.92	1.2–1.4
Tensile strength, MPa	19	9–12
Elongation, %	500	250–350
Modulus of elasticity, MPa	121	5–14
Heat distortion, %	20	5–8
Thermal conductivity W/m°C	0.27	0.27–0.35
Dielectric constant	2.3	2.5–3.0
Dissipation factor, % at 20°C at 90°C	<0.03 <0.03	0.16–0.3 0.3–1.0
Volume resistivity, O. cm at 23°C	10 <sup>16</sup>	10 <sup>13</sup>
Short-term AC breakdown on miniature cable KV/mm	48	30–40

# Núcleo

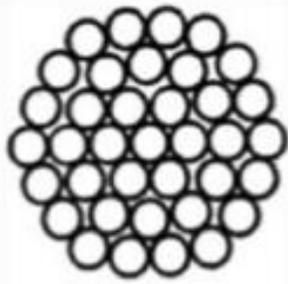
Tipo de Núcleo:

- Alumínio
- Cobre

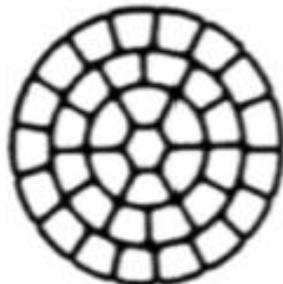
Recomendação : Milliken com 5 segmentos devido ao baixo valor do fator de efeito pelicular ( $y_s$ )



Round, solid



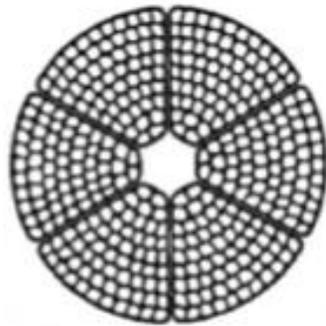
Round, stranded



Round stranded compacted



4, 5 or 6 equal segments (Milliken)



4, 5 or 6 equal segments hollow (Milliken) with or without core



Round, with profiled strands

$y_s$



$R_{ac}$



$I$



# Isolamento

Parte mais importante do cabo de energia. Isola a parte energizada (núcleo) das demais partes



**LDPE**



**HDPE**



**EPR**



**XLPE**

Polietileno de baixa resistividade

Polietileno de alta resistividade

Goma de etileno propileno

Polietileno termoplástico reticulado

Tope = 70°C

Tope = 90°C

Tope = 90°C

Tope = 90°C

Tcc = 130°C

Tcc = 160°C

Tcc = 250°C

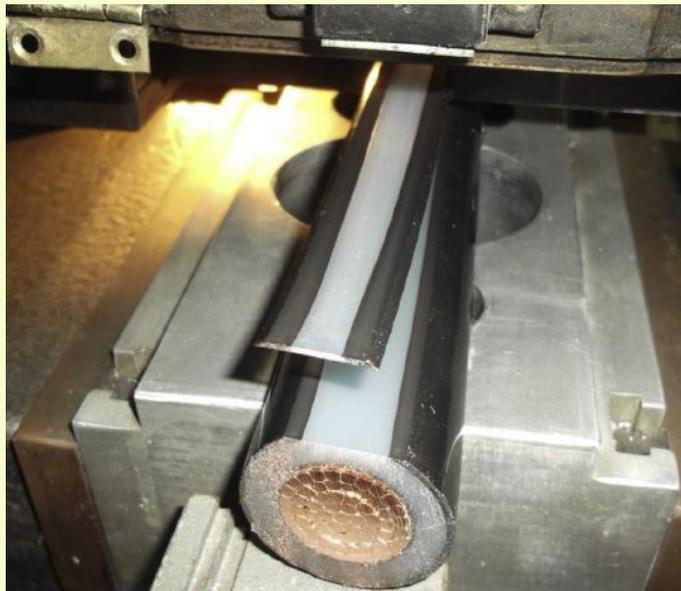
Tcc = 250°C

Recomendación hasta 138 kV

Quanto ao tipo de isolação, a recomendação é do tipo XLPE devido às suas baixas perdas dielétricas em comparação à isolação EPR.



UNICAMP



## O que acontece se eu exceder a temperatura operacional?

Reduz a vida útil do cabo de energia, cuja estimativa é feita através da expressão empírica de Arrhenius

IEC 60216-1

$$\ln(k) = \ln(A) + \frac{-E_a}{R} \left( \frac{1}{T} \right)$$

K: Tiempo de vida del cable.

A: Factor de Arrhenius.

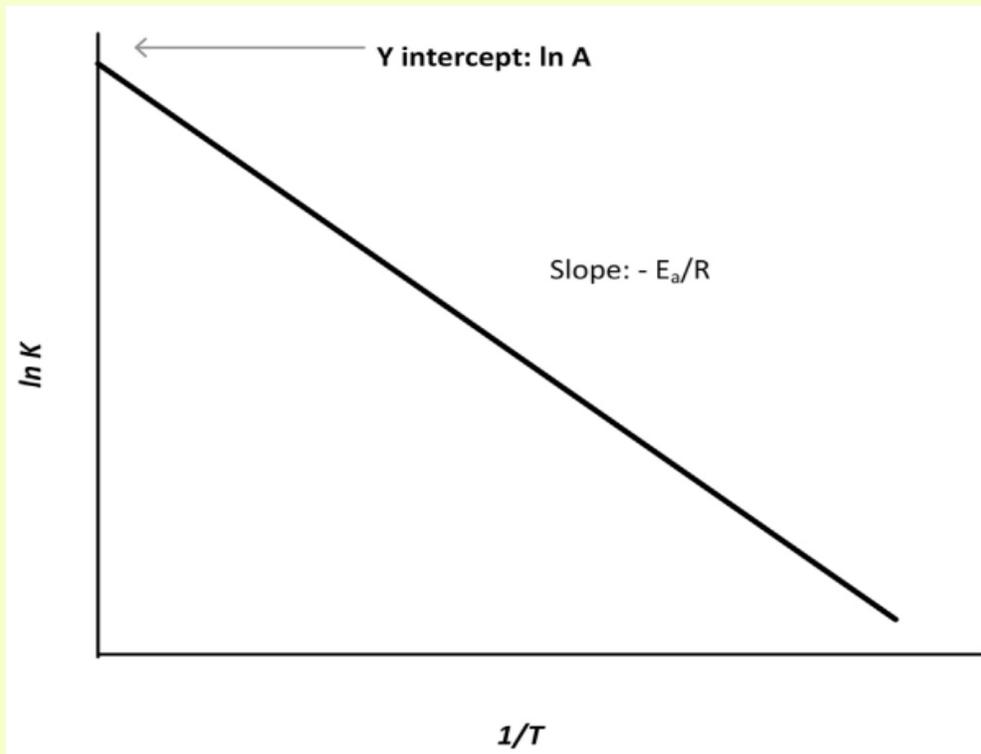
$E_a$ : Energía de activación del material.

T: Temperatura (°K).

R: Constante del gas.

Cortesía: Abdusalam S. Alghamdi, Rayan K. Desuqi

Electrical and Computer Engineering Department, King Abdulazi University, Saudi Arabi



$$\ln(k) = \ln(A) + \frac{-E_a}{R} \left( \frac{1}{T} \right)$$

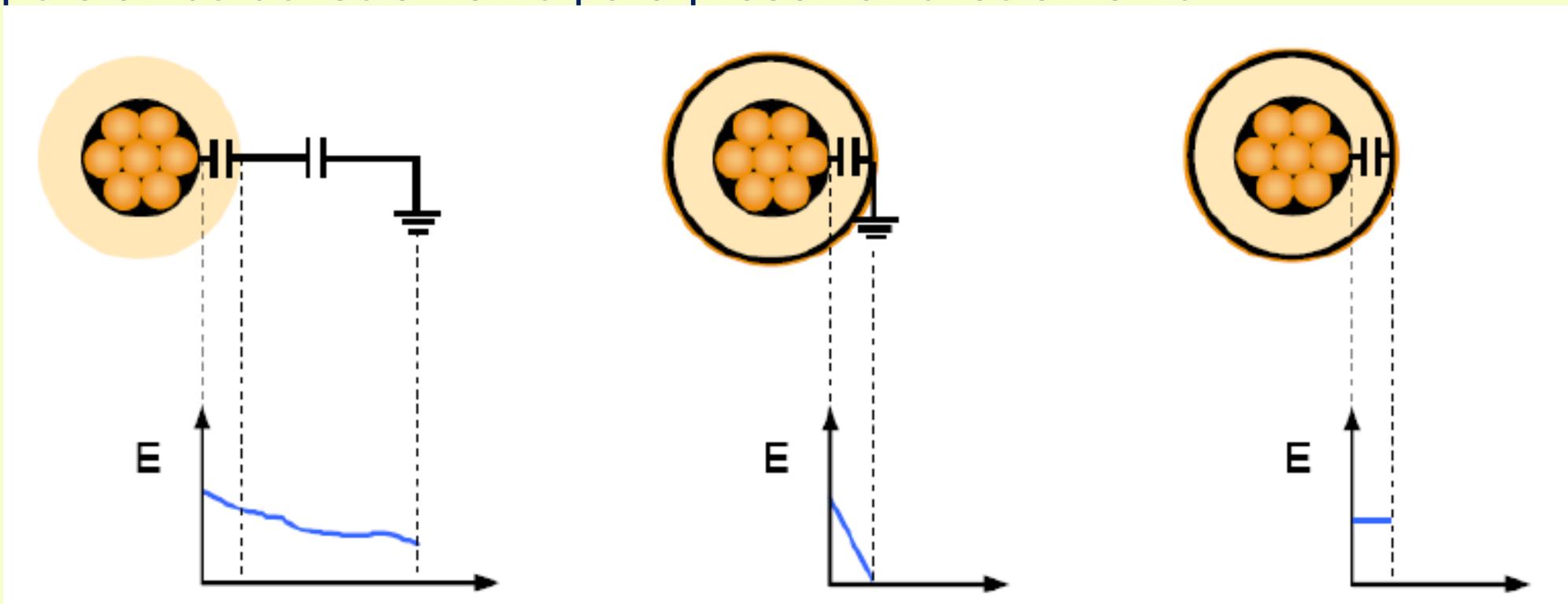
Temperatura máxima (°C)	Temperatura máxima (°K)	X (inversa de temperatura)	Y (ln(k))	Tempo de vida do cabo (anos)
110	383,15	0,002610	7,230	3,8
105	378,15	0,0026445	7,873	7,2
100	373,15	0,0026799	8,534	13,9
95	368,15	0,0027163	9,212	27,4
90	363,15	0,0027537	9,909	55,1

# Blindagem do cable de energia

(Sheath/Shield)



**Função principal:** Confinar adequadamente (uniformemente e radialmente) o campo elétrico do isolamento para preservar o isolamento



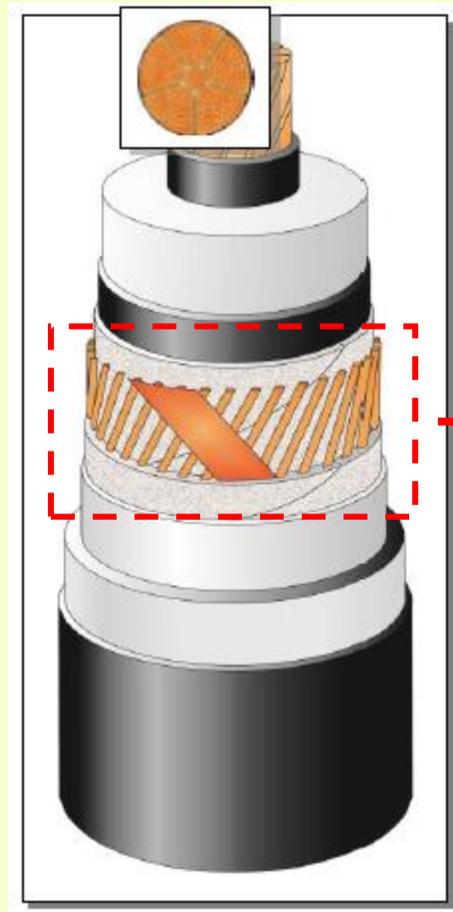
Sem blindagem

Com blindagem  
conectado ao solo

Com blindagem sem  
conexão ao solo

## Outras funções:

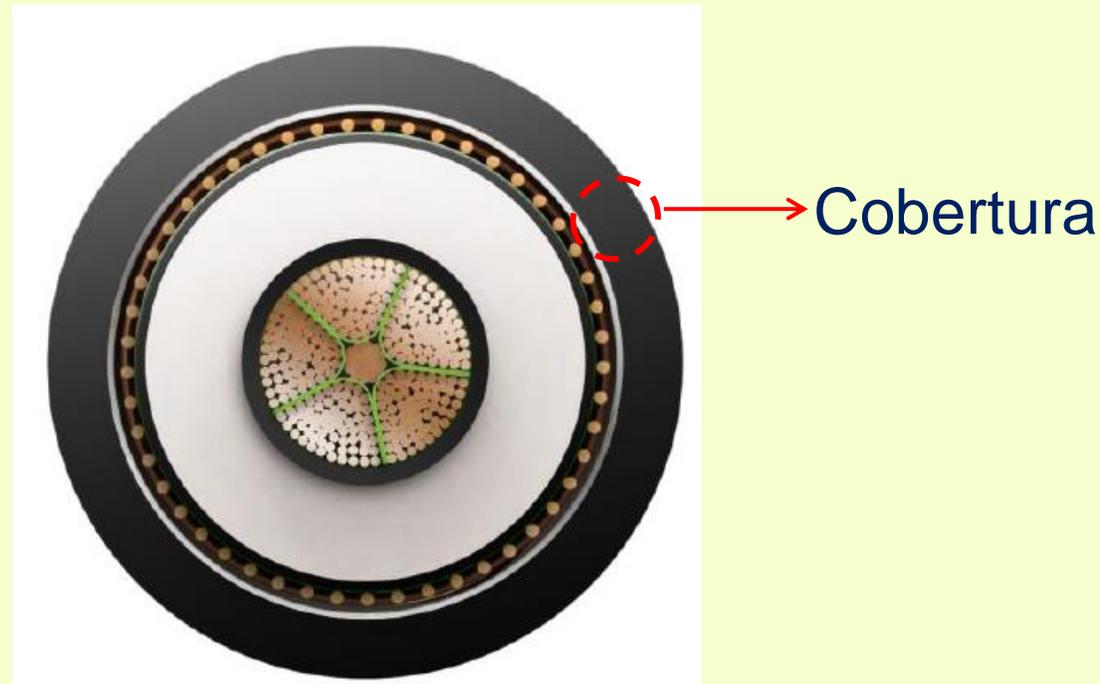
- Fornece um caminho de retorno para corrente de carga capacitiva.
- Fornece um caminho de retorno para corrente de falha de curto-circuito.
- Fornece proteção mecânica ao isolamento.



O blindaje pode ser feito de cobre ou alumínio, com ou sem fios ou chapas de alumínio reforçadas.

# Cobertura

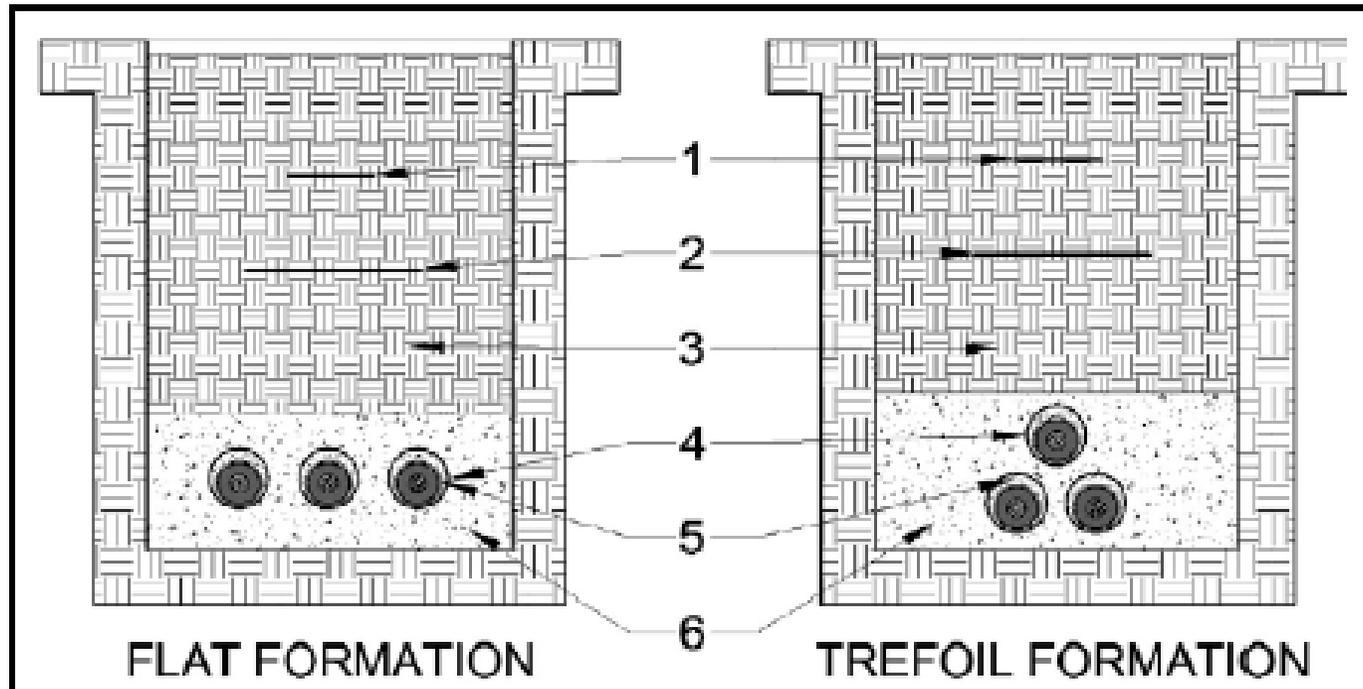
Seu objetivo é proteger as demais camadas do cabo da superfície onde o cabo está instalado e de fenômenos externos, como corrosão, umidade e esforços mecânicos externos. As tampas são geralmente feitas de PE tipo ST8, isentas de halogênio, retardantes de chama e resistentes ao fogo.



# 1.3 Banco de dutos

É o meio físico que contém os cabos de energia em um determinado arranjo de acordo com a exigência de capacidade de transmissão da linha de transmissão subterrânea.

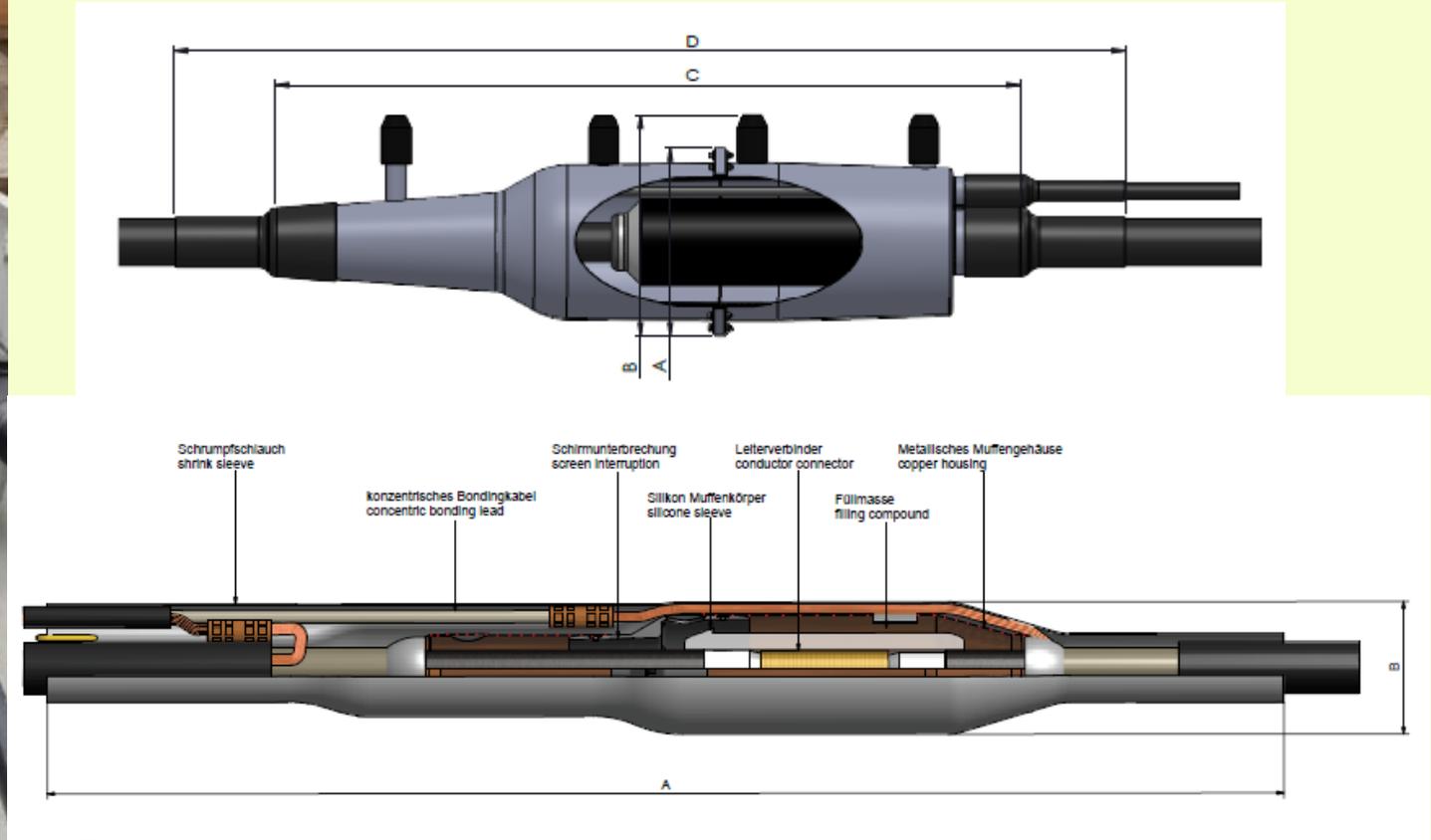
Outra opção que dispensa banco de dutos é instalar o cabo diretamente na superfície.



Os bancos de dutos devem proteger o cabo de esforços mecânicos externos como, por exemplo, cargas verticais produzidas pela movimentação de caminhões, ônibus, automóveis; bem como umidade, correção, etc.

# 1.4 Câmara de junção de cabos

Los terminales deben ser shield break (2 cañones)



Para o design que você precisa:

- Seção de cabos e blindagem
- Tipo de material do núcleo y blindagem.

## 1.4.1 Caixas de aterramento da blindagem



UNICAMP

sistema de aterramento consiste em aterrar a blindagem do cabo de potência conforme:

- Capacidade de transmissão necessária
- Nível de tensão
- Comprimento da linha de transmissão

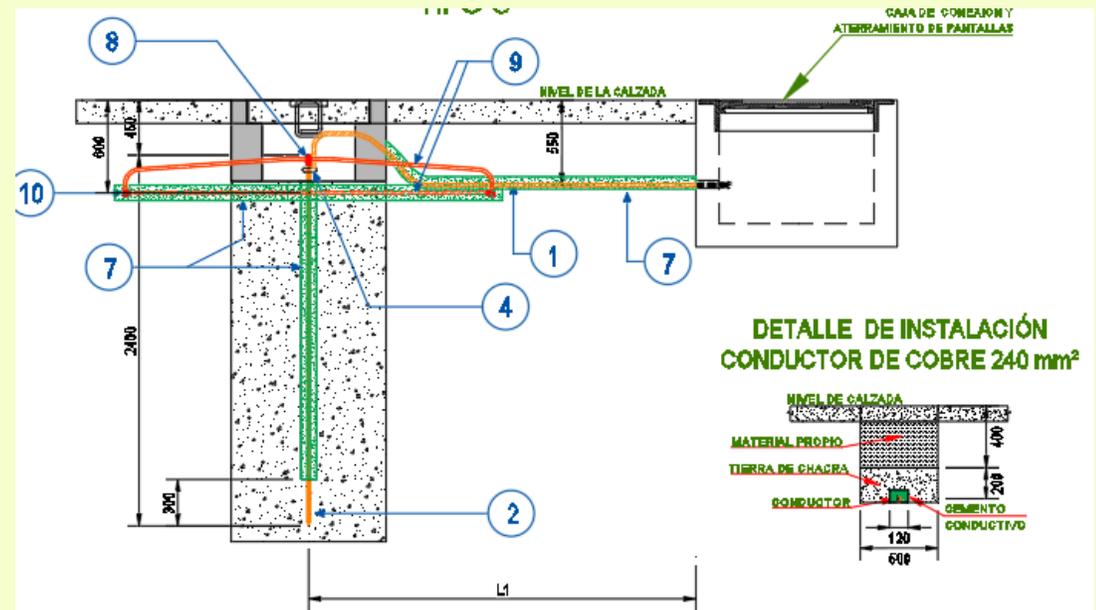
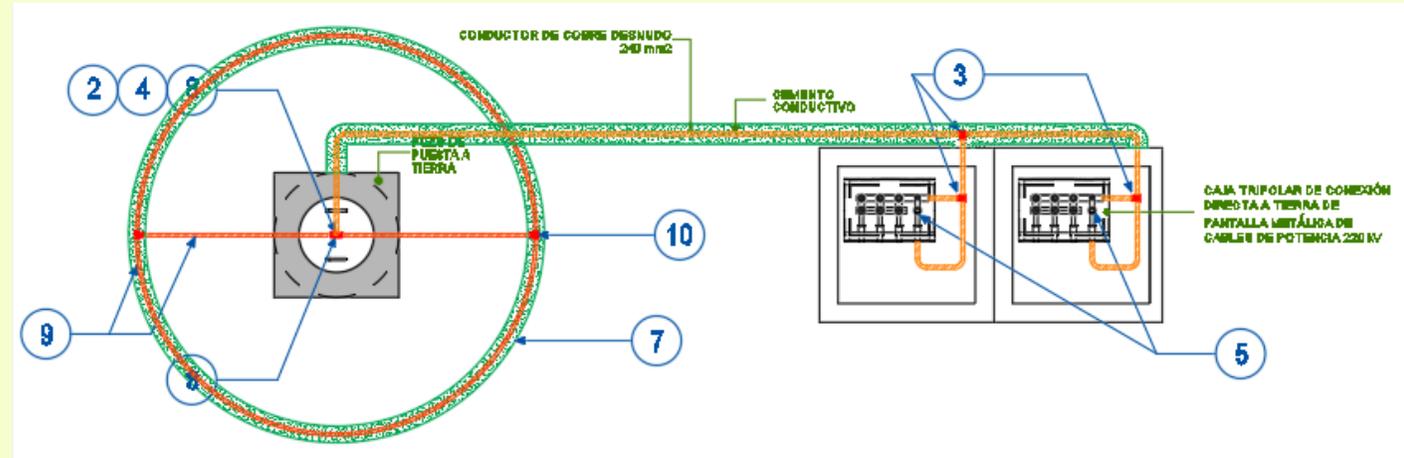
Um correto sistema de aterramento permite transportar a maior capacidade de transmissão.



# 1.4.2 Sistema de aterramiento



Controlar as tensões de toque e passo

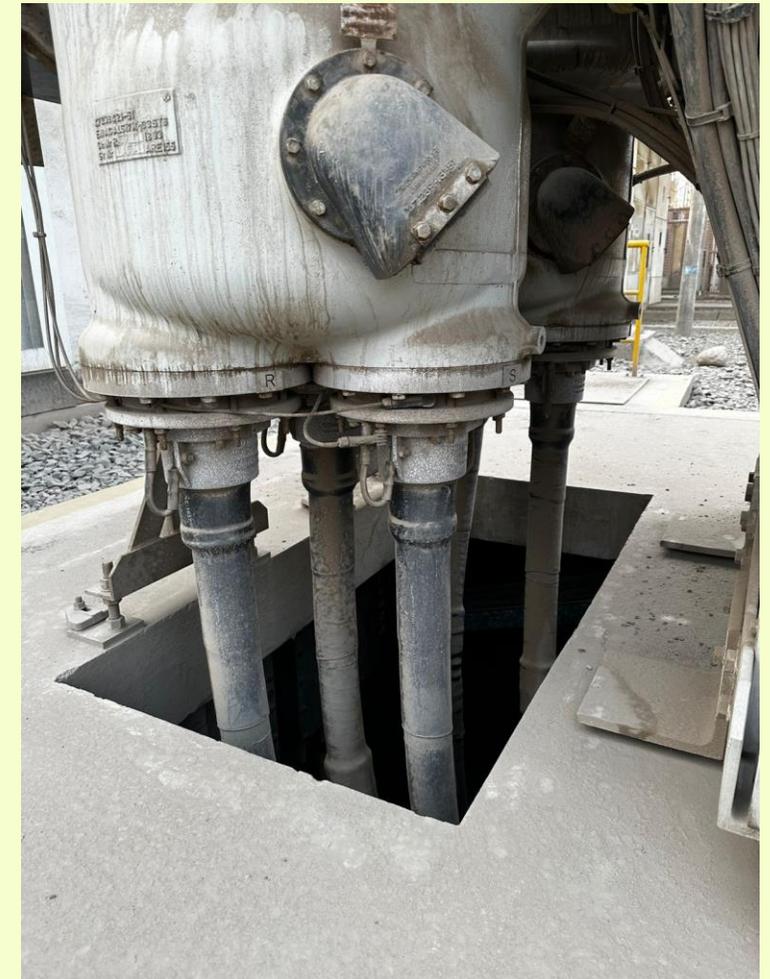
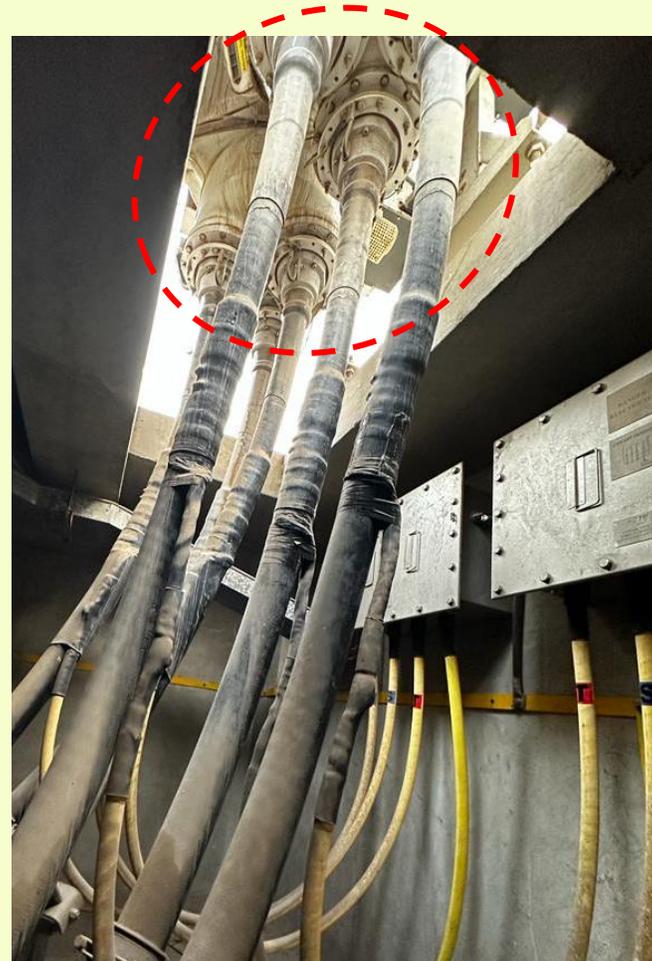
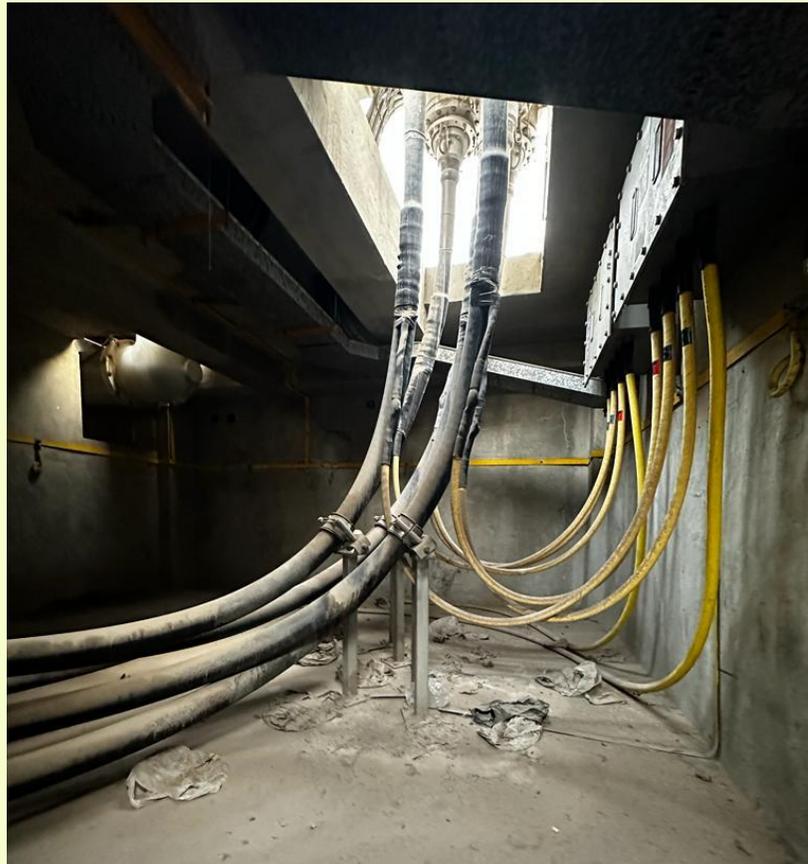


# 1.5 Chegada na subestação

## 1.5.1. Galeria da GIS

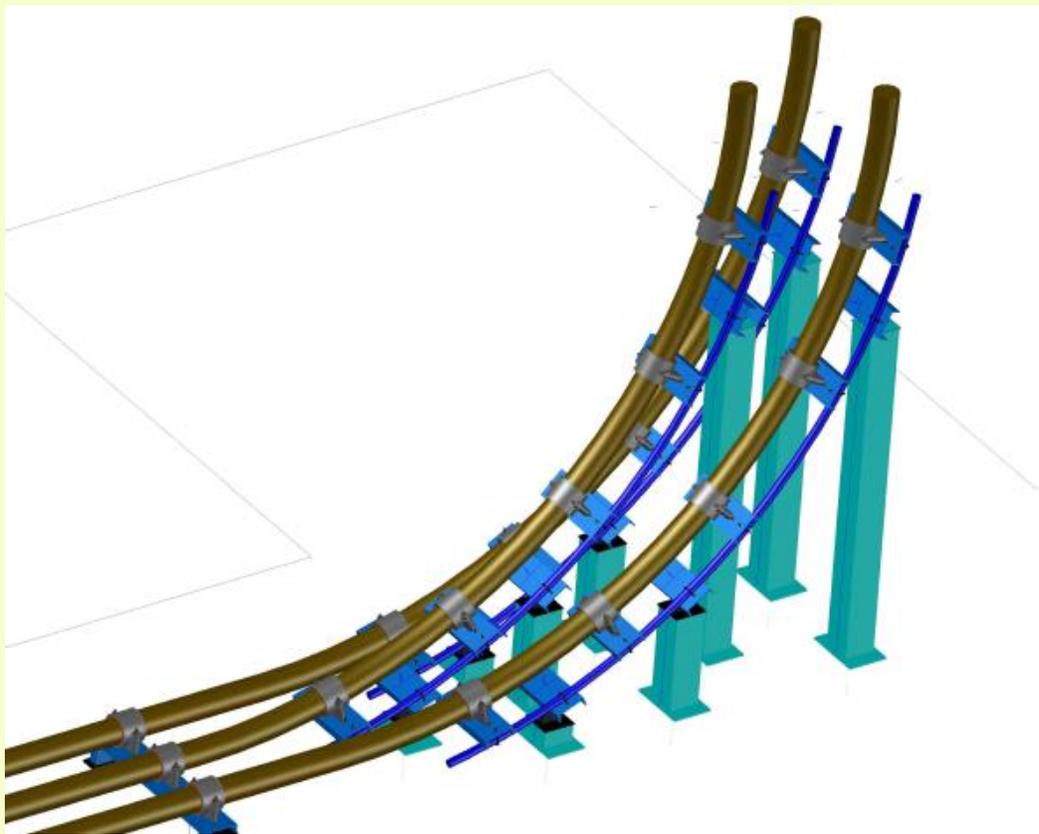


Tipo HV-Connex

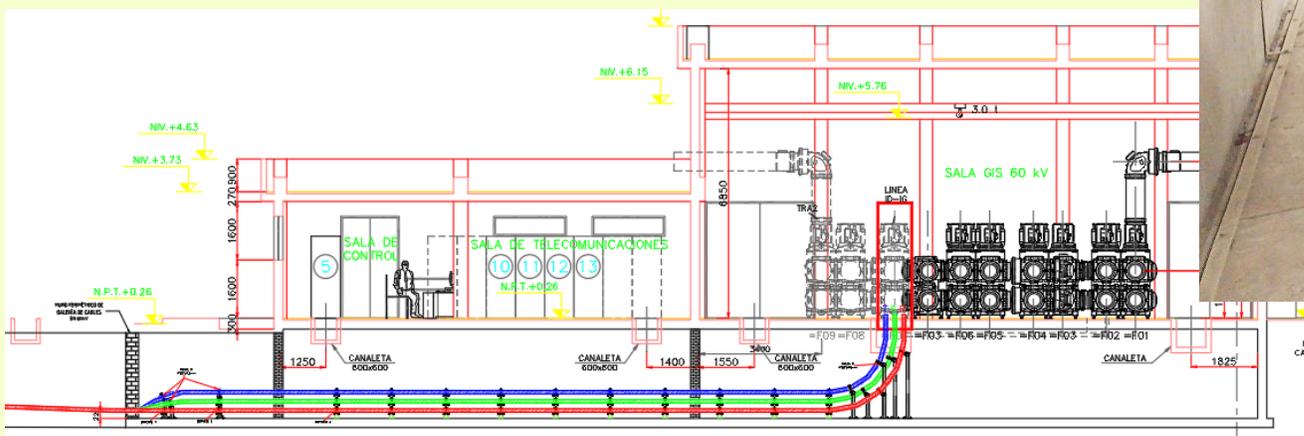




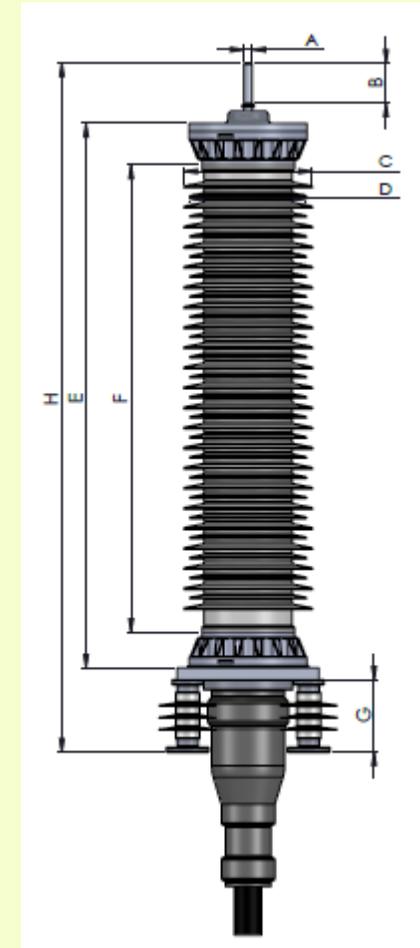
UNICAMP



10/02/2021 11:16



# 1.5.2. Terminais autoportantes





UNICAMP



# Sobre o que vamos falar hoje?



- Em que consiste uma linha de transmissão subterrânea e seus elementos.
- **Projeto elétrico e mecânico de uma linha de transmissão subterrânea.**
- Construção de linhas de transmissão subterrâneas.
- Modelagem para estudos transitórios de linhas de transmissão subterrâneas

## 2.1 Projeto elétrico de linhas de transmissão subterrâneas

1. Atenda à capacidade de transmissão necessária em estado estacionário e de emergência.
2. Cumprir os valores limites de tensões induzidas nas blindagens dos cabos de potência utilizando um sistema de aterramento da blindagem correto.
3. Reduza ou limite as perdas na blindagem do cabo de alimentação.



## 2.1.1. Capacidade de transmissão

O cálculo da capacidade de transmissão em cabos subterrâneos é realizado utilizando as normas IEC 60287-1-1, 60287-2-1 e IEEE 835-1994, onde é aplicado o procedimento Neher – McGrath. O cálculo da capacidade de transmissão é realizado para regimes cíclicos, permanentes e emergenciais.

$$\Delta\theta = \left(I^2R + \frac{1}{2}W_d\right)T_1 + [I^2R(1 + \lambda_1) + W_d]nT_2 + [I^2R(1 + \lambda_1 + \lambda_2) + W_d]n(T_3 + T_4).$$

$$I = \left[ \frac{\Delta\theta - Wd[0.5T_1 + n(T_2 + T_3 + T_4)]}{RT_1 + nR(1 + \lambda_1)T_2 + nR(1 + \lambda_1 + \lambda_2)(T_3 + T_4)} \right]^{1/2}$$

$I$ : Capacidade de transmissão em régimen permanente (A)

$\Delta\theta$ : Aumento de la temperatura sobre la temperatura ambiente sin dañar al aislamiento (K.m/W).

(K).

$R$ : Resistencia AC por unidad de longitud del conductor del cable a la temperatura máxima de operación ( $\Omega/m$ ).

$W_d$ : Pérdidas dieléctricas por el aislamiento por unidad de longitud (W/m).

$T_1$ : Resistencia térmica por unidad longitud entre conductor y pantalla (K.m/W).

$T_2$ : Resistencia térmica por unidad longitud entre pantalla y armadura (K.m/W).

$T_3$ : Resistencia térmica por unidad longitud de la cubierta del cable (K.m/W).

