

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

BERNARDO MAIA PIMENTEL

**INTRODUÇÃO AO ESTUDO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA A CABOS ISOLADOS**

VIÇOSA  
2010

BERNARDO MAIA PIMENTEL

**INTRODUÇÃO AO ESTUDO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA A CABOS ISOLADOS**

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal de Viçosa, para a obtenção dos créditos da disciplina ELT 490 – Monografia e Seminário e cumprimento do requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Tarcísio Pizziolo.

VIÇOSA  
2010



**BERNARDO MAIA PIMENTEL**

**INTRODUÇÃO AO ESTUDO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA A CABOS ISOLADOS**

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal de Viçosa, para a obtenção dos créditos da disciplina ELT 490 – Monografia e Seminário e cumprimento do requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 26 de novembro de 2010.

**COMISSÃO EXAMINADORA**

---

**Prof. Dr. Tarcísio de Assunção Pizziolo - Orientador**  
**Universidade Federal de Viçosa**

---

**Prof. Dr. André Gomes Torres - Membro**  
**Universidade Federal de Viçosa**

---

**Prof. Dr. Marco Aurélio de Almeida Castro - Membro**  
**Universidade Federal de Viçosa**

*“Engineering: where the noble semi-skilled laborers execute the vision of those who think  
and dream.”*

*Sheldon Cooper*

*Aos que estiveram ao meu lado durante os estudos mais desafiantes.  
Mas, principalmente, àqueles que me apoiaram de longe.*

## *Agradecimentos*

Dirijo meus sinceros agradecimentos a:

A CAPES por possibilitar a realização de um intercâmbio no exterior. Durante meu estágio em uma metalúrgica francesa, despertou em mim o interesse pelo estudo das ligações elétricas a cabos isolados.

Professor Tarcísio Pizziolo pelo apoio e orientação na elaboração deste trabalho.

## ***Resumo***

O presente texto destina-se àqueles que se iniciam em estudos de ligações elétricas a cabos isolados. Apresenta aspectos construtivos e ambientais dos cabos e das linhas: formas de aterramento das blindagens, cálculo e estratégias para redução das tensões induzidas, ferramentas para a análise do campo magnético emitido e exemplos de equipamentos acessórios. O cálculo das tensões induzidas é feito analiticamente e um exemplo numérico é mostrado, já o cálculo dos campos magnéticos é computacional e apenas as principais ferramentas são apresentadas.

## *Abstract*

This text is for those who begin studies in electrical connections to insulated cables. The text presents construction and environmental aspects of cables and lines: ways to ground the shielding, calculation and strategies for reducing induced voltages, tools for analyzing the magnetic field emitted and examples of accessories. The calculation of induced voltages is done analytically and a numerical example is shown, on the other hand the calculation of magnetic fields is computational and only main tools are presented.

## *Sumário*

1. Introdução .....	13
2. Constituição e Fabricação.....	15
Condutor Principal.....	16
Blindagens Semicondutoras .....	17
Isolante .....	18
Blindagem Metálica.....	20
Revestimento Exterior .....	22
3. Disposições e Técnicas de Aterramento.....	23
Disposições.....	23
Técnicas de Aterramento.....	25
4. Tensões Induzidas .....	28
Aterramento em Ponto Único .....	31
Permutação das Blindagens Metálicas ou Crossbonding .....	35
Estudo de Caso - Aterramento em Ponto Único.....	37
Estudo de Caso - Crossbonding.....	39
5. Campos Magnéticos .....	41
Cálculo Analítico.....	41
Técnicas de Redução do Campo Magnético .....	44
6. Equipamentos Acessórios.....	46
Limitadores de Sobretensão .....	46
Junções .....	47
Extremidades ou Terminações .....	48
7. Conclusões .....	49
8. Referências Bibliográficas.....	50

## *Lista de Figuras*

Figura 1 - Vista em corte de um cabo.....	15
Figura 2 - Ilustração de um cabo isolado de alta tensão.....	15
Figura 3 - Máquina de extrusão. [4] .....	19
Figura 4 - Arborescência em um cabo XLPE [5] .....	20
Figura 5 - Exemplo de blindagem formada por dois materiais. ....	21
Figura 6 - Comparação entre cabos de diferentes revestimentos [6].....	22
Figura 7 - Modos de posta mais utilizados: Triangular e Linear .....	23
Figura 8 - Aeroporto de Barajas. Madrid, Espanha. [6] .....	24
Figura 9 - Rede de transmissão do Quatar [6] .....	24
Figura 10 - Esquema de conexão do aterramento contínuo.....	25
Figura 11 - Esquema de conexão do aterramento em ponto único.....	26
Figura 12 - Esquema de conexão do aterramento a permutação de blindagens. ....	27
Figura 13 - Sistemas de coordenadas. Disposição linear e triangular. *CDT: Cabo de terra... 31	
Figura 14 - Transposição dos cabos na disposição triangular. ....	33
Figura 15 - Campo magnético emitido por um cabo. [9] .....	41
Figura 16 - Princípio da Compensação Passiva.....	44
Figura 17 - Blindagem de campo magnético.....	45
Figura 18 - Característica Tensão - Corrente de um LST.....	46
Figura 19 - Conexão subterrânea entre postes.....	48
Figura 20 - Conexão aero-subterrânea.....	48
Figura 21 - Conexão em sifão.....	48

## *Lista de Tabelas*

Tabela 1 - Características de Cobre e Alumínio [2] .....	16
Tabela 2 - Características dos isolantes. [1] .....	18

## 1. Introdução

O estudo de cabos isolados para transmissão de energia ainda é esquecido nos cursos de graduação. Mesmo sendo um campo de estudos que cresce e concorre com a transmissão de energia por linhas aéreas, poucos estudantes têm acesso às informações sobre cabos isolados.

De fato, o emprego dos cabos isolados na transmissão e distribuição de energia é menor que das linhas aéreas a cabos nus, e as universidades têm toda razão de privilegiar o estudo da tecnologia mais empregada. Porém, recentes mudanças e avanços tecnológicos sinalizam para a ampliação da rede elétrica a cabos isolados do país.

Isto se deve a algumas características que há pouco tempo não eram tão consideradas, tais como a atenuação dos campos magnéticos propagados pelas corrente de potência, a redução da poluição visual em centros urbanos e a qualidade da energia. Conceitos modernos que a cada dia interferem mais em nossas escolhas.

Cabos isolados e linhas subterrâneas têm custos de fabricação e instalação mais altos que dos cabos nus e linhas aéreas. Porém, quando levado em consideração os custos de manutenção, preventiva e corretiva, as linhas subterrâneas são vantajosas pois falham menos [10]. Esta vantagem, somada a custos com podas de árvores, cuidados com meio-ambiente (poluição visual e menores emissões de campos eletromagnéticos), qualidade da energia e satisfação dos clientes, torna-se decisiva na escolha dos cabos isolados como tecnologia mais adequada atualmente. Abaixo um comparativo das falhas:

<b>Confiabilidade comparada das redes subterrâneas e aéreas</b>		
<b>Redes de Média Tensão (Taxa de falhas por ano e por 100km)</b>	<b>Urbana</b>	<b>Rural</b>
<b>Subterrânea</b>	3,15	1,29
<b>Aérea</b>	-	4,03

<b>Confiabilidade comparada das redes subterrâneas e aéreas</b>		
<b>Redes de Baixa Tensão (Taxa de falhas por ano e por 100km)</b>	<b>Em 2005</b>	<b>Em 2006</b>
<b>Subterrânea</b>	3,24	3,17
<b>Aérea</b>	3,23	4,12

Já existem resoluções normativas da cidade de São Paulo que regulamentam a substituições das redes atuais por redes de transmissão subterrânea e não permitem a inserção de novas linhas aéreas à rede já existente.

O presente texto tem o objetivo de servir aos interessados como uma introdução ao estudo da transmissão de energia elétrica por cabos isolados de alta tensão. Para isto, os seguintes temas serão abordados:

- Constituição e fabricação;
- Disposição dos cabos em uma ligação e formas de aterramento;
- Cálculo das tensões induzidas;
- Características dos campos magnéticos emitidos;
- Acessórios de uma ligação a cabos isolados;

## 2. Constituição e Fabricação

A história dos cabos isolados de forte potência é centenária. Três correntes tecnológicas foram desenvolvidas originariamente e distinguem-se quanto ao material isolante: papel impregnado com óleo, polímeros sintéticos ou gás. [1] Atualmente, o uso de material sintético é a tecnologia mais difundida, tendo como o polietileno reticulado (ou entrecruzado) seu polímero mais utilizado.

Cabos isolados podem ser classificados quanto às características do condutor principal. Este podendo ser fabricado em cobre ou alumínio, maciço ou em feixe. Existem ainda cabos monopolares, que conduzem apenas uma fase, ou tripolares, onde as três fases - devidamente isoladas entre si - são alojadas dentro do mesmo envelope isolante.

Nesta seção, cada parte construtiva de um cabo monopolar será tratada isoladamente, tendo suas características e funções explicadas uma a uma. Partiremos do elemento central ao mais exterior.

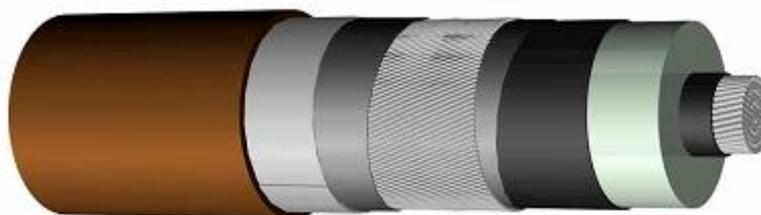


Figura 1 - Ilustração de um cabo isolado de alta tensão.