$T_4$ : Resistencia térmica por unidad longitud entre la cubierta del cable y el medio exterior

(K.m/W).

$\lambda_1$ : Es la relación de las pérdidas en la pantalla y las pérdidas totales de todos los conductores del cable.

$\lambda_2$ : Es la relación de las pérdidas en la armadura y las pérdidas totales de todos los conductores del cable.

$n$ : Número de conductores de igual sección que transportan la misma corriente en el cable

CAPACIDADE DE TRANSMISSÃO



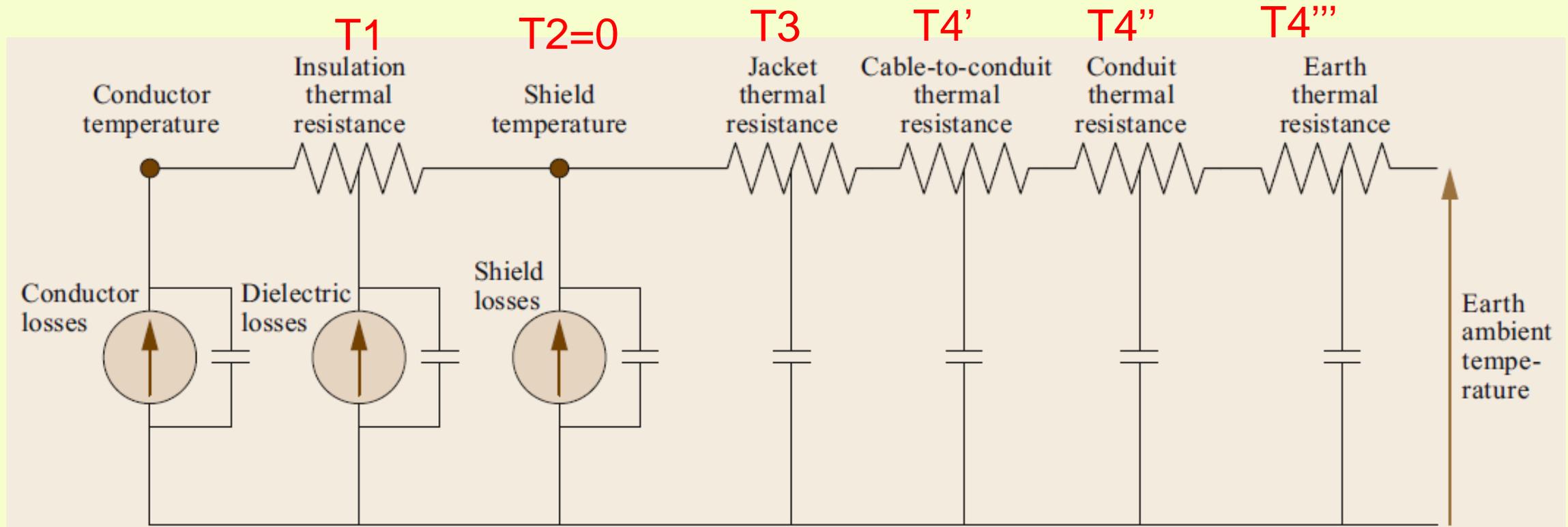
FENÔMENO TÉRMICO



É essencial conhecer com precisão os valores de resistividade térmica (K.m/W) do solo.



Equilíbrio térmico que é produzido pelo aumento da temperatura ambiente devido à passagem de corrente.



$$T_4 = T_4' + T_4'' + T_4'''$$

$$I = \left[ \frac{\Delta\theta - Wd[0.5T_1 + n(T_2 + T_3 + T_4)]}{RT_1 + nR(1 + \lambda_1)T_2 + nR(1 + \lambda_1 + \lambda_2)(T_3 + T_4)} \right]^{1/2}$$

Como nenhuma armadura é usada,  $T_2 = 0$

Resistência térmica de terreno natural

$$T_4 = T_4' + T_4'' + T_4'''$$

$T_4'$ : Resistencia térmica entre el espacio del cable con el ducto interno (tubería) (K.m/W).

$T_4''$ : Resistencia térmica del ducto (concreto) (K.m/W).

$T_4'''$ : Resistencia térmica externa del ducto (K.m/W).

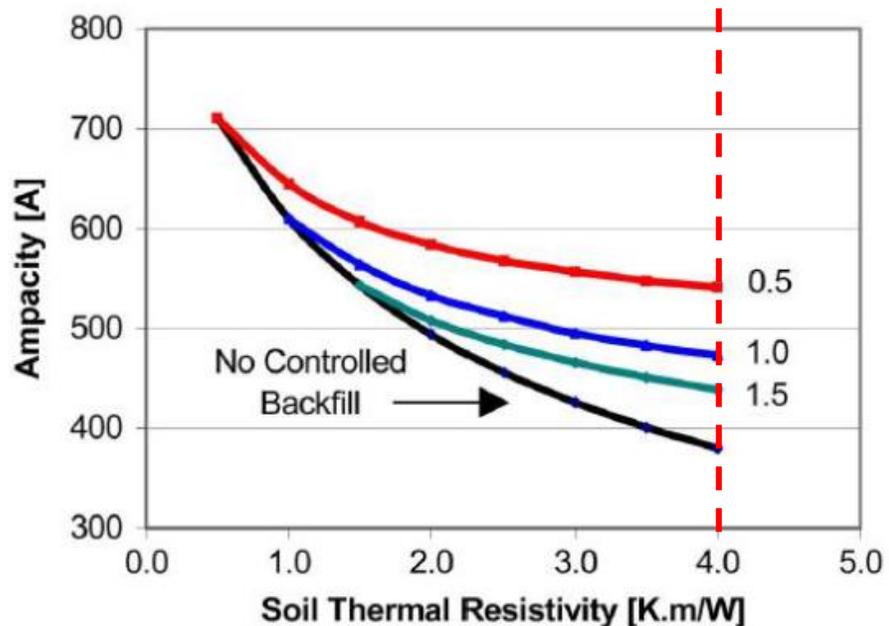
Se um banco de dutos for usado

## Por que é importante conhecer os valores da resistividade térmica do solo?

A resistividade térmica (K.m/W) do solo é a variável mais importante para o cálculo da capacidade de transmissão. Se os valores forem altos, você tem as seguintes opções para atingir a capacidade de transmissão necessária:

1. Aumente a seção do cabo de alimentação
2. Separe a distância de separação entre as fases do cabo de alimentação na vala e/ou banco de dutos.
3. Substituir o terreno natural por um de baixa resistividade térmica (backfill)

Nas linhas de transmissão aéreas você só tem a opção de aumentar a seção do condutor



Valor típico de projeto de resistividade térmica de backfill : 1,0 k.m/W

Com a mesma ideia, recomenda-se que o concreto do duto seja de baixa resistividade térmica, por exemplo 0,75 k.m/W.

### ANALISIS DE CONDUCTIVIDAD / RESISTIVIDAD TERMICA

SOLICITANTE : TECSUR S.A. TIPO : ENSAYO DE LABORATORIO  
 MUESTRA : PORTATIL - CANTERA PETRAMAS ZONA : QUEBRADA HUAYCOLORO S/N  
 SAN ANTONIO - HUACHIPA  
 PROYECTO : LINEA TRANSMISION 60 KV SET BALNERIOS - BARRANCO

#### DATOS DE LA MUESTRA:

TIPO : Material Afirmado para Relleno  
 PESO : 20 kilos.  
 TEMPERATURA : 19.7° C  
 HUMEDAD MUESTRA : 10%  
 FECHA DE ENSAYO : 30-09-2019

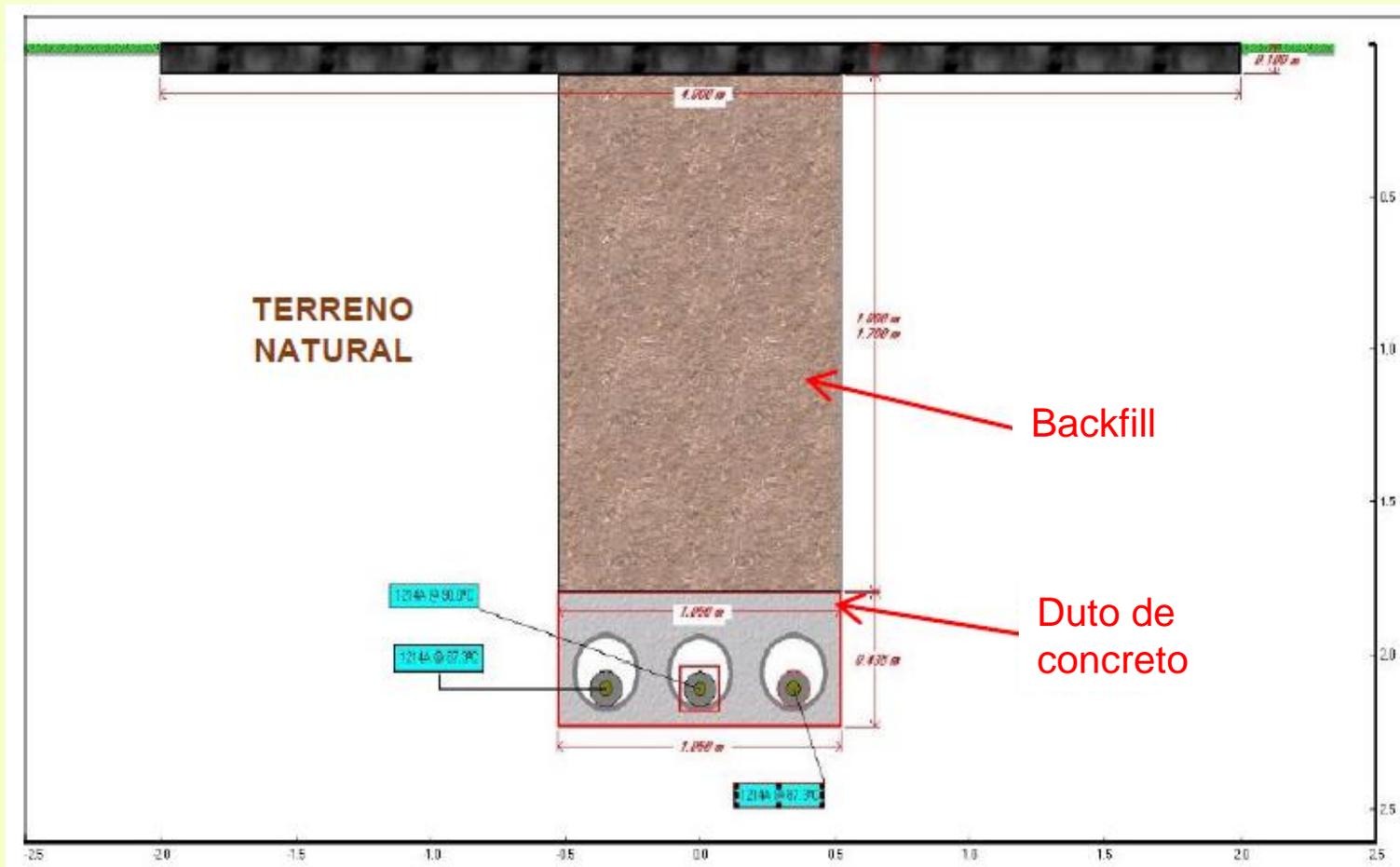
#### DATOS DEL EQUIPO:

EQUIPO : THERMOTEST – TL-100  
 SENSOR : PORT- Suelos Finos  
 MEDICION : Controlador Portátil  
 Fecha Cal. : 23-02-19.  
 Cod. Ensavo: CT-0027

MUESTRA	PESO 5.0 Kg.	PESO 10.0 Kg.	PESO 20.0 Kg.	Media °K m/W
7.00 – 7.30 a.m.	0.934	0.807	0.705	0.815
12.00 - 12.30 a.m.	0.921	0.828	0.783	0.844
6.00 – 6.30 p.m.	0.908	0.818	0.756	0.827
9.00 - 9.30 p.m.	0.937	0.838	0.721	0.832

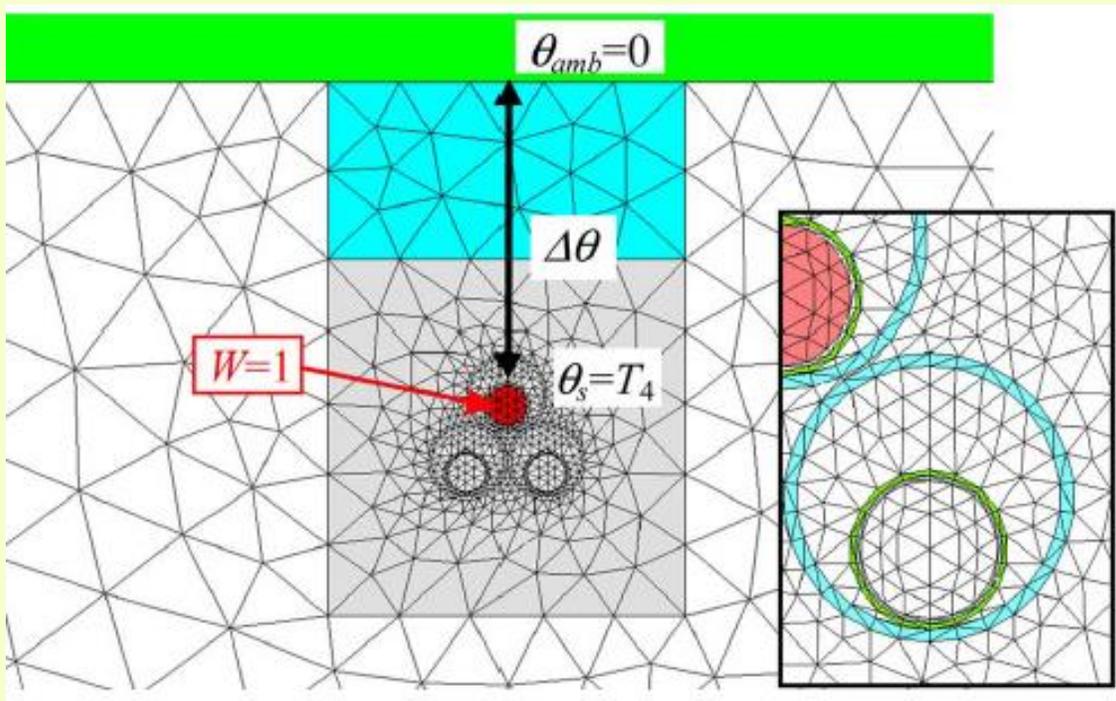
Nota: El valor medio de Resistividad Térmica es **0.830 ° K m/W +/-1.5%**





Devido à utilização de backfill, rejeita-se a formulação necessária para o cálculo de  $T_4'''$  indicada na IEC 60287, pois a formulação considera apenas que a resistência externa do duto é uniforme e igual à resistividade térmica do terreno natural.

Para calcular o efeito do backfill, ele é realizado por meio de equações diferenciais de transferência de calor resolvidas por meio de elementos finitos.

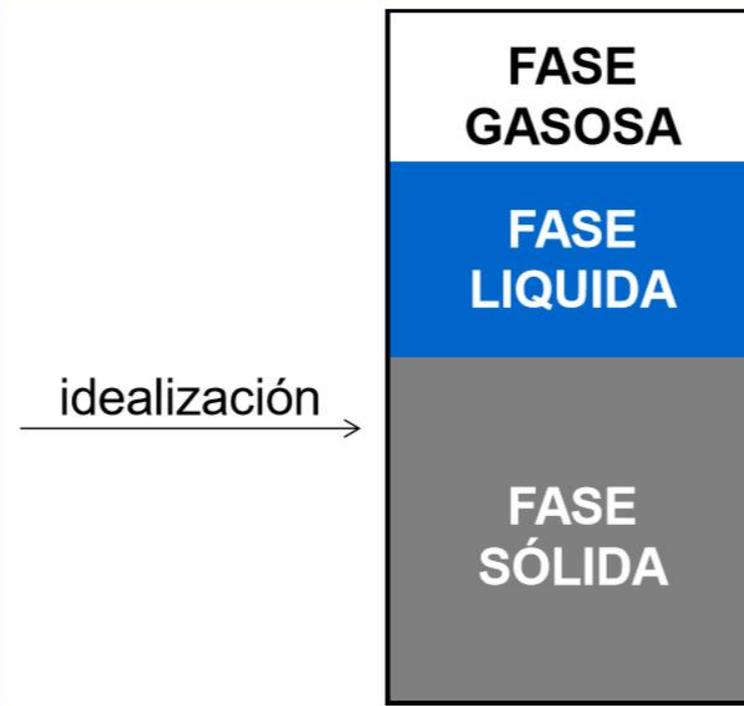
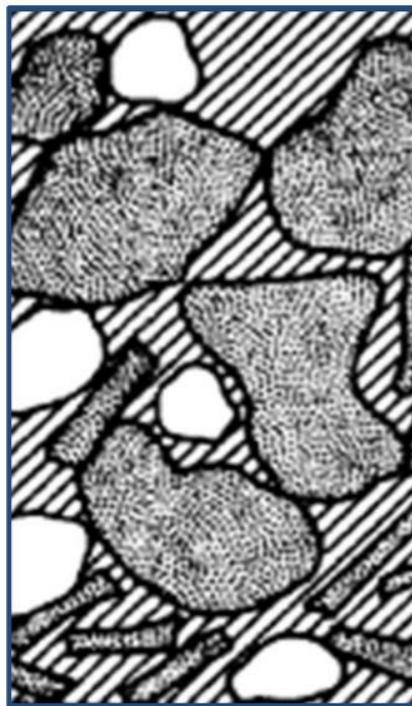
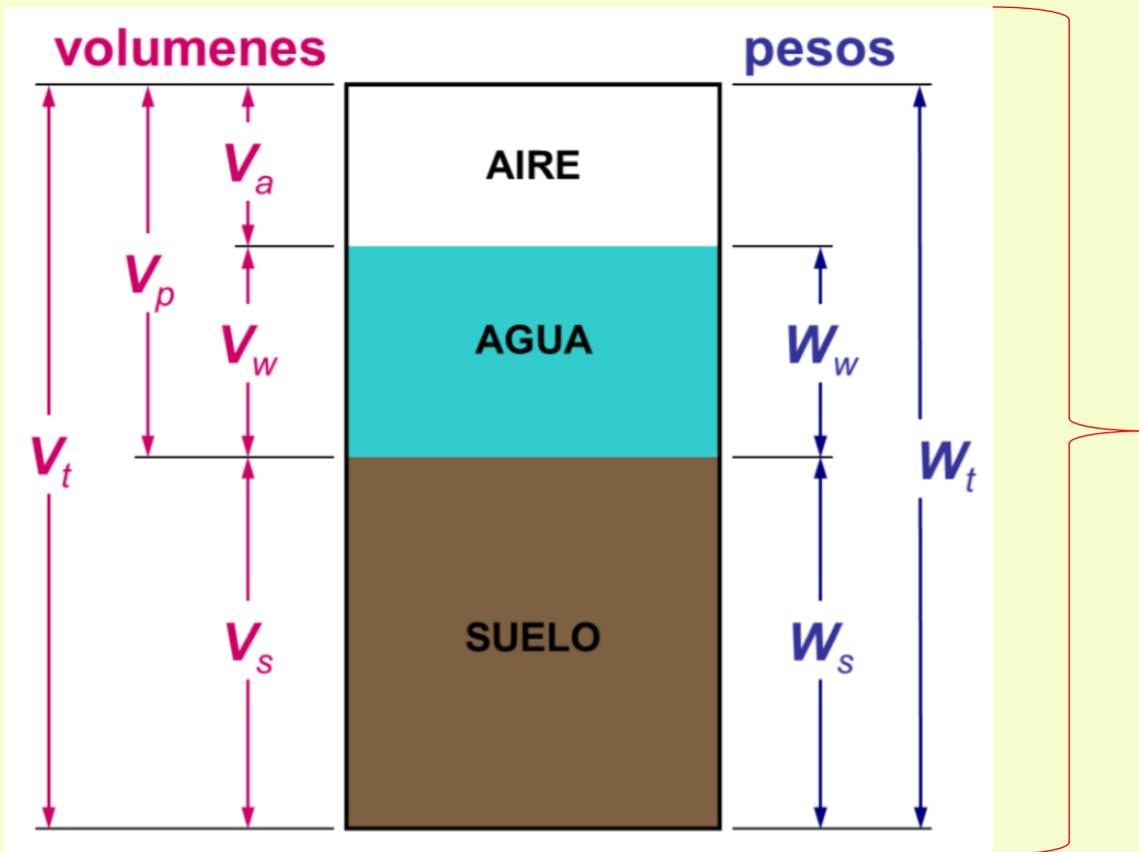


A partir da resolução das equações diferenciais obtém-se o valor de  $T_4'''$

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} t(x, y) + \frac{\partial^2}{\partial y^2} t(x, y) + \alpha^2 t(x, y) = 0$$

$$\Rightarrow t(x) = t_0 e^{-\alpha x} e^{-\alpha y}$$

# Medição de resistividade térmica do solo



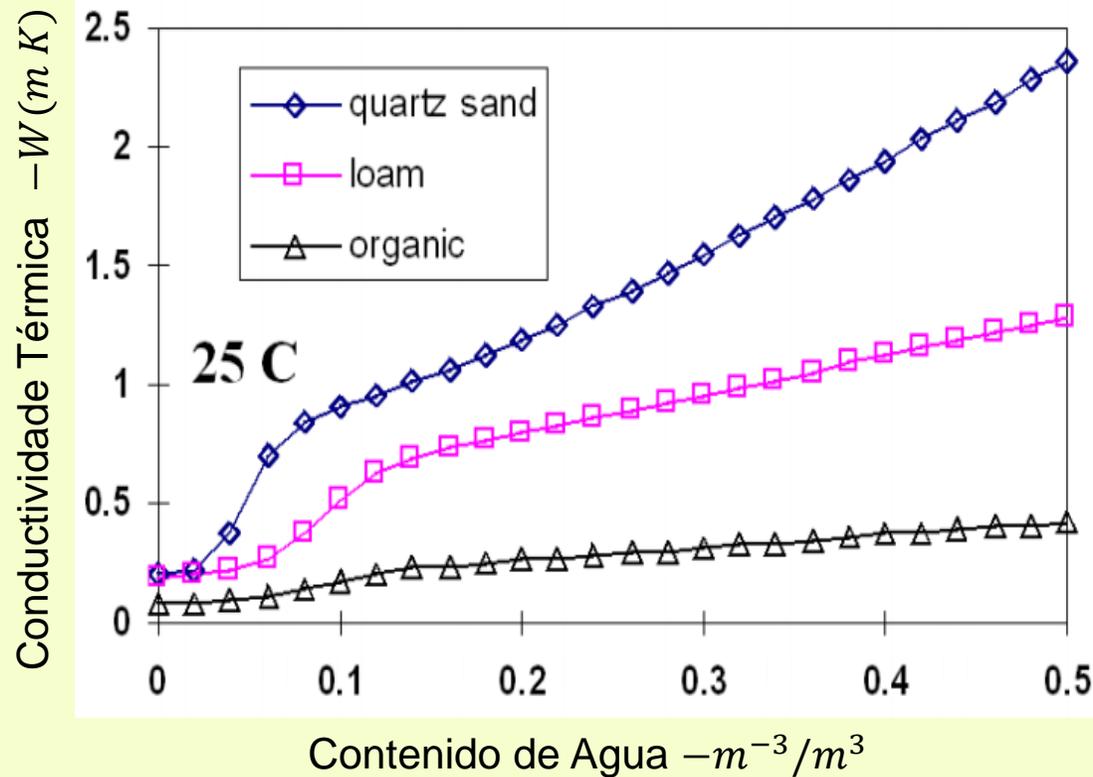
- $V_t$  : Volume total
- $V_a$  : Volume de ar
- $V_w$  : Volume de água
- $V_s$  : Volume de solidos
- $V_p$  : Volume de lacunas

A resistividade térmica depende do teor de água do solo

Existem 2 tipos de medidas:  
- Em campo  
- Curvas de secagem



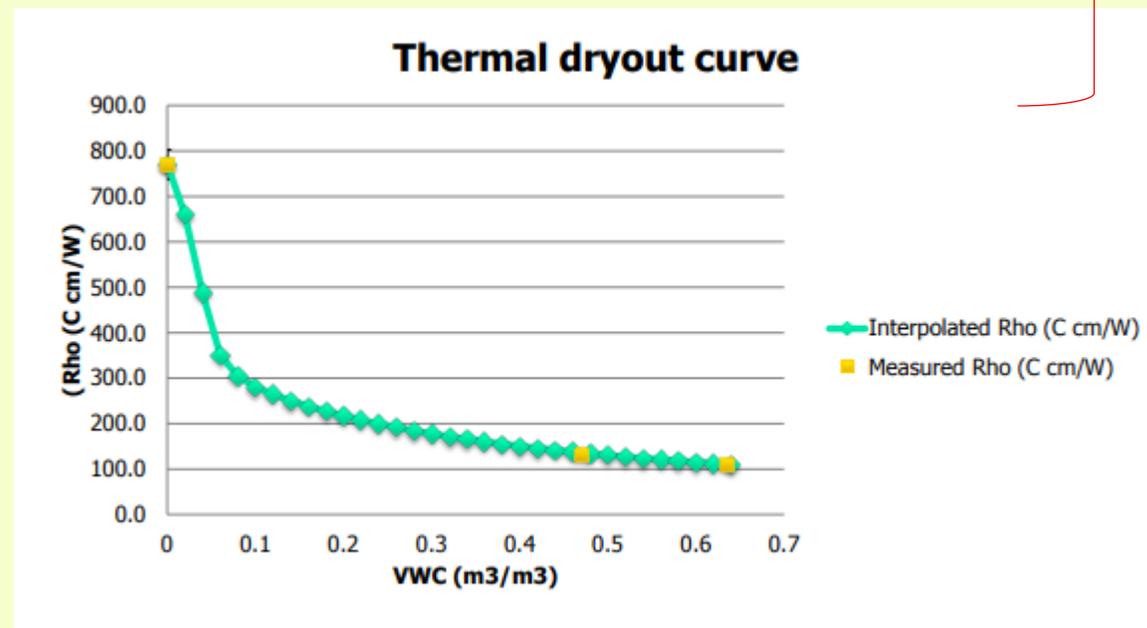
**Medições em campo:** Eles não fornecem muitas informações. Apenas um instantâneo do valor da resistividade térmica





## Curvas de secagem

Relação entre teor de água e resistividade térmica do solo





UNICAMP

**SOIL**

**ROCK**

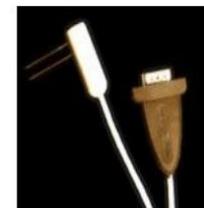
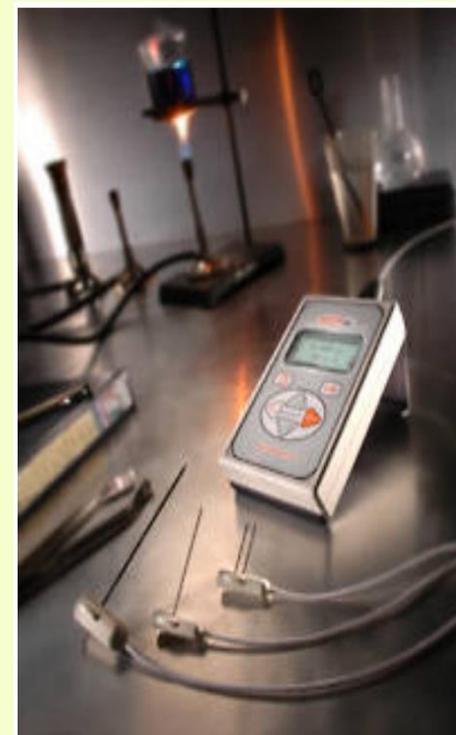
**CONCRETE**

**POLYMER**

**TLS-100**  
ASTM D5334, ASTM D5930, & IEEE 442-1981

*Portable Thermal Conductivity Meter for Measurement of Soil, Rock, Concrete, and Polymers.*

**THERMTEST PORTABLE**



# Usando o programa CYMCAP



Um dos programas mais comerciais e interativos para cálculo de capacidade de transmissão de linhas de transmissão subterrâneas, este software pertence à empresa CYME.

Outras opções: Ansys, Electrotechnik.

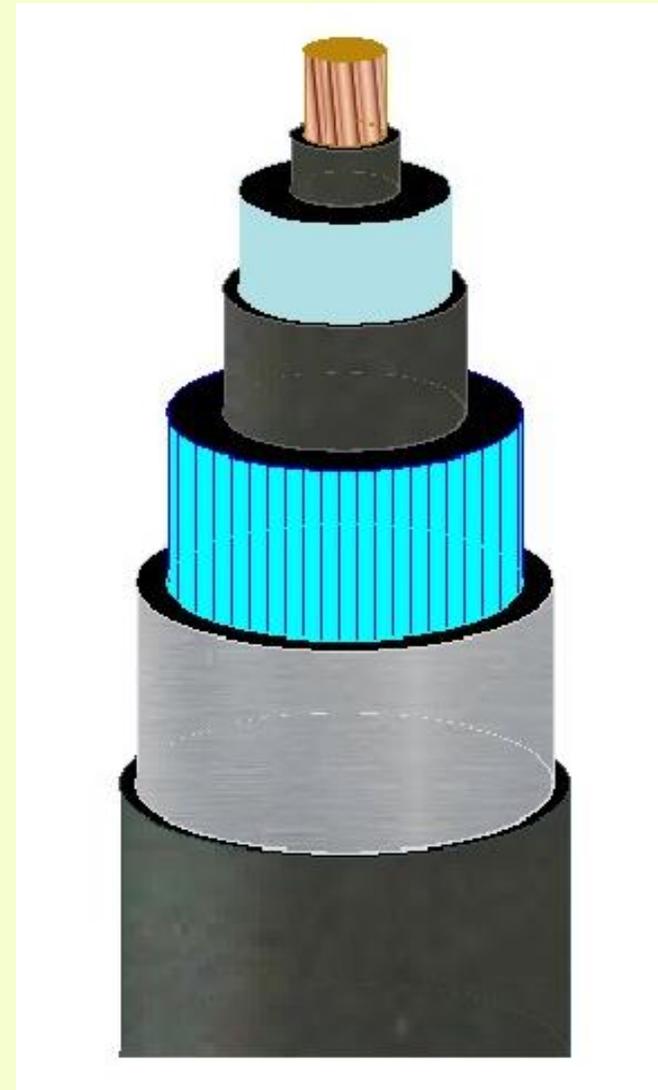
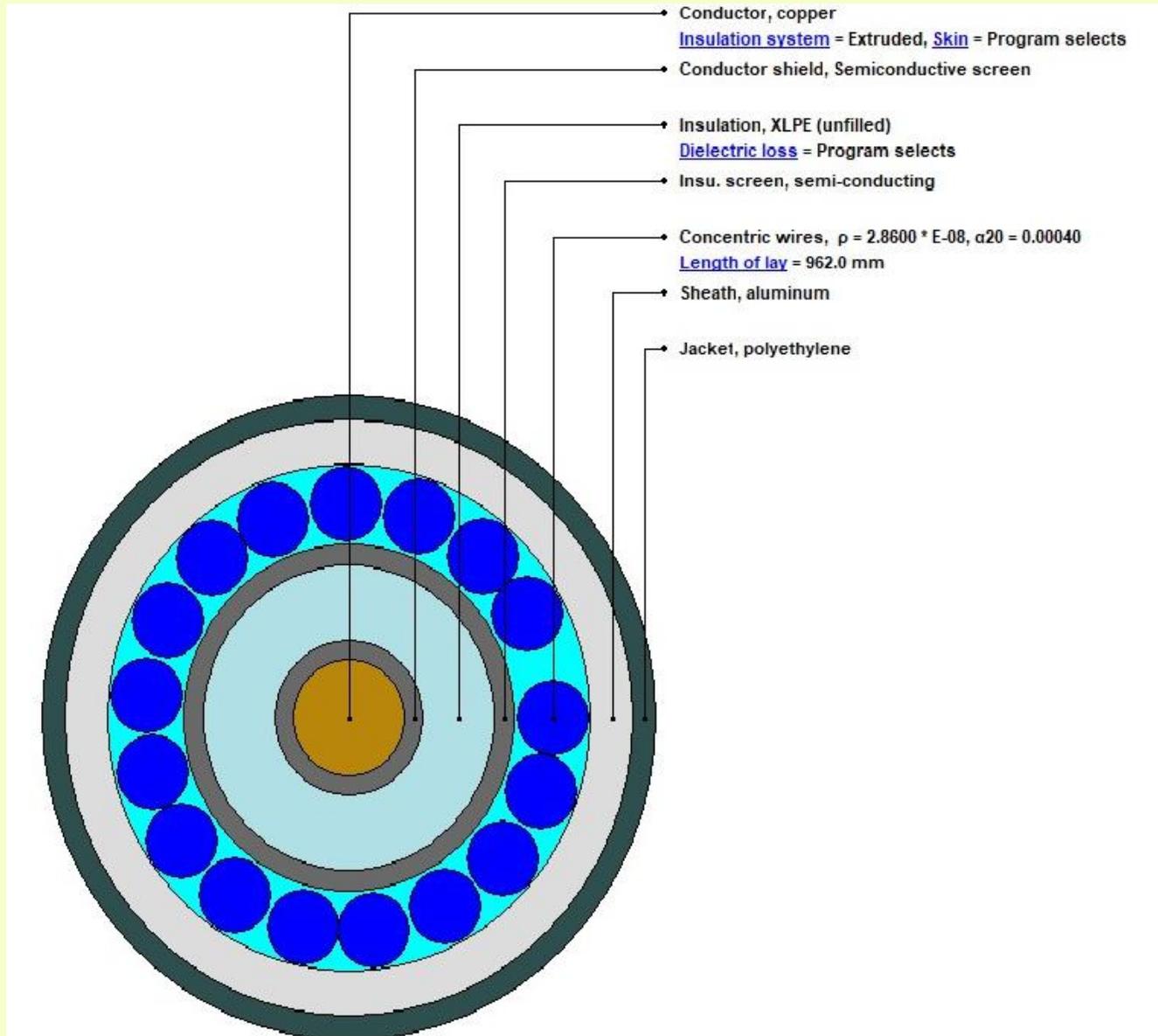
Informações necessárias para simulação:

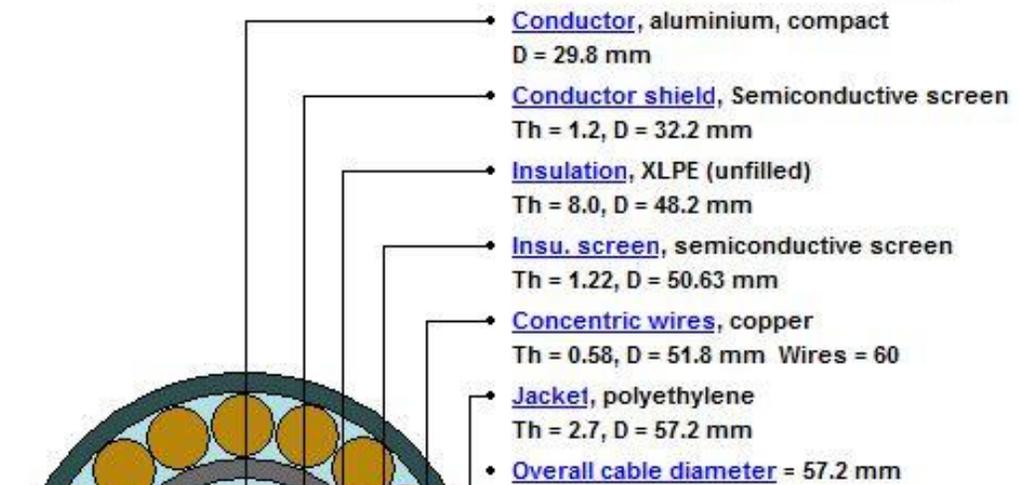
1. Dimensões do cabo de energia.
2. Capacidade de transmissão necessária em estado estacionário e de emergência.
3. Diagrama de carga de 24 horas.
4. Medições de campo da resistividade térmica do solo.
5. Definir se será utilizado banco de dutos ou se será instalado diretamente na solo.
6. Sistema de aterramento do blindagem

## 2.1.2 Modelagem de cabo de energia



UNICAMP





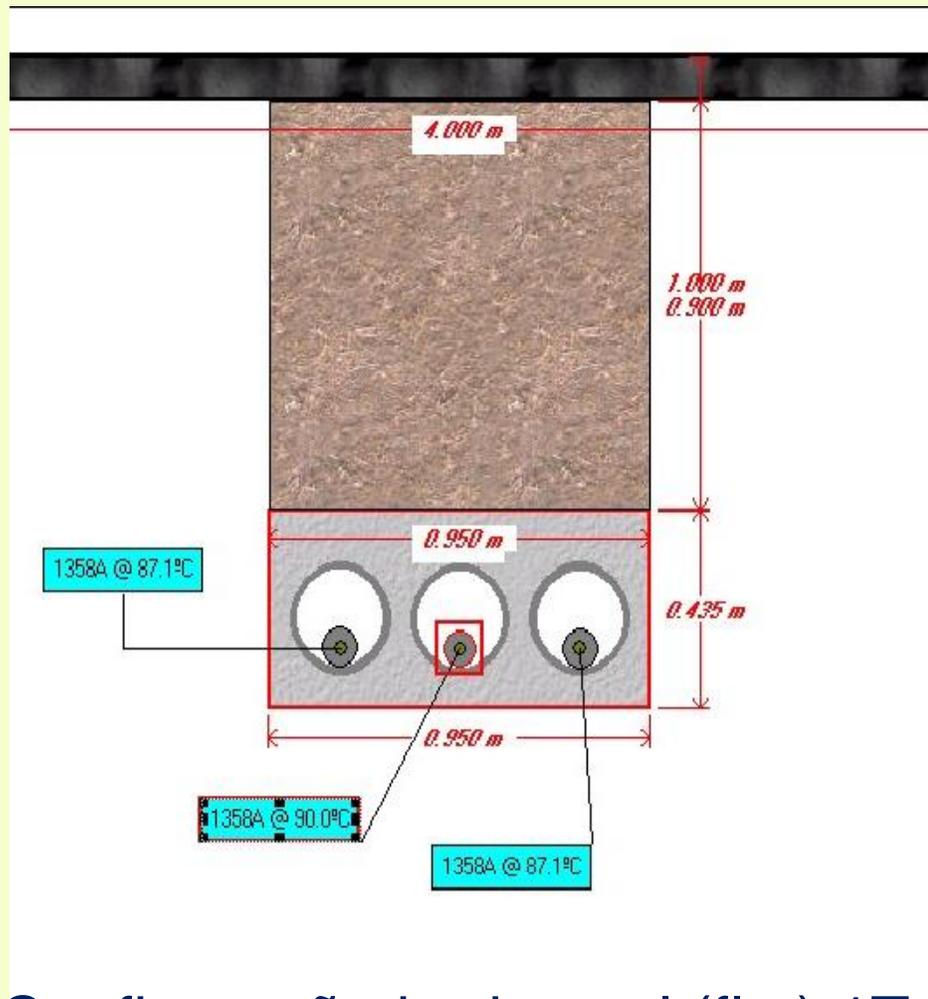
Datos Identificativos			
Código del Cable		0412808	0412809
Tipo de cable		RHE-OL	RHE-OL
Norma		IEC 60502-2 basado	
Tensión Nominal	kV	20/34,5	20/34,5
Nº Conductores x Sección		1 x 630 mm <sup>2</sup>	1 x 240 mm <sup>2</sup>
Características de Diseño			
Material conductor		Aluminio	Aluminio
Forma		Circular compactado	Circular compactado
Clase / Norma		2 / IEC 60228	2 / IEC 60228
Diámetro Nominal	mm	29,80	23,00
Conductor obturado		NO	NO
Cinta semiconductora obturante sobre conductor		NO	NO
Material pantalla sobre conductor		Capa semiconductora extruida	
Esesor nominal	mm	1,2	0,5
Material aislamiento		XLPE	XLPE
Esesor nominal (*)	mm	8,0 / --	8,0 / --
Diámetro sobre aislamiento	mm	48,2	40,0
Material pantalla sobre aislamiento (no metálico)		Capa semiconductora extruida	
Esesor nominal	mm	0,5	0,5
Cinta semiconductora obturante bajo pantalla metálica		SI	SI
Material pantalla sobre aislamiento (parte metálica)		Hilos Cu	Hilos Cu
Formación de la pantalla	N x mm	60x0,583	60x0,583
Sección de la pantalla (hilos Cu)	mm <sup>2</sup>	16	16
Cinta de cobre en helice abierta, sobre la pantalla de hilos		SI	SI
Material cubierta		MDPE	MDPE
(tipo: DMZ1 según HD 620 Parte 10E / ST7 según IEC 60502-2)			
Esesor nominal / mínimo en cualquier punto	mm	2,7 / --	2,5 / --
Diámetro nominal exterior	mm	57,2	48,6
Marca de cubierta en dos líneas diametralmente opuestas		SI	SI
Peso nominal	kg/km	3680	2530
Radio mínimo de curvatura (en servicio)	mm	870	720



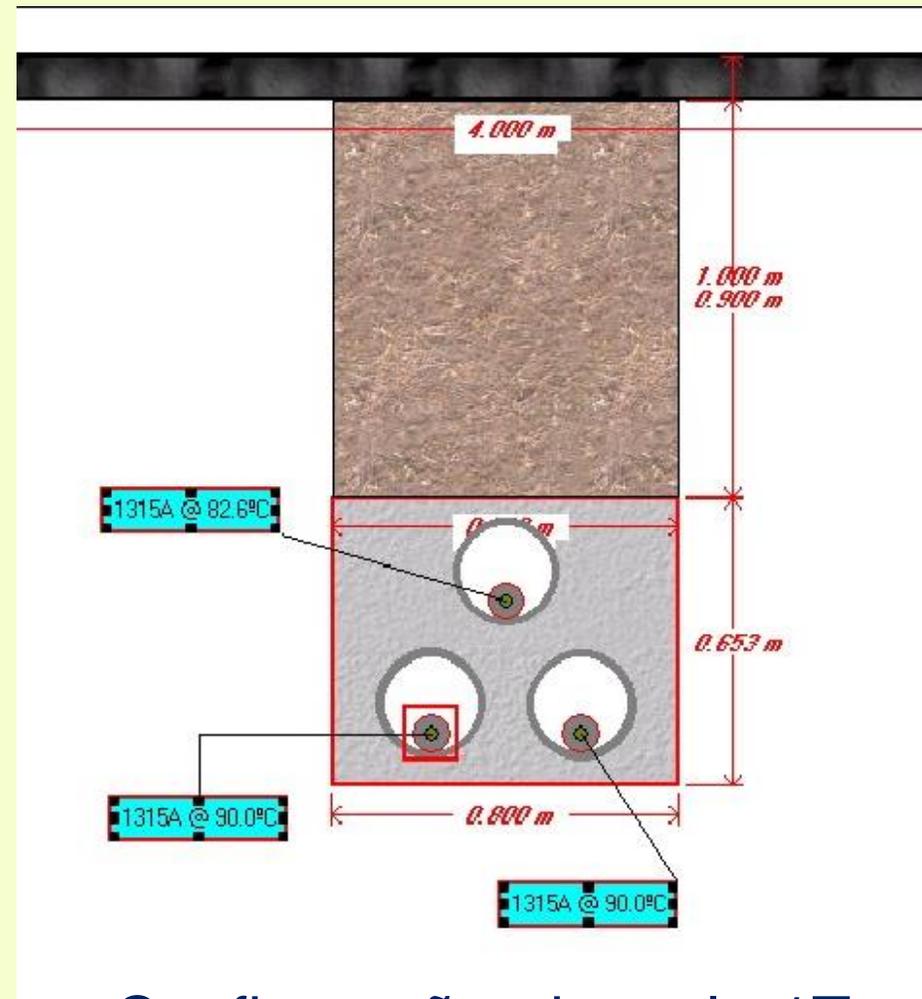
# HERSATENE

RHE-OL AL  
20/34,5 kV

## 2.1.2 Seleção de banco de dutos



Configuração horizontal (flat) 1T



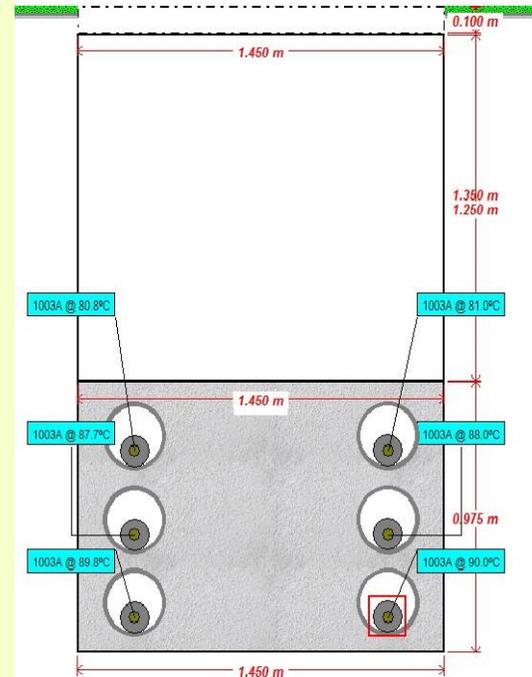
Configuração triangular 1T

Usando o modelo de multi duct bank

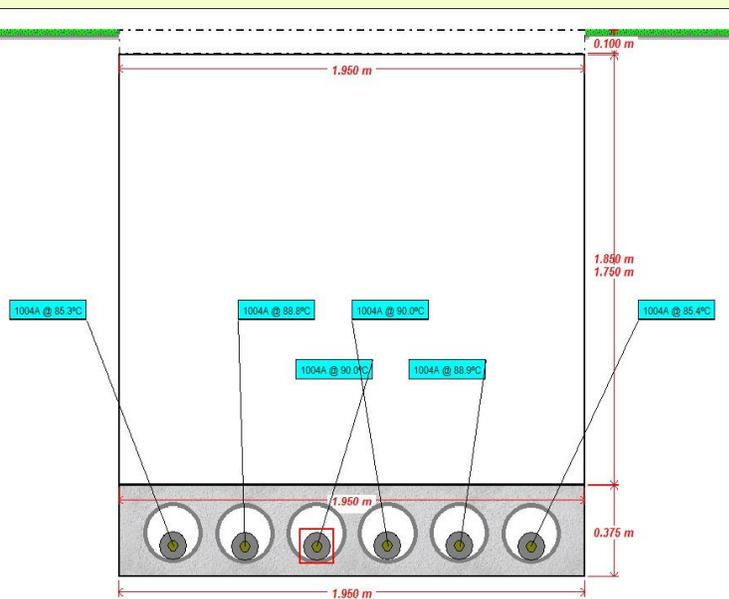


UNICAMP

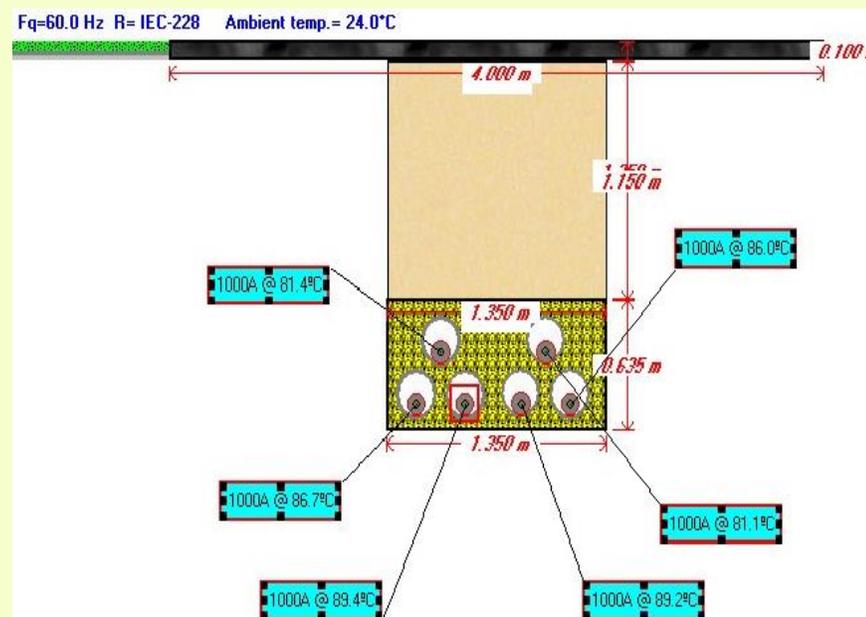
## Configuração vertical 2T



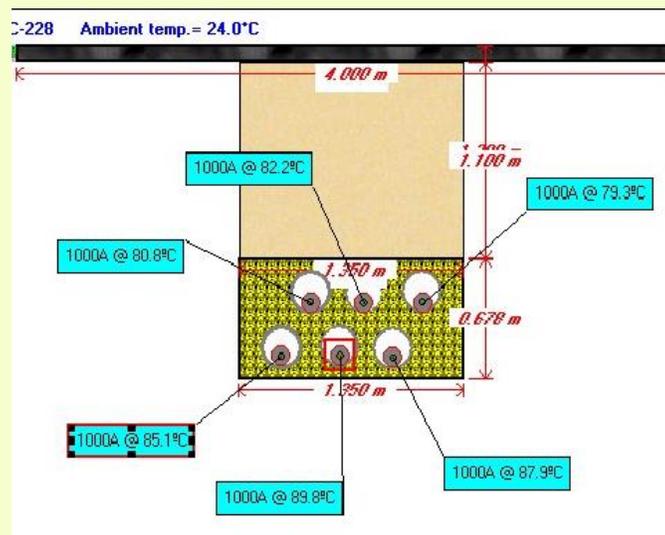
## Configuração horizontal (flat) 2T



## Configuração triangular 2T



## Configuração triangular invertida 2T



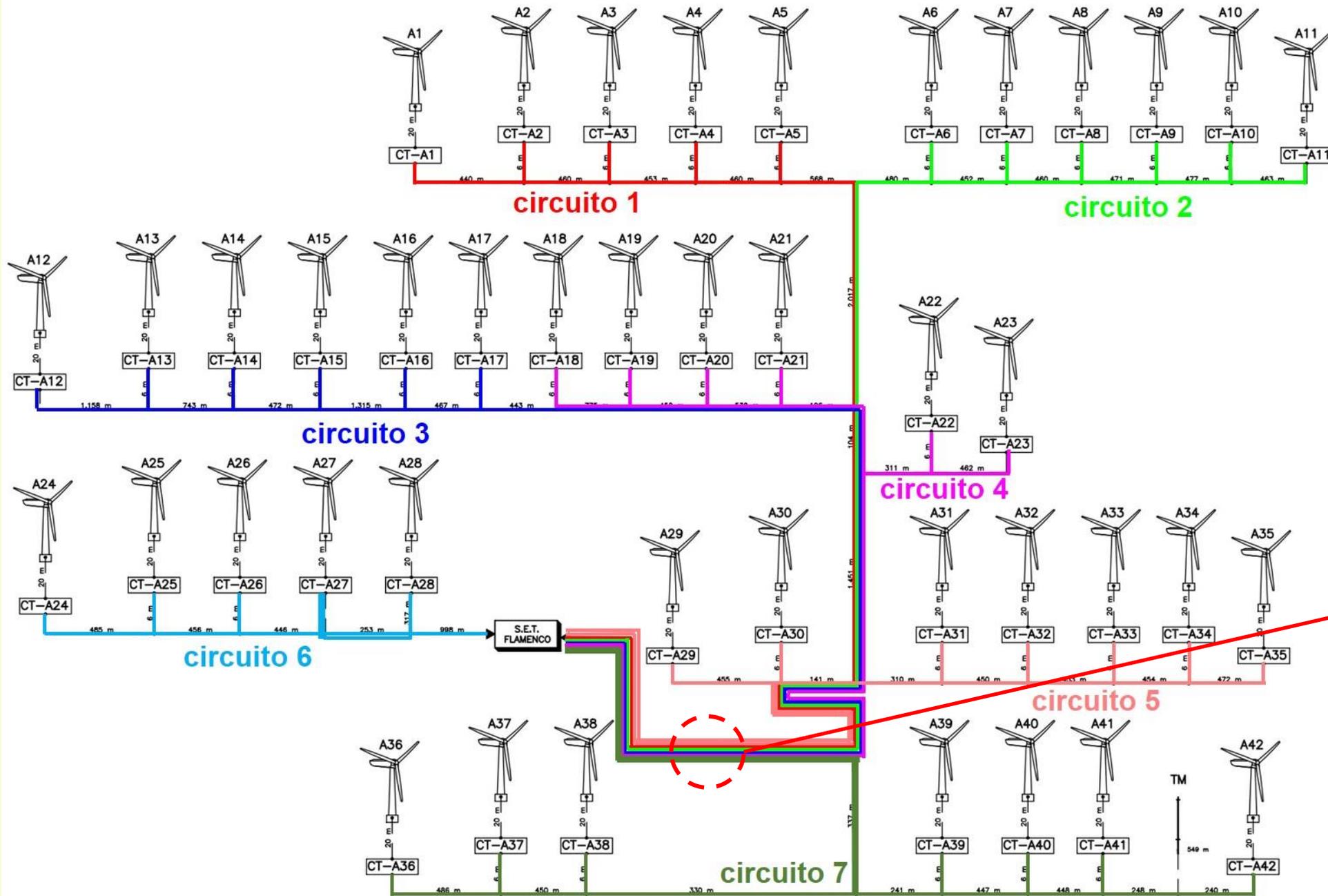
TEST CASE ID	Description	CYMCAP Software	Cable HV Software	Difference
01	Three cables in separate ducts in backfill, flat not touching	766.2 A <a href="#">View PDF</a>	770.5 A <a href="#">View PDF</a>	+0.56%
04	Three cables combined in a duct in backfill	685.6 A <a href="#">View PDF</a>	695.4 A <a href="#">View PDF</a>	+1.41%
06	Three cables in separate ducts in backfill, trefoil touching	746.9 A <a href="#">View PDF</a>	743.1 A <a href="#">View PDF</a>	-0.51%
13	Three cables buried direct in backfill, flat touching	748.7 A <a href="#">View PDF</a>	757.7 A <a href="#">View PDF</a>	+1.19%

# Erros durante o cálculo da capacidade de transmissão



Alguns erros mais comuns no cálculo da capacidade de transmissão:

- Utilize tabelas com fatores de proximidade e correção para o número de cabos. No entanto, estes fatores foram concebidos para valores de resistividade térmica natural, que muito provavelmente não são corretos durante o projeto.
- Não considere uma distância de separação entre os cabos durante a instalação. Embora reduza as perdas nas blindagens, aquece os condutores.
- Colocar diversas fases em um único banco de dutos, sem considerar as corretas dimensões de separação entre circuitos.
- No caso de cruzamentos transversais com cabos energizados, não cumprem a distância exigida.
- Coloque cabos de diferentes dimensões em um único banco de dutos
- Cada projeto de capacidade de transmissão é próprio, para cada banco de dutos deverão ser realizadas as respectivas simulações.



Caso de análise

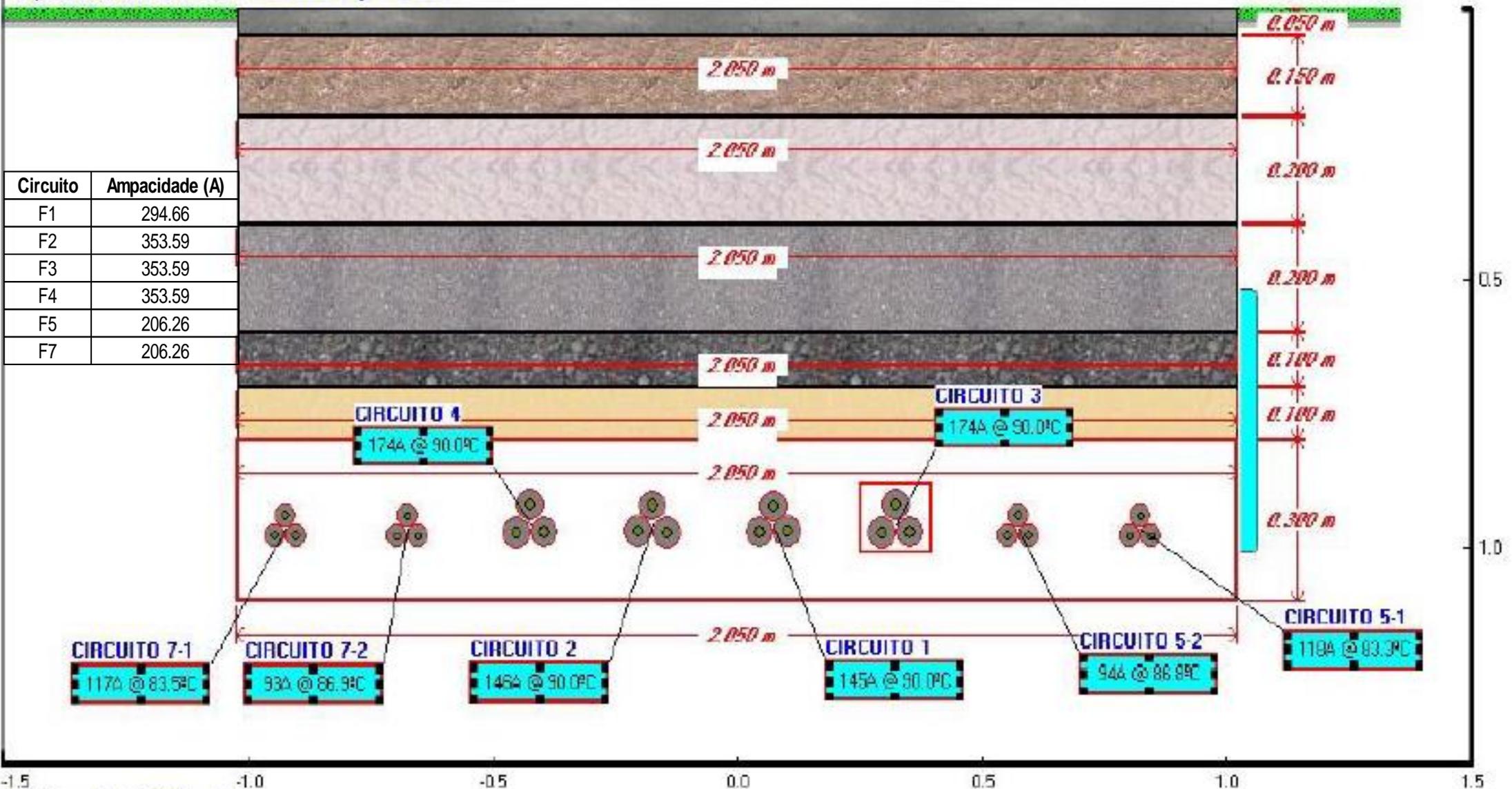


Circuito	Tramo	Longitud (km)	Sección (mm <sup>2</sup> )	Potencia (MW)	Corriente (A)
F1	A-01 - A-02	0,398	95	3,2	58,93
	A-02 - A-03	0,49	95	6,4	117,86
	A-03 - A-04	0,4	95	9,6	176,80
	A-04 - A-05	0,425	150	12,8	235,73
	A-05 - SUBESTACIÓN	7,483	630	16	294,66
F2	A-11 - A-10	0,375	95	3,2	58,93
	A-10 - A-09	0,45	95	6,4	117,86
	A-09 - A-08	0,459	95	9,6	176,80
	A-08 - A-07	0,461	150	12,8	235,73
	A-07 - A-06	0,442	240	16	294,66
	A-06 - SUBESTACIÓN	7,41	630	19,2	353,59
F3	A-12 - A-13	1,140	95	3,2	58,93
	A-13 - A-14	0,738	95	6,4	117,86
	A-14 - A-15	0,461	95	9,6	176,80
	A-15 - A-16	1,306	150	12,8	235,73
	A-16 - A-17	0,438	240	16	294,66
	A-17 - SUBESTACIÓN	7,285	630	19,2	353,59
F4	A-18 - A-19	0,779	95	3,2	58,93
	A-19 - A-20	0,427	95	6,4	117,86
	A-20 - A-21	0,521	95	9,6	176,80
	A-21 - A-22	0,620	240	12,8	235,73
	A-23 - A-22	0,425	95	3,2	58,93

Circuito	Tramo	Longitud (km)	Sección (mm <sup>2</sup> )	Potencia (MW)	Corriente (A)
	A-22 - SUBESTACIÓN	5,116	630	19,2	353,59
F5	A-35 - A-34	0,460	95	3,2	58,93
	A-34 - A-33	0,427	95	6,4	117,86
	A-33 - A-32	0,444	95	9,6	176,80
	A-32 - A-31	0,434	150	12,8	235,73
	A-31 - A-30	0,441	400	16	294,66
	A-29 - A-30	0,456	95	3,2	58,93
	A-30 - SUBESTACIÓN	2,989	2x240	22,4	412,52
F6	A-28 - A-27	0,614	95	3,2	58,93
	A-24 - A-25	0,398	95	3,2	58,93
	A-25 - A-26	0,444	95	6,4	117,86
	A-26 - A-27	0,433	95	9,6	176,80
	A-27 - SUBESTACIÓN	1,303	240	16	294,66
F7	A-42 - A-41	0,438	95	3,2	58,93
	A-41 - A-40	0,421	95	6,4	117,86
	A-40 - A-39	0,429	95	9,6	176,80
	A-39 - A-38	0,568	240	12,8	235,73
	A-36 - A-37	0,369	95	3,2	58,93
	A-37 - A-38	0,44	95	6,4	117,86
	A-38 - SUBESTACIÓN	1,426	2x240	22,4	412,52



Fq=60.0 Hz R= IEC-228 Ambient temp.= 30.9°C



Circuito	Ampacidade (A)
F1	294.66
F2	353.59
F3	353.59
F4	353.59
F5	206.26
F7	206.26

Native soil- 4.892°C·m/W

Características de Diseño		Aluminio	Aluminio	Aluminio
<b>Material conductor</b>				
Forma		Circular compactado	Circular compactado	Circular compactado
Clase / Norma		2 / IEC 60228	2 / IEC 60228	2 / IEC 60228
Diámetro Nominal	mm	29,80	23,00	17,85
Conductor obturado		NO	NO	NO
Cinta semiconductora obturante sobre conductor		NO	NO	NO
<b>Material pantalla sobre conductor</b>		Capa semiconductora extruida		
Espesor nominal	mm	1,2	0,5	0,5
<b>Material aislamiento</b>		XLPE	XLPE	XLPE
Espesor nominal (*)	mm	8,0 / --	8,0 / --	8,0 / --
Diámetro sobre aislamiento	mm	48,2	40,0	34,9
<b>Material pantalla sobre aislamiento (no metálico)</b>		Capa semiconductora extruida		
Espesor nominal	mm	0,5	0,5	0,5
Cinta semiconductora obturante bajo pantalla metálica		SI	SI	SI
<b>Material pantalla sobre aislamiento (parte metálica)</b>		Hilos Cu	Hilos Cu	Hilos Cu
Formación de la pantalla	N x mm	60x0,583	60x0,583	60x0,583
Sección de la pantalla (hilos Cu)	mm <sup>2</sup>	16	16	16
Cinta de cobre en helice abierta, sobre la pantalla de hilos		SI	SI	SI
<b>Material cubierta</b>		<b>MDPE</b>	<b>MDPE</b>	<b>MDPE</b>
(tipo: DMZ1 según HD 620 Parte 10E / ST7 según IEC 60502-2)				
Espesor nominal / mínimo en cualquier punto	mm	2,7 / --	2,5 / --	2,4 / --
Diámetro nominal exterior	mm	57,2	48,6	43,2
Marca de cubierta en dos líneas diametralmente opuestas				
Peso nominal	kg/km	3680	2530	1915
Radio mínimo de curvatura (en servicio)	mm	870	720	615
Datos Eléctricos				
Resistencia máxima CC del conductor, a 20°C	Ohm/km	0,0469	0,0778	0,125
Resistencia aprox. CA del conductor, a 90°C, 60 Hz	Ohm/km	0,0641	0,102	0,162
Inductancia	mH/km	0,320	0,340	0,368
Reactancia estrella, a 60 Hz	Ohm/km	0,121	0,128	0,139
Capacidad por fase	µF/km	0,324	0,256	0,212
Corriente de carga por fase, a U <sub>0</sub> , 60 Hz	A/km	2,443	1,930	1,598
Intensidad máxima admisible en régimen permanente (**)	A	822 (3) / 564 (4)	611 (3) / 438 (4)	456 (3) / 341 (4)
Temp. máx. conductor en régimen permanente / en cortocircuito	°C	90 / 250	90 / 250	90 / 250
Intensidad máxima admisible en cortocircuito adiabático (0.1/0.5/1.0 s)	kA	188 / 84,2 / 59,6	120 / 53,5 / 37,8	71,8 / 32,1 / 22,7

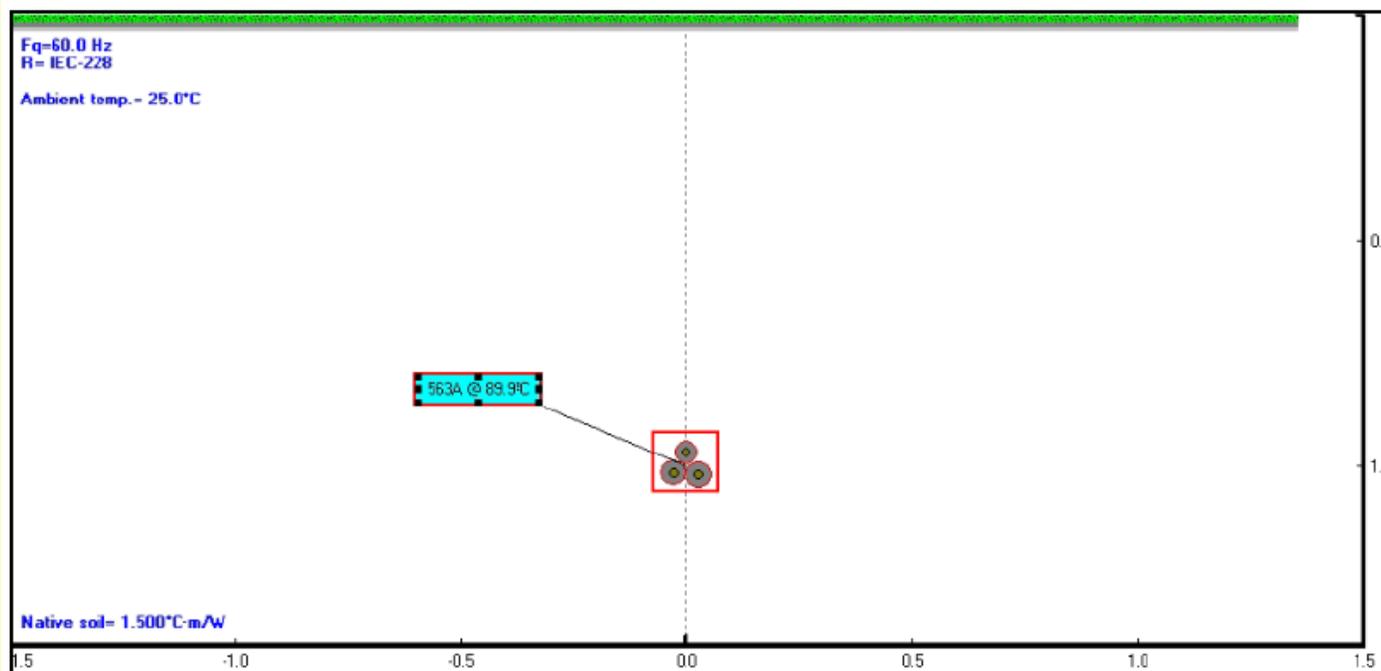


**3 cables unipolares no armados en triángulo en contacto.**

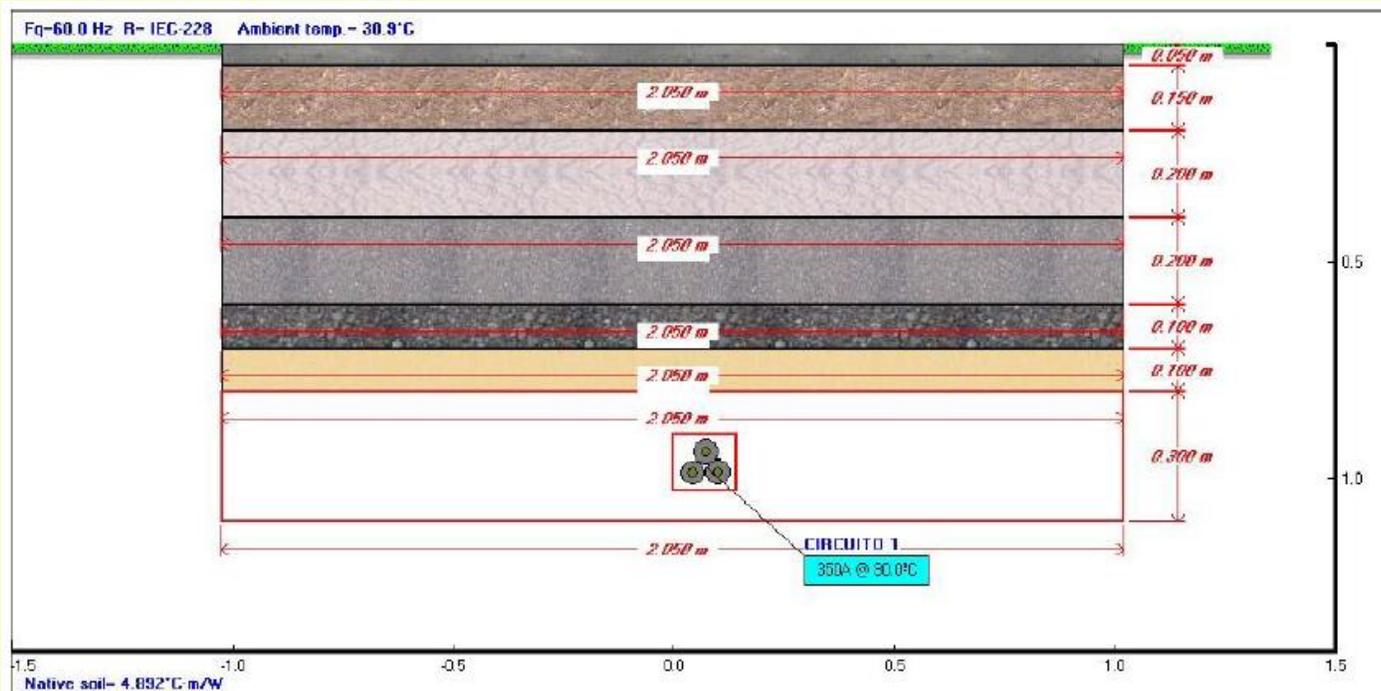
Directamente enterrado, a 25°C - 1,5°K·m/W - 1 m, criterio de cálculo según IEC 60287



UNICAMP

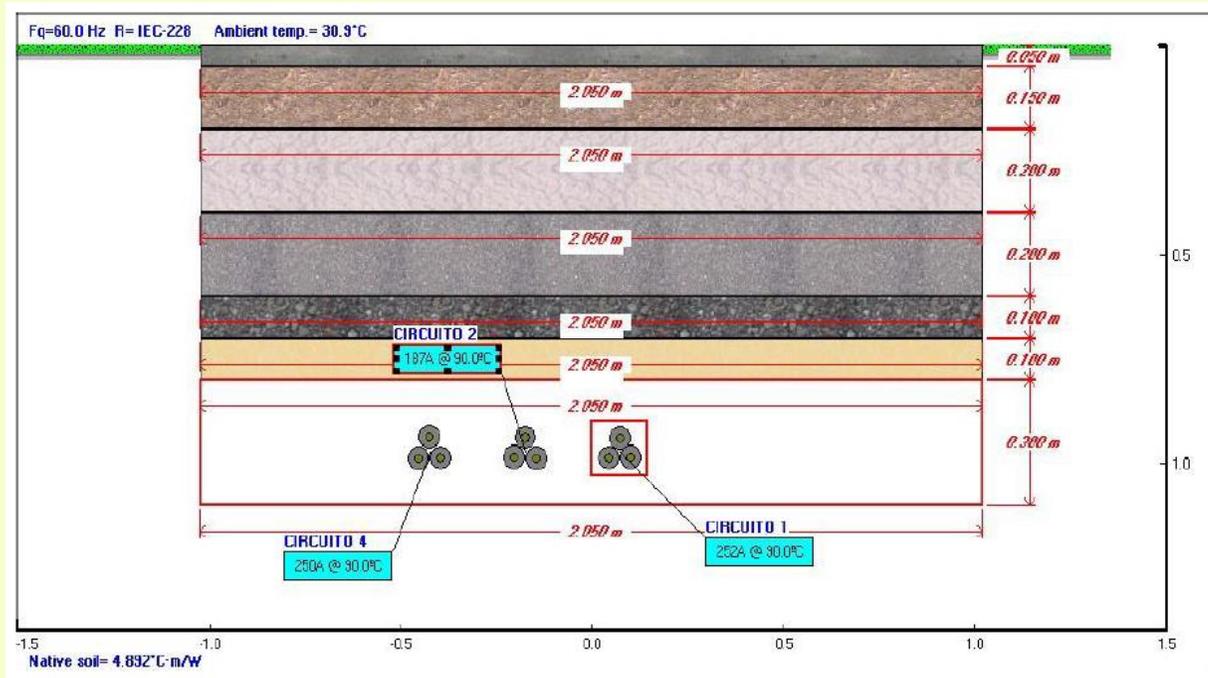
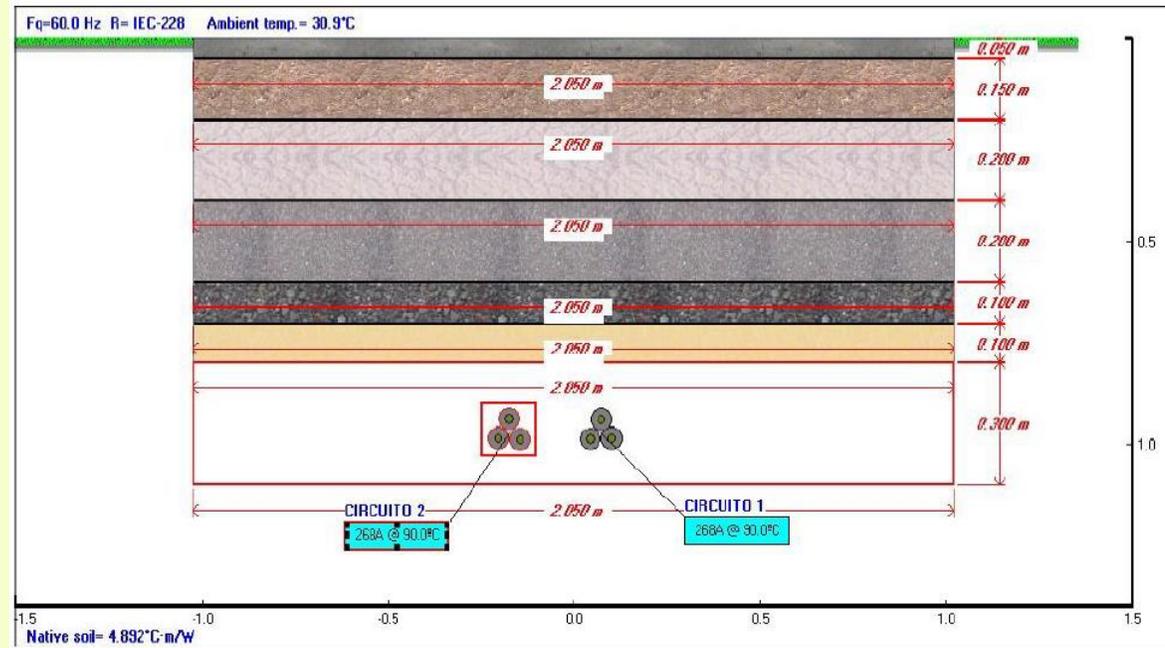


Passo de 563 A  
para 350 A (uma  
redução de  
62%)



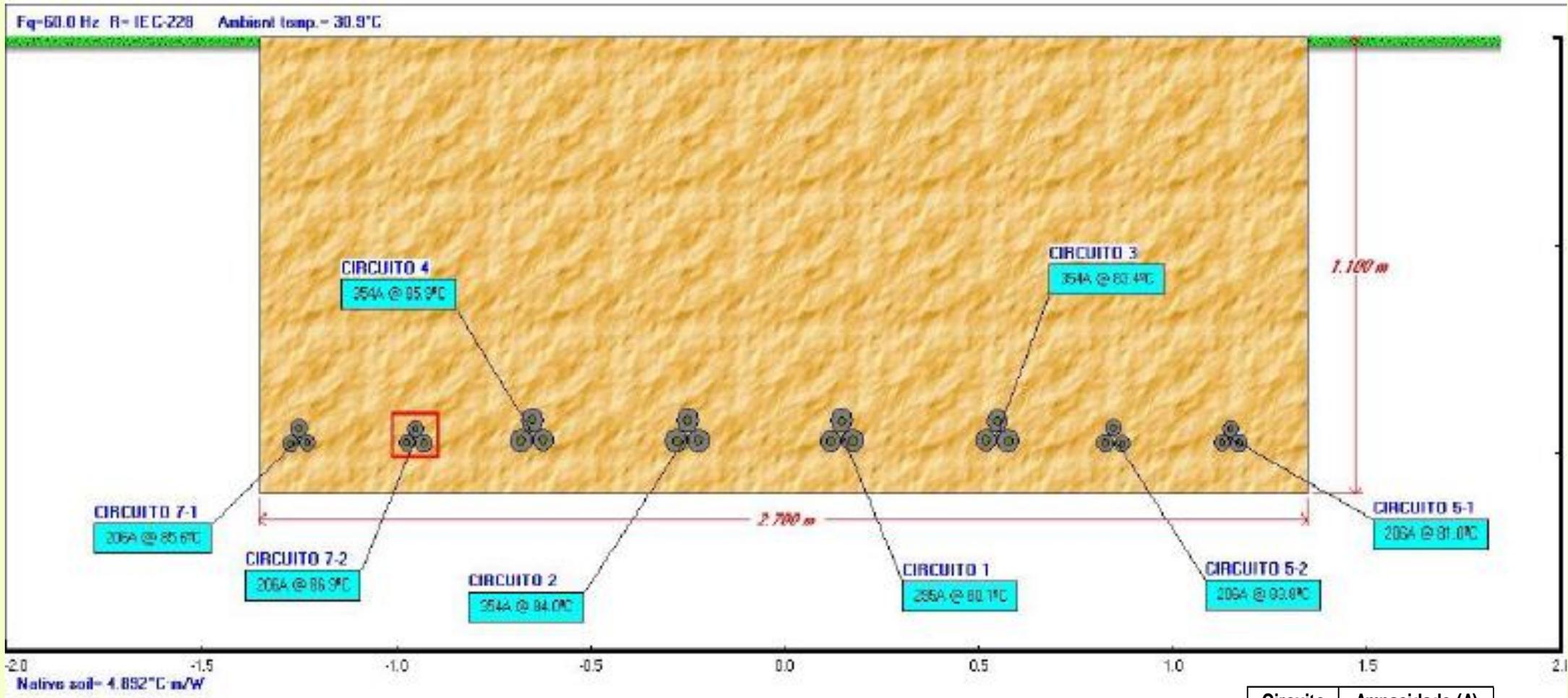


UNICAMP



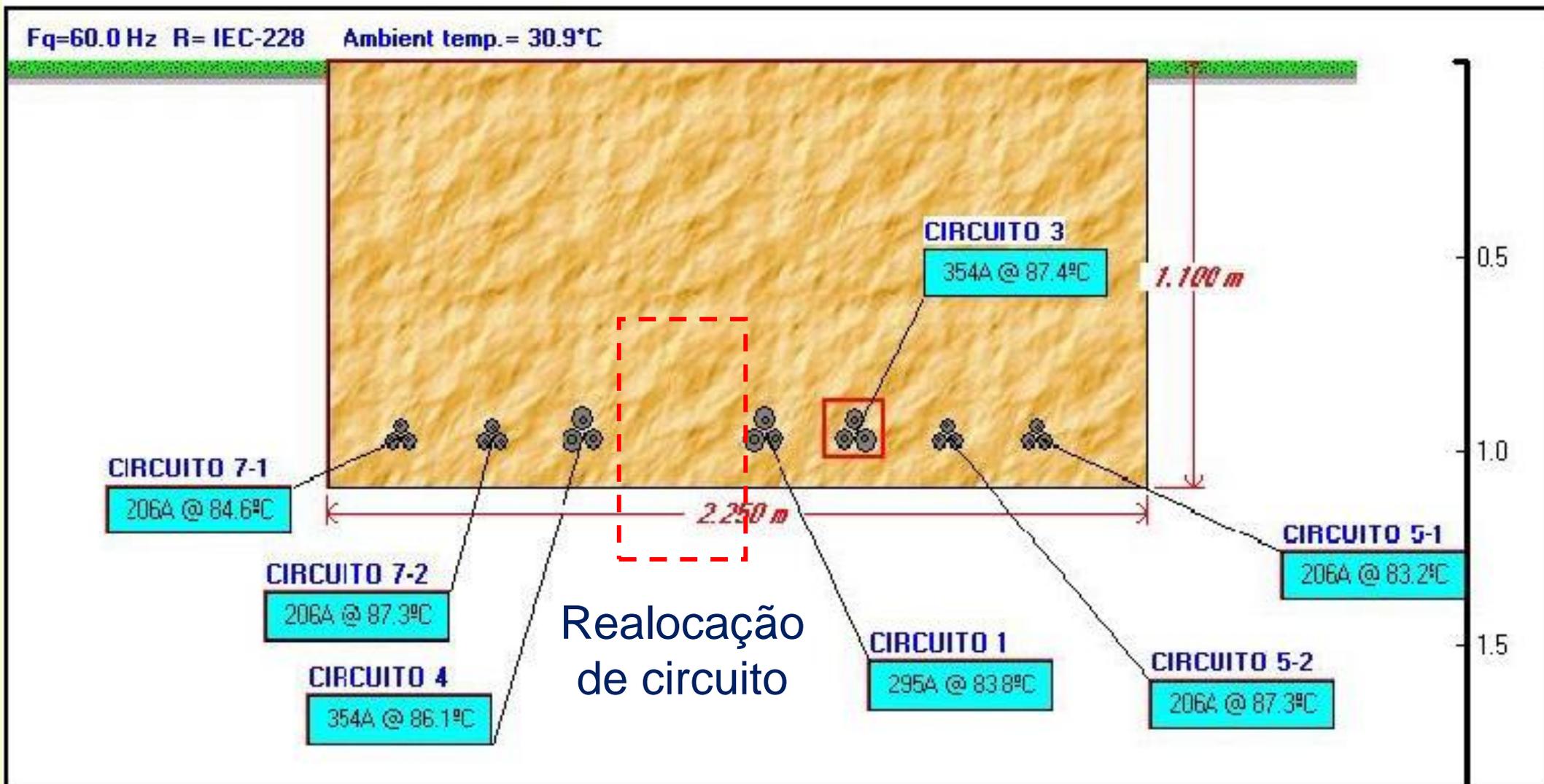


# Soluções:



Backfill + Aumento da distância entre cabos.  
Comprido de 2.05 para 2.70 m

Circuito	Ampacidade (A)
F1	294.66
F2	353.59
F3	353.59
F4	353.59
F5	206.26
F7	206.26



Backfill + Aumento da distância entre cabos + Realocação de um circuito para outra vala.