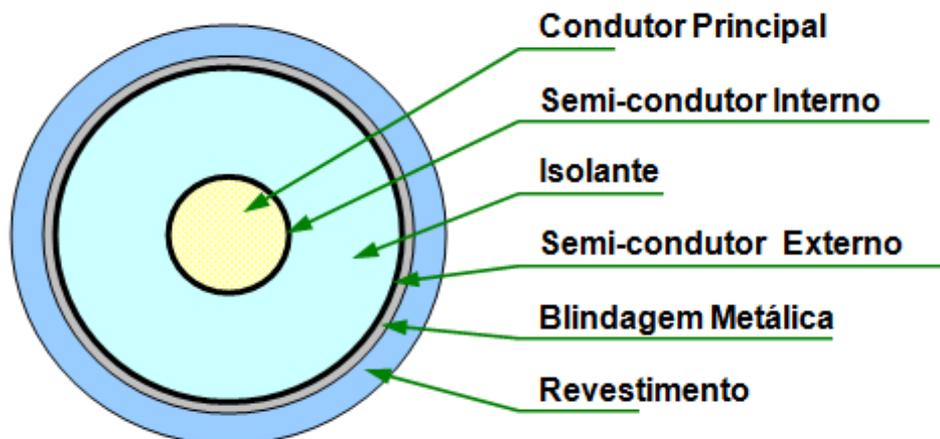


Figura 2 - Vista em corte de um cabo.

## Condutor Principal

Não à toa, em tradução literal do francês, esta parte é chamada de alma. É responsável pelo transporte das correntes de fase, isto é, da transmissão de energia.

Os materiais mais empregados são o cobre e o alumínio. A seguir, um comparativo destes materiais:

	<i>Cobre</i>	<i>Alumínio</i>
<i>Resistividade (mΩ.m)</i>	1,72	2,84
<i>Densidade (g/cm³)</i>	8,94	2,70
<i>Coefficiente de Dilatação Linear (K<sup>-1</sup>)×10<sup>6</sup></i>	16	24
<i>Condutividade Térmica (W/(m.K))</i>	390	209

**Tabela 1 - Características de Cobre e Alumínio [2]**

A partir dos dados acima, temos que para dois condutores de mesmo comprimento e resistência, a razão entre seções e a razão entre as massas de alumínio e cobre levam à escolha do alumínio como material mais interessante economicamente. A seguir, o cálculo:

$$R_x = \rho_x \frac{L}{S_x}$$

$$\frac{S_{Al}}{S_{Cu}} = \frac{2,84}{1,72} = 1,64$$

$$m_x = L \cdot s_x \cdot d_x$$

$$\frac{m_{Al}}{m_{Cu}} = 1,64 \frac{2,70}{8,94} = 0,5$$

Conclui-se que para a fabricação de condutores equivalentes eletricamente, o uso do alumínio será mais favorável do ponto de vista econômico, ou seja, mais barato, até o limite em que o preço do alumínio supere o preço do cobre em duas vezes. Atualmente, o alumínio usado na indústria de cabos custa um terço do cobre. (Dados obtidos no site da LME: *London Metal Exchange*).

Ainda que se considere o aumento das massas dos outros materiais empregados no cabo, o alumínio continuará mais econômico até tensões muito elevadas. [1]

Os condutores podem ter estruturas diferentes. Condutores maciços não são desejáveis para transmissão de corrente alternada em altas tensões devido ao Efeito de Pele: a tendência da corrente alternada concentrar-se na periferia do condutor, deixando a região interna com densidade de corrente bem inferior.

O Efeito de Pele é proporcional à frequência elétrica da corrente, isto é, quanto mais alta a frequência, mais concentradas nas bordas as cargas estarão. Porém, em transmissões de fortes potências em alta tensão, até as frequências industriais, consideradas baixas, são prejudiciais. O Efeito de Pele é minimizado pelo uso de condutores finos, dispostos em feixe e isolados entre si a verniz. São os condutores ditos segmentados.

### **Blindagens Semicondutoras**

O uso da segmentação na construção do condutor principal faz com que o campo elétrico gerado pela corrente não seja perfeitamente radial. Esta característica não é desejável uma vez que a rigidez dielétrica do isolante é maior justamente no sentido radial.

A fim de canalizar o campo elétrico no sentido radial, duas camadas de material semicondutor são dispostas envolvendo o isolante. Quando o cabo está energizado as camadas semicondutoras funcionam como eletrodos e a diferença entre seus potenciais impõe o sentido radial às linhas de campo.

Materiais utilizados para a confecção das camadas semicondutoras são o papel carbono e polímeros impregnados com carbono. O papel carbono é enrolado em duas tiras sucessivas em um movimento helicoidal. Os polímeros são dispostos em camadas através de extrusão. O princípio da extrusão será detalhado na seção que trata da isolação.

## Isolante

Ao longo dos anos, vários materiais foram empregados na isolação de cabos: papel impregnado de óleo, borracha, gás e polímeros sintéticos. Sendo o último, a classe de materiais mais difundida atualmente.

	<i>Papel Impregnado de Óleo</i>	<i>Gás (SF<sub>6</sub>)</i>	<i>Policloreto de Vinila (PVC)</i>	<i>Polietileno (PEhd)</i>	<i>Polietileno Reticulado (XLPE)</i>
<i>Permissividade Relativa</i>	3,3 a 4	1	5 a 8	2,2 a 2,4	2,4 a 2,6
<i>Fator de Perdas Dielétricas (10<sup>-4</sup>)</i>	40 a 100	20	200 a 1000	1 a 10	10 a 50
<i>Temperatura Máxima Admissível (°C)</i>	50 a 85 *	-	70	70	90
<i>Temperatura Máxima de Curto- Circuito (°C)</i>	150	-	160	130 a 150	250

\* Varia de acordo com o material e com a pressão do óleo.

**Tabela 2 - Características dos isolantes. [1]**

O uso do papel impregnado na isolação do cabo está ultrapassado, mas foi amplamente utilizado. A fabricação era simples - fitas de papel enroladas sucessivamente sobre o condutor -, porém a manutenção exigia maiores esforços. Para evitar que o óleo escoasse e gerasse regiões de papel seco - de características dielétricas piores -, os cabos eram conectados a equipamentos que regulavam a pressão no interior do cabo. Estes equipamentos oneravam as ligações.

Cabos a isolação gasosa também exigiam equipamentos reguladores de pressão. O gás mais utilizado era o hexafluoreto de enxofre ( $\text{SF}_6$ ), um gás sintético ainda utilizado na indústria elétrica - extintor de arco elétrico em disjuntores e em subestações blindadas.

O policloreto de vinila (PVC) é um isolante muito difundido, porém, devido a um alto fator de perdas dielétricas, não é empregado na isolação de tensões acima de 15 kV.

O polietileno (PE) é hoje o polímero sintético mais utilizado como isolante em cabos de média e alta tensão. Algumas formas são empregadas: alta densidade, baixa densidade e reticulado, por exemplo. As diferentes formas variam a partir do processo de obtenção do polímero e conferem características elétricas diferentes ao produto final. O polietileno reticulado (XLPE) é o mais difundido no momento.

A reticulação consiste na reorganização das moléculas do polímero. Há certo número de processos que resultam na reticulação, alguns químicos, outros físicos. O polietileno reticulado tem características elétricas próximas do não-reticulado, porém suas características térmicas proferem-lhe destaque.

O polímero isolante é aplicado sobre o condutor principal por extrusão. A extrusão é um processo em que o material fundido disposto sobre o cabo. O cabo nu é puxado através de um tubo e, simultaneamente, o material é forçado a acompanhá-lo por uma rosca infinita.

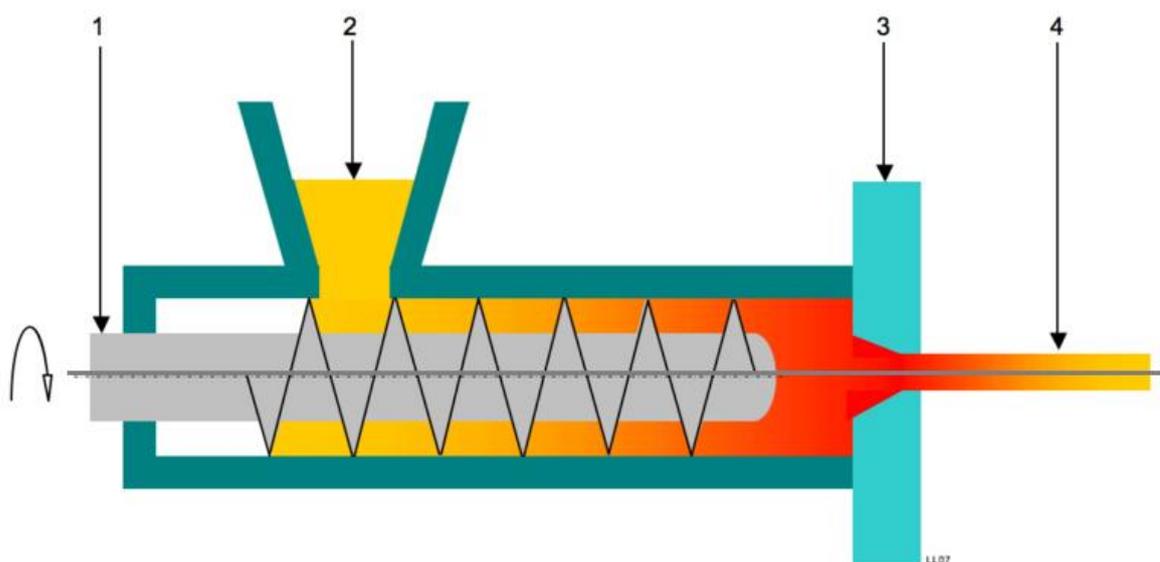


Figura 3 - Máquina de extrusão. [4]

Os itens numerados no esquema acima são:

1. Rosca sem fim;

2. Reservatório do material fundido, alimentador;
3. Matriz, peça que dá forma ao material;
4. Cabo envolvido pelo isolante.