Comprido de 2.05 para 2.25 m



## 2.1.3 TENSÕES INDUZIDAS ABAIXO DO LIMITE

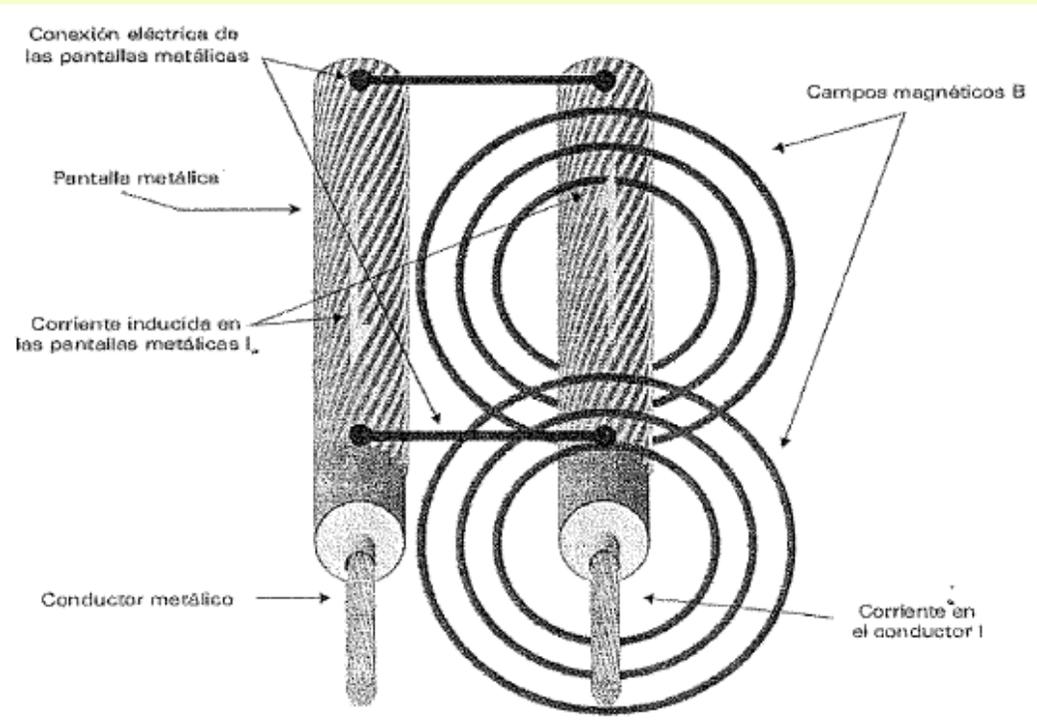
Devido à passagem de corrente alternada pelo núcleo do cabo de energia, é criado um campo magnético ao seu redor, que ao cruzar uma superfície provoca um fluxo magnético. O referido fluxo magnético, por ser variável no tempo, induzirá uma força eletromotriz no perímetro da superfície, que se o perímetro da superfície existir em circuito fechado, será produzida uma corrente circulante.

Por que manter as tensões induzidas abaixo do limite?  
¿Cuál é o limite?

- Dê segurança aos transeuntes.
- Valores elevados de tensões induzidas diminuem a capacidade de transmissão.

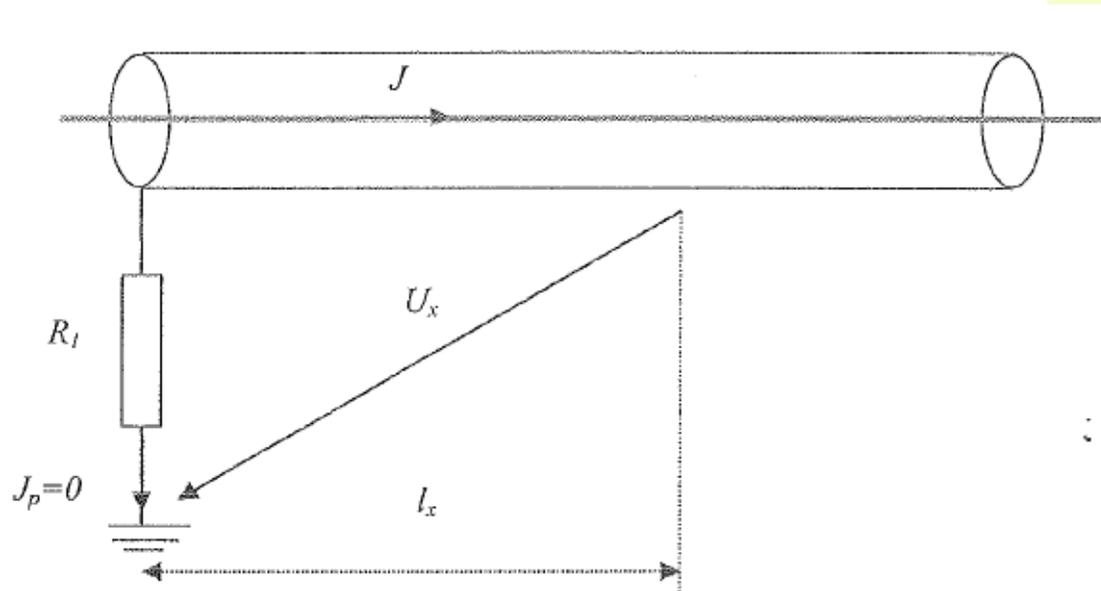
As tensões induzidas dependem de:

1. Dimensões do cabo de alimentação
2. Capacidade de transmissão
3. Separação entre cabos de energia na vala ou duto
4. Tipo de banco de dutos



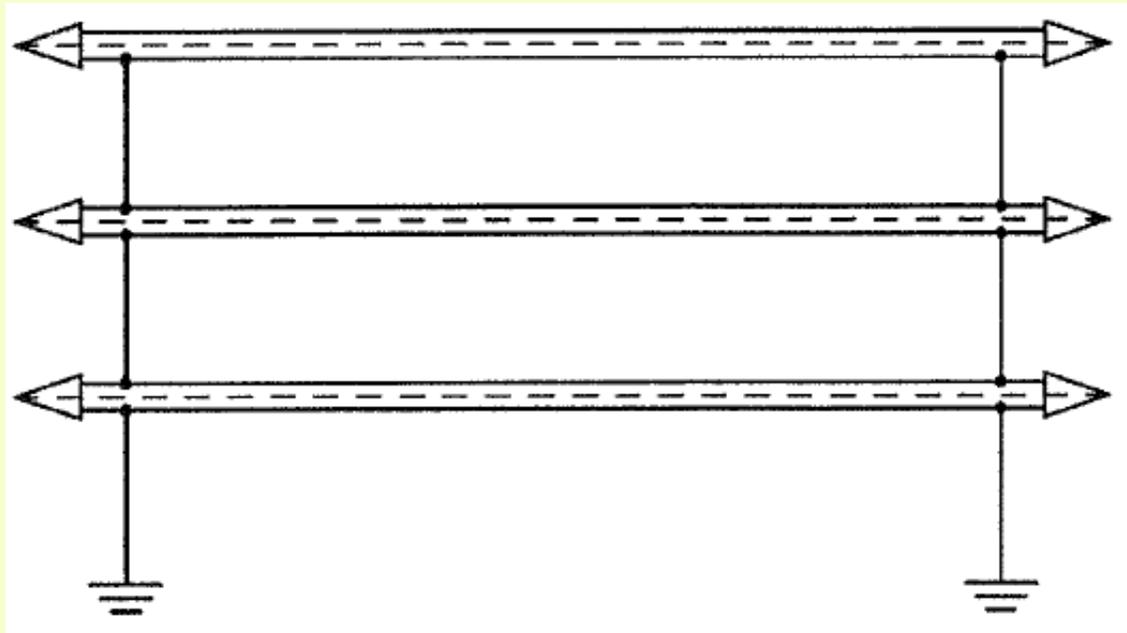
## Em conclusão:

Devido à passagem de corrente alternada pelo núcleo, é gerada uma fem nas blindagens, onde se as blindagens forem conectadas ao terra (fechando o circuito), serão geradas correntes circulantes pela blindagem.



## 2.1.4 Sistemas de aterramento de pantallas

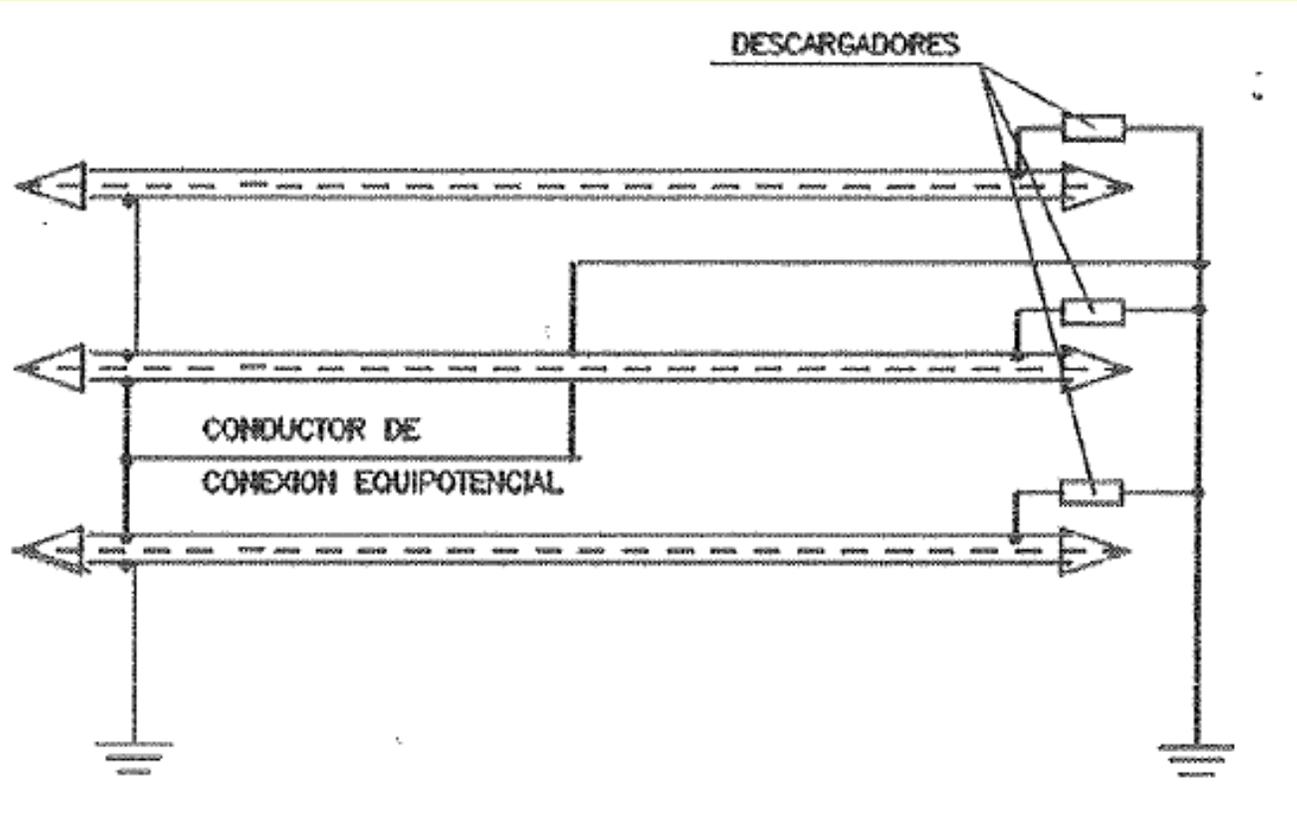
### 2.1.4.1 Solid Bonding



Consiste em conectar as blindagens dos cabos no início e no final do trecho ao terra com o objetivo de reduzir as tensões induzidas nas blindagens; Porém, haverá correntes circulando na tela que afetarão a capacidade de transmissão.

Este método é recomendado para cabos de média tensão com comprimentos máximos de 500 a 600 m, em configuração “tresbolillo” para reduzir as correntes circulantes.

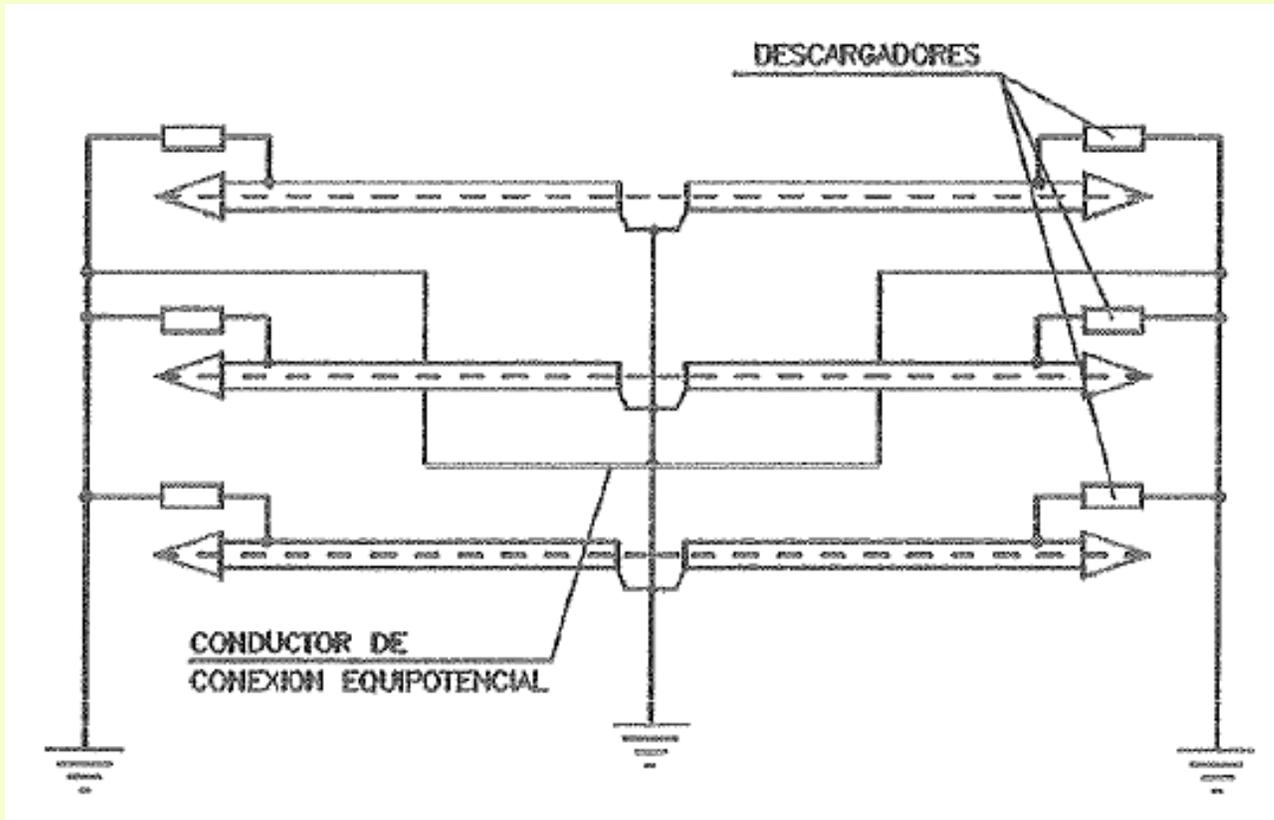
## 2.1.4.2 Single Point Bonding



Para reduzir as perdas produzidas pela corrente que circula pela blindagem, no final do trecho as blindagens não são conectadas diretamente ao terra. Portanto, uma tensão induzida é gerada no final da seção.

Em caso de falhas é necessário instalar pára-raios (limitadores de tensão) conhecidos como SVL que conectarão as blindagens com o cabo de ligação equipotencial de retorno a fim de evitar valores elevados de tensões de toque e de passo no final do trecho. Este método é recomendado para linhas curtas (600 m) em alta tensão.

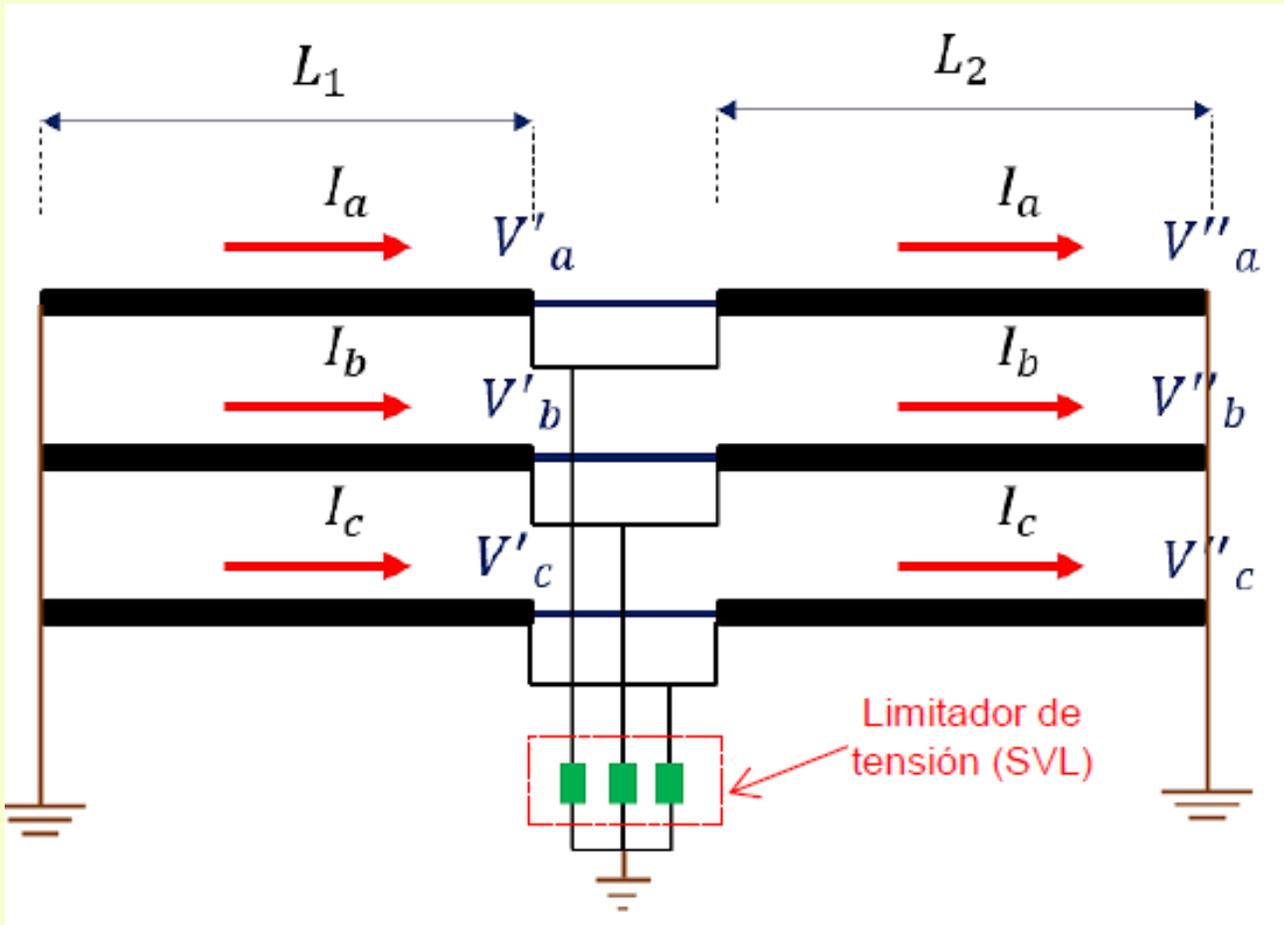
## 2.1.4.3 Mid Point



No meio do trecho é feita a emenda, conectando as blindagens diretamente ao terra. Nas extremidades, a tela de aterramento é isolada por meio de pára-raios (SVL'S). O cabo de retorno à terra é usado em toda a seção.

Mid point es prácticamente 2 singles point bonding

## 2.1.4.4 Variações al Mid Point

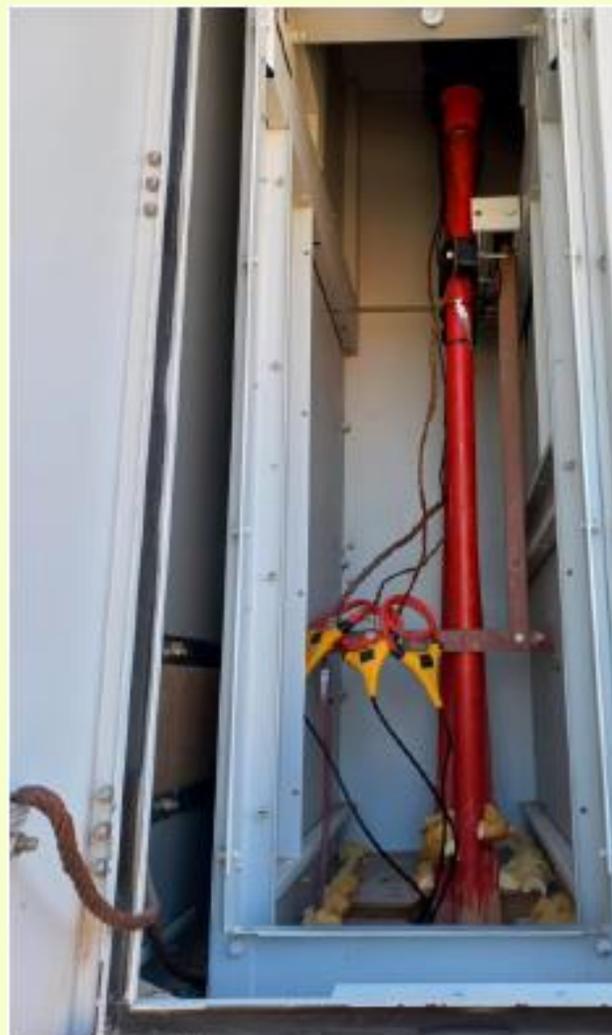


No meio do trecho, as telas de solo são isoladas por meio de SVL's. O cabo de retorno é usado em toda a seção.

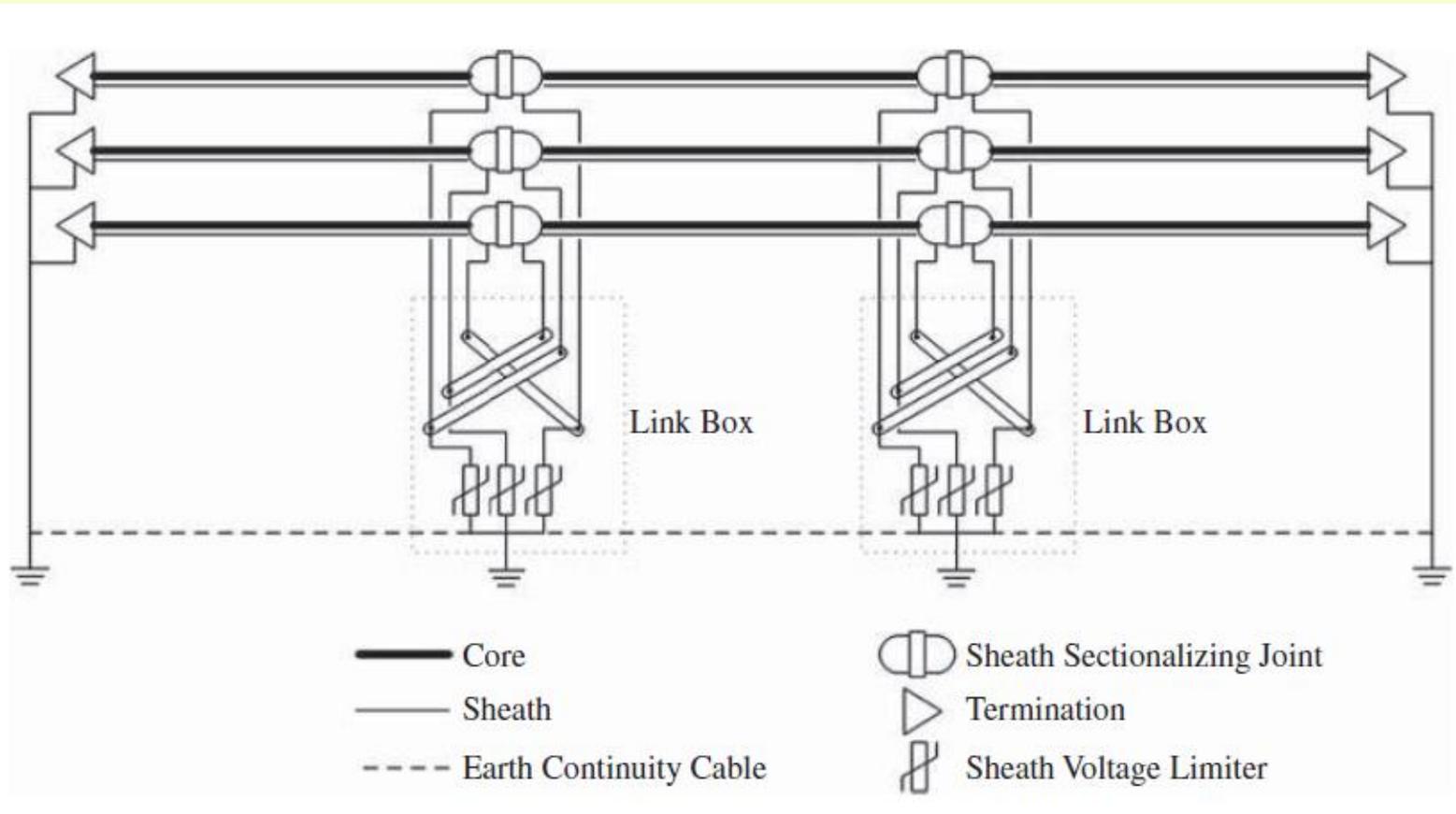


UNICAMP

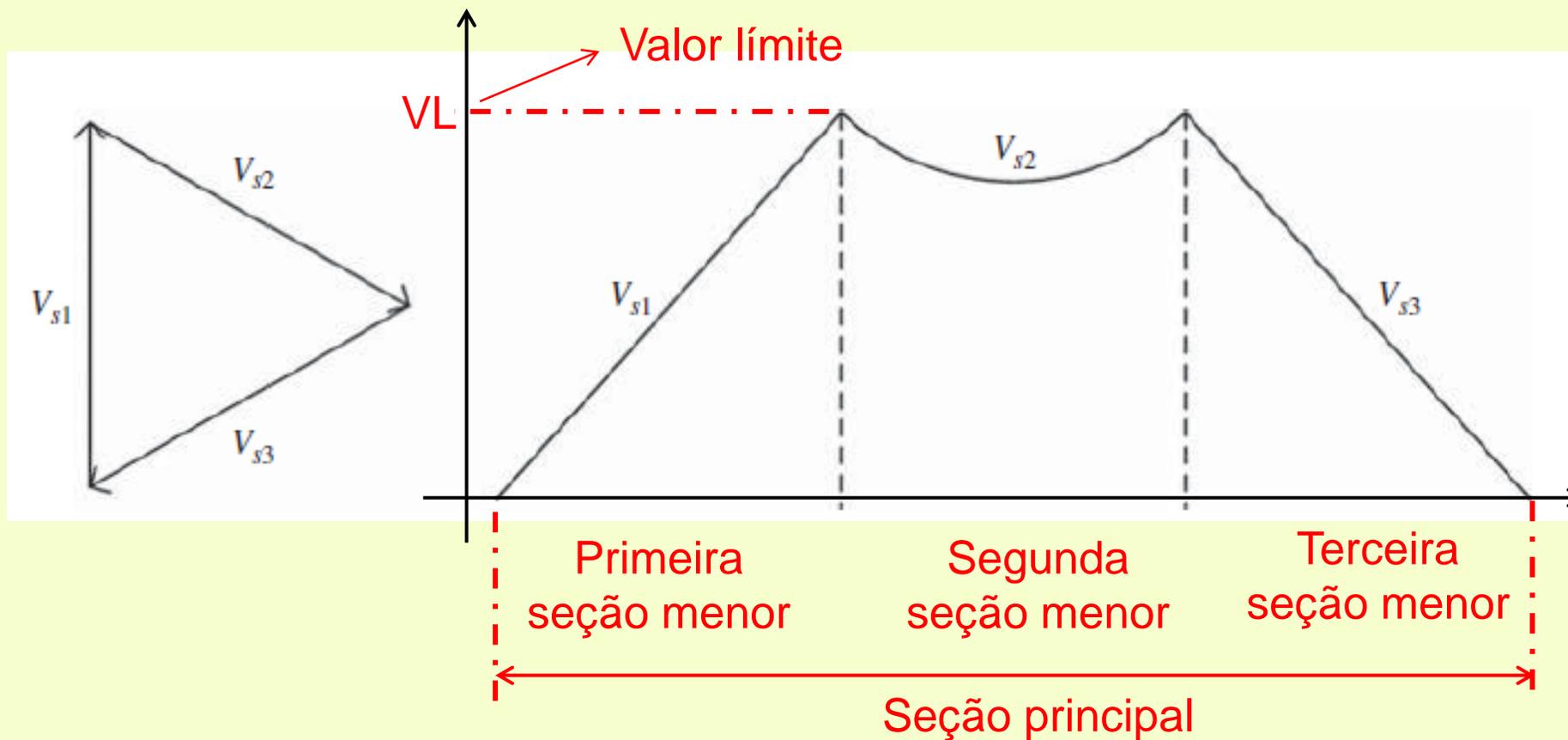
# Solid Bonding – $I_b = 54 \text{ A}$



## 2.1.4.5 Cross bonding

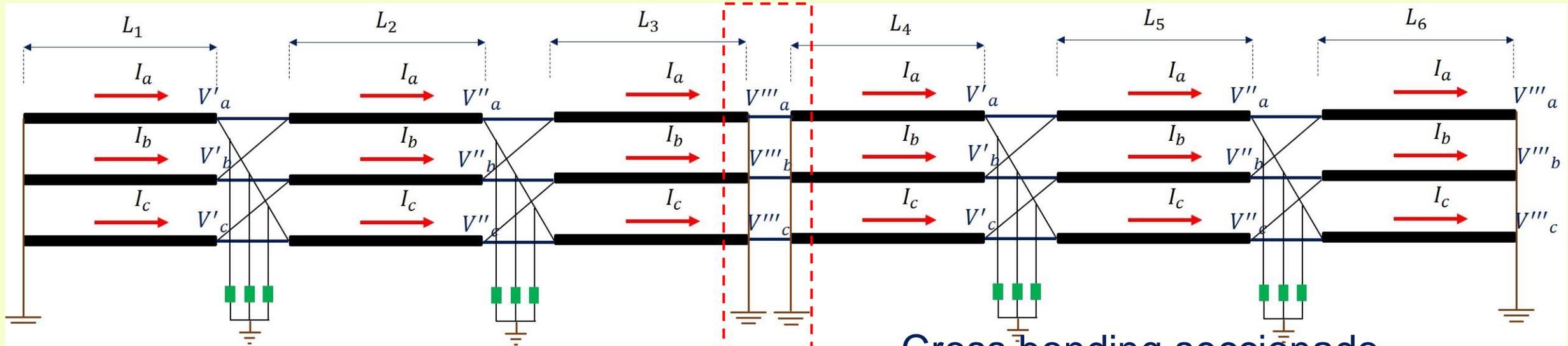


Aproveitando que as tensões induzidas geradas nas blindagens do cabo de potência estão  $120^\circ$  defasadas, assim como as correntes nominais, no final da terceira seção, desde que o comprimento de cada seção mais curta seja igual, a tensão induzida será zero.

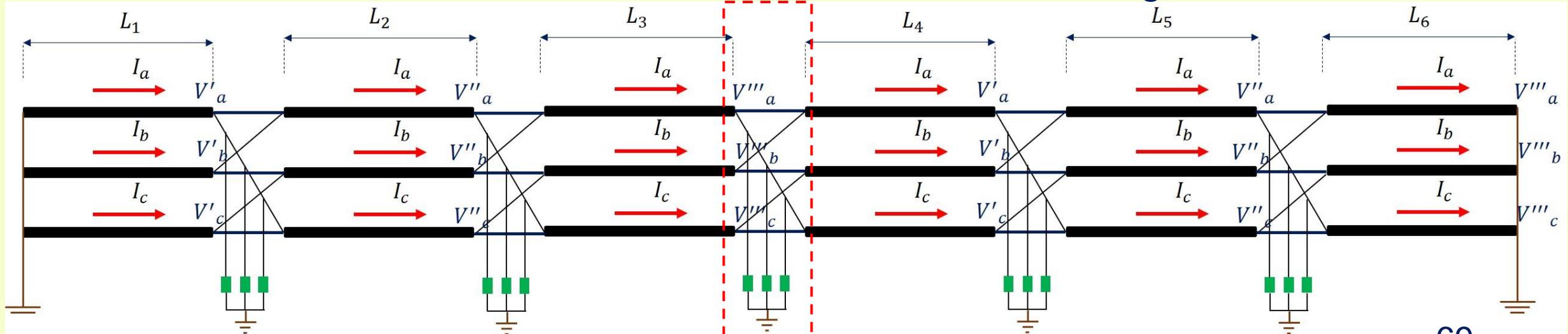


No final da seção maior, a tensão induzida na blindagem é zero e não haverá correntes circulantes nem necessidade de cabo de retorno de terra.

# Existem 2 tipos de cross-bonding, de acordo com o IEEE 575



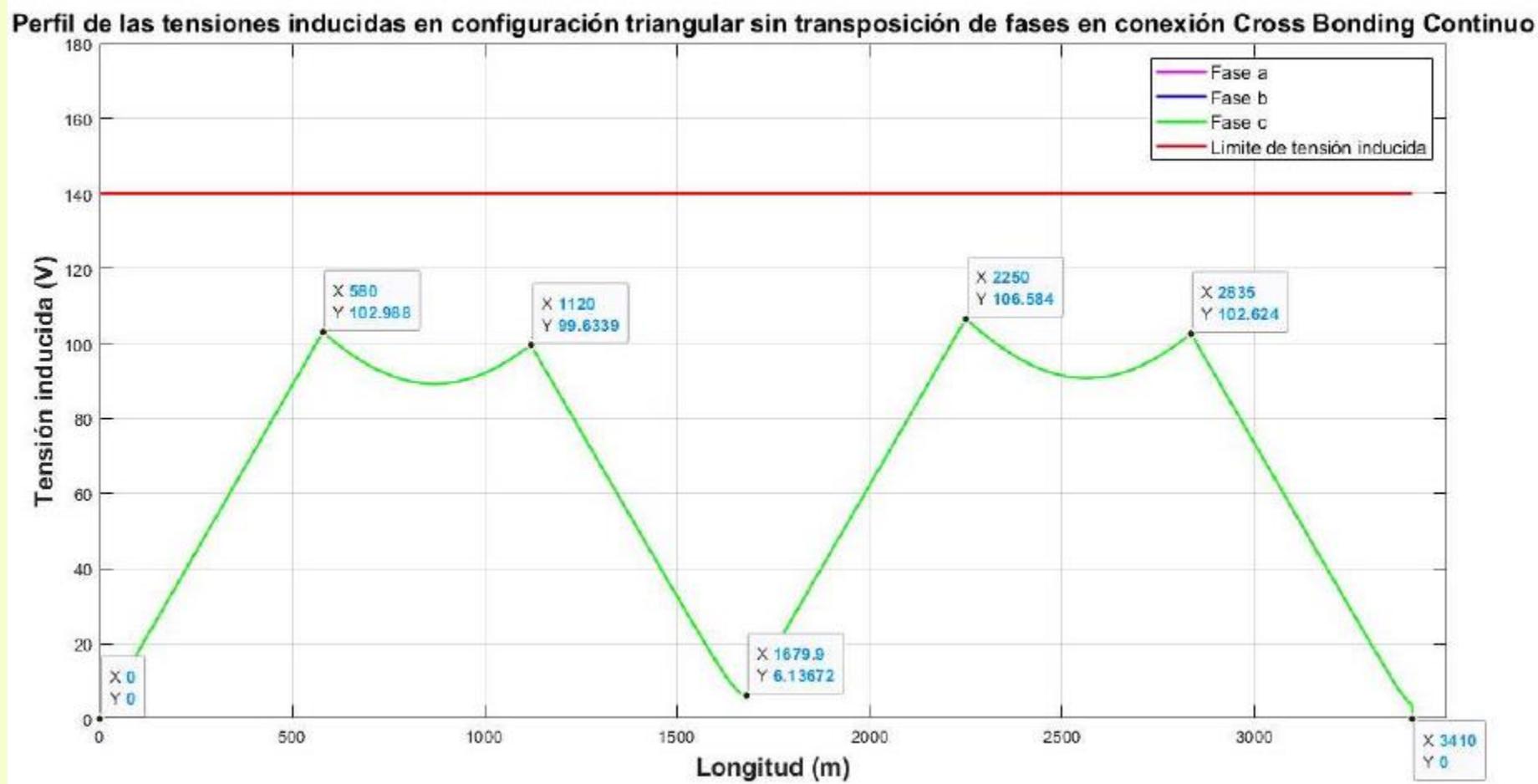
Cross bonding seccionado

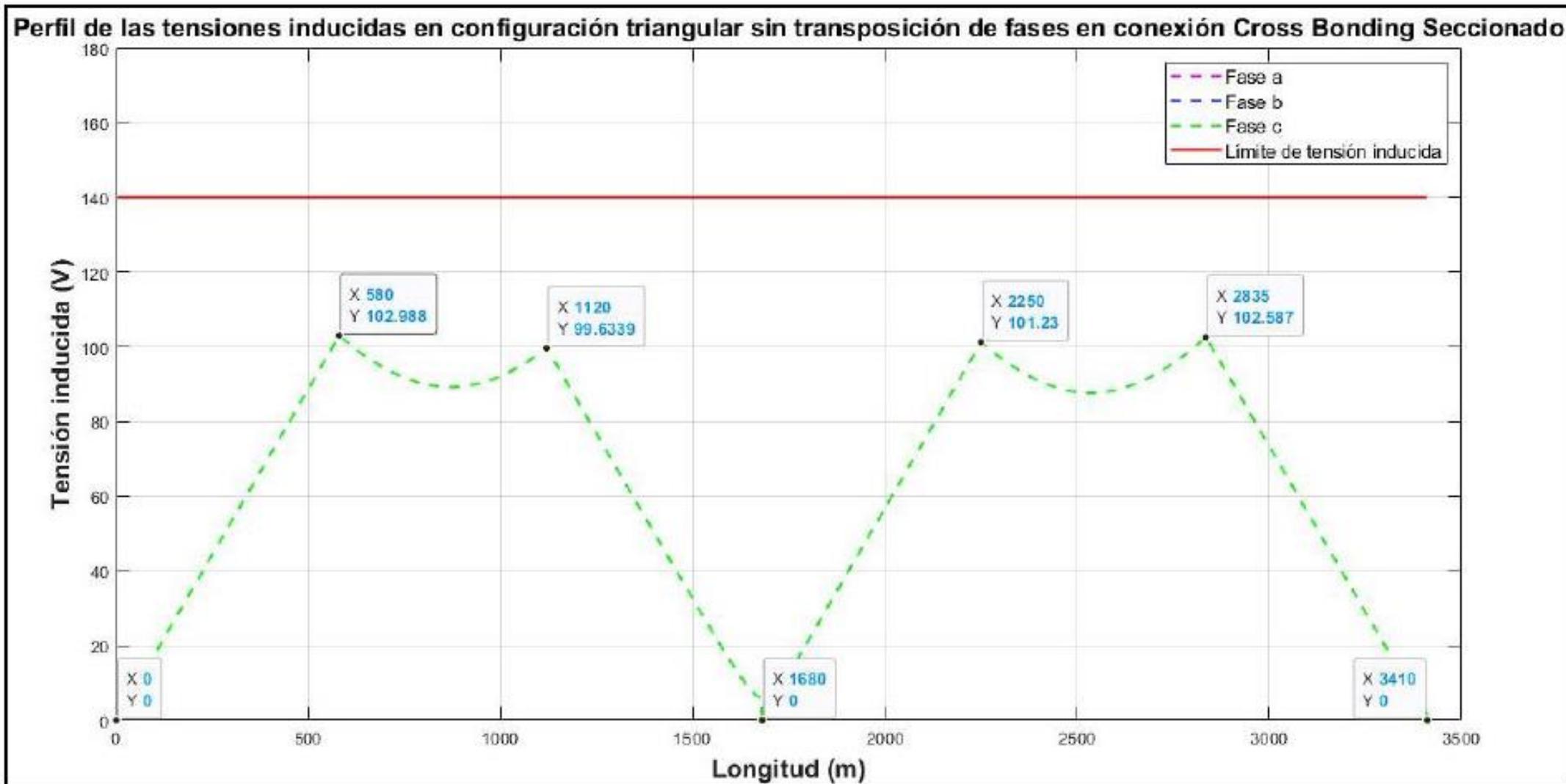


Cross bonding contínuo

Além disso, os métodos de aterramento de blindagem podem ser combinados, por exemplo, o método de ligação cruzada + ligação de ponto único. Porém, deve-se manter o cumprimento dos valores de tensão induzida recomendados pela norma. A norma IEEE 575 fornece valores limites que alguns países adotaram como regulamentação. Como boa prática, algumas concessionárias adotam valores entre 120 – 140 V.

Portanto, o melhor método para criar o sistema de aterramento da blindagem da linha subterrânea é cross bonding; porém, na prática não é possível obter comprimentos iguais de seções menores, portanto haverá uma tensão residual induzida, o que gera perdas na blindagem.





Devido à tensão residual, ocorrerão perdas na blindagem do cabo de potência, limitando a capacidade de transmissão.

A tensão residual induzida não depende apenas dos comprimentos das seções menores, mas também da disposição física dos cabos de energia nas valas e dutos.

No caso de circuitos simples, para a configuração triangular depende apenas dos comprimentos das seções menores devido à assimetria entre suas fases; No entanto, para a configuração plana (flat) não depende apenas dos comprimentos das seções menores, mas também da sua posição física. Portanto, sempre terá uma tensão residual induzida constante em função de “ $\ln(2)$ ” mesmo que teoricamente os comprimentos das seções menores sejam iguais. Como solução para isso, propõe-se a transposição de fases.

Para circuitos duplos, todas as configurações requerem transposição de fases, não só para reduzir tensões induzidas, mas para evitar problemas de desequilíbrio de corrente no sistema de transmissão.