Para a construção de cabos de grande seção, média e alta tensão, recomendasse uma máquina de extrusão vertical. Pois, devido à consistência do material no momento da aplicação sobre o condutor, a disposição horizontal pode gerar deformidade na camada isolante: efeito de gota.

Atualmente, estudam-se processos que melhorem o polietileno reticulado contra a formação das arborescências, cavidades formadas por infiltração de água no isolante, que levam ao rompimento da camada de isolamento e diminuem a vida útil do cabo.

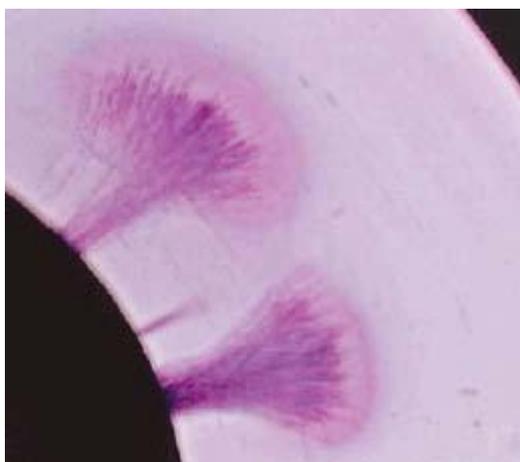


Figura 4 - Arborescência em um cabo XLPE [5]

## Blindagem Metálica

Esta parte metálica, posta sobre a camada semicondutora exterior, exerce funções distintas no cabo. Do ponto de vista elétrico, ela é responsável por escoar as correntes de curto-circuito, por blindar o condutor interior evitando interferências e por reduzir a intensidade do campo magnético emitido.

Há cabos em que a blindagem metálica é responsável também pela impermeabilidade. Folhas de alumínio ou chumbo evitam que a umidade do exterior alcance o isolante. Porém, nem sempre a blindagem metálica é formada por folhas, nestes casos, a impermeabilidade é garantida pelo revestimento externo.

Além das folhas de alumínio soldadas a laser que formam um envelope contínuo ao redor do cabo, podem ser empregados como blindagem, condutores finos, telas e uma combinação de entre folha e cabos. O chumbo também pode ser utilizado, pois resiste bastante à umidade e seu manuseio é conhecido, todavia, atualmente, tem sido preterido face ao alumínio e ao cobre. Abaixo um exemplo de blindagem mista:



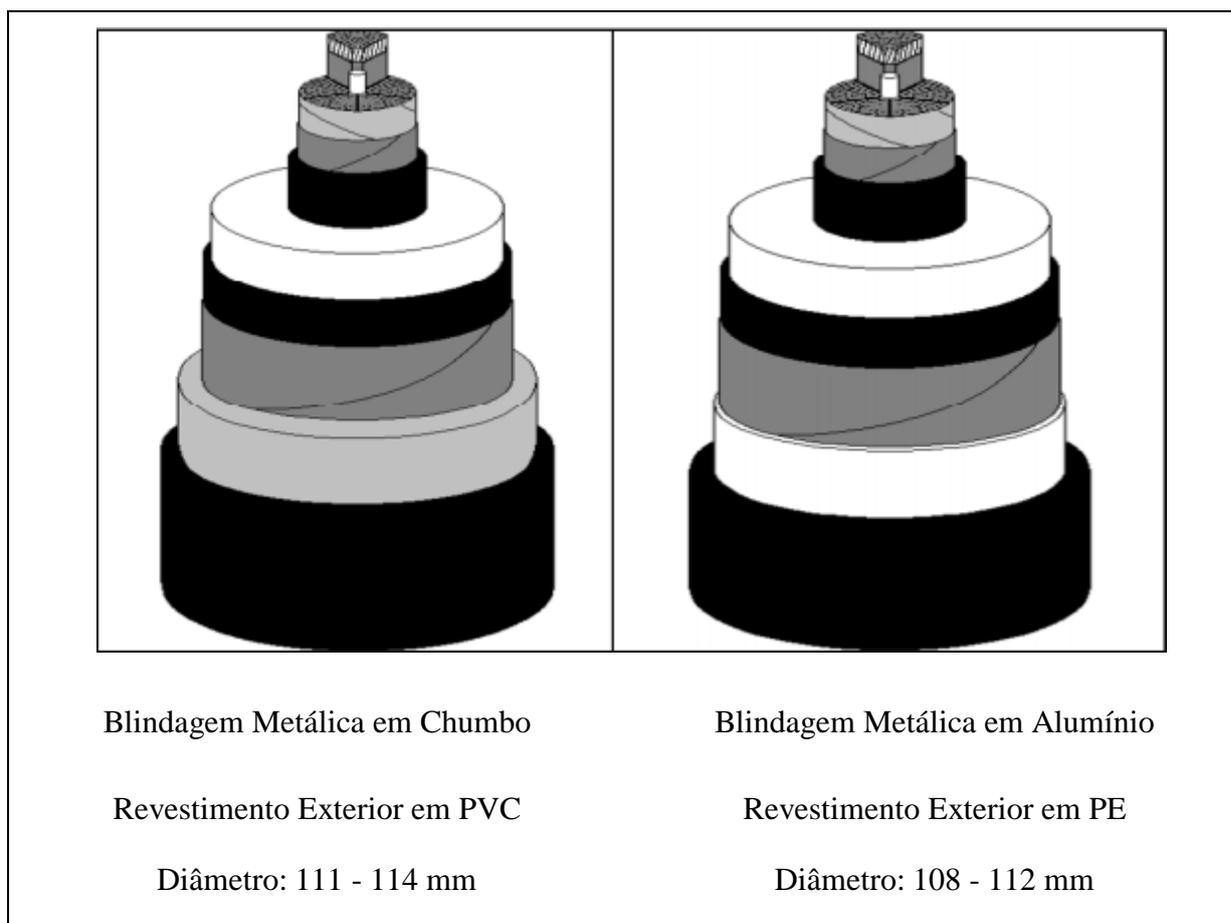
Figura 5 - Exemplo de blindagem formada por dois materiais.

## Revestimento Exterior

São muitos os papéis do revestimento exterior: proteção contra choques físicos, impermeabilização, identificação, segurança da instalação. O policloreto de vanila (PVC) e o polietileno (PE) são os materiais mais empregados como revestimento. Ambos são facilmente aplicados ao cabo por extrusão, podem ser tingidos e têm materiais e fabricação com bom custo.

Os avanços na produção do PE para revestimento externo permitiram a substituição do chumbo como metal da blindagem. A ótima capacidade de impermeabilização dos revestimentos exteriores atuais tira da blindagem metálica a responsabilidade por esta tarefa, sendo assim, o alumínio em folhas ganhou espaço. Suas folhas são mais leves, mais baratas e conduzem melhor a eletricidade.

Na figura abaixo, uma comparação entre cabos de mesma seção, mesma isolamento, porém com revestimentos externos e blindagens diferentes:



**Figura 6 - Comparação entre cabos de diferentes revestimentos [6]**

### 3. Disposições e Técnicas de Aterramento

Neste capítulo, passaremos à análise de uma ligação trifásica a cabos isolados. Apresentaremos algumas das numerosas formas de se colocar os cabos, suas vantagens e dificuldades. Trataremos ainda as diferentes técnicas de conexão das blindagens à terra com seus esquemas de ligação e efeitos na capacidade de transporte da ligação.

O conceito de capacidade de transporte refere-se à intensidade máxima de corrente que a ligação pode suportar, em regime permanente, sem ultrapassar a temperatura de operação do isolante. A capacidade de transporte é uma característica da linha e não do cabo.

#### Disposições

As diferentes formas de se dispor os cabos em uma linha de transmissão são definidas por características construtivas: linhas subterrâneas, submarinas, enterradas diretamente ou dispostas dentro de tubos enterrados, passagem por galerias, entre outros fatores. Ou seja, cabe aos engenheiros que implantam as linhas escolher o modo de posta, sem esquecer que a geometria da ligação influe nas características elétricas da transmissão.

Duas configurações são mais utilizadas como modos de posta. Elas estão representadas pelos esquemas abaixo:

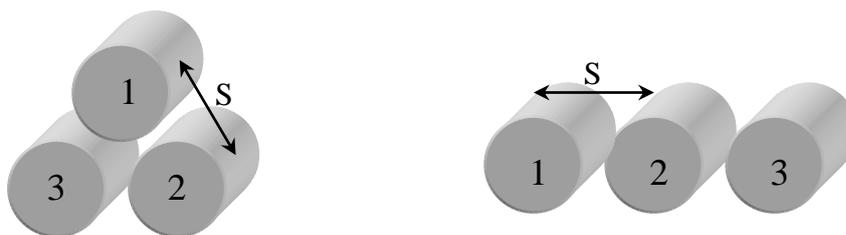


Figura 7 - Modos de posta mais utilizados: Triangular e Linear

Ambos os esquemas são aplicáveis em quaisquer das condições citadas no parágrafo primeiro. A distância entre os eixos centrais dos cabos ( $S$ ) é muito importante para o cálculo das tensões induzidas e dos campos magnéticos emitidos.

Abaixo seguem alguns exemplos linhas a cabos isolados exemplificando algumas das diferentes possibilidades.

Primeiro uma ligação trifásica de 12,3 km e tensão nominal 400 kV a cabos de 2500 mm<sup>2</sup> de Cobre. O sistema de cabos linear vertical é disposto em uma galeria. A galeria facilita a manutenção e permite que haja o resfriamento forçado dos cabos.



**Figura 8 - Aeroporto de Barajas. Madrid, Espanha. [6]**

O segundo exemplo mostra uma ligação de 15 km de tensão nominal 400 kV. Neste caso, lança-se mão do emprego de dois circuitos paralelos. Os circuitos, dispostos em formação linear horizontal, serão enterrados. Neste caso, a falta de refrigeração forçada sobre os cabos leva ao uso de dois circuitos, o que diminui a corrente a percorrer os cabos e consequentemente o aquecimento.



**Figura 9 - Rede de transmissão do Qatar [6]**

## Técnicas de Aterramento

A função das blindagens metálicas é, entre outras, fundamentalmente drenar as correntes em regimes de curto circuito. As correntes de curto circuito devem ser direcionadas para terra, há diferentes formas de conectar as blindagens à terra: aterramento contínuo, em um único ponto e permutação de blindagens.

Todas as técnicas de aterramento são aplicadas por seções da linha de transmissão. Linhas quilômetros de comprimento são compostas de seções de cabos conectados por equipamentos especiais (junções), o comprimento das seções é limitado por restrições de fabricação e transporte.

O aterramento contínuo é a técnica mais básica. Consiste a conectar as duas extremidades da seção à terra. A seguir um esquema de conexão das blindagens - os condutores principais não estão representados e não serão de forma alguma interrompidos e/ou ligados à terra:

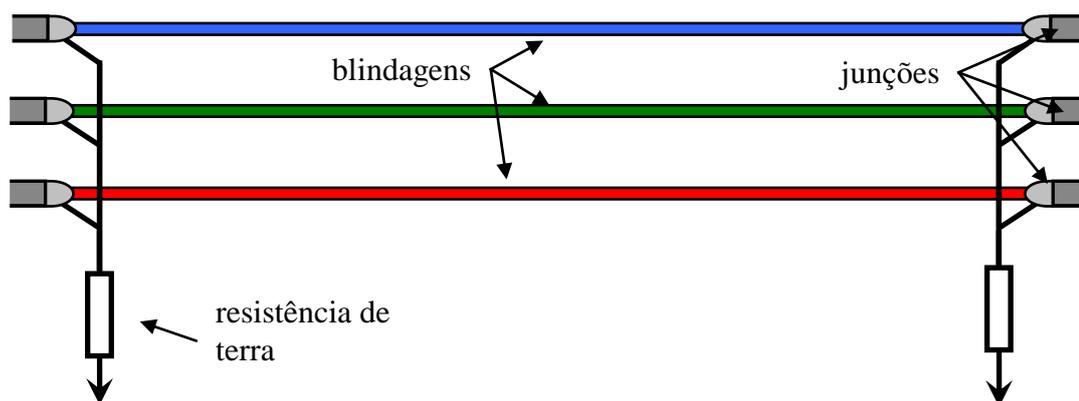


Figura 10 - Esquema de conexão do aterramento contínuo

A utilização de um condutor de continuidade (cabo de terra) posto paralelamente à ligação não é imperativa, mas pode ser desejável quando a blindagem não for suficiente para drenar as correntes de falta.

A vantagem principal desta técnica de aterramento é manter as blindagens metálicas em um potencial neutro, o que garante a segurança da instalação. Porém, do ponto de vista da capacidade de transporte, o aterramento contínuo não é interessante, pois cria um caminho para a corrente induzida mesmo em regime permanente. Estas correntes geram perdas por efeito Joule e diminuem a capacidade de transporte da linha.

A fim de eliminar a circulação de corrente em regime permanente nas blindagens, criou-se o aterramento em um único ponto (*single point bonding*). O esquema abaixo representa o aterramento em ponto único:

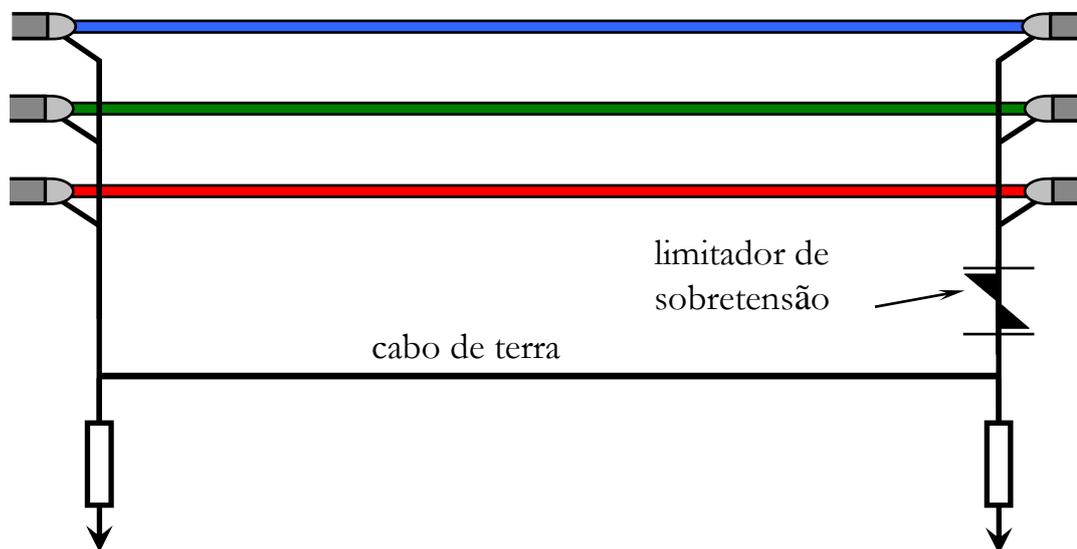


Figura 11 - Esquema de conexão do aterramento em ponto único.

Nesta montagem, as blindagens não formam um caminho para a corrente induzida, pois uma de suas extremidades é mantida isolada da terra. Conseqüentemente, a instalação de um cabo de terra é fundamental, é por ele que as correntes de falta circularão.

Uma das extremidades da seção é mantida isolada do ponto de aterramento - e do cabo de continuidade - por um dispositivo de segurança limitador de sobre tensão. As características deste dispositivo serão apresentadas em outro capítulo deste trabalho. Por hora, basta entender que se trata de uma resistência não-linear que é alta em regime permanente e baixa em regime de curto circuito.

O ponto forte do aterramento em ponto único é a eliminação das correntes induzidas nas blindagens metálicas. Porém, devido à indução de tensão, surge uma elevação do potencial elétrico na extremidade isolada. Sabendo-se que este potencial elétrico é proporcional ao comprimento da ligação e pode atingir níveis inseguros e onerosos - inseguros, pois podem exigir demais do revestimento externo; onerosos, pois os limitadores de sobretensão são dimensionados com base nestes valores -, deve-se limitar o comprimento das seções com este tipo de aterramento.

Há que se levar em conta também, no cálculo das perdas, a circulação de corrente induzida através do cabo de terra. Existem técnicas simples, baseadas apenas na disposição dos cabos, que permitem eliminar ou atenuar a tensão induzida sobre o cabo de terra. Algumas delas serão apresentadas no capítulo que trata das tensões induzidas.

A terceira técnica de aterramento foi concebida com o objetivo de minimizar o efeito das tensões induzidas sobre as blindagens metálicas. Ela é chamada permutação de blindagens ou *crossbonding* e aplica-se sobre grupos de três seções em uma linha. É importante neste caso, diferenciar seção elementar, comprimento entre junções consecutivas, e seção ternária, conjunto de três seções elementares, que compõem um aterramento *crossbonding*. Eis o esquema de conexão para uma seção ternária:

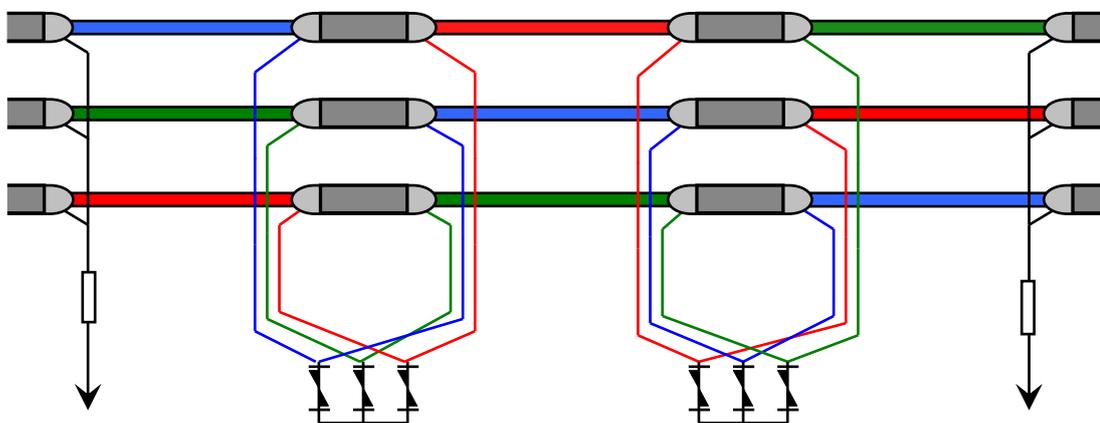


Figura 12 - Esquema de conexão do aterramento a permutação de blindagens.

A idéia da permutação das blindagens é fazer com que cada blindagem envolva uma das três fases sucessivamente. Quando as seções elementares têm mesmo comprimento e disposição triangular - seções equilibradas -, a soma das tensões induzidas em cada um dos setores das blindagens é nula. Para a disposição linear, as tensões induzidas totais não se anulam, apenas são atenuadas.

No esquema acima, podemos notar os limitadores de sobretensão conectados em estrela sem neutro. As outras conexões também são possíveis. O emprego do condutor de continuidade é facultativo e depende das características da ligação em regime de falta.

Em todos os três casos, as resistências de aterramento são fundamentais. Durante as faltas, elas têm papel importantíssimo em absorver a corrente de curto circuito. Aterramentos mal feitos, que oferecem alta resistência à penetração da corrente, podem levar a uma elevação do potencial elétrico no local e pôr em risco pessoas e equipamentos próximos.[7]

## 4. Tensões Induzidas

Com o intuito de diminuir a diferença de custo entre linhas aéreas e linhas subterrâneas, é necessário otimizar a capacidade de transporte das ligações a cabos isolados. Desde a concepção dos cabos até a implantação da linha, existem vários problemas a serem resolvidos para que as perdas por efeito Joule sejam mínimas.