# Analysis of Induced Voltages on the Sheath of Single-Circuit Underground Power Lines - Part I: Without Phases Transposition

Jesus E. Guevara  
*School of Electrical and Computer Eng.*  
*State University of Campinas*  
 Campinas, SP, Brazil  
 j272296@dac.unicamp.br

Jaimis S. L. Colqui  
*School of Electrical and Computer Eng.*  
*State University of Campinas*  
 Campinas, SP, Brazil  
 jaimis@unicamp.br

Juan P. Bautista  
*Faculty of Electrical Engineering*  
*National University of Engineering.*  
 Lima, Peru  
 jbautista@uni.edu.pe

José Pissolato Filho  
*School of Electrical and Computer Eng.*  
*State University of Campinas*  
 Campinas, SP, Brazil  
 pisso@unicamp.br

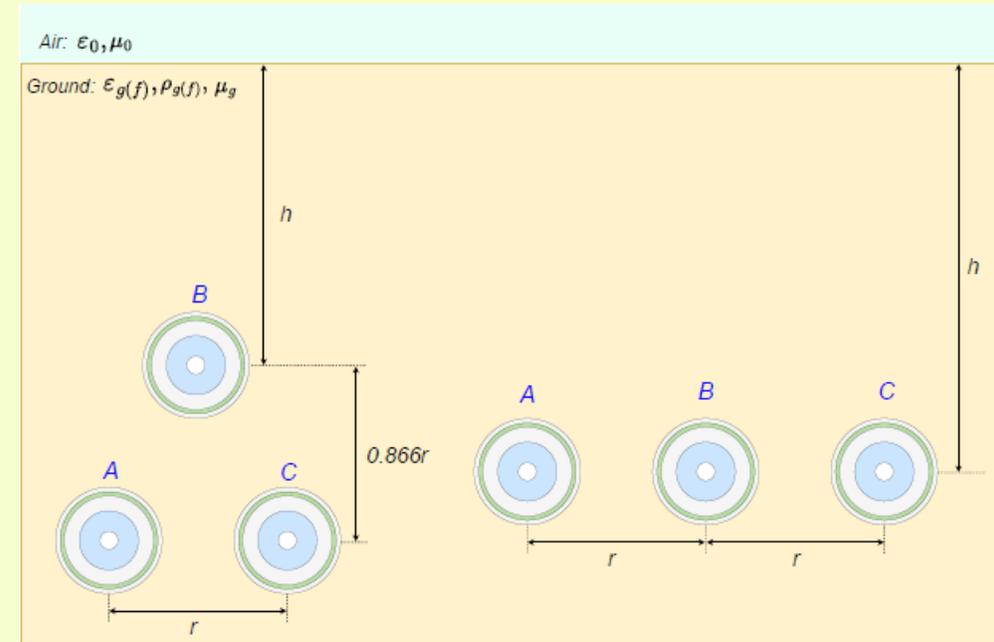
# Analysis of Induced Voltages on the Sheath of Single-Circuit Underground Power Lines - Part II: With Phases Transposition

Jesus E. Guevara  
*School of Electrical and Computer Eng.*  
*State University of Campinas*  
 Campinas, SP, Brazil  
 j272296@dac.unicamp.br

Jaimis S. L. Colqui  
*School of Electrical and Computer Eng.*  
*State University of Campinas*  
 Campinas, SP, Brazil  
 jaimis@unicamp.br

Juan P. Bautista  
*Faculty of Electrical Engineering*  
*National University of Engineering.*  
 Lima, Peru  
 jbautista@uni.edu.pe

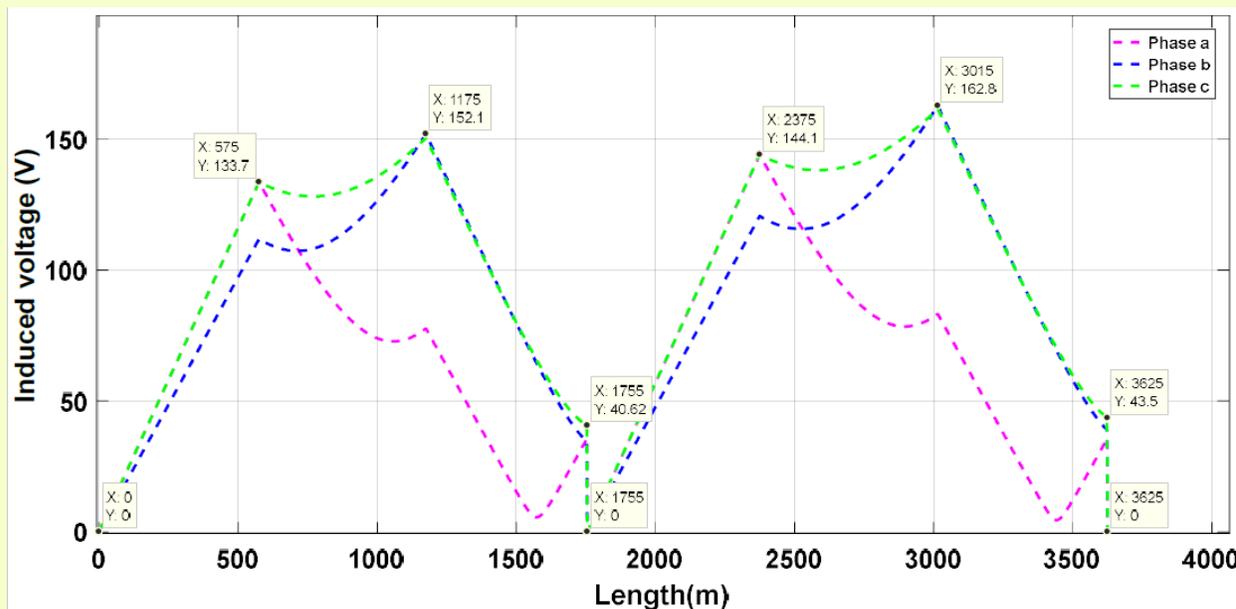
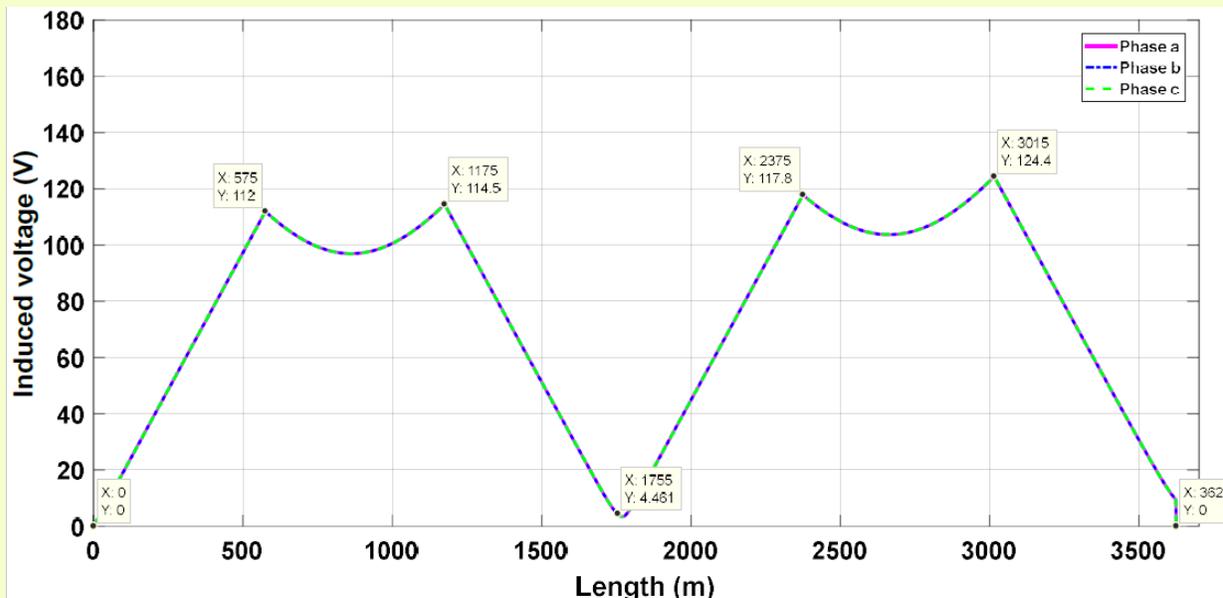
José Pissolato Filho  
*School of Electrical and Computer Eng.*  
*State University of Campinas*  
 Campinas, SP, Brazil  
 pisso@unicamp.br



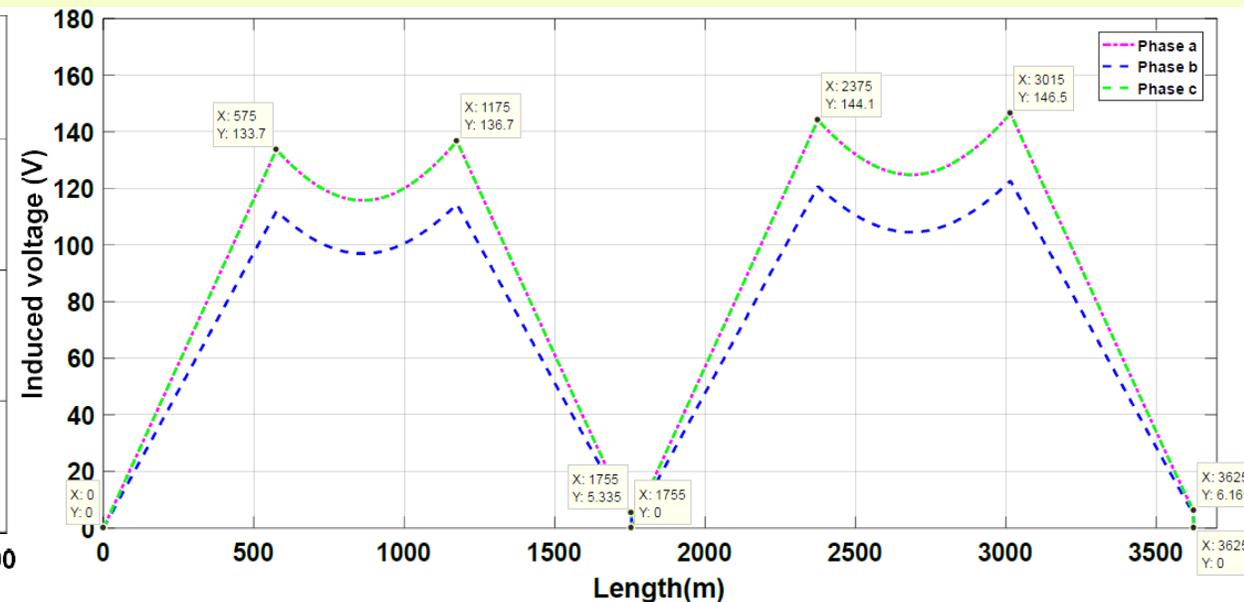


UNICAMP

# Triangular configuration



Configuração Flat sem transposição de fase



Configuração Flat com transposição de fase

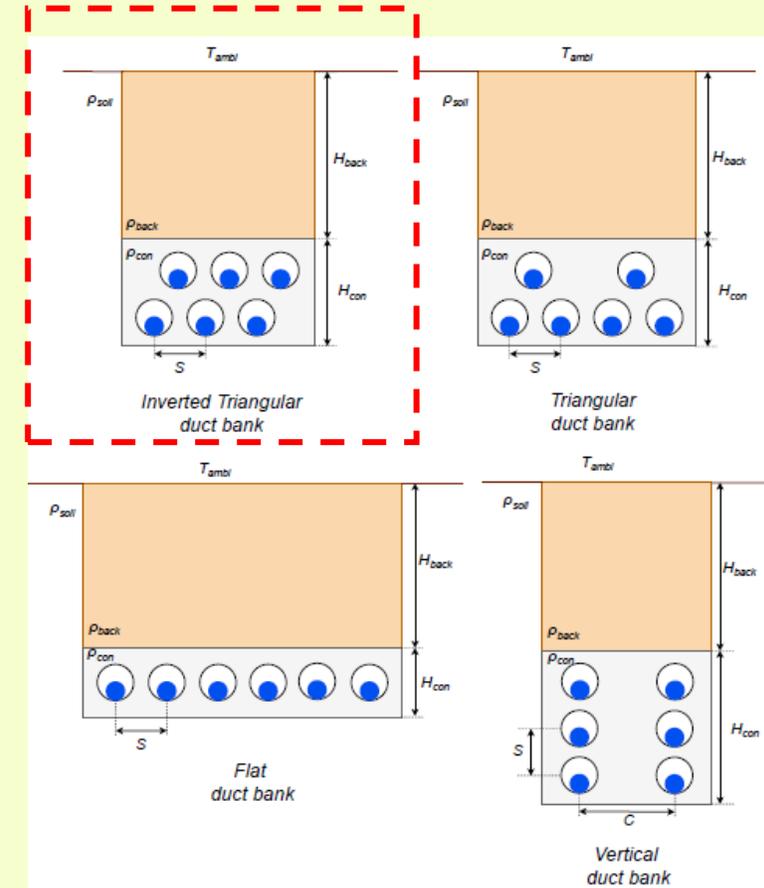
# Analysis of Induced Voltages on the Sheath of Double-Circuit Underground Power Lines - Part I: Without Phases Transposition

Jesus E. Guevara  
School of Electrical and Computer Eng.  
State University of Campinas  
Campinas, SP, Brazil  
j272296@dac.unicamp.br

Jaimis S. L. Colqui  
School of Electrical and Computer Eng.  
State University of Campinas  
Campinas, SP, Brazil  
jaimis@unicamp.br

Juan P. Bautista  
Faculty of Electrical Engineering  
National University of Engineering.  
Lima, Peru  
jbautista@uni.edu.pe

José Pissolato Filho  
School of Electrical and Computer Eng.  
State University of Campinas  
Campinas, SP, Brazil  
pisso@unicamp.br



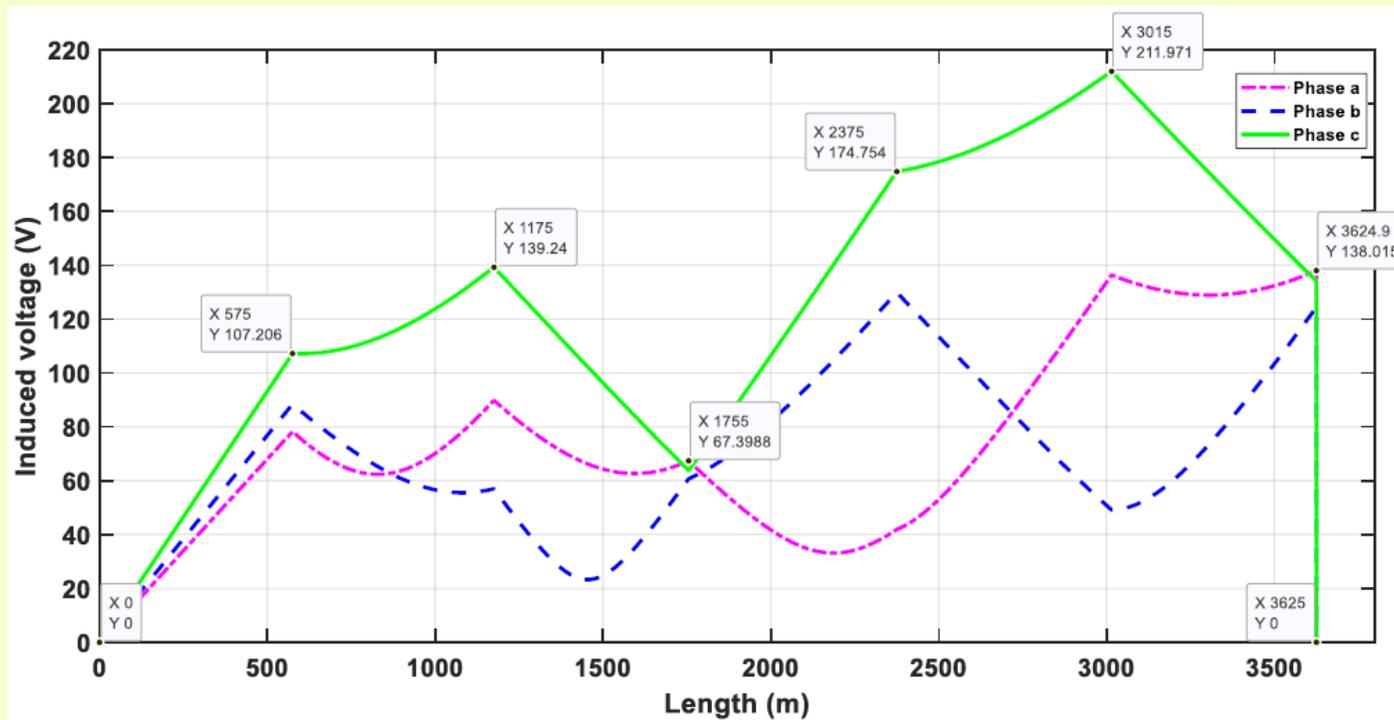
# Analysis of Induced Voltages on the Sheath of Double-Circuit Underground Power Lines - Part II: With Phases Transposition

Jesus E. Guevara  
School of Electrical and Computer Eng.  
State University of Campinas  
Campinas, SP, Brazil  
j272296@dac.unicamp.br

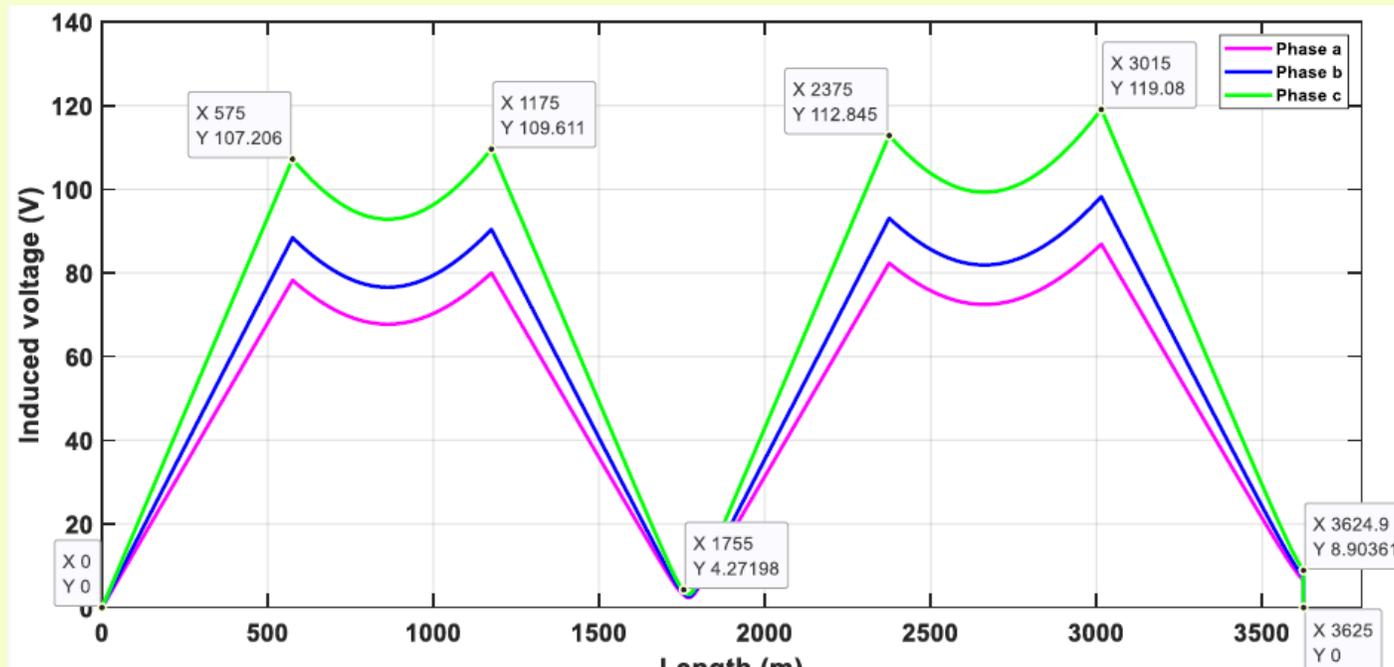
Jaimis S. L. Colqui  
School of Electrical and Computer Eng.  
State University of Campinas  
Campinas, SP, Brazil  
jaimis@unicamp.br

Juan P. Bautista  
Faculty of Electrical Engineering  
National University of Engineering.  
Lima, Peru  
jbautista@uni.edu.pe

José Pissolato Filho  
School of Electrical and Computer Eng.  
State University of Campinas  
Campinas, SP, Brazil  
pisso@unicamp.br

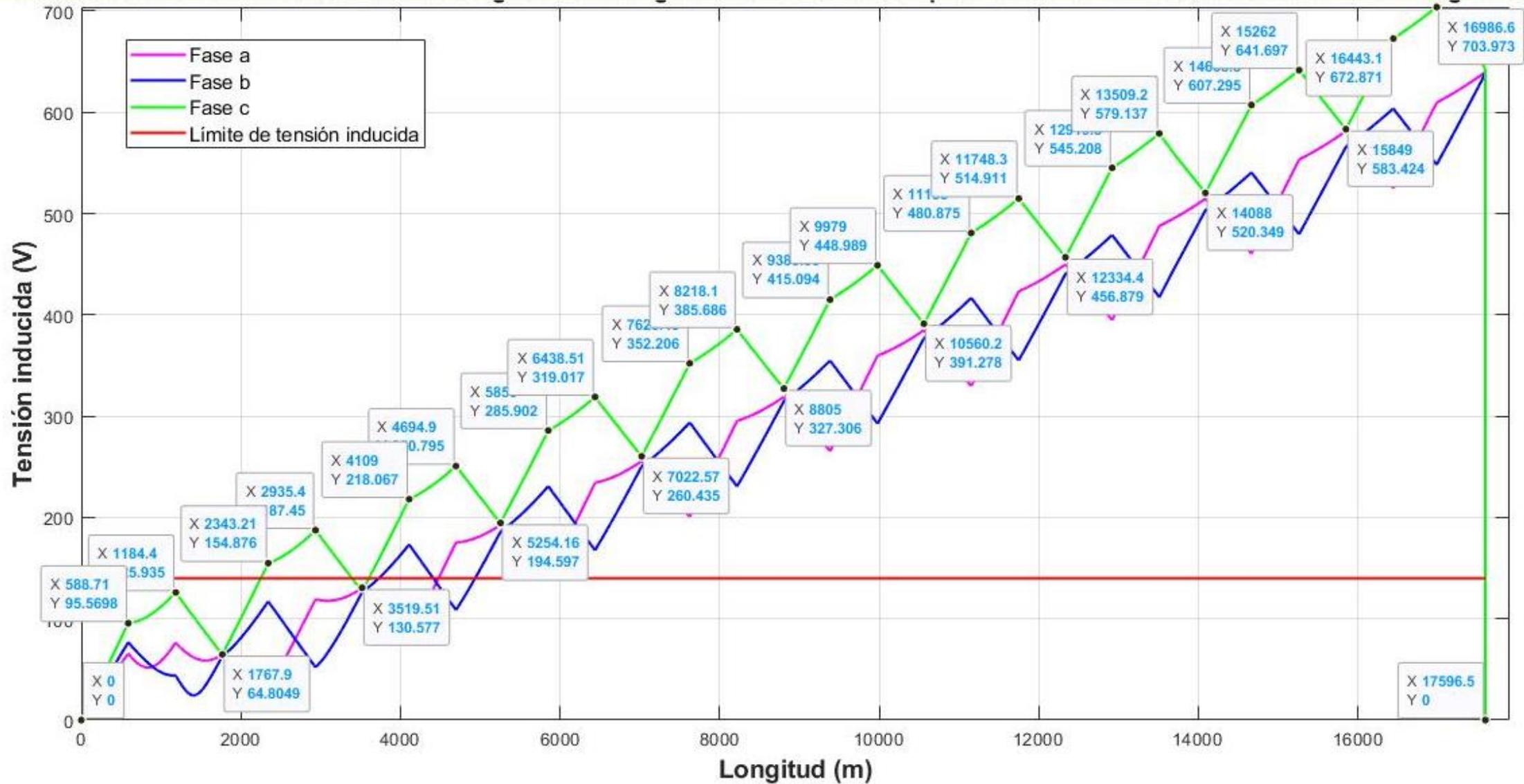


Configuração triangular invertido sem transposição de fase



Configuração triangular invertido com transposição de fase

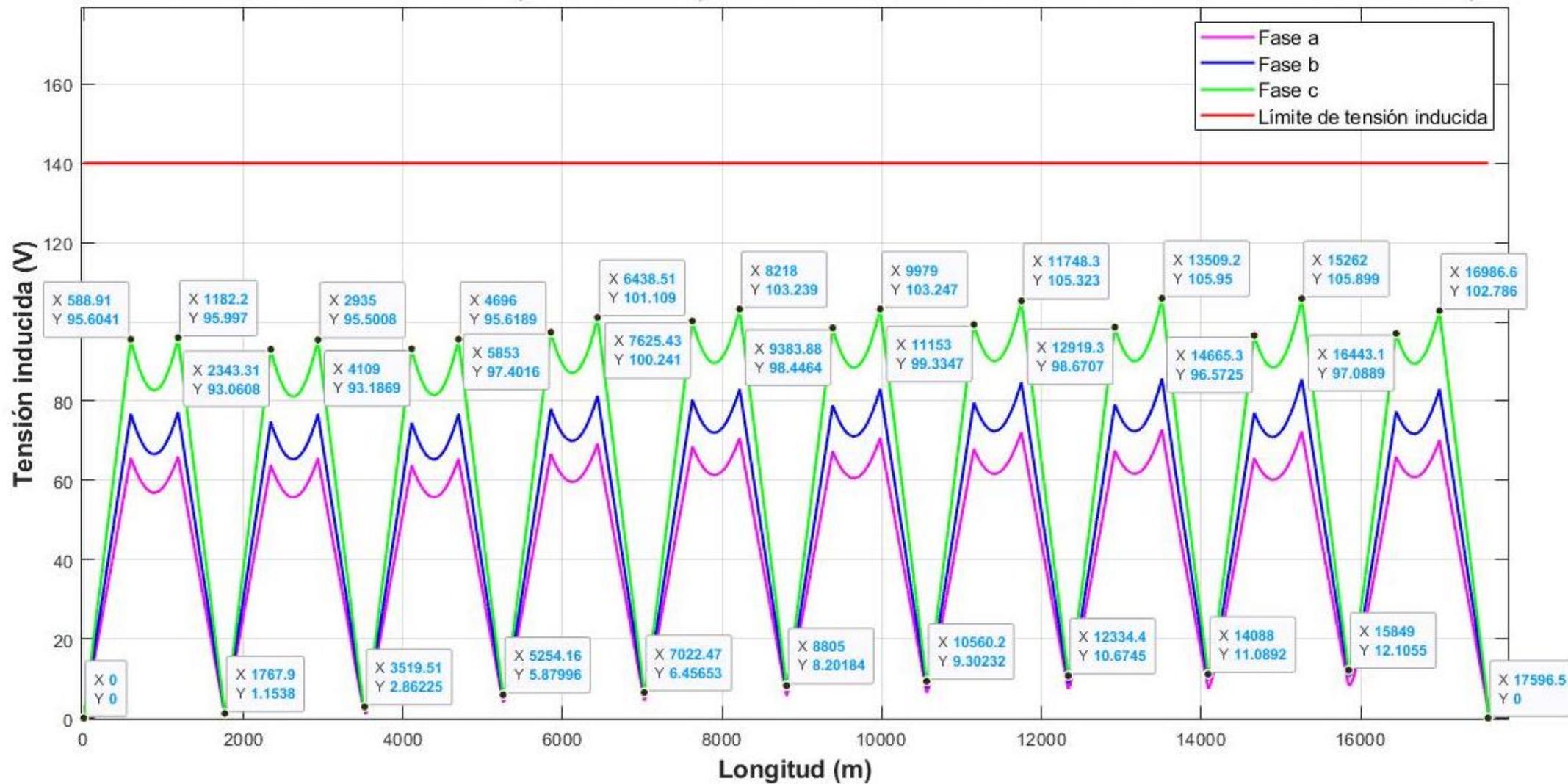
# Configuração triangular invertido sem transposição de fase



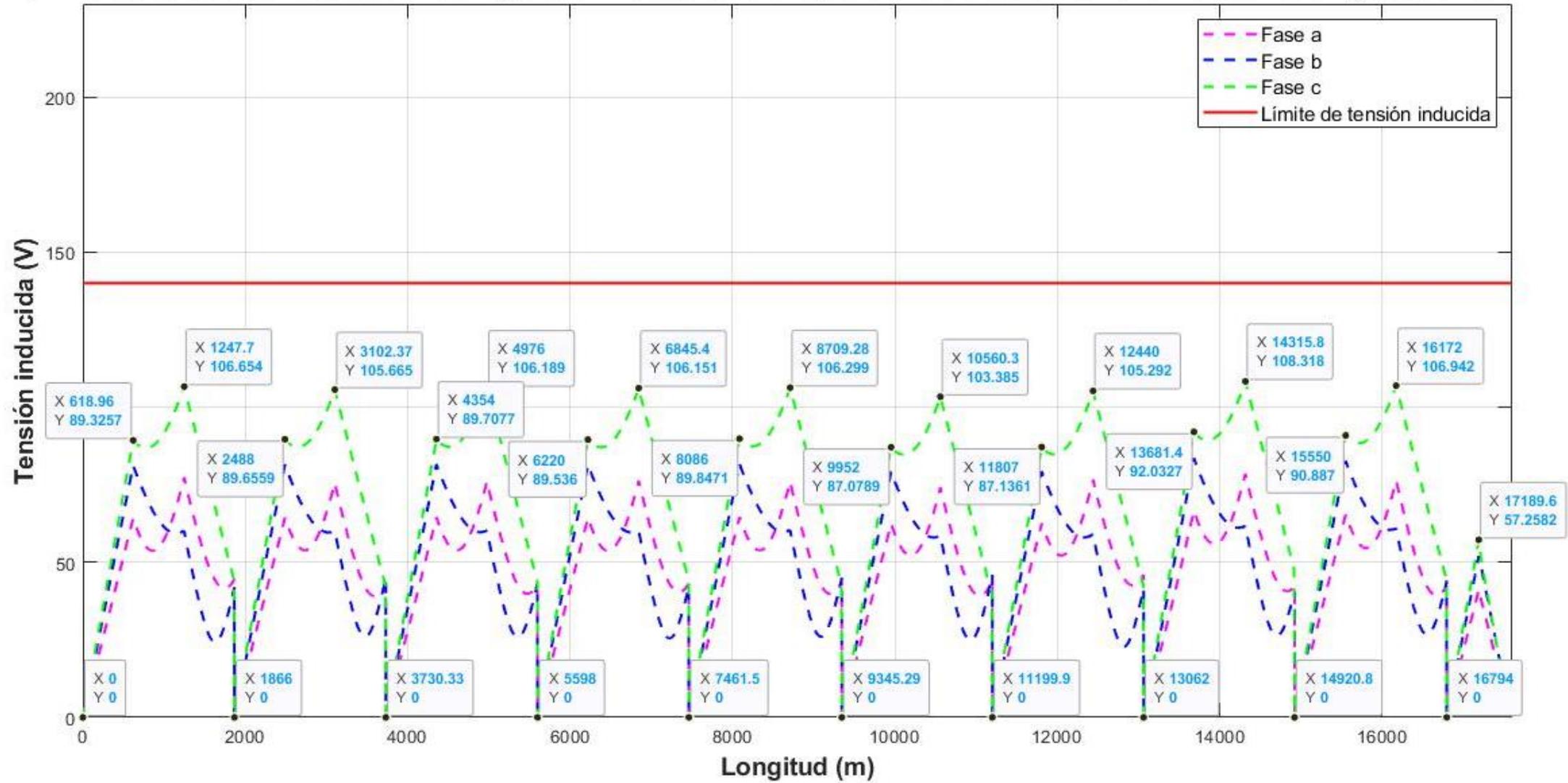
# Configuração triangular invertido com transposição de fase



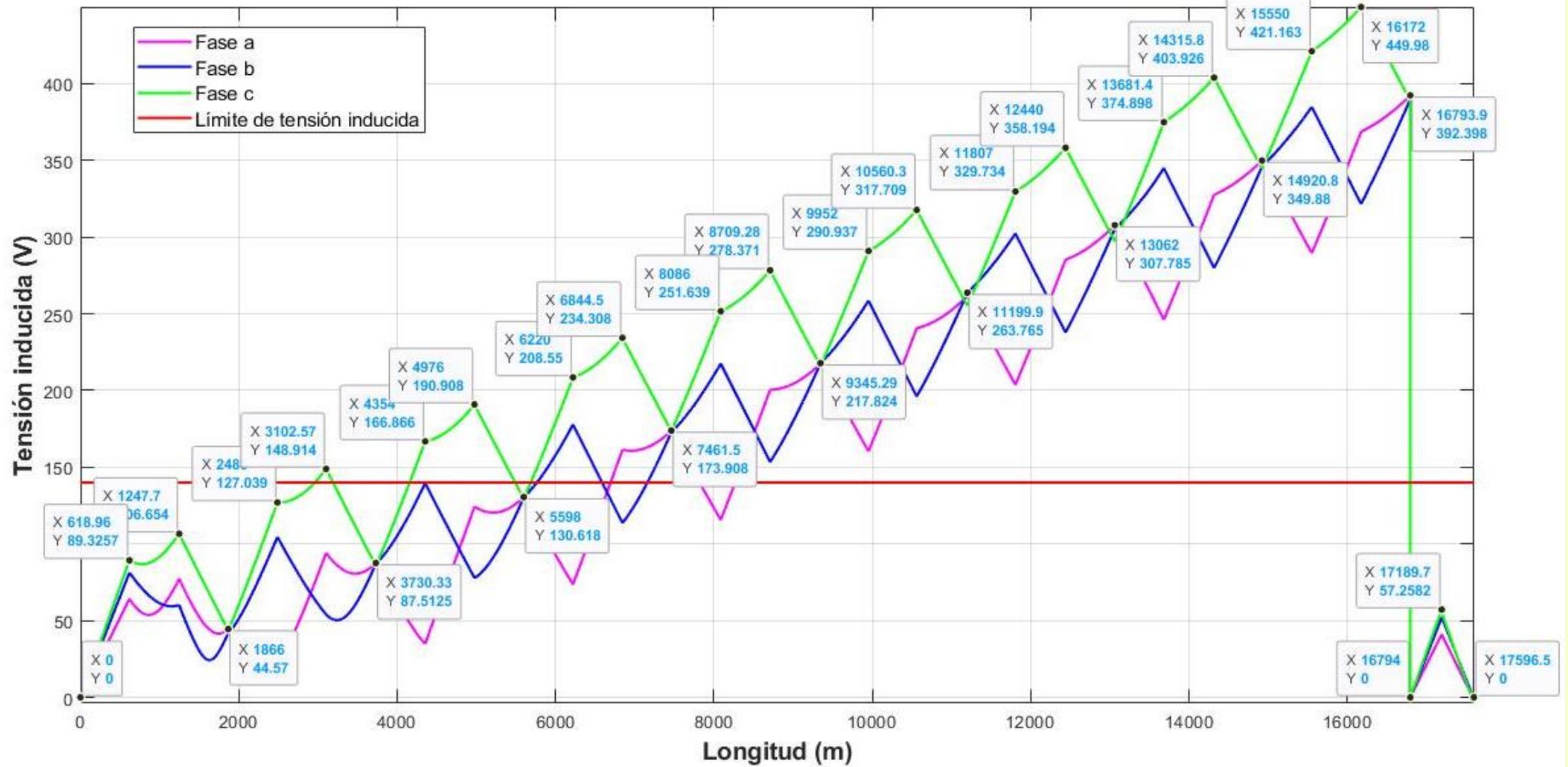
UNICAMP



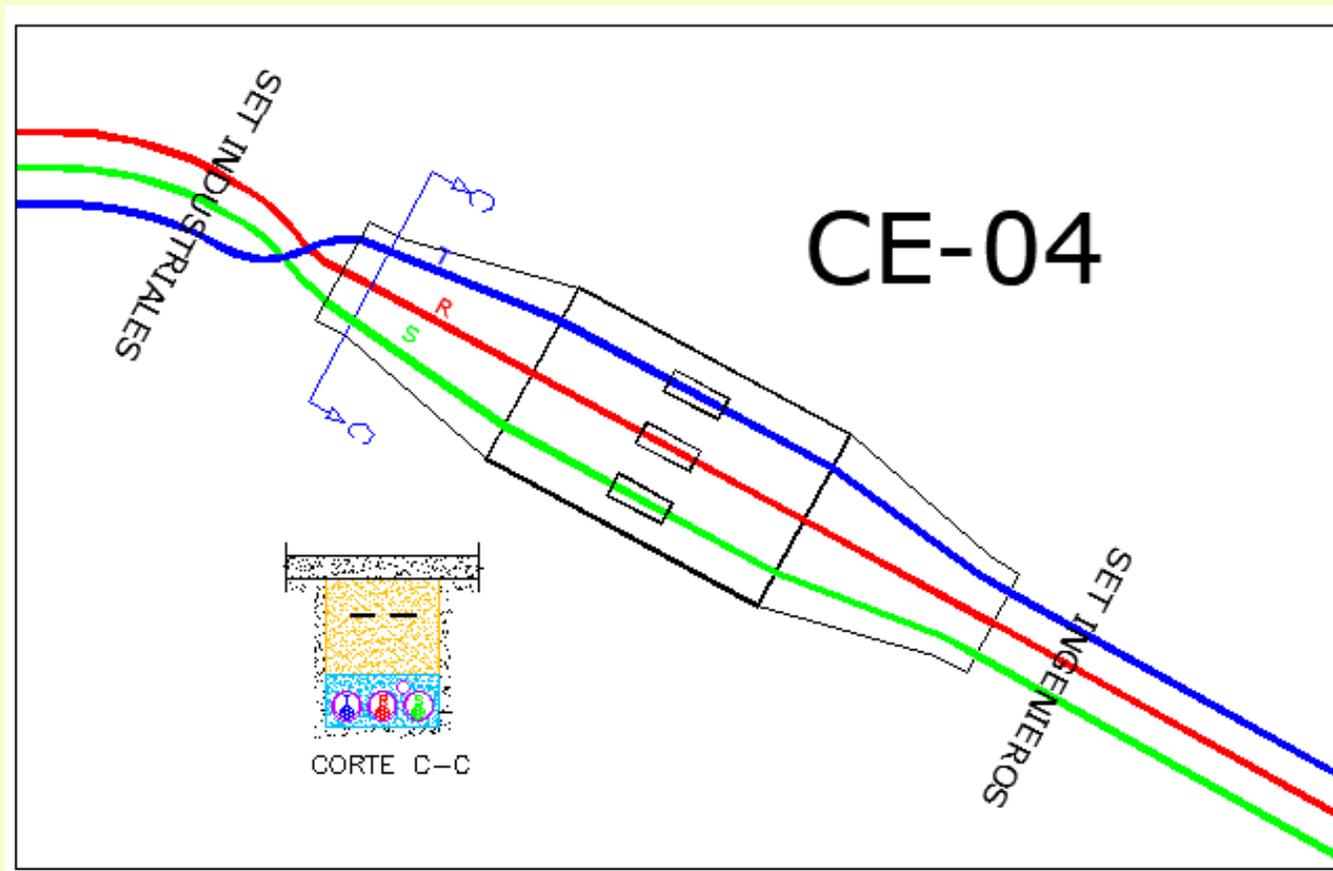
### Perfil de las tensiones inducidas en configuración vertical sin transposición de fases en conexión Cross Bonding Seccionado + M.P



### Perfil de las tensiones inducidas en configuración vertical sin transposición de fases en conexión Cross Bonding Continuo + M.P



A transposição das fases consiste em trocar, cruzar as posições das fases antes de entrar na câmara de emenda, onde será realizada a emenda e derivação dos cabos de MT. que conectará as blindagens com o sistema de cruzamento de blindagem