Dentre os vários problemas, figura o das tensões induzidas sobre as blindagens elétricas dos cabos, que podem, segundo o modo de aterramento, fazer circular correntes induzidas sobre blindagens e cabos de terra.

Duas das três técnicas apresentadas no capítulo precedente permitem que estas correntes indesejadas sejam eliminadas ou atenuadas: permutação de blindagens e aterramento em um único ponto. Ambas conduzem à elevação do potencial elétrico em certos pontos da ligação, o que deve chamar a atenção durante o dimensionamento dos equipamentos.

Neste capítulo, mostraremos como calcular analiticamente as tensões e correntes induzidas e, como consequência, o aumento do potencial elétrico sobre os pontos isolados (onde estão os limitadores de sobretensão) da ligação. Além disto, técnicas simples que permitem reduzir as perdas Joule no cabo de terra.

Para o cálculo das tensões induzidas a seguinte lista de variáveis elétricas foi estabelecida:

**$I_{ai}$**  : corrente da fase  $i$ ;

**$I_{ei}$**  : corrente na blindagem do cabo da fase  $i$ ;

**$I_t$**  : corrente no condutor de continuidade (cabo de terra);

**$e_i$**  : tensão induzida sobre a blindagem do cabo da fase  $i$ ;

**$E(i,k)$**  : tensão induzida sobre a seção elementar  $k$  do circuito de blindagem  $i$  ;

**$e_t$**  : tensão induzida sobre o condutor de continuidade;

**U<sub>a</sub>** : potencial elétrico no ponto de permutação ou tensão sobre os limitadores de sobretensão;

As variáveis geométricas são:

**r<sub>e</sub>** : raio médio da blindagem;

**r<sub>t</sub>** : raio médio do condutor de continuidade;

**S** : distância entre os eixos longitudinais de cabos paralelos e adjacentes;

**d<sub>it</sub>** : distância entre o condutor da fase *i* e o condutor de continuidade;

**D** : distância entre a linha e um condutor fictício de retorno pelo solo ;

**X<sub>o</sub>** et **Y<sub>o</sub>** : coordenadas do geométricas do condutor de continuidade;

**L** : comprimento da linha;

As seguintes constantes também serão utilizadas:

**f** : frequência elétrica em Hz ;

**w** : frequência elétrica em rad/s ;

**μ** : permeabilidade magnética;

**g**: condutividade magnetic;

**α** : operador de rotação;

Antes de apresentar a metodologia de cálculo, listaremos as expressões usadas para o cálculo das impedâncias utilizadas. Estas expressões são resultados de simplificações feitas para a frequência industrial [8] (50 ~ 60 Hz). Impedâncias lineares têm como unidade o ohm/m. O operador imaginário é representado pela letra **j**.

**Z<sub>e</sub>** : impedância linear própria da blindagem :

$$Z_e = \frac{\mu_0 \omega}{8} + j \frac{\mu_0 \omega}{2\pi} \ln \left( \frac{D}{r_e} \right)$$

**Z<sub>m</sub>** : impedância mútua linear entre condutor principal e blindagem metálica de um mesmo cabo :

$$Z_m = \frac{\mu_0 \omega}{8} + j \frac{\mu_0 \omega}{2\pi} \ln \left( \frac{D}{r_e} \right)$$

**Z<sub>c</sub>** : impedância mútua linear entre o condutor principal do cabo central e o condutor principal de um dos cabos laterais :

$$Z_c = \frac{\mu_0 \omega}{8} + j \frac{\mu_0 \omega}{2\pi} \ln \left( \frac{D}{S} \right)$$

**Z<sub>l</sub>** : impedância mútua linear entre condutores principais dos cabos laterais de uma linha em disposição linear :

$$Z_l = \frac{\mu_0 \omega}{8} + j \frac{\mu_0 \omega}{2\pi} \ln \left( \frac{D}{2S} \right)$$

Para o caso de uma disposição triangular, em que os cabos estão equidistantes :  $Z_l = Z_c$

**Z<sub>t</sub>** : impedância própria do cabo de terra :

$$Z_t = \frac{\mu_0 \omega}{8} + R_t + j \frac{\mu_0 \omega}{2\pi} \ln \left( \frac{D}{rt} \right)$$

Sabendo-se que a distância entre os eixos longitudinais dos cabos é suficientemente menor que o raio médio da blindagem metálica, pode-se generalizar o uso das expressões de **Z<sub>c</sub>** e **Z<sub>l</sub>** para o cálculo das impedâncias mútuas existentes entre o condutor principal de um cabo com a blindagem metálica de outro, e também, para cálculo da impedância mútua entre duas blindagens. Estas aproximações serão usadas neste trabalho.

Outra aproximação importante, pois simplifica sem comprometer a qualidade do resultado, é o cálculo de D (distância a um condutor de retorno fictício). Baseando-se na condutividade do solo e na frequência, calcula-se um valor satisfatório de D a partir da expressão:

$$D = \frac{2 \cdot e^{0,5}}{1,7811 \sqrt{g_{solo} \omega \mu}}$$

## Aterramento em Ponto Único

Para o cálculo das tensões induzidas em uma ligação cujas blindagens são aterradas em um único ponto, deve-se conhecer as distâncias entre cada cabo, a resistência dos aterramentos e a condutividade do solo. Os sistemas de coordenadas utilizados durante este trabalho foram:

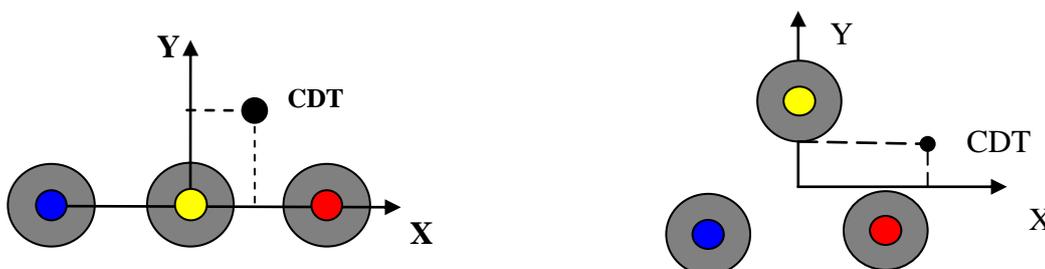


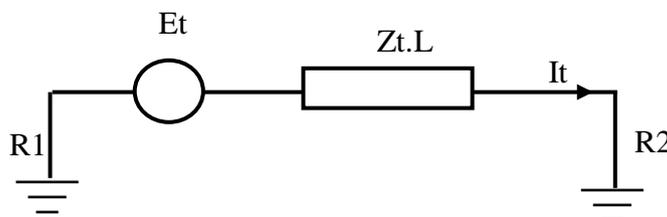
Figura 13 - Sistemas de coordenadas. Disposição linear e triangular. \*CDT: Cabo de terra.

Como não há, nesta configuração de conexão, corrente circulando nas blindagens metálicas, a tensão induzida sobre o condutor de continuidade provem das correntes de fase nos condutores principais. Sendo assim, em um sistema equilibrado, tem-se:

$$e_t = \frac{\mu_0 \omega}{2\pi} \left[ \frac{\sqrt{3}}{2} \ln \left( \frac{d_{3t}}{d_{2t}} \right) + j \frac{1}{2} \ln \left( \frac{d_{2t} d_{3t}}{d_{1t}^2} \right) \right] \times I_{a1} \times L$$

A expressão é a mesma para as duas disposições - linear e triangular - o que muda são os valores das distâncias  $d_{it}$ .

Uma análise da malha formada pelo condutor de continuidade e as resistências de aterramento possibilita o cálculo da corrente induzida:



$$I_t = \frac{E_t}{Z_t \cdot L + R_1 + R_2}$$

A corrente induzida no cabo de terra é levada em conta no cálculo da elevação do potencial elétrico das blindagens. No entanto, ela influencia de maneira diferente na blindagem de cada fase, de acordo com a sua posição.

Os potenciais elétricos que aparecem nas extremidades isoladas das blindagens metálicas de uma ligação com aterramento em ponto único têm como expressão, para uma disposição linear:

$$E_1 = \frac{\mu_0 \omega}{2\pi} \left[ \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \ln(2) + j \frac{1}{2} \cdot \ln \left( \frac{2 \cdot S^2}{r_e^2} \right) \right] I_a \cdot L + Z_{1t} \cdot I_t \cdot L$$

$$E_2 = \frac{\mu_0 \omega}{2\pi} \left[ \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \ln \left( \frac{S}{r_e} \right) - j \frac{1}{2} \cdot \ln \left( \frac{S}{r_e} \right) \right] I_a \cdot L + Z_{2t} \cdot I_t \cdot L$$

$$E_3 = \frac{\mu_0 \omega}{2\pi} \left[ \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \ln \left( \frac{r_e}{S} \right) - j \frac{1}{2} \cdot \ln \left( \frac{4 \cdot S}{r_e} \right) \right] I_a \cdot L + Z_{3t} \cdot I_t \cdot L$$

Para uma linha disposta em formação triangular:

$$E_1 = \frac{\mu_0 \omega}{2\pi} \ln \left( \frac{S}{r_e} \right) I_a \cdot L + Z_{1t} \cdot I_t \cdot L$$

$$E_2 = \frac{\mu_0 \omega}{2\pi} \ln \left( \frac{S}{r_e} \right) \alpha^2 \cdot I_a \cdot L + Z_{2t} \cdot I_t \cdot L$$

$$E_3 = \frac{\mu_0 \omega}{2\pi} \ln \left( \frac{S}{r_e} \right) \alpha \cdot I_a \cdot L + Z_{3t} \cdot I_t \cdot L$$

Neste último caso, o operador imaginário de rotação não foi substituído por seu valor. Daí nota-se mais facilmente que as primeiras parcelas - sem a contribuição da corrente no cabo de terra - são iguais em módulo quando a disposição é triangular.