UNICAMP





UNICAMP

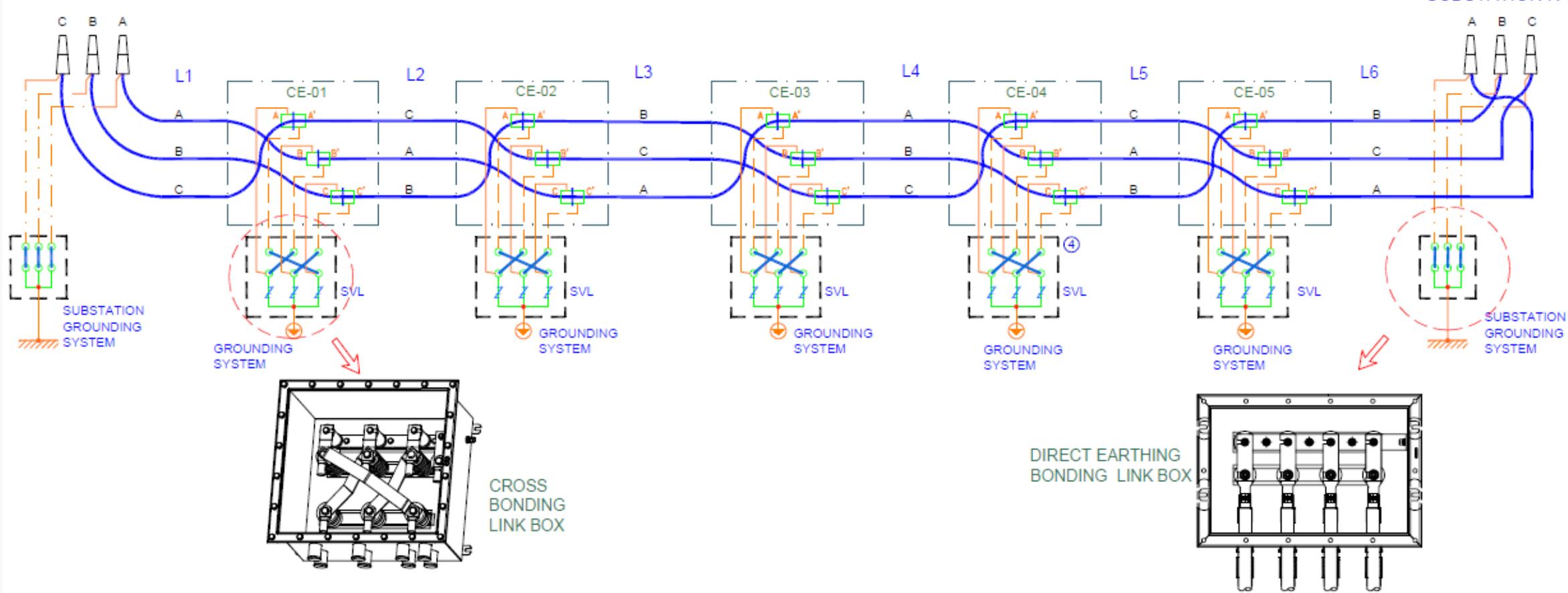


FIRST MAYOR SECTION

SECOND MAYOR SECTION

SUBSTATION N°1

SUBSTATION N°2

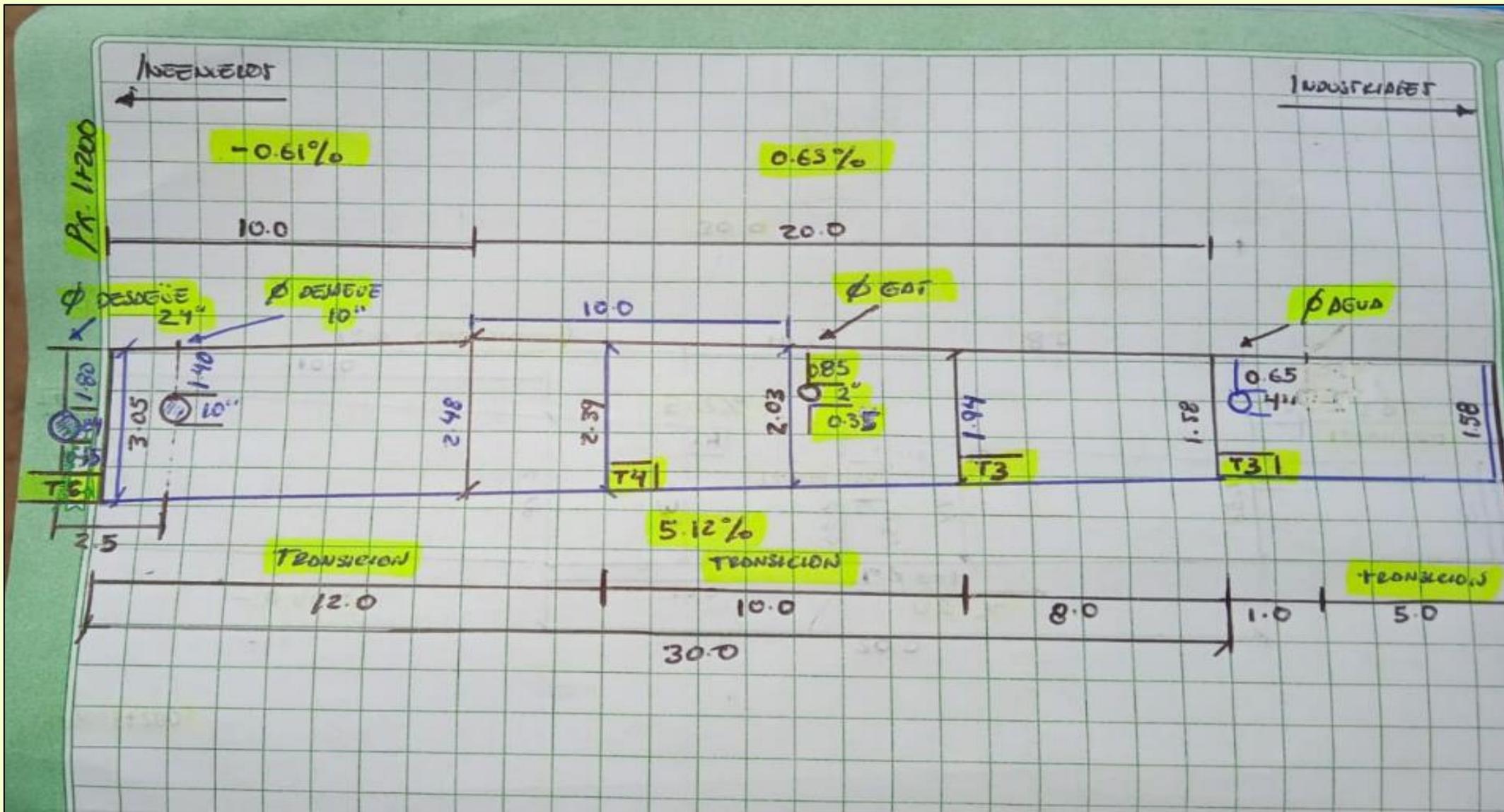




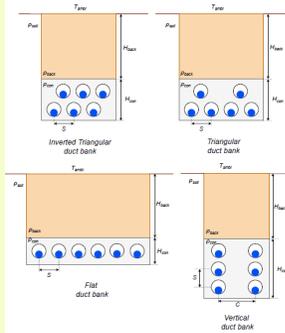
UNICAMP

# Problemas durante a construção



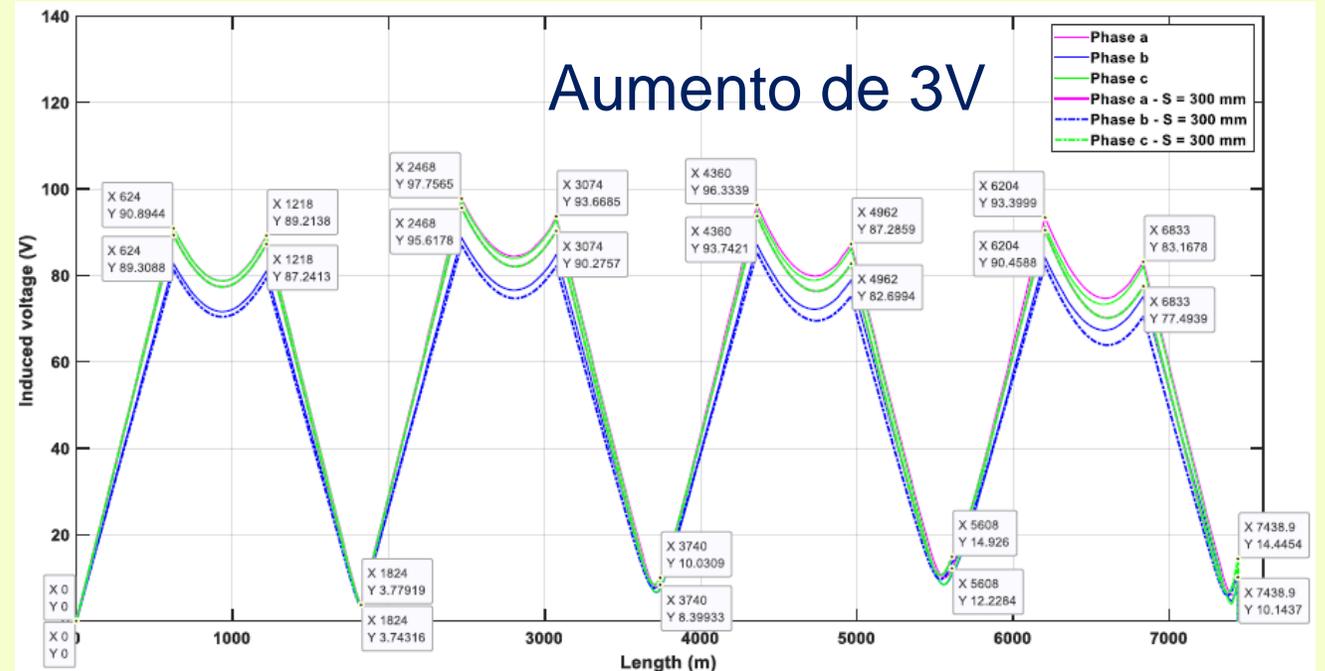


# Influence of Interferences in the Relation Between Ampacity and Induced Voltage on Sheath in Double-Circuit Underground Lines



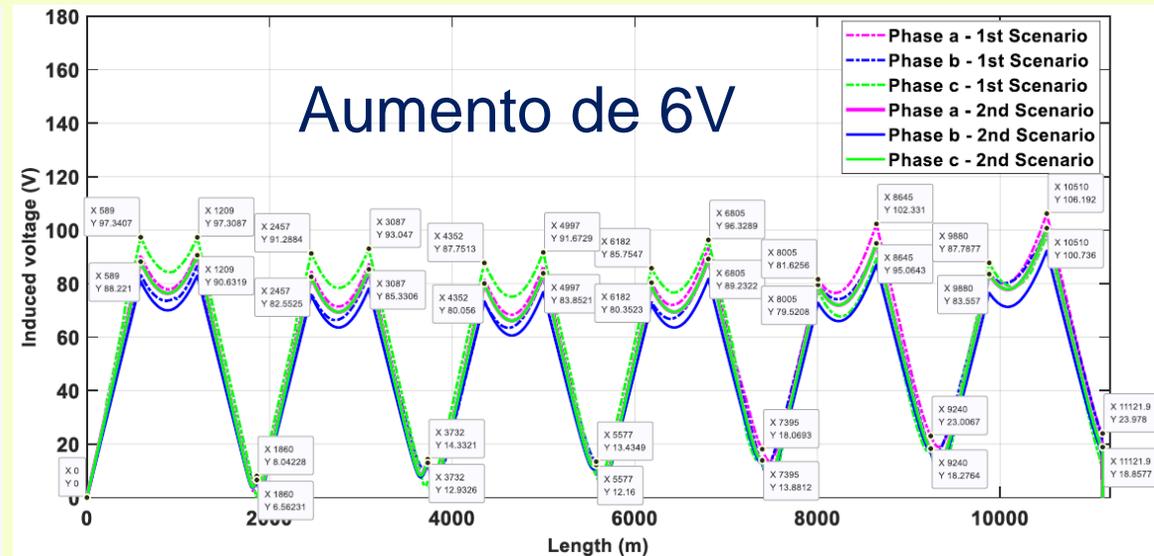
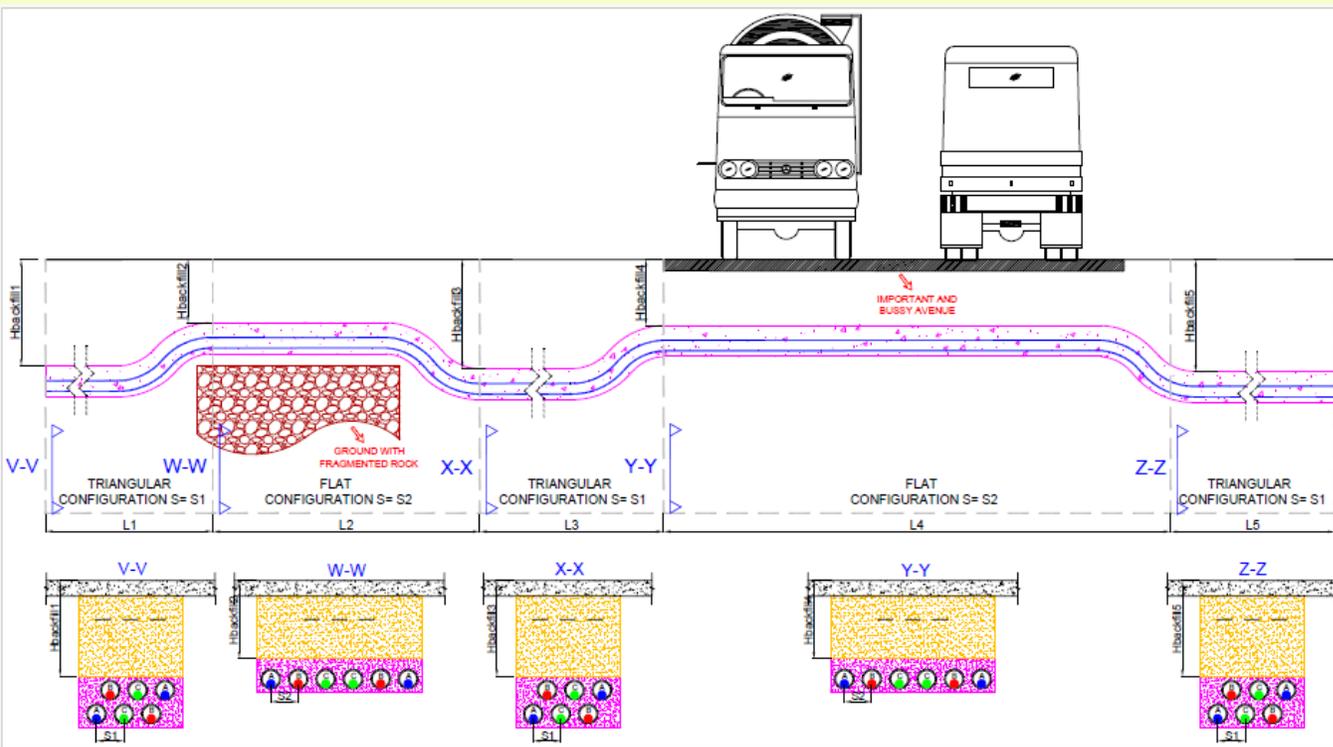
Jesus E. Guevara, Jaimis S. L. Colqui, José Pissolato Filho  
 School of Electrical and Computer Engineering  
 State University of Campinas  
 Campinas, Brazil  
 j272296@dac.unicamp.br, jaimis@unicamp.br, pisso@unicamp.br

Type of duct banks	Cable separation within the same circuit (mm)	Distance between circuits (mm)	Maximum depth (mm)
Triangular	300	600	1250
	350	700	1450
	400	800	1650
	450	900	1800
Inverted triangular	350	525	1200
	400	600	1400
	450	675	1550
Flat	300	900	1850
	300	800	1150
Vertical	350	1000	1500
	400	1200	1750



# Analysis of the Increase of Induced Voltages on Sheath Guaranteeing the Ampacity in Double-Circuit Underground Transmission Lines

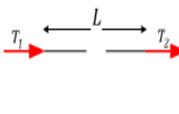
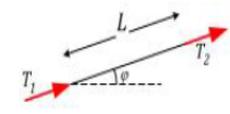
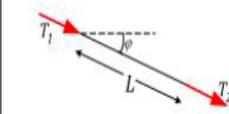
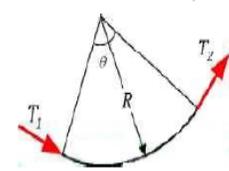
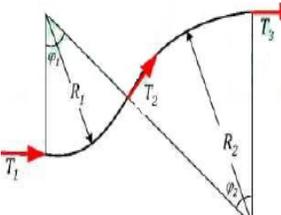
Jesus Guevara Asorza, · Jaimis S. L. Colqui, · José Pissolato Filho

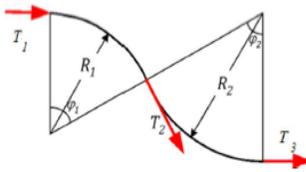
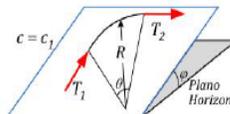
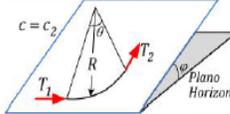
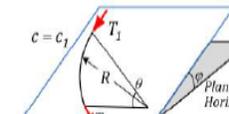
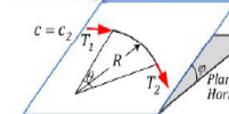


Configuração vertical com transposição  
de fase

# 2.2 Projeto mecânico de linhas de transmissão subterrâneas

## 2.2.1 Tensão de tração do cabo

Sección Rectilínea		
<p><u>Sin pendiente</u></p> $T_2 = T_1 + P \cdot k \cdot L$ 	<p><u>Pendiente Ascendente</u></p> $T_2 = T_1 + P \cdot L(\text{sen}\varphi + k \cdot \text{cos}\varphi)$ 	<p><u>Pendiente Descendente</u></p> $T_2 = T_1 - P \cdot L(\text{sen}\varphi - k \cdot \text{cos}\varphi)$ 
Curvatura en el Plano Horizontal		
$T_2 = T_1 \cosh(k\theta) + \text{senh}(k\theta) \sqrt{T_1^2 + (P \cdot R)^2}$ 		
Curvatura en el Plano Vertical		
<p><u>Curvatura Hacia Arriba</u></p> $T_2 = T_1 \cdot e^{k\varphi_1} - \frac{P \cdot R_1}{1+k^2} [2 \cdot k \cdot \text{sen}\varphi_1 - (1-k^2)(e^{k\varphi_1} - \text{cos}\varphi_1)]$ $T_3 = T_2 \cdot e^{k\varphi_2} + \frac{P \cdot R_2}{1+k^2} [2 \cdot k \cdot e^{k\varphi_2} \cdot \text{sen}\varphi_2 + (1-k^2)(1 - e^{k\varphi_2} \cdot \text{cos}\varphi_2)]$ 		

Curvatura en el Plano Vertical	
<p><u>Curvatura Hacia Abajo</u></p> $T_2 = T_1 \cdot e^{k\varphi_1} + \frac{P \cdot R_1}{1+k^2} [2 \cdot k \cdot \text{sen}\varphi_1 - (1-k^2)(e^{k\varphi_1} - \text{cos}\varphi_1)]$ $T_3 = T_2 \cdot e^{k\varphi_2} - \frac{P \cdot R_2}{1+k^2} [2 \cdot k \cdot e^{k\varphi_2} \cdot \text{sen}\varphi_2 + (1-k^2)(1 - e^{k\varphi_2} \cdot \text{cos}\varphi_2)]$ 	
Curvatura en un Plano Inclinado Ascendente o Descendente de Pendiente phi	
<p><u>Plano Ascendente</u></p> $T_2 = a(1 - \text{sen}\varphi) + (b + c)\text{sen}\varphi$	<p><u>Plano Descendente</u></p> $T_2 = a(1 - \text{sen}\varphi) + (b - c)\text{sen}\varphi$
<p><u>Posición del centro de curvatura en relación con el eje</u></p>  	<p><u>Posición del centro de curvatura en relación con el eje</u></p>  
$a = T_1 \cosh(k\theta) + \text{senh}(k\theta) \sqrt{T_1^2 + (P \cdot R)^2} ; \quad b = T_1 \cdot e^{k\theta}$ $c_1 = \frac{P \cdot R}{1+k^2} [(1-k^2) \cdot \text{sen}\theta - 2k \cdot \text{cos}\theta + 2k \cdot e^{k\theta}]$ $c_2 = \frac{P \cdot R}{1+k^2} [(k^2-1) \cdot \text{cos}\theta - 2k \cdot \text{sen}\theta - (k^2-1) \cdot e^{k\theta}]$	

Por exemplo:

A força máxima de tração é definida pelo fabricante do cabo de energia.

Por exemplo, um cabo de 1600 mm<sup>2</sup> 220 kV da empresa TFKable suporta uma tração máxima de 80 kN.



A direção de instalação dos cabos de energia é de CE-01 a CE-02



A direção de instalação dos cabos de energia é de CE-02 a CE-01



Caso a tração recomendada pelo fabricante não seja atendida, recomenda-se a utilização de câmaras de passagem com a máquina “Puxador de Cabo”.

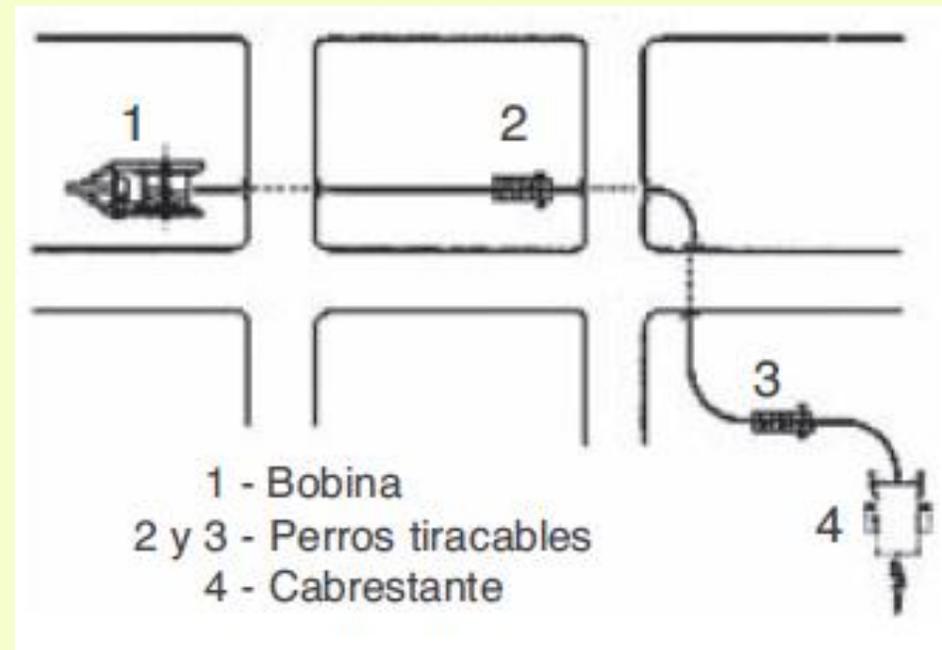


SENTIDO DE JALADO	TENSIÓN DE JALADO VERTICAL (kN)	TENSIÓN DE JALADO HORIZONTAL (kN)	TENSIÓN DE JALADO RESULTANTE (kN)	TENSIÓN MÁXIMA FABRICANTE (kN)
DE SET-MA A CE-01	16.28	31.80	35.72	80.00
DE CE-01 A CE-02	16.77	26.91	31.71	80.00
DE CE-02 A CE-03	16.17	23.08	28.18	80.00
DE CE-03 A CE-04	18.47	28.06	33.59	80.00
DE CE-04 A CE-05	17.73	24.28	30.06	80.00
DE CE-05 A CE-06	18.60	25.94	31.92	80.00
DE CE-06 A CE-07	18.33	23.93	30.14	80.00
DE CE-07 A CE-08	21.42	27.40	34.78	80.00
DE CE-08 A CE-09	19.03	24.85	31.30	80.00
DE CE-09 A CE-10	17.30	22.68	28.53	80.00
DE CE-10 A CE-11	20.41	27.93	34.59	80.00
DE CE-11 A CE-12	23.26	26.15	35.00	80.00
DE CE-12 A CE-13	26.30	23.73	35.43	80.00
DE CE-13 A CE-14	27.87	22.80	36.01	80.00
DE CE-14 A CE-15	30.30	25.69	39.73	80.00
DE CE-15 A CE-16	32.62	22.79	39.79	80.00
DE CE-16 A CE-17	29.49	23.92	37.97	80.00
DE CE-17 A CE-18	33.07	40.79	52.51	80.00
DE CE-18 A CE-19	28.40	63.88	69.90	80.00
DE CE-19 A CE-20	7.49	106.19	106.46	80.00
DE CE-20 A CE-21	4.28	25.40	25.76	80.00
DE CE-21 A CE-22	11.10	28.39	30.48	80.00
DE CE-22 A CE-23	14.96	38.63	41.43	80.00
DE CE-23 A CE-24	15.06	27.31	31.19	80.00
DE CE-24 A CE-25	15.51	25.15	29.55	80.00
DE CE-25 A CE-26	17.03	23.16	28.74	80.00
DE CE-26 A CE-27	17.16	23.20	28.86	80.00
DE CE-27 A CE-28	17.27	22.75	28.56	80.00
DE CE-28 A CE-29	17.73	25.45	31.02	80.00
DE CE-29 A SET PA	24.24	74.34	78.20	80.00

SENTIDO DE JALADO	TENSIÓN DE JALADO VERTICAL (kN)	TENSIÓN DE JALADO HORIZONTAL (kN)	TENSIÓN DE JALADO RESULTANTE (kN)	TENSIÓN MÁXIMA FABRICANTE (kN)
DE CE-01 A SET MA.	25.47	31.80	40.75	80.00
DE CE-02 A CE-01	27.49	26.91	38.47	80.00
DE CE-03 A CE-02	25.25	23.08	34.21	80.00
DE CE-04 A CE-03	27.76	28.06	39.47	80.00
DE CE-05 A CE-04	25.51	24.28	35.22	80.00
DE CE-06 A CE-05	27.77	25.94	38.00	80.00
DE CE-07 A CE-06	28.45	23.93	37.17	80.00
DE CE-08 A CE-07	28.96	27.40	39.87	80.00
DE CE-09 A CE-08	28.28	24.85	37.65	80.00
DE CE-10 A CE-09	26.71	22.68	35.04	80.00
DE CE-11 A CE-10	25.15	27.93	37.59	80.00
DE CE-12 A CE-11	20.67	26.15	33.33	80.00
DE CE-13 A CE-12	16.48	23.73	28.89	80.00
DE CE-14 A CE-13	16.51	22.80	28.15	80.00
DE CE-15 A CE-14	16.33	25.69	30.44	80.00
DE CE-16 A CE-15	12.18	22.79	25.84	80.00
DE CE-17 A CE-16	5.30	23.92	24.50	80.00
DE CE-18 A CE-17	9.85	40.79	41.96	80.00
DE CE-19 A CE-18	5.31	63.88	64.16	80.00
DE CE-20 A CE-19	31.96	106.19	110.90	80.00
DE CE-21 A CE-20	39.25	25.40	46.75	80.00
DE CE-22 A CE-21	34.18	28.39	44.43	80.00
DE CE-23 A CE-22	31.77	38.63	50.02	80.00
DE CE-24 A CE-23	28.34	27.31	39.35	80.00
DE CE-25 A CE-24	28.98	25.15	38.37	80.00
DE CE-26 A CE-25	28.44	23.16	36.67	80.00
DE CE-27 A CE-26	28.56	23.20	36.80	80.00
DE CE-28 A CE-27	25.83	22.75	34.42	80.00
DE CE-29 A CE-28	21.72	25.45	33.46	80.00
DE SET PA A CE-29	18.63	74.34	76.64	80.00



“Puxador de Cabo”.





UNICAMP



Aplicação de lubrificante durante a colocação do cabo de energia.

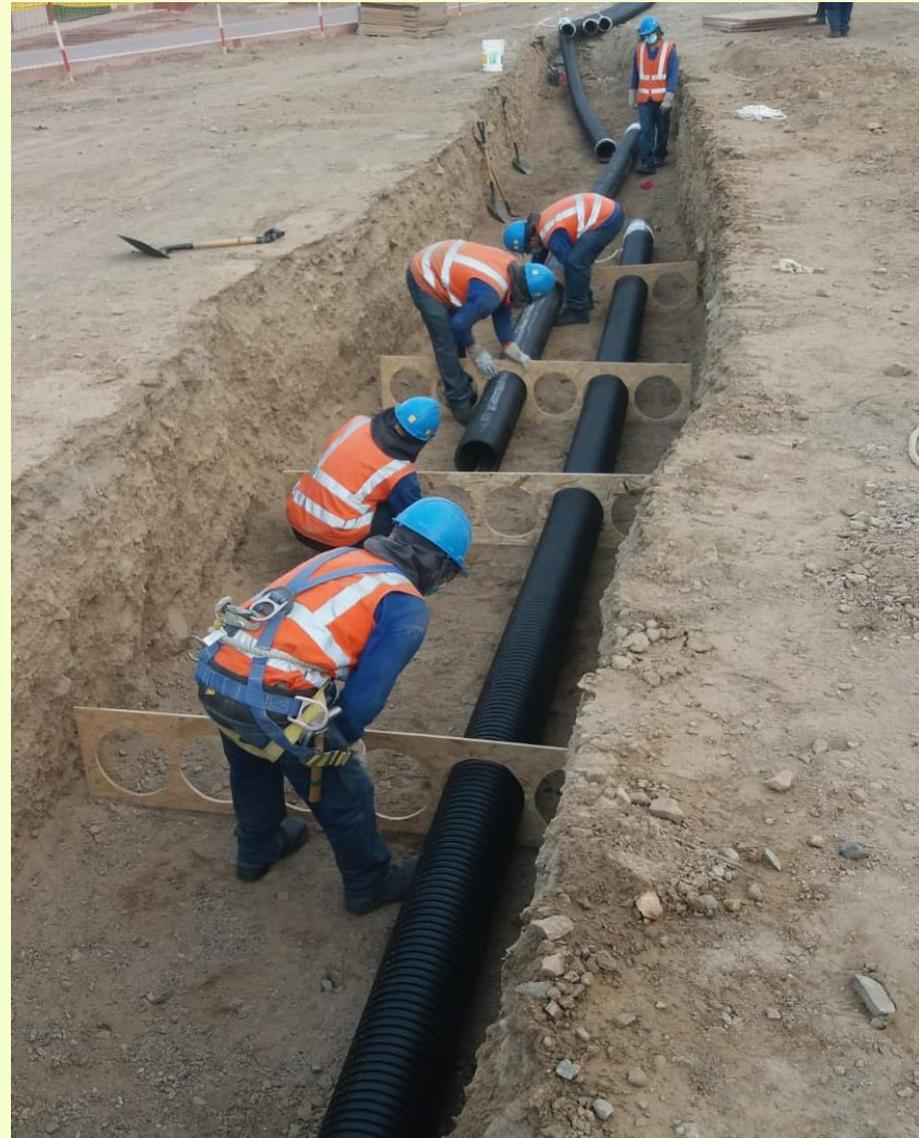
## Raio de curvatura do cabo de energia



UNICAMP

O raio de curvatura do cabo de alimentação é recomendado pelo fabricante com base no diâmetro total do próprio cabo, que normalmente é de aproximadamente 3 m.

Porém, se for utilizado um banco de dutos, o raio mínimo de interesse é o da tubulação utilizada. Devido ao bom comportamento térmico (baixa resistividade térmica), recomenda-se a utilização de tubo corrugado de HDPE. Por exemplo, para um tubo HDPE com 250 mm de diâmetro, as boas práticas construtivas indicam um raio de curvatura mínimo de 10 m, de forma a facilitar a etapa de colocação do cabo de alimentação.



# Sobre o que vamos falar hoje?



- Em que consiste uma linha de transmissão subterrânea e seus elementos.
- Projeto elétrico e mecânico de uma linha de transmissão subterrânea.
- **Construção de linhas de transmissão subterrâneas.**
- Modelagem para estudos transitórios de linhas de transmissão subterrâneas

# 3.1 Principais obras civis



UNICAMP

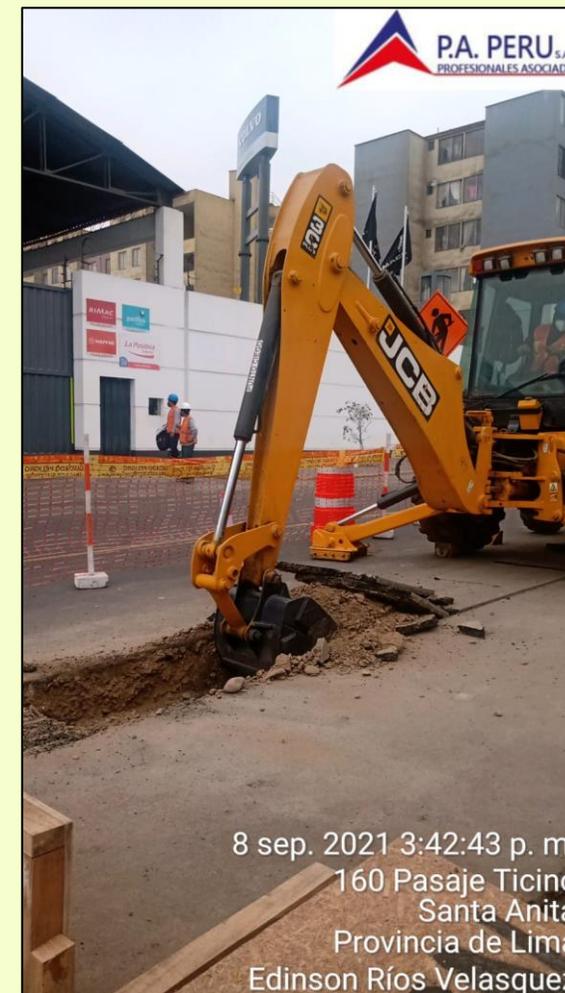
## 1. PESQUISAS SUBTERRÂNEAS



## 2. CORTE E ESCAVAÇÃO



9 sep. 2021 5:05:04 p. m.  
146-160 Calle Ticino  
Santa Anita  
Provincia de Lima  
Edinson Ríos Velasquez



8 sep. 2021 3:42:43 p. m.  
160 Pasaje Ticino  
Santa Anita  
Provincia de Lima  
Edinson Ríos Velasquez

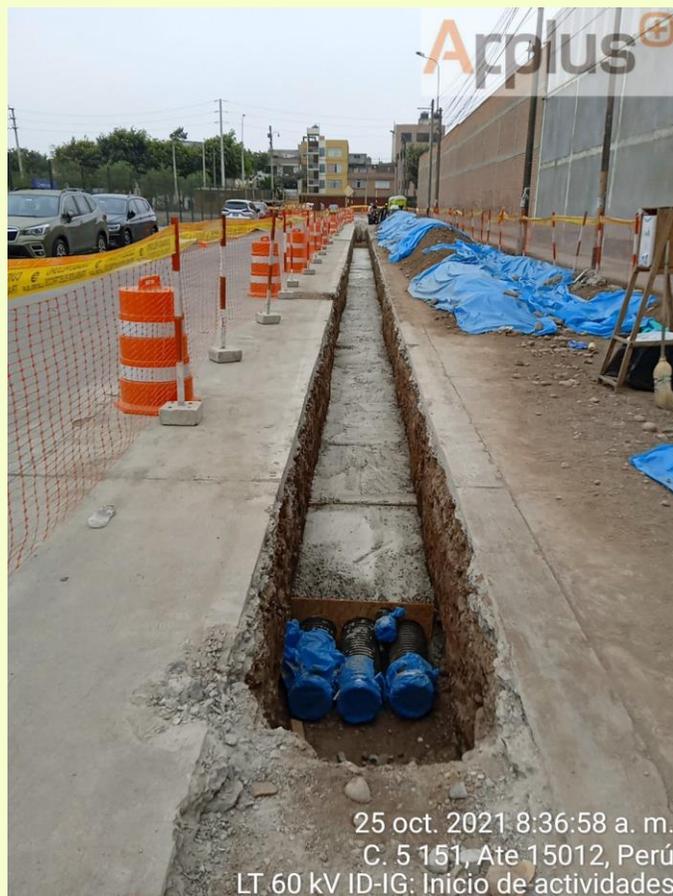
### 3. ENTIBADO



### 4. ENTUBADO



## 5. DERRAMAMENTO DE CONCRETO



## 6. ENCHIMENTO E COMPACTAÇÃO



UNICAMP



## 3.2 Principais obras mecânico



UNICAMP





UNICAMP





UNICAMP

# Sobre o que vamos falar hoje?



- Em que consiste uma linha de transmissão subterrânea e seus elementos.
- Projeto elétrico e mecânico de uma linha de transmissão subterrânea.
- Construção de linhas de transmissão subterrâneas.
- **Modelagem para estudos transitórios de linhas de transmissão subterrâneas**

# 4. Cálculo de parâmetros elétricos

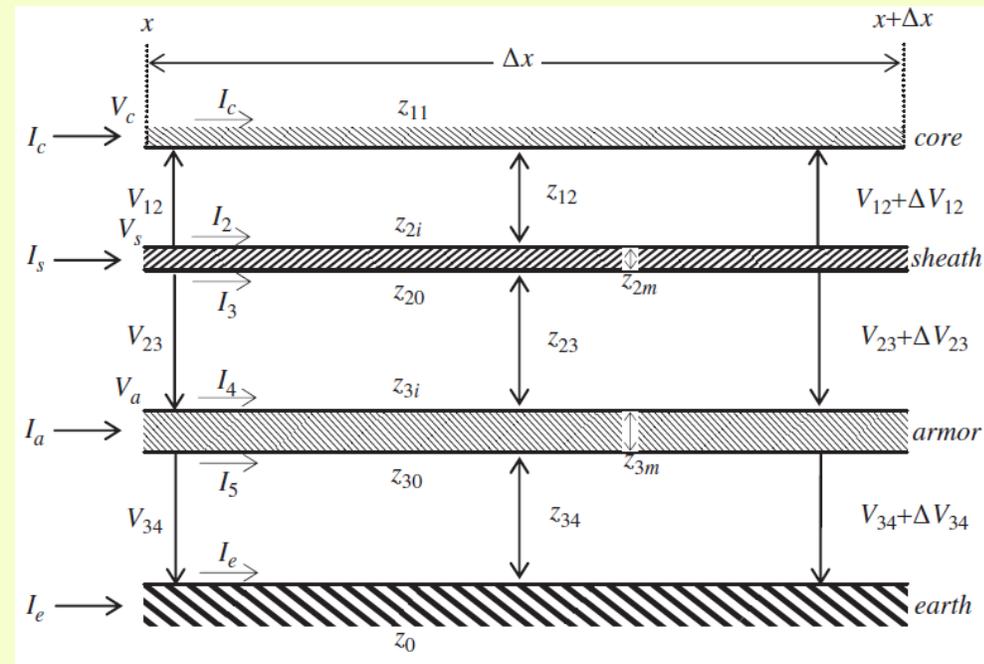
$$Z = Z_i + Z_g$$

## 4.1 Impedância interna

$$Z_i = \begin{bmatrix} Z_{i1} & 0_{n \times n} & \dots & 0_{n \times n} \\ 0_{n \times n} & Z_{i2} & \dots & 0_{n \times n} \\ \vdots & \dots & \dots & \vdots \\ 0_{n \times n} & 0_{n \times n} & \dots & Z_{in} \end{bmatrix}$$

$$Z_{ij} = \begin{bmatrix} Z_{ccj} & Z_{csj} \\ Z_{csj} & Z_{ssj} \end{bmatrix}$$

$$Z_{ij} = \begin{bmatrix} Z_{ccj} & Z_{csj} & Z_{caj} \\ Z_{csj} & Z_{ssj} & Z_{saj} \\ Z_{caj} & Z_{saj} & Z_{aaaj} \end{bmatrix}$$



$$Z_{ccj} = Z_{cs} + Z_{za} + Z_{aA} - 2Z_{2m} - 2Z_{3m}$$

$$Z_{ssj} = Z_{sa} + Z_{aA} - 2Z_{3m}$$

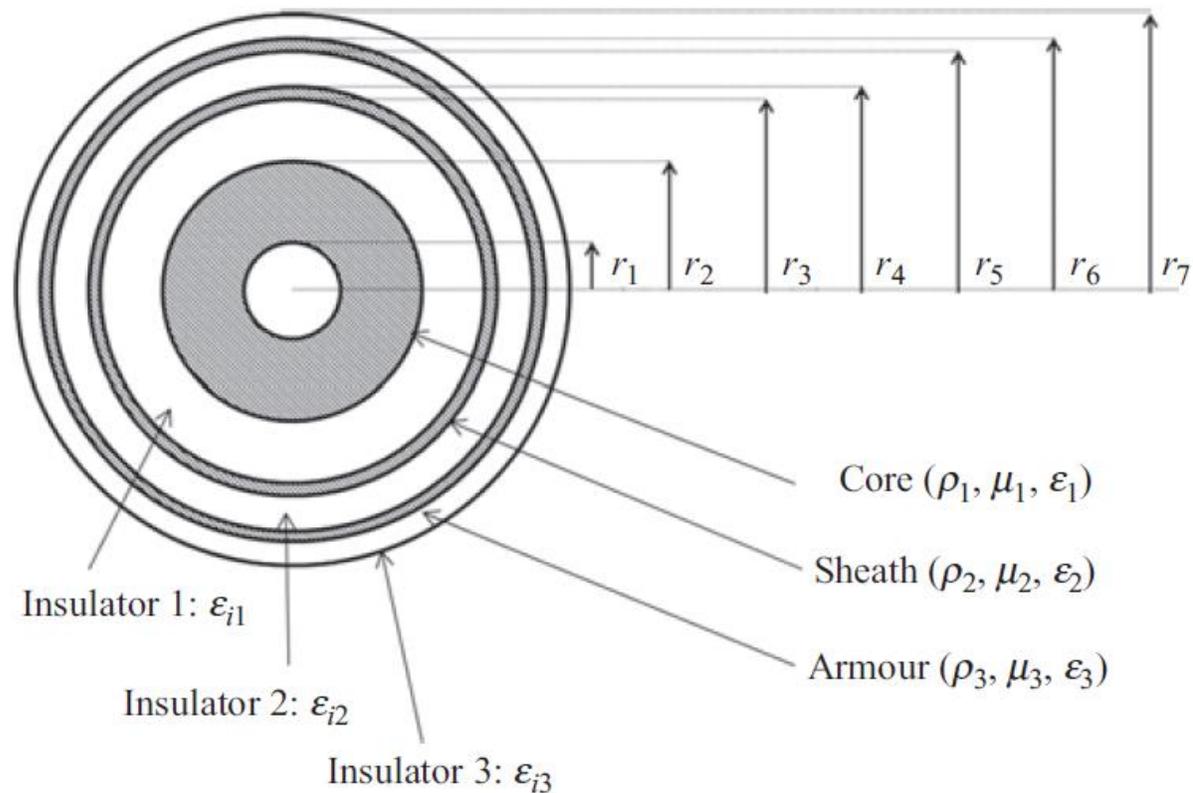
$$Z_{saj} = Z_{caj}$$

$$z_{cs} = z_{11} + z_{12} + z_{2j}$$

$$z_{sa} = z_{20} + z_{23} + z_{3j}$$

$$z_{aA} = z_{30} + z_{34}$$

$$Z_{csj} = Z_{sa} + Z_{aA} - Z_{2m} - 2Z_{3m}$$



$$z_{12} = (s\mu_0\mu_{i1}/2\pi) \ln \left( \frac{r_3}{r_2} \right)$$

$$z_{11} = (s\mu_0\mu_1/2\pi) (1/x_2 D_1) \{ I_0(x_2) K_1(x_1) + K_0(x_2) I_1(x_1) \}$$

$$z_{2i} = (s\mu_0\mu_2/2\pi) (1/x_3 D_2) \{ I_0(x_3) K_1(x_4) + K_0(x_3) I_1(x_4) \}$$

$$z_{2m} = \rho_2 / (2\pi r_3 r_4 D_2)$$

$$z_{20} = (s\mu_0\mu_2/2\pi) (1/x_4 D_2) \{ I_0(x_4) K_1(x_3) + K_0(x_4) I_1(x_3) \}$$

$$z_{23} = (s\mu_0\mu_{i2}/2\pi) \ln \left( \frac{r_5}{r_4} \right)$$

$$z_{34} = (s\mu_0\mu_{i3}/2\pi) \ln \left( \frac{r_7}{r_6} \right)$$

$$z_{3i} = (s\mu_0\mu_3/2\pi) (1/x_5 D_3) \{ I_0(x_5) K_1(x_6) + K_0(x_5) I_1(x_6) \}$$

$$z_{3m} = \rho_3 / (2\pi r_5 r_6 D_3)$$

$$z_{30} = (s\mu_0\mu_3/2\pi) (1/x_6 D_3) \{ I_0(x_6) K_1(x_5) + K_0(x_6) I_1(x_5) \}$$

$$D_1 = I_1(x_2) K_1(x_1) - I_1(x_1) K_1(x_2)$$

$$D_2 = I_1(x_4) K_1(x_3) - I_1(x_3) K_1(x_4)$$

$$D_3 = I_1(x_6) K_1(x_5) - I_1(x_5) K_1(x_6)$$



$$x_1 = r_1 \sqrt{j\omega \mu_0 \mu_1 / \rho_1}$$

$$x_2 = r_2 \sqrt{j\omega \mu_0 \mu_1 / \rho_1}$$

$$x_3 = r_3 \sqrt{j\omega \mu_0 \mu_2 / \rho_2}$$

$$x_4 = r_4 \sqrt{j\omega \mu_0 \mu_2 / \rho_2}$$

$$x_5 = r_5 \sqrt{j\omega \mu_0 \mu_3 / \rho_3}$$

$$x_6 = r_6 \sqrt{j\omega \mu_0 \mu_3 / \rho_3}$$

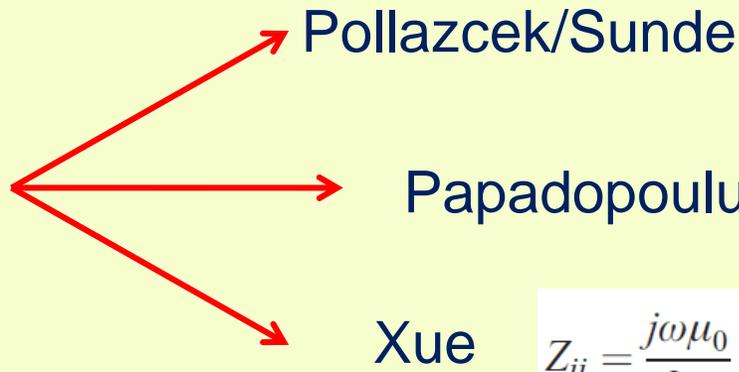
$$Z_{iCSA} = \begin{bmatrix} Z_{cc1} & Z_{cs1} & Z_{ca1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Z_{cs1} & Z_{ss1} & Z_{sa1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Z_{ca1} & Z_{sa1} & Z_{aa1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Z_{cc2} & Z_{cs2} & Z_{ca2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Z_{cs2} & Z_{ss2} & Z_{sa2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Z_{ca2} & Z_{sa2} & Z_{aa2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Z_{cc3} & Z_{cs3} & Z_{ca3} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Z_{cs3} & Z_{ss3} & Z_{sa3} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Z_{ca3} & Z_{sa3} & Z_{aa3} \end{bmatrix}$$

$$Z_{iCS} = \begin{bmatrix} Z_{cc1} & Z_{cs1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Z_{cs1} & Z_{ss1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z_{cc2} & Z_{cs2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z_{cs2} & Z_{ss2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Z_{cc3} & Z_{cs3} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Z_{cs3} & Z_{ss3} \end{bmatrix}$$



# 4.2 Impedância de Retorno por solo

$$Z_g = \begin{bmatrix} Z_{gs1} & Z_{gm12} & \dots & Z_{gm1n} \\ Z_{gm12} & Z_{gs2} & \dots & Z_{gm2n} \\ \vdots & \dots & \dots & \vdots \\ Z_{gm1n} & Z_{gm2n} & \dots & Z_{gsn} \end{bmatrix}$$



Pollaczek/Sunde

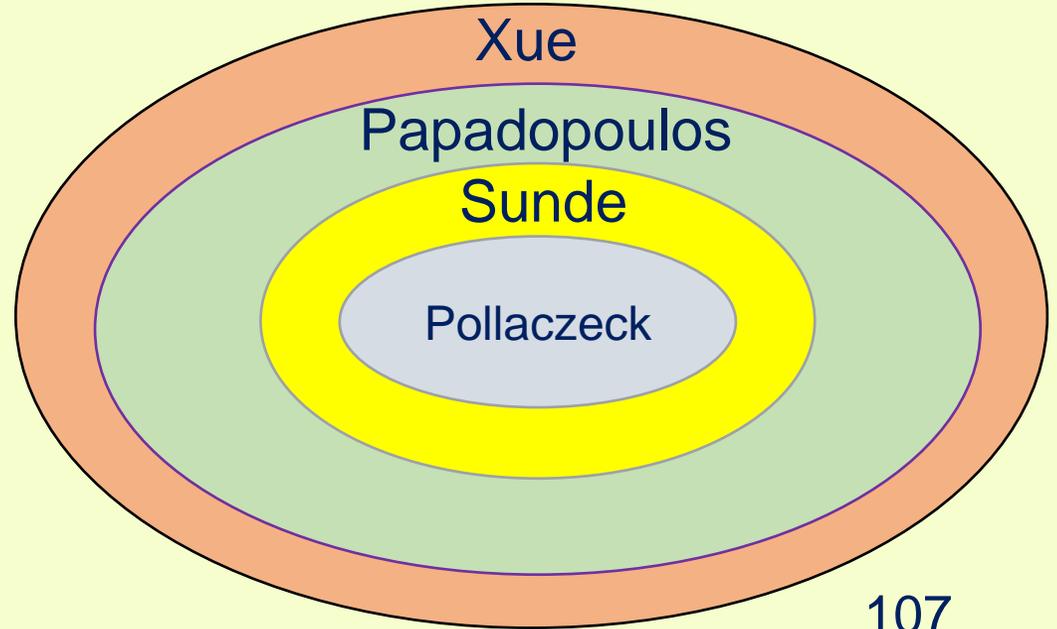
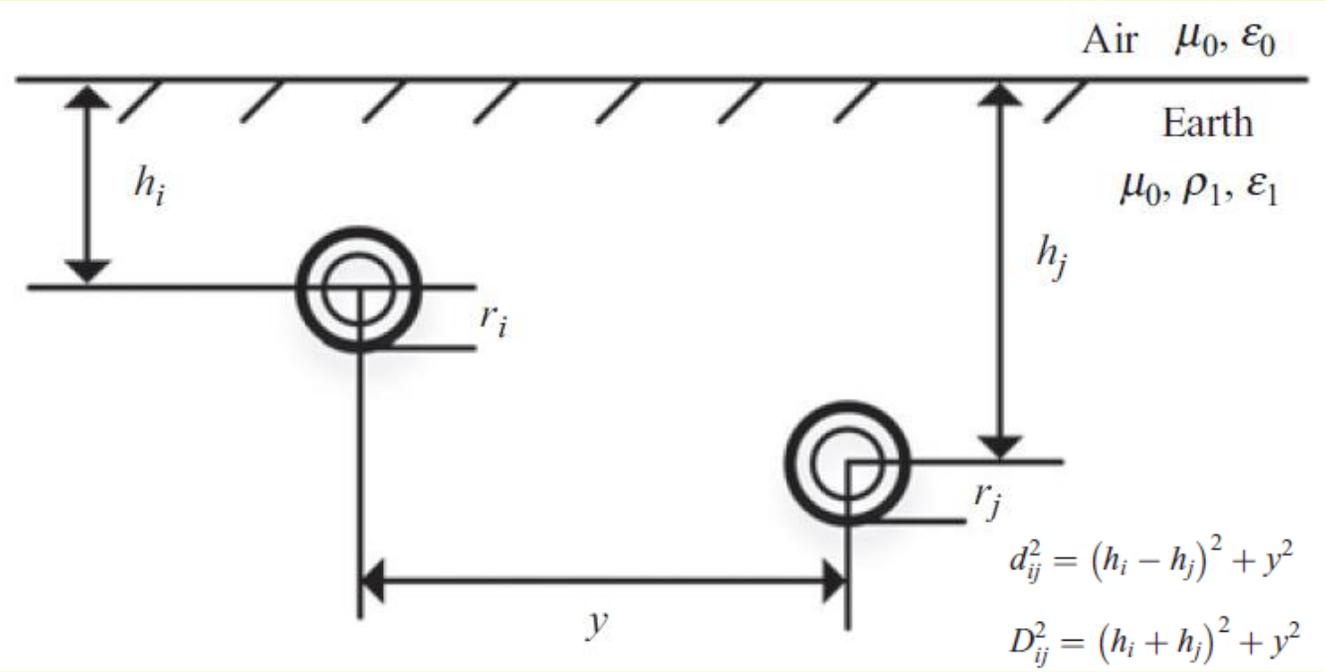
$$Z_{ij} = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \left[ K_0(\gamma_1 d_{ij}) - K_0(\gamma_1 D_{ij}) + 2S_{=1} \right]$$

Papadopoulos

$$Z_{ij} = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \left( \Delta_{=1} + 2S_{=} \right)$$

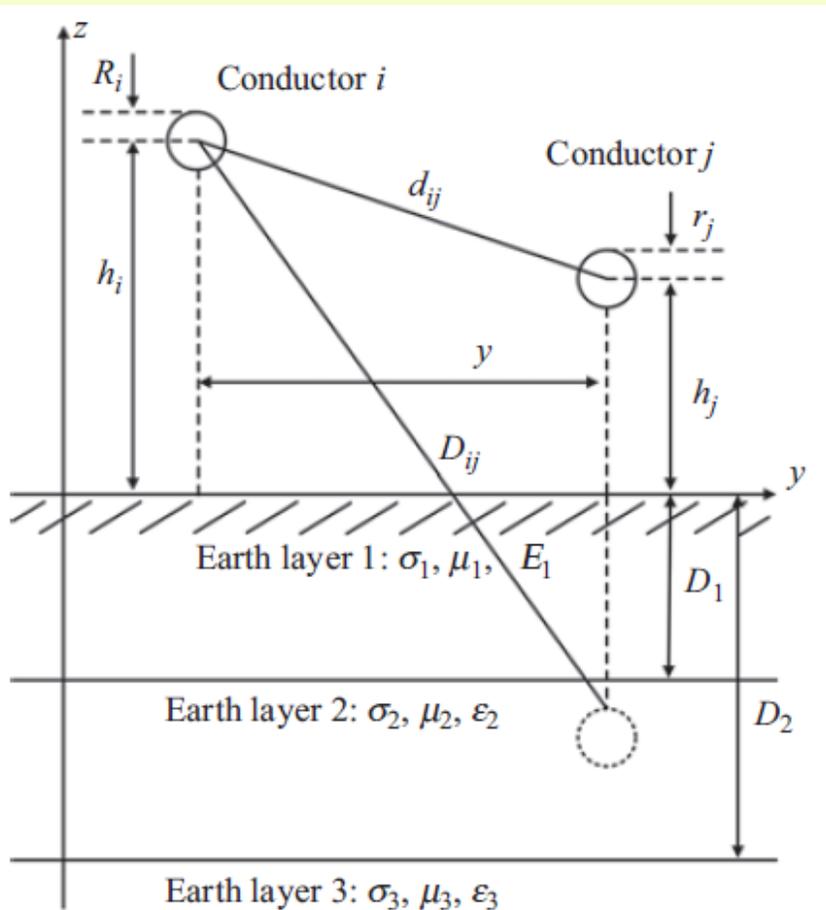
Xue

$$Z_{ij} = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \left[ K_0(\gamma_1 d_{ij}) - K_0(\gamma_1 D_{ij}) + 2S_{=11}^c + 2\gamma_1^2 S_{=13}^c \right]$$



$$Z_{ij} = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} [P_0 + (Q - jR)]$$

$P_0$ : Indutância mútua considerando aterramento perfeito  
 $Q - jR$ : Correção de perdas de terra devido à impedância mútua



$$P_0 = \ln\left(\frac{D_{ij}}{d_{ij}}\right)$$

$$Q - jR = 2 \int_0^{+\infty} AF(s) ds$$

$$F(s) = \exp[-(h_i + h_j)s] \cos(ys)$$

A: Função das propriedades eletromagnéticas da terra

## A: Terreno com 3 camadas

$$A = \frac{c_1 + c_2}{(s + \mu_0 b_1)c_1 + (s - \mu_0 b_1)c_2}$$

$$c_1 = (b_1 + b_2)(b_2 + b_3) + (b_1 - b_2)(b_2 - b_3)\exp[2a_2(d_1 - d_2)]$$

$$c_2 = \{(b_1 - b_2)(b_2 + b_3) + (b_1 + b_2)(b_2 - b_3)\exp[2a_2(d_1 - d_2)]\}\exp(-2a_1 d_1)$$

$$a_k = \sqrt{s^2 + \gamma_k^2 - \gamma_0^2}$$

$$b_k = a_k / \mu_k$$

$$\gamma_0^2 = j\omega\mu_0 j\omega\varepsilon_0$$

$$\gamma_k^2 = j\omega\mu_k(\sigma_k + j\omega\varepsilon_k)$$

## A: Terreno com 2 camadas

$$A = \frac{b_1 + b_2 + (b_1 - b_2)\exp(-2a_1 d_1)}{(s + \mu_0 b_1)(b_1 + b_2) + (s - \mu_0 b_1)(b_1 - b_2)\exp(-2a_1 d_1)}$$

## A: Terreno com 1 camada

$$A = \frac{1}{s + \mu_0 b_1} = \frac{1}{s + \frac{\mu_0}{\mu_1} \sqrt{s^2 + \gamma_1^2 - \gamma_0^2}}$$

$$\gamma_1^2 = j\omega\mu_0(\sigma_1 + j\omega\varepsilon_1)$$

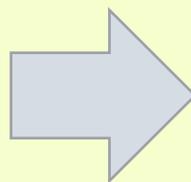


$$A = \frac{1}{s + \mu_0 b_1} = \frac{1}{s + \frac{\mu_0}{\mu_1} \sqrt{s^2 + \gamma_1^2 - \gamma_0^2}}$$

## Pollaczek

$$A = \frac{1}{s + \sqrt{s^2 + \gamma_1^2}}$$

$$\gamma_1^2 = j\omega\mu_0\sigma_1$$



$$Z_{ij} = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \left[ K_0(\gamma_1 d_{ij}) - K_0(\gamma_1 D_{ij}) + 2 \underline{S} \right]$$

$$\underline{S} = \int_0^{+\infty} \frac{e^{-(h_i+h_j)\sqrt{\lambda^2+\gamma_1^2}}}{\lambda + \sqrt{\lambda^2 + \gamma_1^2}} \cos(y\lambda) d\lambda$$

## Sunde

$$A = \frac{1}{s + \sqrt{s^2 + \gamma_1^2}}$$

$$\gamma_1^2 = j\omega\mu_0(\sigma_1 + j\omega\varepsilon_1)$$

## Papadopoulos

$$Z_{ij} = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \left( \underset{=1}{\Delta} + 2 \underset{=}{S} \right)$$

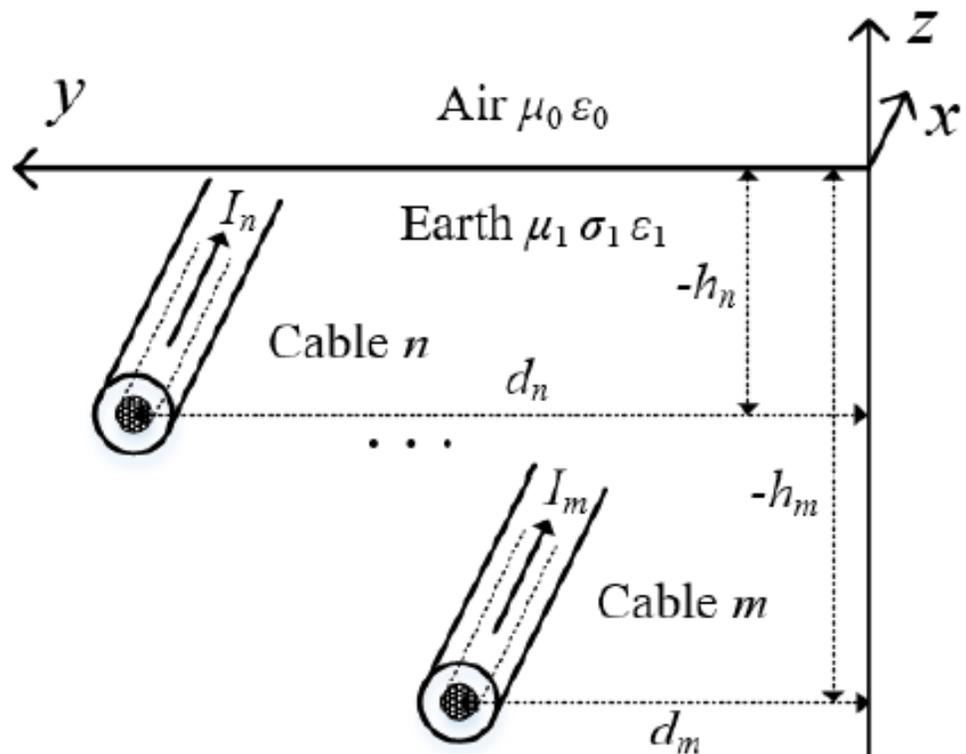
$$\underset{=1}{\Delta} = \int_0^{+\infty} \frac{\left[ e^{-|h_i-h_j|\sqrt{\lambda^2+\gamma_1^2+k_x^2}} - e^{-(h_i+h_j)\sqrt{\lambda^2+\gamma_1^2+k_x^2}} \right]}{\sqrt{\lambda^2 + \gamma_1^2 + k_x^2}} \cos(y\lambda) d\lambda$$

$$\underset{=}{S} = \int_0^{+\infty} \frac{e^{-(h_i+h_j)\sqrt{\lambda^2+\gamma_1^2+k_x^2}}}{\sqrt{\lambda^2 + \gamma_0^2 + k_x^2} + \sqrt{\lambda^2 + \gamma_1^2 + k_x^2}} \cos(y\lambda) d\lambda$$

$$k_x = \omega\sqrt{\mu_0\varepsilon_1}$$

# Generalized Formulation of Earth-Return Impedance / Admittance and Surge Analysis on Underground Cables

Haoyan Xue, *Student Member, IEEE*, Akihiro Ametani, *Life Fellow, IEEE*, Jean Mahseredjian, *Fellow, IEEE*, Ilhan Kocar, *Senior Member, IEEE*



$$I_m(x) = \sum_{v=1}^N B_{mv} i_v(x)$$

$$i_v(x) = i_{vp} e^{-jk_v x}$$

$B_{mv}$ : Elemento  $mv$  de matriz de transformação linear (B)

$i_{vp}$ : corrente modal

$k_v$ : número de onda de modo desconhecido  $v$

$$E_{1x}(x, y, z) = S_1 \sum_{m=1}^N \sum_{v=1}^N \Lambda(y, z, d_m, h_m, v) B_{mv} i_v(x)$$

$$S_1 = -\frac{j\omega\mu_0}{4\pi}$$

$$\Lambda(y, z, d_m, h_m, v) = \left(1 - \frac{k_v^2}{k_e^2}\right) \Delta_1(y, z, d_m, h_m, v) + 2\Delta_2(y, z, d_m, h_m, v) - 2\frac{k_v^2}{k_e^2} \Delta_3(y, z, d_m, h_m, v)$$

$$\Delta_1(y, z, d_m, h_m, v) = \int_{-\infty}^{+\infty} \left[ e^{-|z-h_m|u_{1v}} - e^{(z+h_m)u_{1v}} \right] \frac{e^{-j(y-d_m)\lambda}}{u_{1v}} d\lambda$$

$$\Delta_2(y, z, d_m, h_m, v) = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{e^{(z+h_m)u_{1v}}}{u_{0v} + u_{1v}} e^{-j(y-d_m)\lambda} d\lambda$$

$$\Delta_3(y, z, d_m, h_m, v) = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{e^{(z+h_m)u_{1v}}}{u_{0v} + k_a^2 k_e^{-2} u_{1v}} e^{-j(y-d_m)\lambda} d\lambda$$

$$u_{0v} = \sqrt{\lambda^2 + k_v^2 - k_a^2}, \quad u_{1v} = \sqrt{\lambda^2 + k_v^2 - k_e^2}$$

$$k_a^2 = \omega^2 \mu_0 \epsilon_0, \quad k_e^2 = -j\omega\mu_0 (\sigma_1 + j\omega\epsilon_1)$$

$$Z_{sn}(v) = \frac{k_v^2 - k_{ins}^2}{j\omega 2\pi \epsilon_{ins}} \ln\left(\frac{r_{on}}{r_{in}}\right)$$

$$k_{ins}^2 = \omega^2 \mu_{ins} \epsilon_{ins}$$

Impedância de superfície

$$\sum_{v=1}^N (Z_{sn}(v)) B_{mv} i_v(x) = S_1 \sum_{m=1}^N \sum_{v=1}^N \Lambda(d_n, h_n, d_m, h_m, v) B_{mv} i_v(x)$$

Eigenvalor de P

$$PB_v = -k_v^2 B_v$$

Eigenvector de P

$B_v$ : coluna  $v$  de matriz de transformação linear (B)

$$P = P_2^{-1} P_1$$

$$Z_{P_1} = Z_{ins} + \frac{j\omega\mu_0}{4\pi} [\Delta_1(v) + 2\Delta_2(v)]$$

$$Y_{P_2} = Y_{ins}^{-1} + \frac{1}{4\pi(\sigma_1 + j\omega\epsilon_1)} [\Delta_1(v) + 2\Delta_3(v)]$$

$$k_e^2 = \gamma_1^2$$

$$k_v^2 = k_x^2$$

$$\mathbf{Z}_e = \frac{j\omega\mu_0}{4\pi} [\Delta_1(v) + 2\Delta_2(v)]$$

$$\mathbf{Y}_e^{-1} = \frac{1}{4\pi(\sigma_1 + j\omega\varepsilon_1)} [\Delta_1(v) + 2\Delta_3(v)]$$

$$k_v = 0$$

$$k_a^2 = 0$$

$$k_e^2 = -j\omega\mu_0\sigma_1$$

Pollaczek

$$Z_{ij} = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} [K_0(\gamma_1 d_{ij}) - K_0(\gamma_1 D_{ij}) + 2\underline{S}]$$

$$\underline{S} = \int_0^{+\infty} \frac{e^{-(h_i+h_j)\sqrt{\lambda^2+\gamma_1^2}}}{\lambda + \sqrt{\lambda^2 + \gamma_1^2}} \cos(y\lambda) d\lambda$$

$$\gamma_1^2 = j\omega\mu_0\sigma_1$$

$$k_v = 0$$

$$k_a^2 = 0$$

$$k_e^2 = -j\omega\mu_0(\sigma_1 + j\omega\varepsilon_1)$$

Sunde

$$Z_{ij} = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} [K_0(\gamma_1 d_{ij}) - K_0(\gamma_1 D_{ij}) + 2\underline{S}]$$

$$\underline{S} = \int_0^{+\infty} \frac{e^{-(h_i+h_j)\sqrt{\lambda^2+\gamma_1^2}}}{\lambda + \sqrt{\lambda^2 + \gamma_1^2}} \cos(y\lambda) d\lambda$$

$$\gamma_1^2 = j\omega\mu_0(\sigma_1 + j\omega\varepsilon_1)$$

$$k_v^2 = -j\omega\mu_0 j\omega\varepsilon_1$$

Papadopoulos

$$Z_{ij} = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \left( \underset{=1}{\Delta} + 2\underline{S} \right)$$

$$\underset{=1}{\Delta} = \int_0^{+\infty} \frac{[e^{-|h_i-h_j|\sqrt{\lambda^2+\gamma_1^2+k_x^2}} - e^{-(h_i+h_j)\sqrt{\lambda^2+\gamma_1^2+k_x^2}}]}{\sqrt{\lambda^2 + \gamma_1^2 + k_x^2}} \cos(y\lambda) d\lambda$$

$$k_x = \omega\sqrt{\mu_0\varepsilon_1}$$

$$\underline{S} = \int_0^{+\infty} \frac{e^{-(h_i+h_j)\sqrt{\lambda^2+\gamma_1^2+k_x^2}}}{\sqrt{\lambda^2 + \gamma_0^2 + k_x^2} + \sqrt{\lambda^2 + \gamma_1^2 + k_x^2}} \cos(y\lambda) d\lambda$$

$$\gamma_0^2 = j\omega\mu_0 j\omega\varepsilon_0 \text{ and } \gamma_1^2 = j\omega\mu_0(\sigma_1 + j\omega\varepsilon_1) \quad 113$$

$$Z_{ij} = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \left[ K_0(\gamma_1 d_{ij}) - K_0(\gamma_1 D_{ij}) + 2S_{=11}^c + 2\gamma_1^2 S_{=13}^c \right]$$

$$\gamma_0^2 = j\omega\mu_0 j\omega\epsilon_0 \text{ and } \gamma_1^2 = j\omega\mu_0(\sigma_1 + j\omega\epsilon_1)$$

$$d_{ij}^2 = (h_i - h_j)^2 + y^2$$

$$D_{ij}^2 = (h_i + h_j)^2 + y^2$$

$$S_{=11}^c = \int_0^{+\infty} \frac{e^{-(h_i+h_j)\sqrt{\lambda^2+\gamma_1^2}}}{(\lambda^2 + \gamma_1^2) \left( \sqrt{\lambda^2 + \gamma_0^2} + \sqrt{\lambda^2 + \gamma_1^2} \right)} \lambda^2 \cos(y\lambda) d\lambda$$

$$S_{=13}^c = \int_0^{+\infty} \frac{e^{-(h_i+h_j)\sqrt{\lambda^2+\gamma_1^2}}}{(\lambda^2 + \gamma_1^2) \left( \sqrt{\lambda^2 + \gamma_0^2} + \sqrt{\lambda^2 + \gamma_1^2} \right)} \cos(y\lambda) d\lambda$$

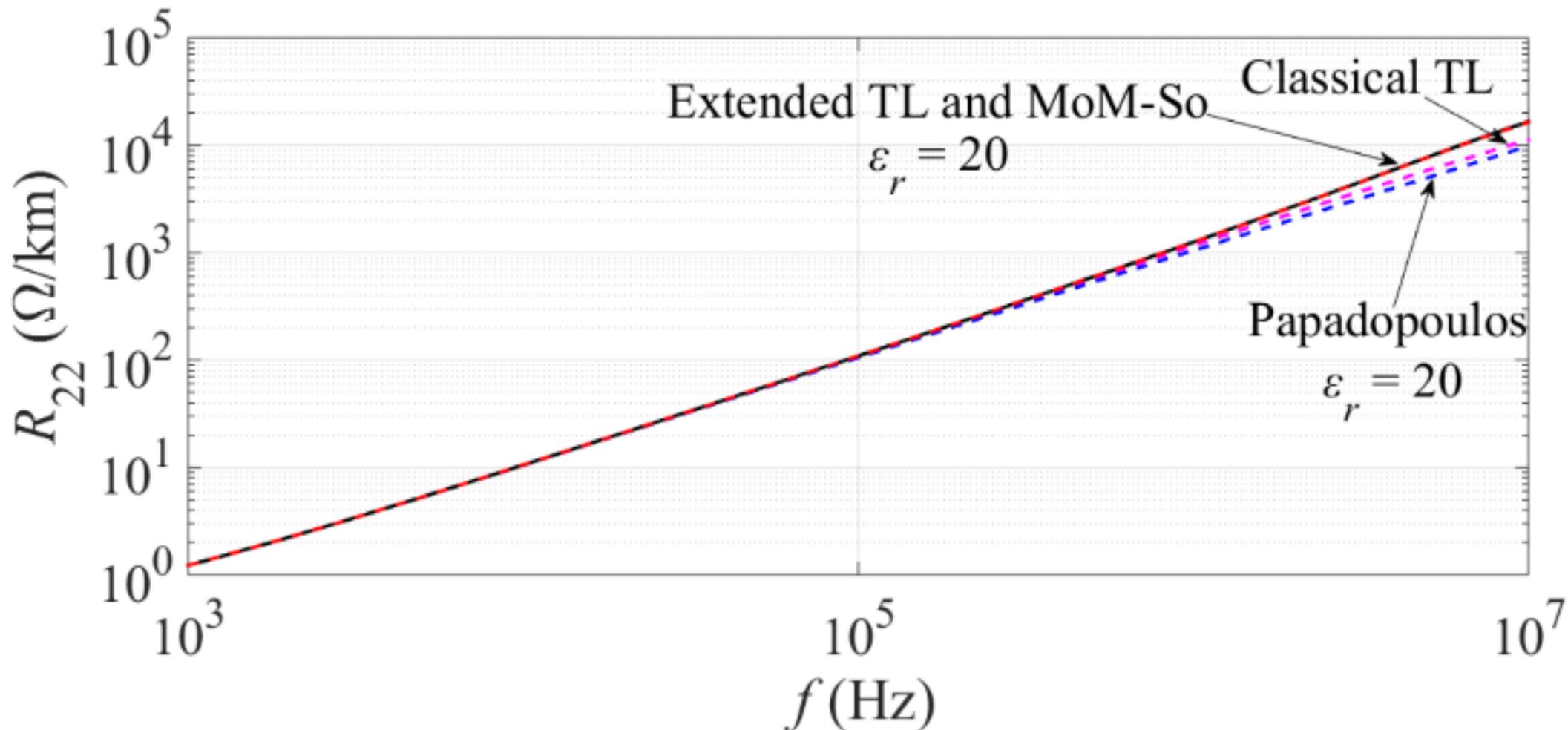
## Admittance by Xue

$$\mathbf{Y} = j\omega\mathbf{P}^{-1}$$

$$\mathbf{P} = \mathbf{P}_i + \mathbf{P}_e$$

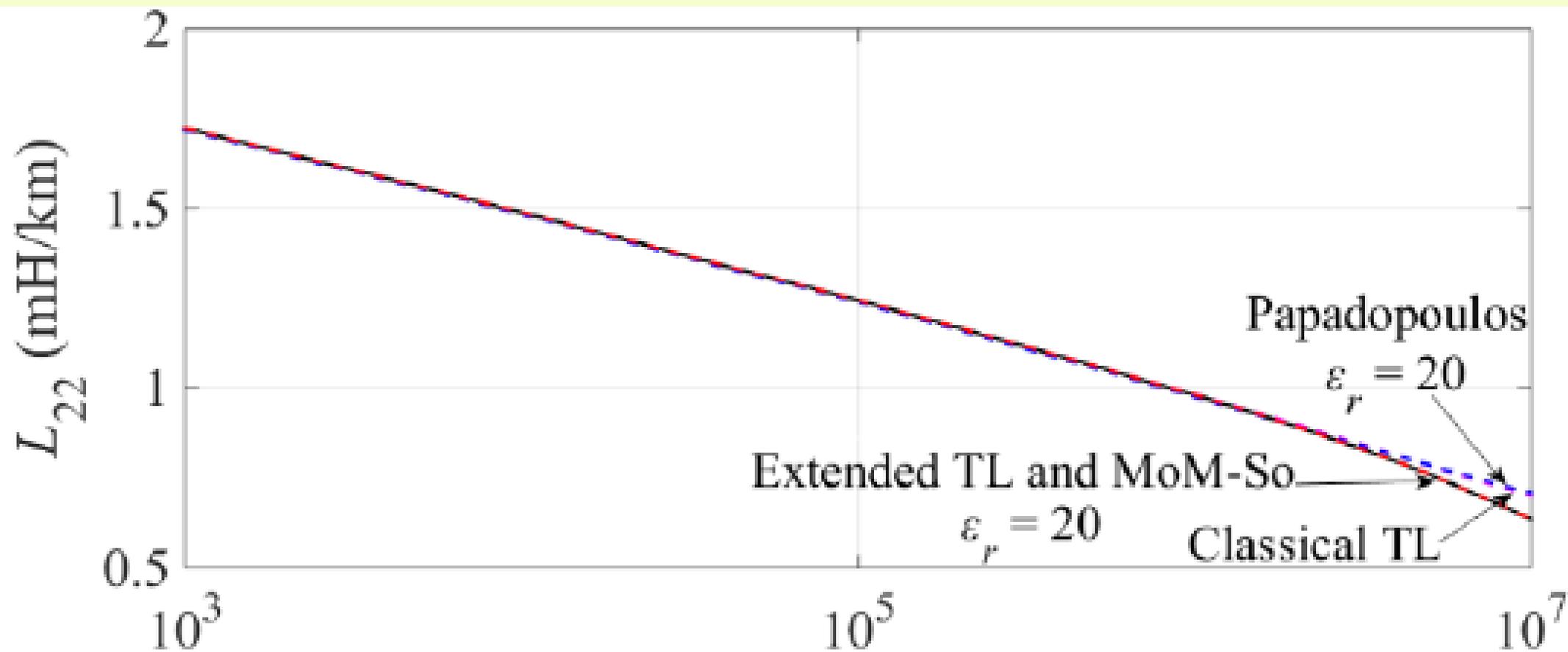
$$P_{ij} = \frac{j\omega}{2\pi(\sigma_1 + j\omega\epsilon_1)} \left[ K_0(\gamma_1 d_{ij}) - K_0(\gamma_1 D_{ij}) + 2S_{=12}^c + 2\gamma_1^2 S_{=13}^c \right]$$

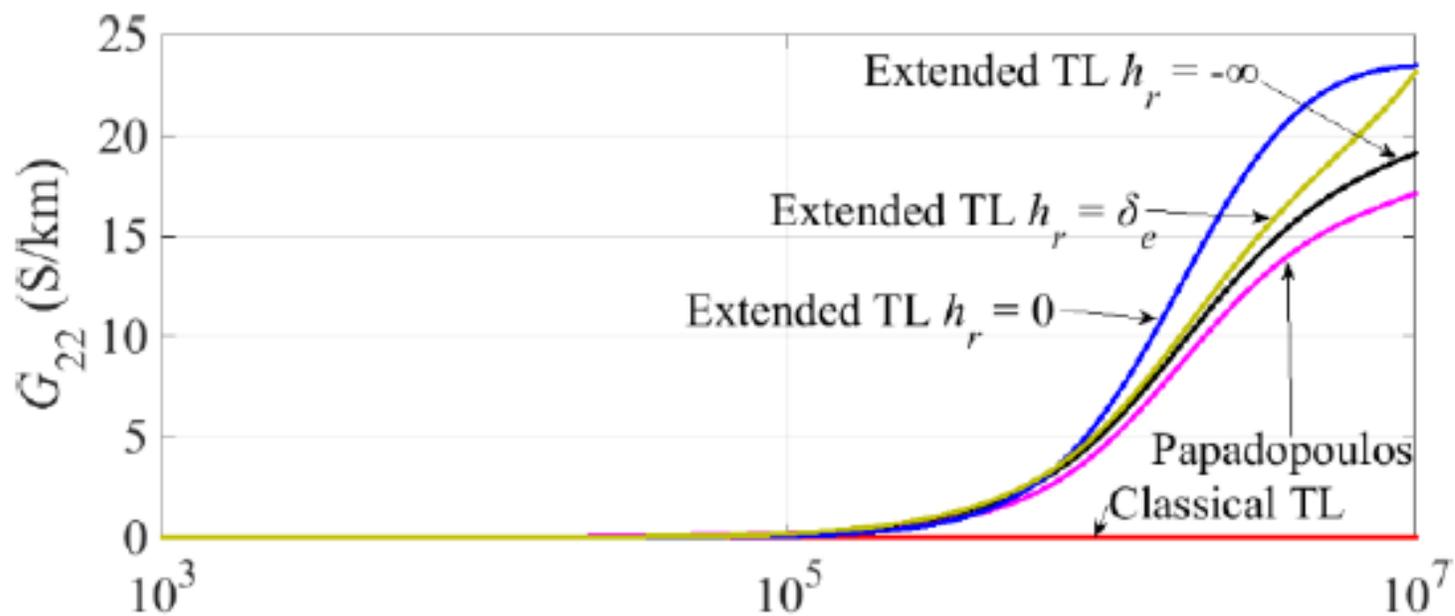
$$S_{=12}^c = \int_0^{+\infty} \frac{e^{-(h_i+h_j)\sqrt{\lambda^2+\gamma_1^2}}}{(\lambda^2 + \gamma_1^2) \left( \sqrt{\lambda^2 + \gamma_0^2} + \frac{\gamma_0^2}{\gamma_1^2} \sqrt{\lambda^2 + \gamma_1^2} \right)} \lambda^2 \cos(y\lambda) d\lambda$$



Extended: Xue

Classical TL: Pollaczek

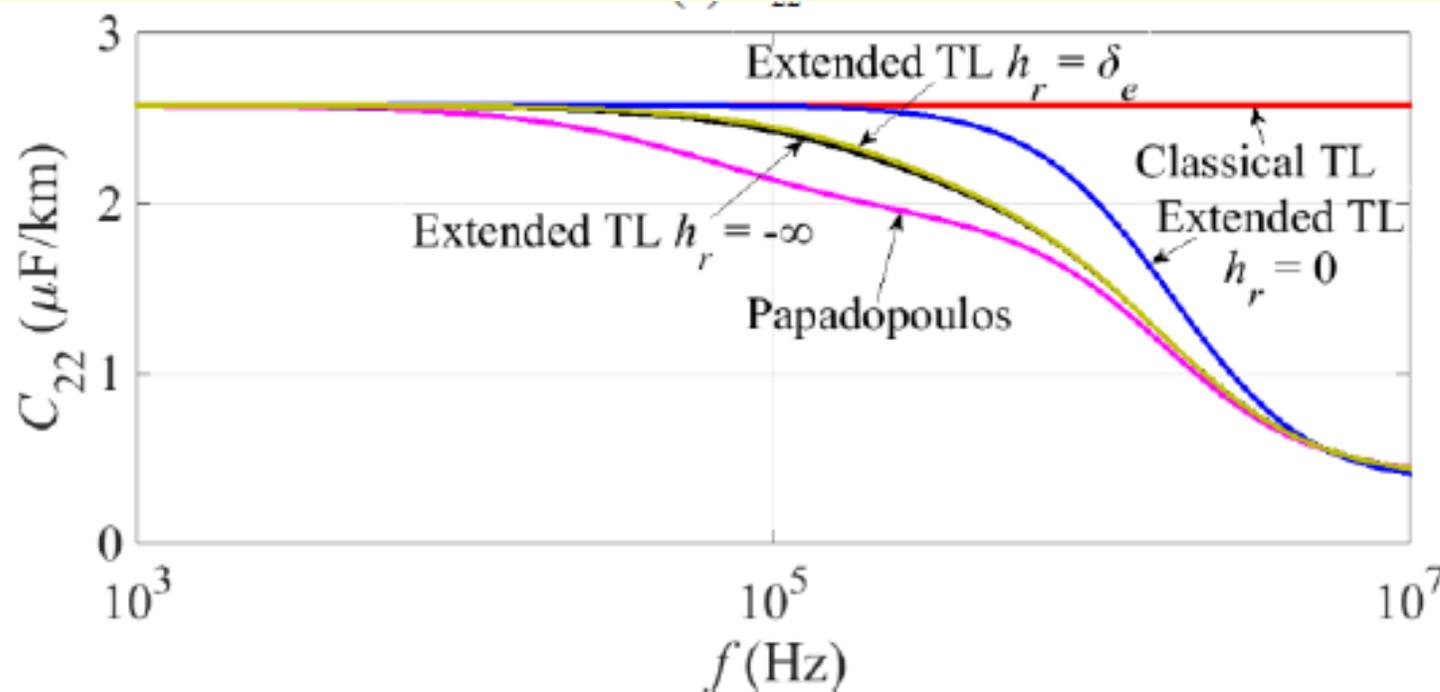




$$h_r = \delta_e = \left[ \frac{\omega^2 \varepsilon_1 \mu_0}{2} \left( \sqrt{1 + \left( \frac{\sigma_1}{\omega \varepsilon_1} \right)^2} - 1 \right) \right]^{-\frac{1}{2}}$$

$$h_r = -\infty$$

$$V_n = - \int_{h_r}^{h_n - r_{on}} E_{1z}(x, d_n, z) dz$$



$$-\frac{dV_n}{dx} = E_{1x}(x, d_n, h_n - r_{on}) + j\omega\mu_0 \int_{-\infty}^{h_n - r_{on}} H_{1y}(x, d_n, z) dz$$

$$Z_{GCSA} = \begin{bmatrix} z_{gs1} & z_{gs1} & z_{gs1} & z_{gm12} & z_{gm12} & z_{gm12} & z_{gm13} & z_{gm13} & z_{gm13} \\ z_{gs1} & z_{gs1} & z_{gs1} & z_{gm12} & z_{gm12} & z_{gm12} & z_{gm13} & z_{gm13} & z_{gm13} \\ z_{gs1} & z_{gs1} & z_{gs1} & z_{gm12} & z_{gm12} & z_{gm12} & z_{gm13} & z_{gm13} & z_{gm13} \\ z_{gm12} & z_{gm12} & z_{gm12} & z_{gs2} & z_{gs2} & z_{gs2} & z_{gm23} & z_{gm23} & z_{gm23} \\ z_{gm12} & z_{gm12} & z_{gm12} & z_{gs2} & z_{gs2} & z_{gs2} & z_{gm23} & z_{gm23} & z_{gm23} \\ z_{gm12} & z_{gm12} & z_{gm12} & z_{gs2} & z_{gs2} & z_{gs2} & z_{gm23} & z_{gm23} & z_{gm23} \\ z_{gm13} & z_{gm13} & z_{gm13} & z_{gm23} & z_{gm23} & z_{gm23} & z_{gs3} & z_{gs3} & z_{gs3} \\ z_{gm13} & z_{gm13} & z_{gm13} & z_{gm23} & z_{gm23} & z_{gm23} & z_{gs3} & z_{gs3} & z_{gs3} \\ z_{gm13} & z_{gm13} & z_{gm13} & z_{gm23} & z_{gm23} & z_{gm23} & z_{gs3} & z_{gs3} & z_{gs3} \end{bmatrix}$$

$$Z_{GCS} = \begin{bmatrix} z_{gs1} & z_{gs1} & z_{gm12} & z_{gm12} & z_{gm13} & z_{gm13} \\ z_{gs1} & z_{gs1} & z_{gm12} & z_{gm12} & z_{gm13} & z_{gm13} \\ z_{gm12} & z_{gm12} & z_{gs2} & z_{gs2} & z_{gm23} & z_{gm23} \\ z_{gm12} & z_{gm12} & z_{gs2} & z_{gs2} & z_{gm23} & z_{gm23} \\ z_{gm13} & z_{gm13} & z_{gm23} & z_{gm23} & z_{gs3} & z_{gs3} \\ z_{gm13} & z_{gm13} & z_{gm23} & z_{gm23} & z_{gs3} & z_{gs3} \end{bmatrix}$$