A corrente circulando pelo cabo de terra, em regime permanente, não é interessante, pois resulta em perdas. Existem técnicas simples que permitem eliminá-la. Tais métodos não necessitam de equipamentos extras, consistem em alterações da geometria ao longo da linha para que a resultante das tensões induzidas seja nula.

Para linhas em formação triangular, deve-se transpor os cabos a cada um terço da seção. Os esquemas abaixo mostram como fica a geometria da linha a cada transposição:

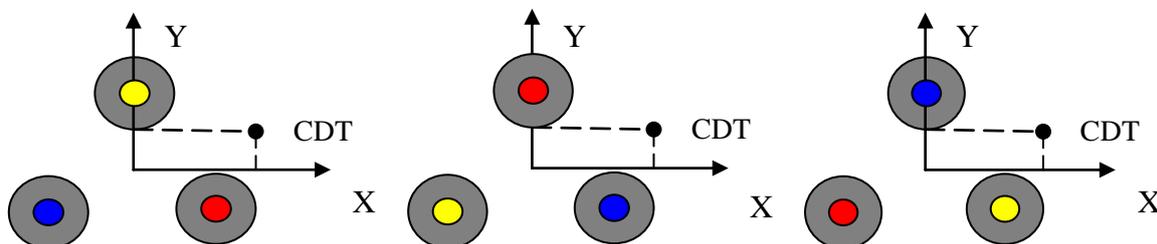


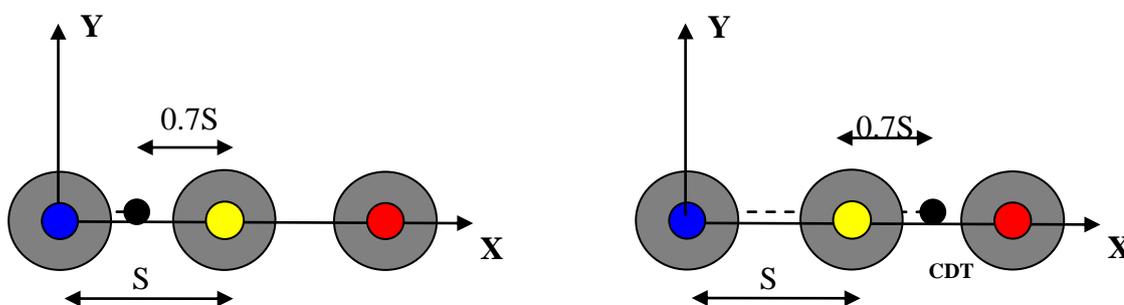
Figura 14 - Transposição dos cabos na disposição triangular.

Após três setores de mesmo comprimento e geometrias como as mostradas acima, tem-se que cada corrente de fase influe da mesma maneira no condutor de terra, isto é, a distância média entre o cabo de terra e cada um dos cabos de fase é igual. Conclui-se, então, que as tensões induzidas serão iguais em módulo porém defasadas em  $120^\circ$  uma das outras, e sua soma será nula.

O potencial elétrico que surge nas extremidades isoladas de uma linha triangular com transposição de cabos tem como expressão para sua intensidade:

$$E_1 = \frac{\mu_0 \omega}{2\pi} \ln\left(\frac{S}{r_e}\right) I_a \cdot L$$

Para linhas em formação linear e aterramento em ponto único, uma técnica que pode ser aplicada para anular a tensão induzida sobre o condutor de continuidade também consiste na alteração da geometria. Desta vez, a linha é dividida em duas seções e a disposição dos cabos segue o esquema a seguir:



O valor de 70% da distância entre os eixos dos cabos, que define o posicionamento do condutor de continuidade, é uma aproximação. Para chegar a este valor, seguimos o seguinte procedimento de cálculo.

Primeiro estabelece-se as distâncias a serem consideradas. O cabo número 2 é o central, e o número de linhas no índice superior indica a seção a que se refere a distância. A distância entre o cabo de terra e os condutores de fase é expressa por uma razão da distância entre os eixos de dois cabos adjacentes.

$$d'_{2t} = d''_{2t} = p.S$$

$$d'_{1t} = d''_{3t} = S + p.S$$

$$d'_{3t} = d''_{1t} = S - p.S$$

Para calcular a tensão induzida sobre o cabo de terra, somam-se todas as influências dos cabos de fase. Utilizando-se as expressões das impedâncias mútuas citadas acima, obtém-se o seguinte resultado:

$$E_t = (2.Z_{2t}' - Z_{1t}' - Z_{3t}')I_a \frac{L}{2}$$

Como o objetivo é anular a expressão acima, é obrigatório fazer com que:

$$Z_{2t}' = \frac{Z_{1t}' + Z_{3t}'}{2}$$

Das expressões anteriores:

$$\frac{\mu_0 \omega}{2\pi} \left[ \ln \left( \frac{D}{p.S} \right)^2 - \ln \left( \frac{D}{S - p.S} \right) - \ln \left( \frac{D}{S + p.S} \right) \right] = 0$$

Simplificando-se:

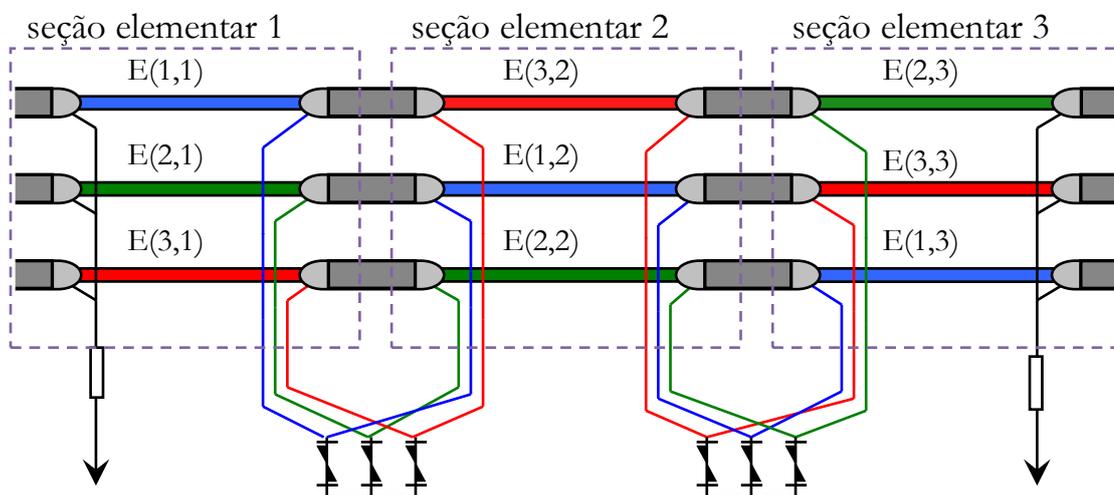
$$\frac{1 - p^2}{p^2} = 1$$

Finalmente :

$$p = \frac{\sqrt{2}}{2} \cong 0,7$$

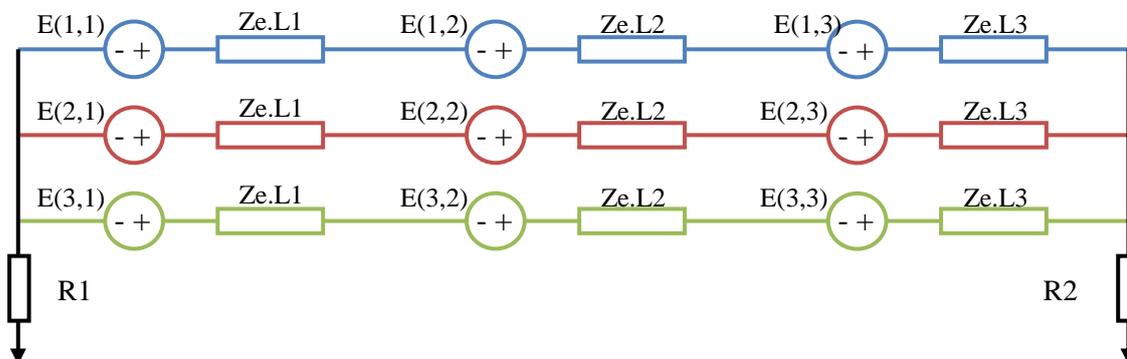
### Permutação das Blindagens Metálicas ou Crossbonding

Utilizou-se o seguinte esquema para modelar a ligação *crossbonding* e calcular as tensões induzidas sobre as blindagens metálicas:



Tratando-se de uma ligação com seções elementares uniformes - todas de mesma geometria e comprimento -, o cálculo é bastante simples. Porém, em instalações reais, a implementação de seções uniformes é bem difícil de ser alcançada. O método a seguir leva em conta diferenças entre as seções, as correntes nos circuitos de blindagens e calcula o potencial elétrico nos pontos de permutação para cada junção.