## 4.2 Admitancia



UNICAMP

$$P_i = \begin{bmatrix} P_{i1} & 0_{n \times n} & \dots & 0_{n \times n} \\ 0_{n \times n} & P_{i2} & \dots & 0_{n \times n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 0_{n \times n} & 0_{n \times n} & \dots & P_{in} \end{bmatrix}$$

$$P_{ij} = \begin{bmatrix} P_{cj} + P_{sj} + P_{aj} & P_{sj} + P_{aj} & P_{aj} \\ P_{sj} + P_{aj} & P_{sj} + P_{aj} & P_{aj} \\ P_{aj} & P_{aj} & P_{aj} \end{bmatrix}$$

$$P_{ij} = \begin{bmatrix} P_{cj} + P_{sj} & P_{sj} \\ P_{sj} & P_{sj} \end{bmatrix}$$

$$P_{cj} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0\epsilon_{i1}} \ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)$$

$$P_{sj} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0\epsilon_{i2}} \ln\left(\frac{r_5}{r_4}\right)$$

$$P_{aj} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0\epsilon_{i3}} \ln\left(\frac{r_7}{r_6}\right)$$

$$P_{iCSA} = \begin{bmatrix} P_{c1} + P_{s1} + P_{a1} & P_{s1} + P_{a1} & P_{a1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ P_{s1} + P_{a1} & P_{s1} + P_{a1} & P_{a1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ P_{a1} & P_{a1} & P_{a1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & P_{c2} + P_{s2} + P_{a2} & P_{s2} + P_{a2} & P_{a2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & P_{s2} + P_{a2} & P_{s2} + P_{a2} & P_{a2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & P_{a2} & P_{a2} & P_{a2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_{c3} + P_{s3} + P_{a3} & P_{s3} + P_{a3} & P_{a3} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_{s3} + P_{a3} & P_{s3} + P_{a3} & P_{a3} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_{a3} & P_{a3} & P_{a3} \end{bmatrix}$$

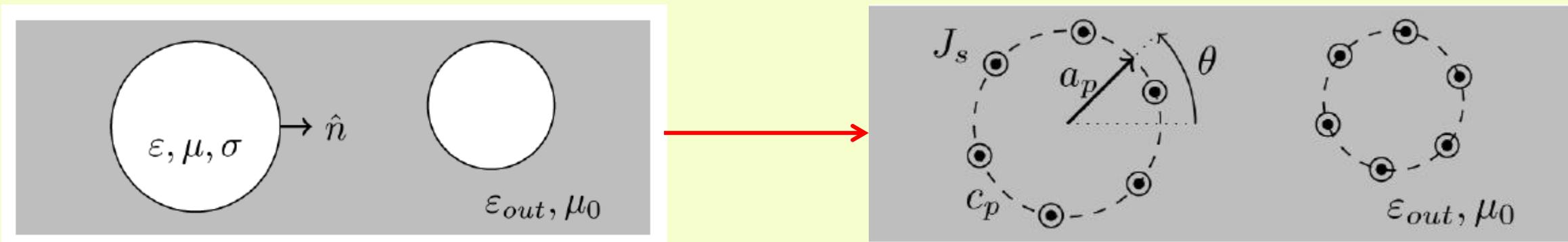
$$P_{iCS} = \begin{bmatrix} P_{c1} + P_{s1} & P_{s1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ P_{s1} & P_{s1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & P_{c2} + P_{s2} & P_{s2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & P_{s2} & P_{s2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & P_{c3} + P_{s3} & P_{s3} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & P_{s3} & P_{s3} \end{bmatrix}$$

$$P_{gCSA} = \begin{bmatrix} P_{gs1} & P_{gs1} & P_{gs1} & P_{gm12} & P_{gm12} & P_{gm12} & P_{gm13} & P_{gm13} & P_{gm13} \\ P_{gs1} & P_{gs1} & P_{gs1} & P_{gm12} & P_{gm12} & P_{gm12} & P_{gm13} & P_{gm13} & P_{gm13} \\ P_{gs1} & P_{gs1} & P_{gs1} & P_{gm12} & P_{gm12} & P_{gm12} & P_{gm13} & P_{gm13} & P_{gm13} \\ P_{gm12} & P_{gm12} & P_{gm12} & P_{gs2} & P_{gs2} & P_{gs2} & P_{gm23} & P_{gm23} & P_{gm23} \\ P_{gm12} & P_{gm12} & P_{gm12} & P_{gs2} & P_{gs2} & P_{gs2} & P_{gm23} & P_{gm23} & P_{gm23} \\ P_{gm12} & P_{gm12} & P_{gm12} & P_{gs2} & P_{gs2} & P_{gs2} & P_{gm23} & P_{gm23} & P_{gm23} \\ P_{gm13} & P_{gm13} & P_{gm13} & P_{gm23} & P_{gm23} & P_{gm23} & P_{gs3} & P_{gs3} & P_{gs3} \\ P_{gm13} & P_{gm13} & P_{gm13} & P_{gm23} & P_{gm23} & P_{gm23} & P_{gs3} & P_{gs3} & P_{gs3} \\ P_{gm13} & P_{gm13} & P_{gm13} & P_{gm23} & P_{gm23} & P_{gm23} & P_{gs3} & P_{gs3} & P_{gs3} \end{bmatrix}$$

$$P_{gCS} = \begin{bmatrix} P_{gs1} & P_{gs1} & P_{gm12} & P_{gm12} & P_{gm13} & P_{gm13} \\ P_{gs1} & P_{gs1} & P_{gm12} & P_{gm12} & P_{gm13} & P_{gm13} \\ P_{gm12} & P_{gm12} & P_{gs2} & P_{gs2} & P_{gm23} & P_{gm23} \\ P_{gm12} & P_{gm12} & P_{gs2} & P_{gs2} & P_{gm23} & P_{gm23} \\ P_{gm13} & P_{gm13} & P_{gm23} & P_{gm23} & P_{gs3} & P_{gs3} \\ P_{gm13} & P_{gm13} & P_{gm23} & P_{gm23} & P_{gs3} & P_{gs3} \end{bmatrix}$$

# MoM-SO: a Complete Method for Computing the Impedance of Cable Systems Including Skin, Proximity, and Ground Return Effects

Utkarsh R. Patel, *Student Member, IEEE*, and Piero Triverio, *Member, IEEE*



# Generalized model for calculation induced voltage on sheath in steady-state for single-circuit underground lines

Jesus E. Guevara, Jaimis S. L. Colqui, Jose Pissolato Filho

*School of Electrical and Computer Engineering*

*State University of Campinas*

Campinas, SP, Brazil

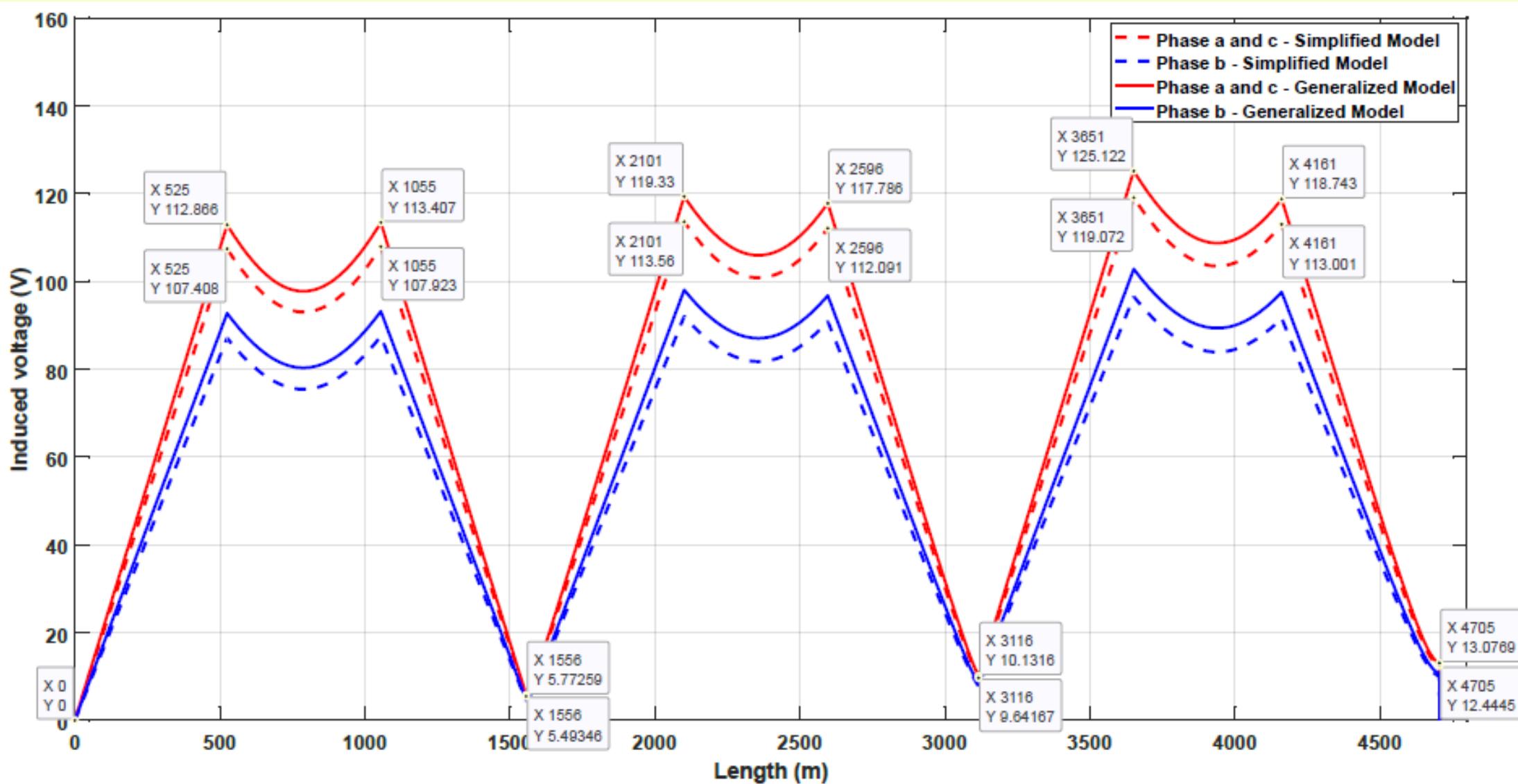
Emails: j272296@dac.unicamp.br, jaimis@unicamp.br, pisso@unicamp.br

$$\begin{pmatrix} V_{SA} \\ V_{SB} \\ V_{SC} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{cs1} + Z_{gs1} & Z_{gm12} & Z_{gm13} \\ Z_{gm12} & Z_{cs2} + Z_{gs2} & Z_{gm23} \\ Z_{gm13} & Z_{gm23} & Z_{cs3} + Z_{gs3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{pmatrix} \quad (13)$$

Generalized model  
(Xue)

$$\begin{pmatrix} V_{SA} \\ V_{SB} \\ V_{SC} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{A,c-s} & Z_{m,A-B} & Z_{m,A-C} \\ Z_{m,A-B} & Z_{B,c-s} & Z_{m,B-C} \\ Z_{m,A-C} & Z_{m,B-C} & Z_{C,c-s} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{pmatrix} \quad (1)$$

IEEE 575 e CIGRE  
283 model  
(Pollazeck)



Flat com transposição de fase

# 5. Usando ATP - EMTP



UNICAMP

Line/Cable Data: Ejemplo

Model Data Nodes

Cable number: 1 Paste Copy Delete Move # cables: 3

	CORE	SHEATH
Rin [m]	0	0.04925
Rout [m]	0.02785	0.05165
Rho [ohm*m]	2.79632E-8	1.8388E-7
mu	1	1
mu (ins)	1	1
eps (ins)	2.9129	2.25
semicon in [m]	0	0
semicon out [m]	0	0

Total radius  
Rout [m] 0.06125

Core  
 On  Ground

Sheath  
 On  Ground

Armor  
 On  Ground

Position  
Vertical [m] 2.04  
Horizontal [m] -0.18

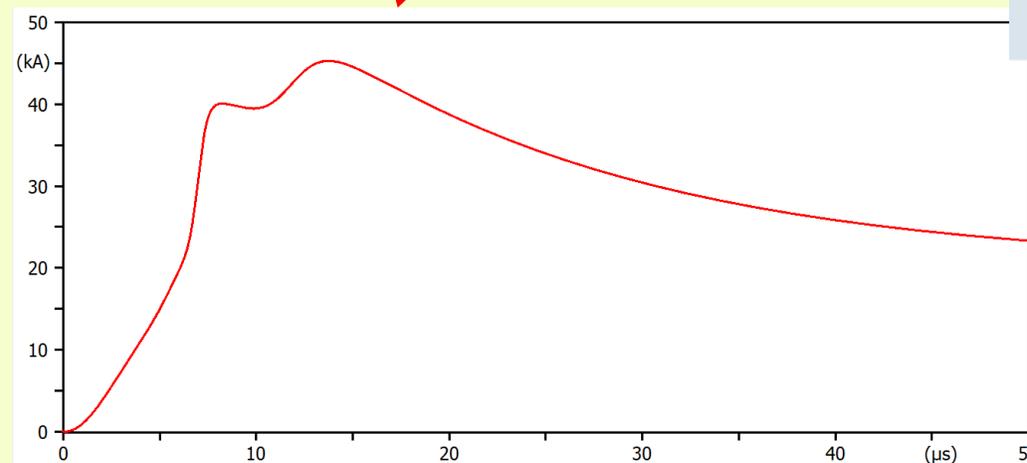
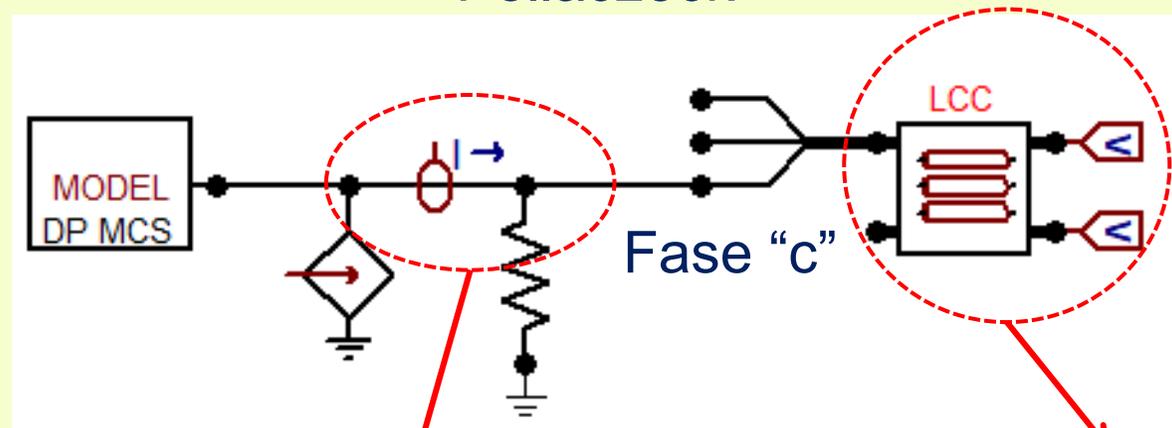
System type  
Name: Ejemplo  
Single Core Cable #Ph: 6  
Number of cables: 3  
Cables in:  Air  Surface  Ground

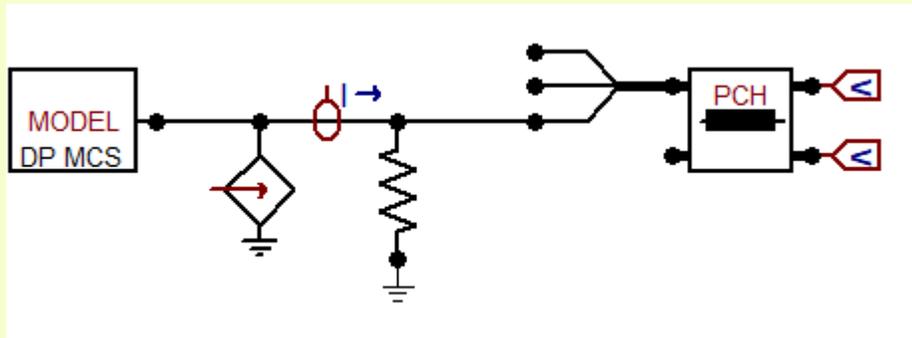
Standard data  
Rho [ohm\*m] 1000  
Freq. init [Hz] 0.01  
Length [m] 1  
 Set length in icon

Model  
Type:  Bergeron  Pi  JMarti  Noda  Semlyen  
Data: Decades 8 Points/Dec 8  
Freq. matrix [Hz] 10000000 Freq. SS [Hz] 200000  
 Use default fitting

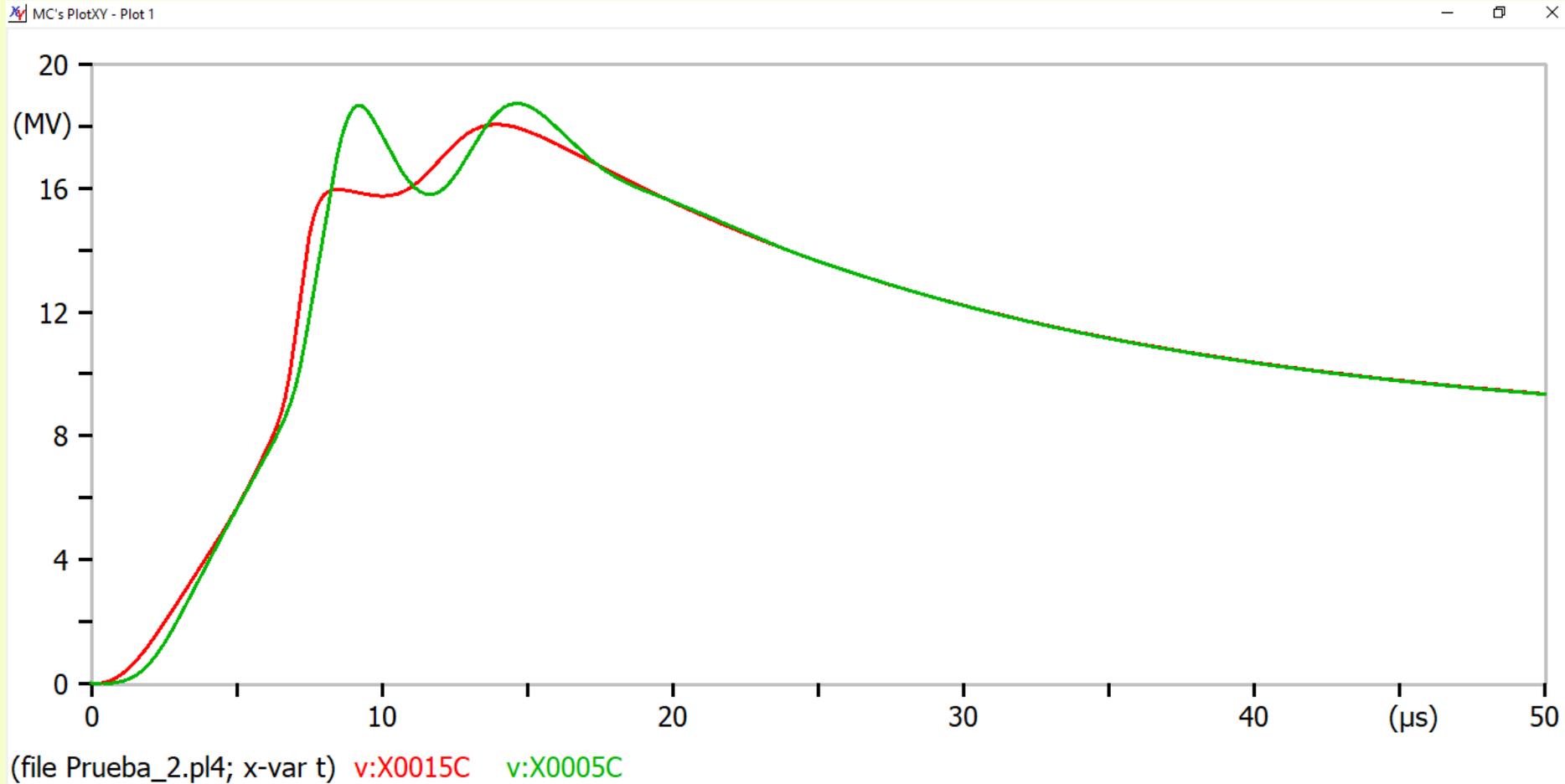
View Verify Edit defin. Help

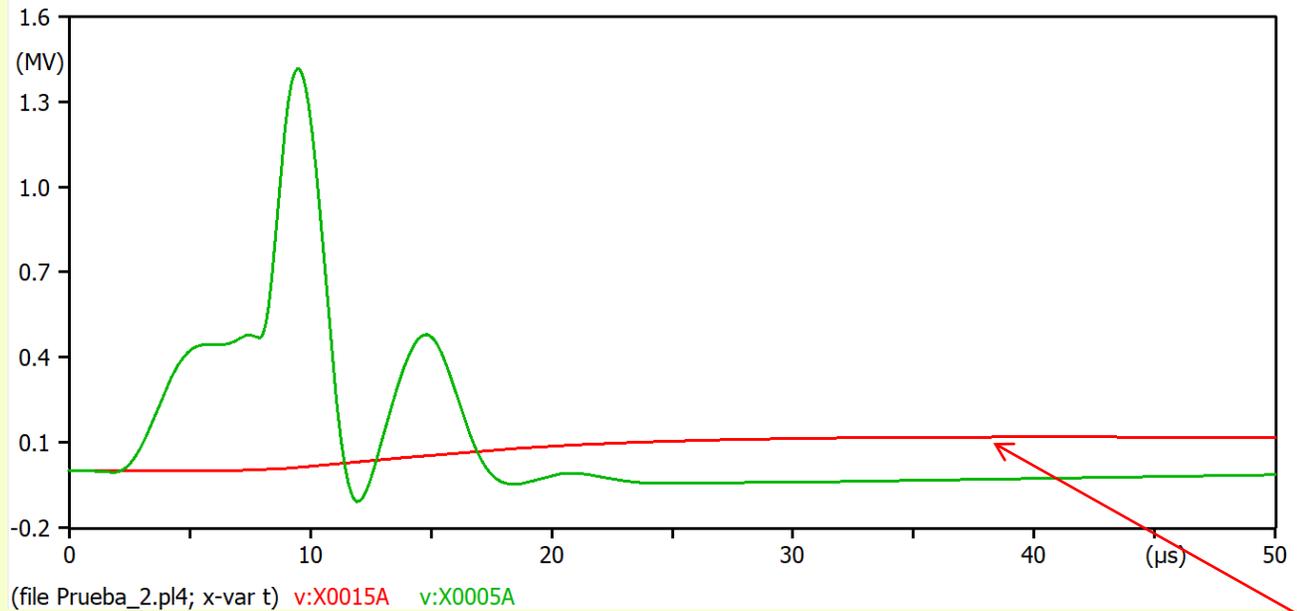
Pollaczek



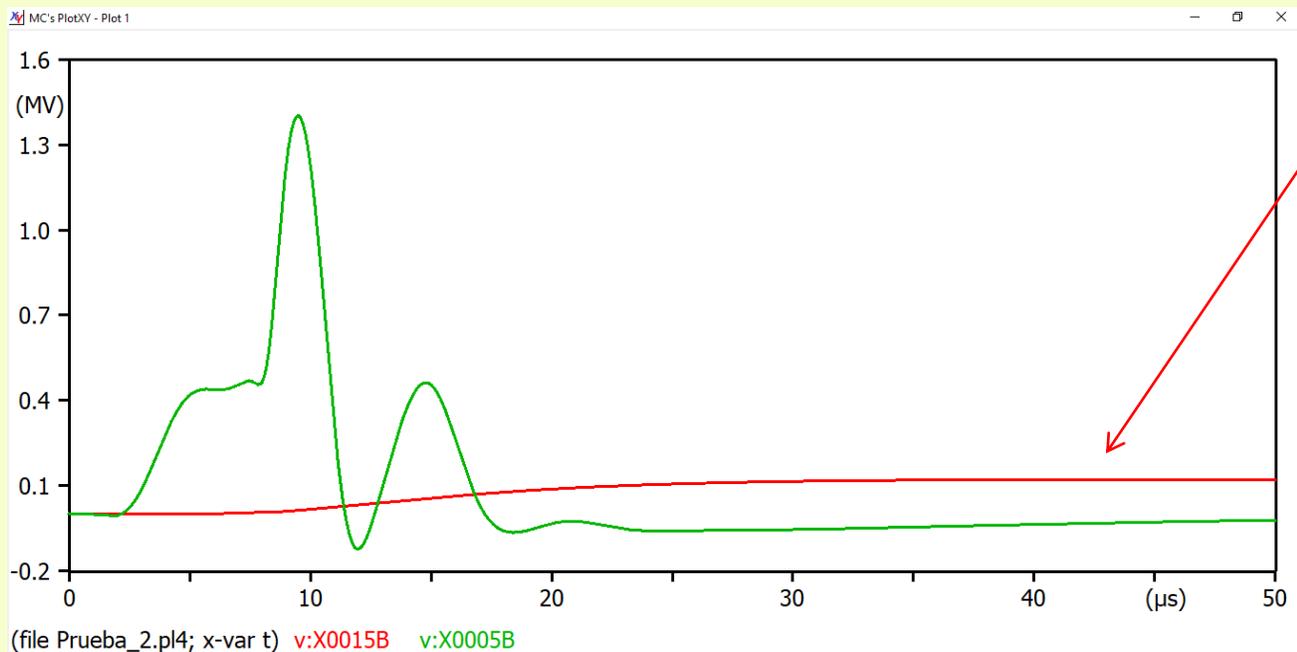


Xue





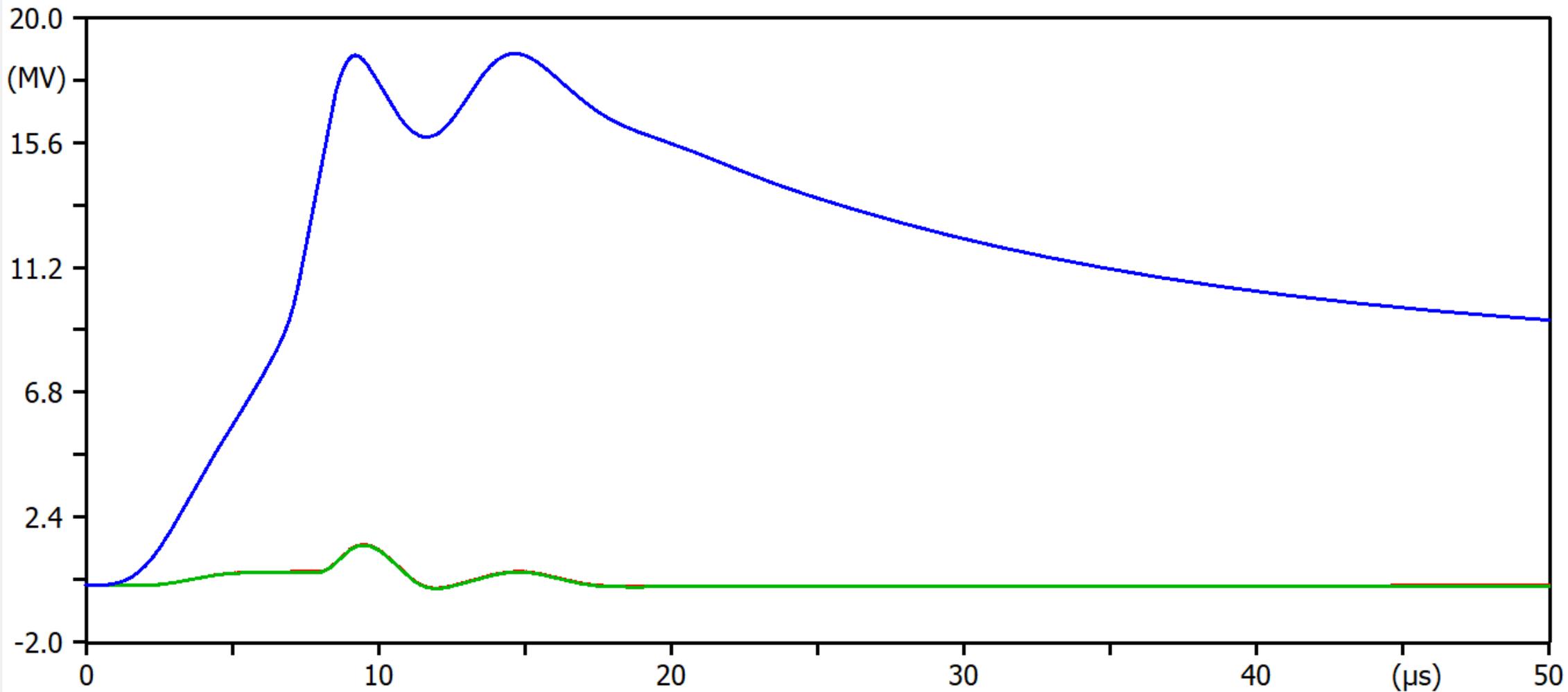
A resposta nas demais fases utilizando o modelo de Pollaczek não é correta porque não considera a impedância mútua em suas formulações.



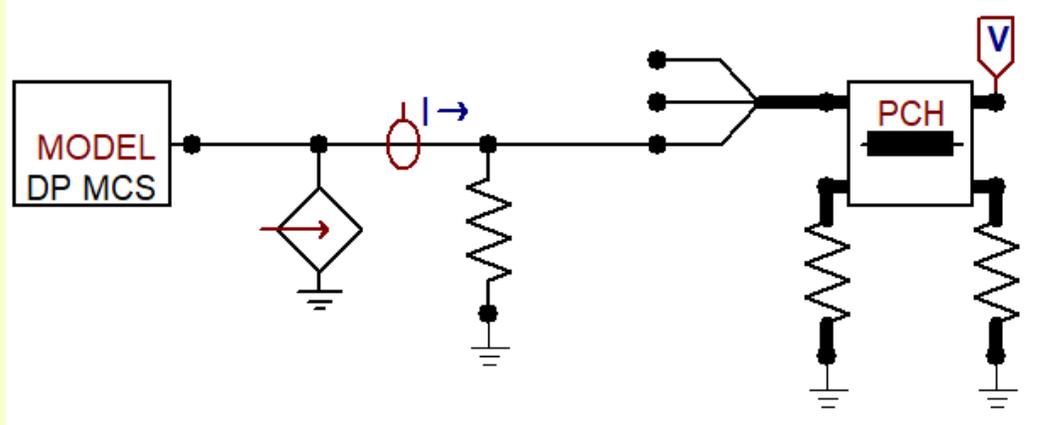


UNICAMP

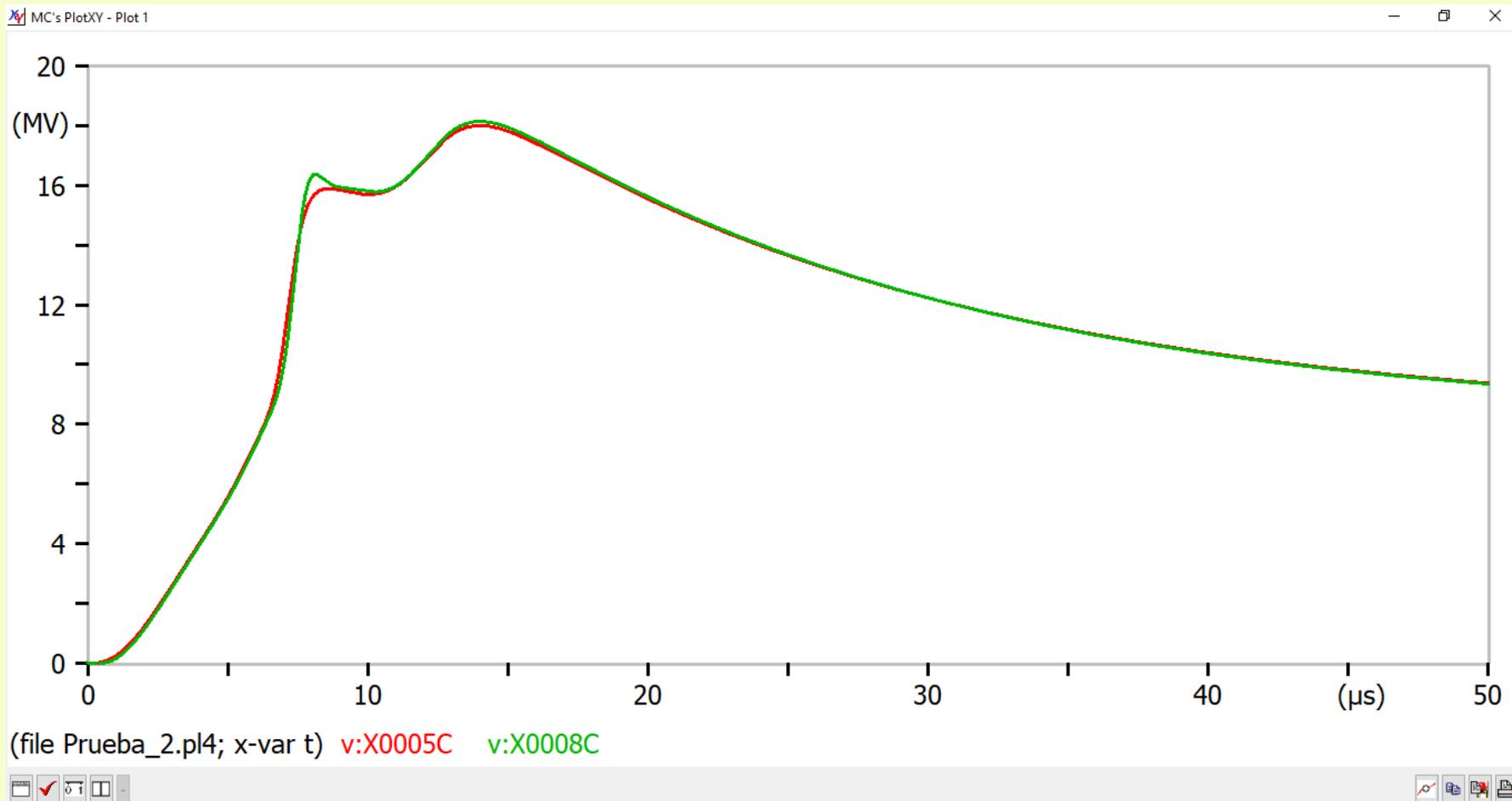
MC's PlotXY - Plot 1

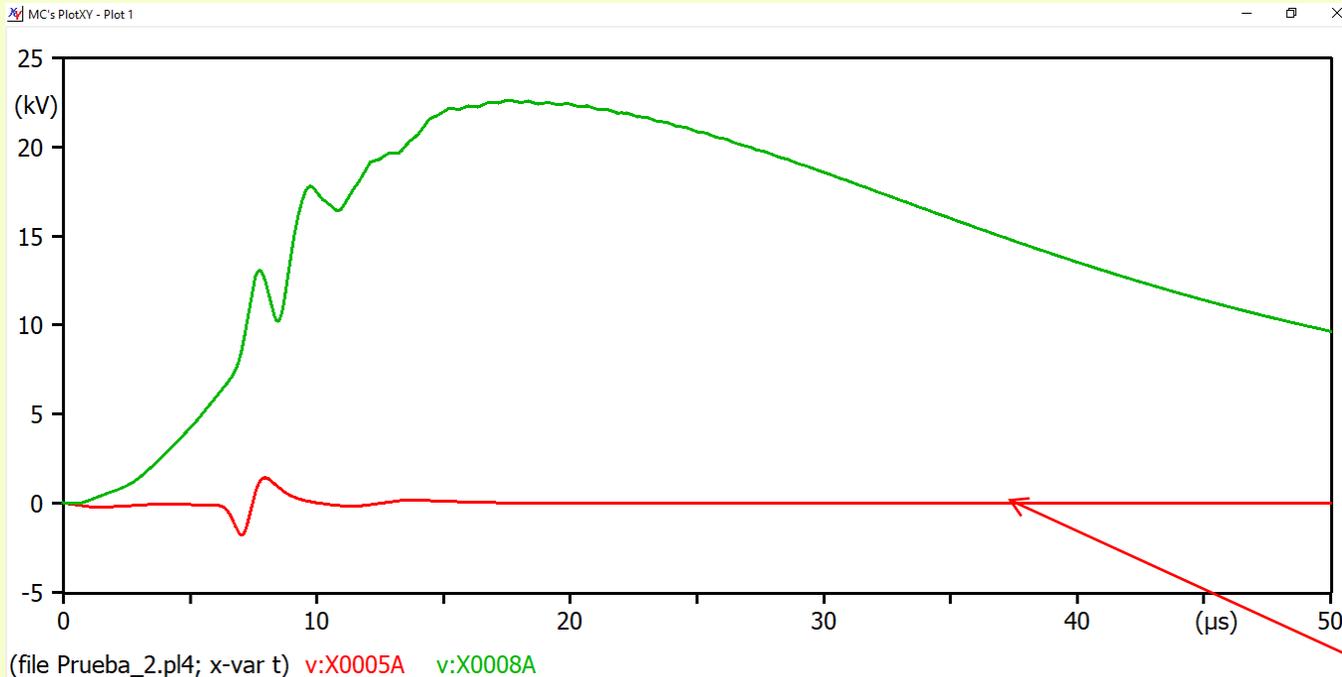


(file Prueba\_2.pl4; x-var t) v:X0005A v:X0005B v:X0005C

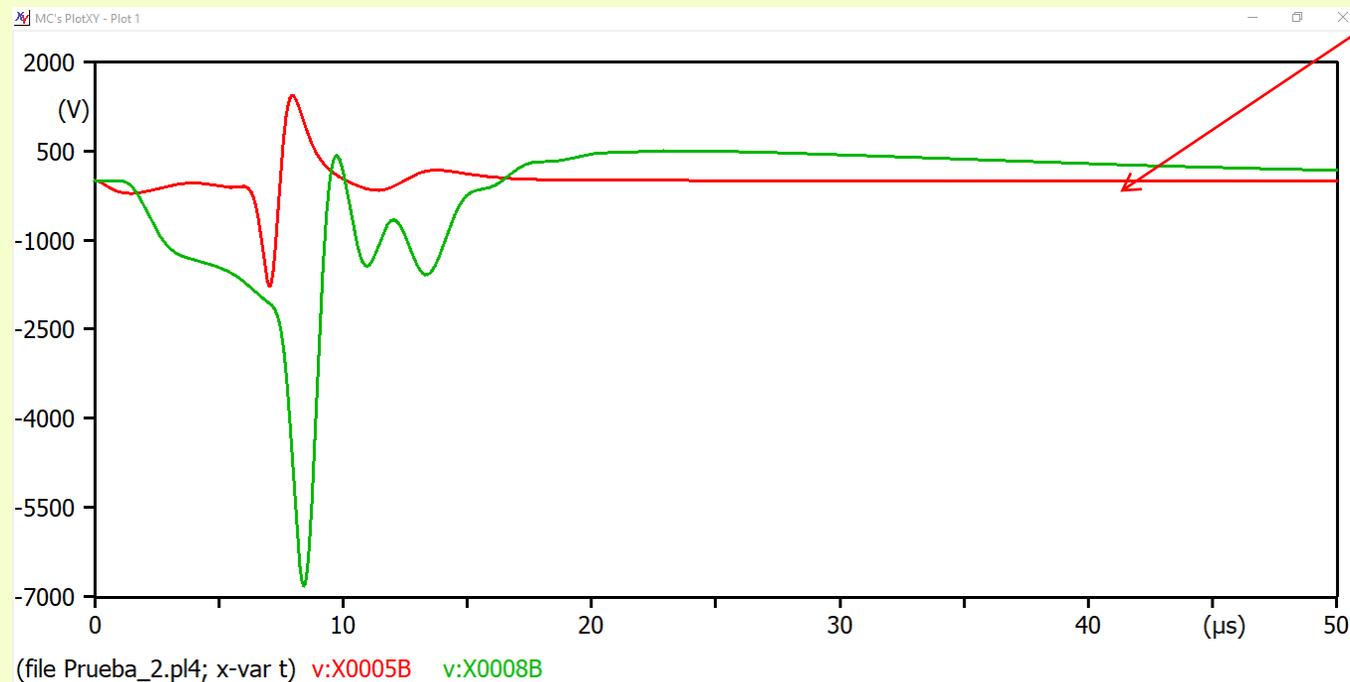


Xue





A resposta nas demais fases utilizando o modelo de Pollaczek não é correta porque não considera a impedância mútua em suas formulações.





UNICAMP

**OBRIGADO PELA  
ATENÇÃO**