Uma forma esquemática de se representar a linha é mostrada abaixo:



O procedimento - neste exemplo - aplica-se a uma linha em formação linear. Primeiro, calculamos as tensões induzidas sobre as blindagens de cada seção. Note-se que todas as grandezas recebem um subíndice numeral referente à seção. A regra muda para as correntes de blindagem ( $I_e$ ), nestas variáveis o subíndice refere-se ao circuito: 1 azul, 2 verde, 3 vermelho.

$$E(1,1) = [(Z_{m1} + Z_{c1} \cdot \alpha^2 + Z_{l1} \cdot \alpha)I_a + Z_{c1}I_{e2} + Z_{l1}I_{e3}]L_1$$

$$E(2,1) = [(Z_{m1} \cdot \alpha^2 + Z_{c1} + Z_{c1} \cdot \alpha)I_a + Z_{c1}I_{e1} + Z_{c1}I_{e3}]L_1$$

$$E(3,1) = [(Z_{m1} \cdot \alpha + Z_{c1} \cdot \alpha^2 + Z_{l1})I_a + Z_{l1}I_{e1} + Z_{c1}I_{e2}]L_1$$

$$E(1,2) = [(Z_{m2} \cdot \alpha^2 + Z_{c2} + Z_{c2} \cdot \alpha)I_a + Z_{c2}I_{e2} + Z_{c2}I_{e3}]L_2$$

$$E(2,2) = [(Z_{m2} \cdot \alpha + Z_{c2} \cdot \alpha^2 + Z_{l2})I_a + Z_{c2}I_{e1} + Z_{l2}I_{e3}]L_2$$

$$E(3,2) = [(Z_{m2} + Z_{c2} \cdot \alpha^2 + Z_{l2} \cdot \alpha)I_a + Z_{c2}I_{e1} + Z_{l2}I_{e2}]L_2$$

$$E(1,3) = [(Z_{m3} \cdot \alpha + Z_{c3} \cdot \alpha^2 + Z_{l3})I_a + Z_{l3}I_{e2} + Z_{c3}I_{e3}]L_3$$

$$E(2,3) = [(Z_{m3} + Z_{c3} \cdot \alpha^2 + Z_{l3} \cdot \alpha)I_a + Z_{l3}I_{e1} + Z_{c3}I_{e3}]L_3$$

$$E(3,3) = [(Z_{m3} \cdot \alpha^2 + Z_{c3} + Z_{c3} \cdot \alpha)I_a + Z_{c3}I_{e1} + Z_{c3}I_{e2}]L_3$$

Tem-se as expressões das tensões induzidas totais sobre cada circuito de blindagens a partir da soma:

$$E_i = E(i, 1) + E(i, 2) + E(i, 3)$$

Obtem-se portanto três equações com seis variáveis, estas sendo:  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $E_3$ ,  $I_{e1}$ ,  $I_{e2}$ ,  $I_{e3}$ . Para completar o sistema, a análise das malhas é necessária, e dela, obtem-se outras três equações:

$$E_1 = (Z_e \cdot L + R_1 + R_2) \cdot I_{e1} + (R_1 + R_2) \cdot I_{e2} + (R_1 + R_2) \cdot I_{e3}$$

$$E_2 = (R_1 + R_2) \cdot I_{e1} + (Z_e \cdot L + R_1 + R_2) \cdot I_{e2} + (R_1 + R_2) \cdot I_{e3}$$

$$E_3 = (R_1 + R_2) \cdot I_{e1} + (R_1 + R_2) \cdot I_{e2} + (Z_e \cdot L + R_1 + R_2) \cdot I_{e3}$$

Onde tem-se:  $L = L_1 + L_2 + L_3$ .

Finalmente, chega-se a um sistema complexo de seis variáveis e seis equações que pode ser resolvido em *softwares* matemáticos ou até mesmo no Microsoft Excel.

Após a resolução numérica do sistema, de posse dos valores de todas as variáveis, calculam-se os potenciais elétricos nos pontos de permutação empregando-se análise de malha novamente.

Os sistemas a permutação de blindagens são amplamente difundidos. Ainda que requeiram conexões elaboradas, são muito interessantes para a realização de grandes distâncias de linha.

### **Estudo de Caso - Aterramento em Ponto Único**

Neste ponto, para dar uma demonstração do cálculo das tensões induzidas, analisou-se uma linha hipotética (com características plausíveis) com algumas configurações diferentes. Eis os detalhes da linha:

- Tensão Nominal: 225 kV, 60 Hz.
- Corrente em Regime Permanente: 1400 A
- Aterramento em Ponto Único
- Comprimento: 650 m
- Resistências de aterramento, R1 e R2: 1 ohm
- Distância da linha ao condutor fictício de retorno por terra: 580 m

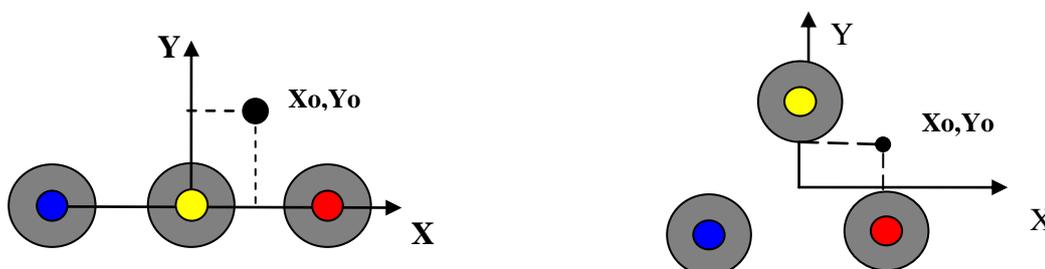
Agora os detalhes dos cabos de fase:

- Raio médio da blindagem,  $r_b$ : 26,5
- Distância entre cabos, S: 250 cm
- Resistência Linear da blindagem,  $R_b$ : não será utilizado, pois não há corrente nas blindagens.

Por último, os detalhes do cabo de continuidade:

- Raio médio do condutor,  $r_c$ : 8 mm
- Resistência Linear,  $R_c$ :  $1,74e-04$  ohms/m (cobre)
- Coordenada horizontal,  $X_o$ : 0,125 m
- Coordenada vertical,  $Y_o$ : 0,125 m

O cálculo das tensões induzidas será feito para diferentes configurações da linha e seus resultados serão apresentados em uma tabela. Primeiramente, apresentam-se duas possibilidades de disposição dos cabos de fase e a posição do condutor de continuidade em ambas:



Os cálculos serão feitos para as configurações apresentadas anteriormente: triangular sem transposição (ou simples), linear sem transposição (ou simples), triangular transposto e linear com transposição do cabo de terra. A seguir a tabela:

	<i>Tensão Induzida sobre o CDT (V)</i>	<i>Corrente no CDT (A)</i>	<i>Elevação do Potencial das Blindagens (V)</i>
<i>Triangular Simples</i>	54,87	24,72	162,08
			144,96
			155,60
<i>Linear Simples</i>	55,21	24,88	185,90
			161,84
			174,37
<i>Triangular Transposto</i>	0,00	0,00	155,99
<i>Linear com Transposição do Cabo de Terra (*)</i>	0,00	0,00	153,99
			182,48
			182,48

(\*) As coordenadas do CDT são especificadas pelo método.

## **Estudo de Caso - Crossbonding**

Como segundo exemplo, supõe-se uma linha a permutação de blindagens. Primeiramente, considera-se que as três seções elementares da ligação são idênticas. Em um segundo momento, os cálculos foram refeitos inserindo-se um desequilíbrio na ligação (uma das seções será mais longa).

As características da linha estudada são:

- Tensão Nominal: 225 kV, 60 Hz.
- Corrente em Regime Permanente: 1400 A
- Crossbonding sem condutor de continuidade
- Comprimento: 3x650 m
- Resistências de aterramento, R1 e R2: 1 ohm
- Distância da linha ao condutor fictício de retorno por terra: 580 m

Agora os detalhes dos cabos de fase:

- Raio médio da blindagem,  $r_e$ : 26,5
- Distância entre cabos, S: 250 cm
- Resistência Linear da blindagem,  $R_e$ :  $6,50e-05$  ohms/m

Como fator de desequilíbrio considerou-se a última seção sendo um pouco mais longa:

- Comprimento: 650, 650, 700.

	<i>LINHA EQUILIBRADA</i>	<i>LINHA DESEQUILIBRADA</i>
<i>Tensão Induzida sobre as Blindagens (V)</i>	0,00	6,70
<i>Corrente Induzida nas Blindagens (A)</i>	0,00	4,39
<i>Potencial Elétrico no Primeiro Ponto de Permutação (V)</i>	153,99	155,89 156,09 155,86
<i>Potencial Elétrico no Segundo Ponto de Permutação (V)</i>	153,99	161,83 161,61 162,63

## 5. Campos Magnéticos

A utilização dos cabos isolados no transporte de energia tende a crescer. Correntes de forte intensidade, antes mantidas afastadas em torres altas, agora podem ser enterradas a apenas alguns metros de profundidade [9]. Esta proximidade requer dos cabos e das linhas tecnologia que garanta a segurança dos habitantes locais.

Sabe-se que os campos magnéticos têm influência nociva e existem regulamentações para a intensidade de campo emitido. Para que estas regras sejam satisfeitas e a segurança dos habitantes seja garantida, muito estuda-se sobre o comportamento dos campos emitidos e as formas de atenuá-lo.

Atualmente, o cálculo analítico dos campos emitidos vem sendo substituído pelo cálculo computacional. Programas que se apoiam em métodos como FEMM (*finite element method magnetics*) e PEEC (*partial element equivalent circuit*) vêm ganhando espaço, apesar de caros, fornecem simplicidade à operação e bons resultados.

### Cálculo Analítico

Dado um cabo retilíneo, percorrido por uma corrente senoidal de intensidade  $I$  e fase  $\varphi$ , tem-se o seguinte esquema, considerando-se o cabo paralelo ao eixo  $z$ , normal à página:

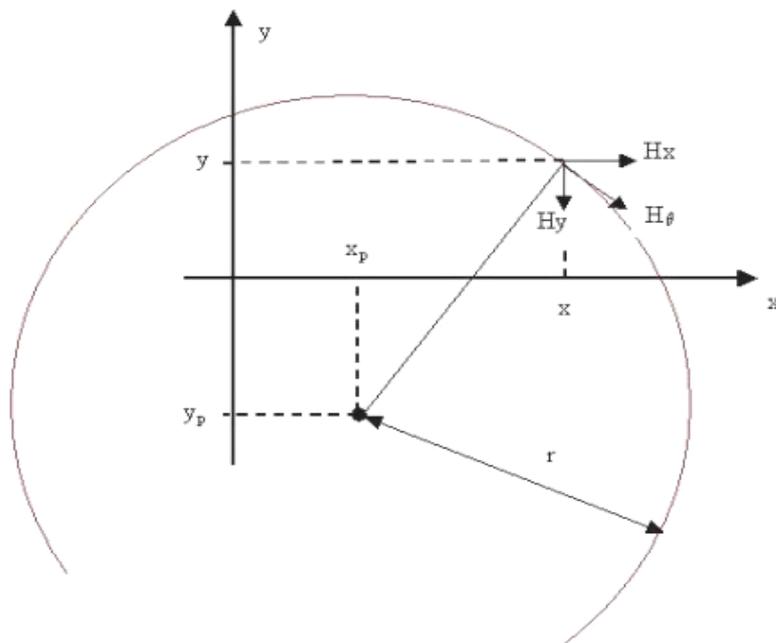


Figura 15 - Campo magnético emitido por um cabo. [9]

Aplicando-se a lei de ampère sobre o círculo, obtém-se a expressão:

$$H(\theta) = \frac{I\sqrt{2}}{2\pi r} \cos(\omega t + \varphi)$$

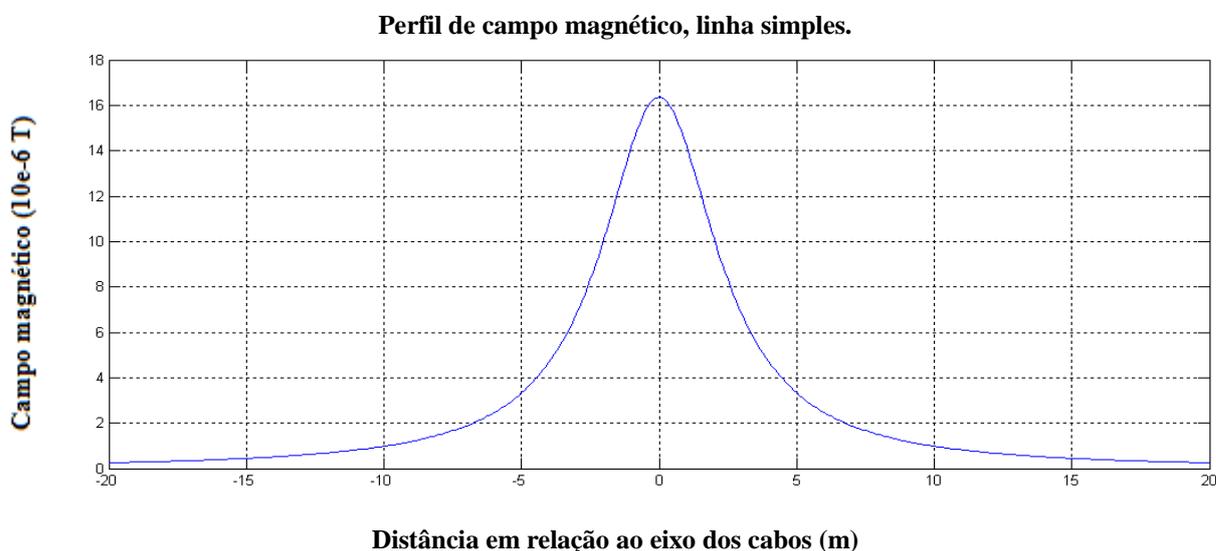
Em coordenadas retangulares, as expressões para a intensidade de campo magnético em x e em y são:

$$H(x) = \frac{I\sqrt{2}}{2\pi r^2} (y_p - y) \cos(\omega t + \varphi)$$

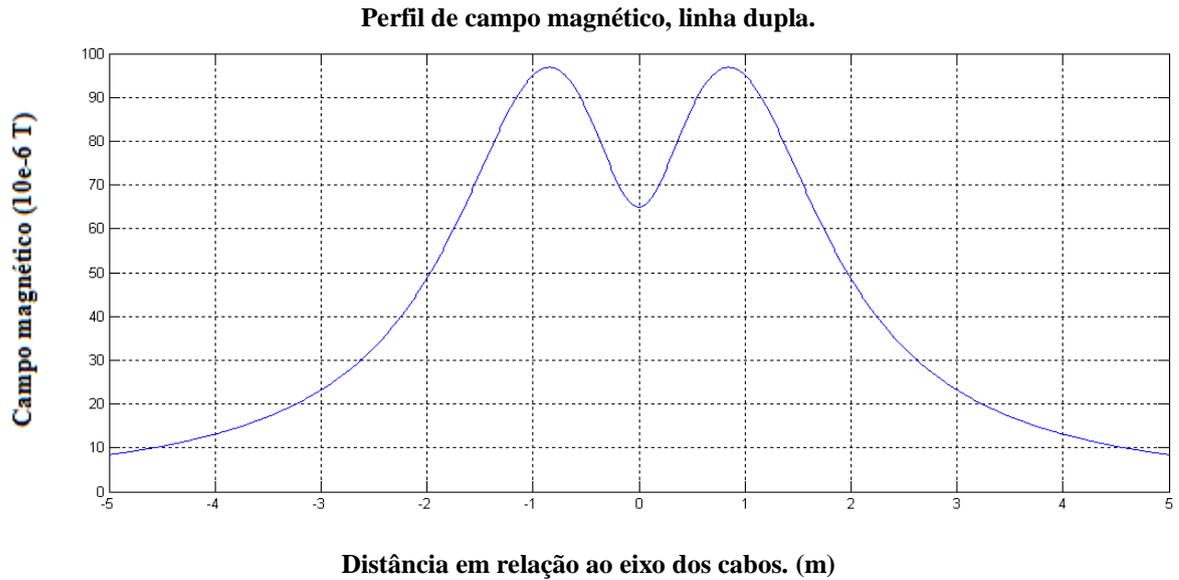
$$H(y) = \frac{I\sqrt{2}}{2\pi r^2} (x_p - x) \cos(\omega t + \varphi)$$

Os efeitos de cada cabo de uma linha - trifásica normalmente - são somados para se obter a intensidade real de campo magnético propagado. Chama-se perfil de campo, o gráfico obtido com valores de campo a uma distância fixa da ligação. Perfis são úteis pois indicam se a distância é ou não segura.

Considerando-se uma linha trifásica subterrânea de 63kV transportando 1000 A, disposta em geometria triangular, com cabos inseridos em tudos de PVC e aterramento em ponto único, tem-se o seguinte perfil de campo magnético:

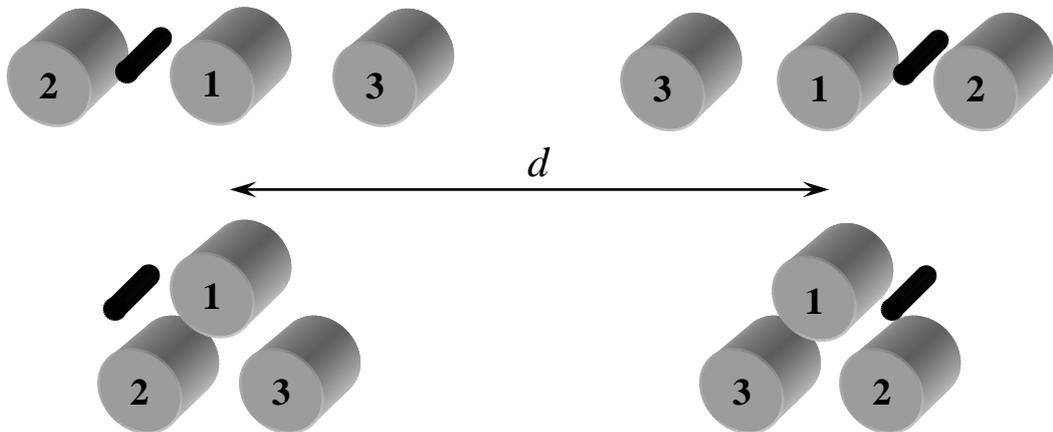


Uma das estratégias adotadas para aumentar a capacidade de transporte de uma linha sem haver a necessidade de se utilizar cabos de seções transversais muito grandes e caras consiste no emprego de dois cabos para cada fase. Considerando-se uma linha dupla, duas linhas de mesma potência postas paralelamente, o perfil do campo magnético tem seguinte forma:



Neste caso, a linha dupla consiste em duas linhas simples iguais as do exemplo anterior. Por isso a forte diferença entre os valores que o campo magnético atinge. Porém, o importante é notar o formato da curva.

Este formato de perfil do campo magnético só é obtido se os cabos de cada ligação respeitarem uma sequência de fases predefinida. Isto é, as fases devem seguir uma colocação simétrica, tal como nos esquemas abaixo:



## Técnicas de Redução do Campo Magnético

Baseando-se no princípio da lei de indução de Faraday, criou-se a primeira técnica para reduzir o campo magnético emitido por linhas subterrâneas.

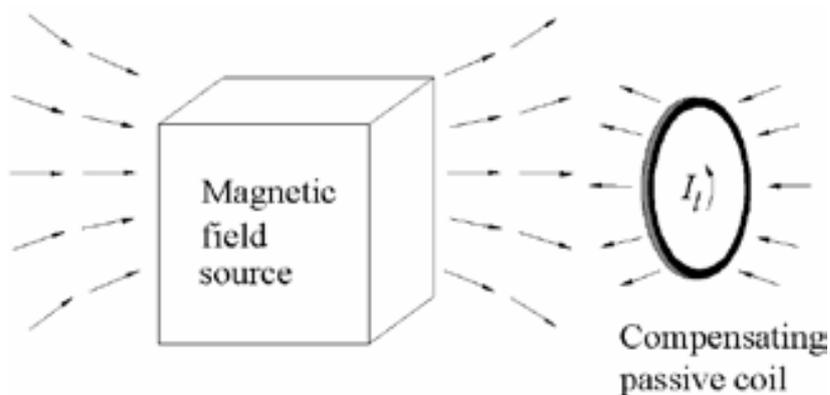
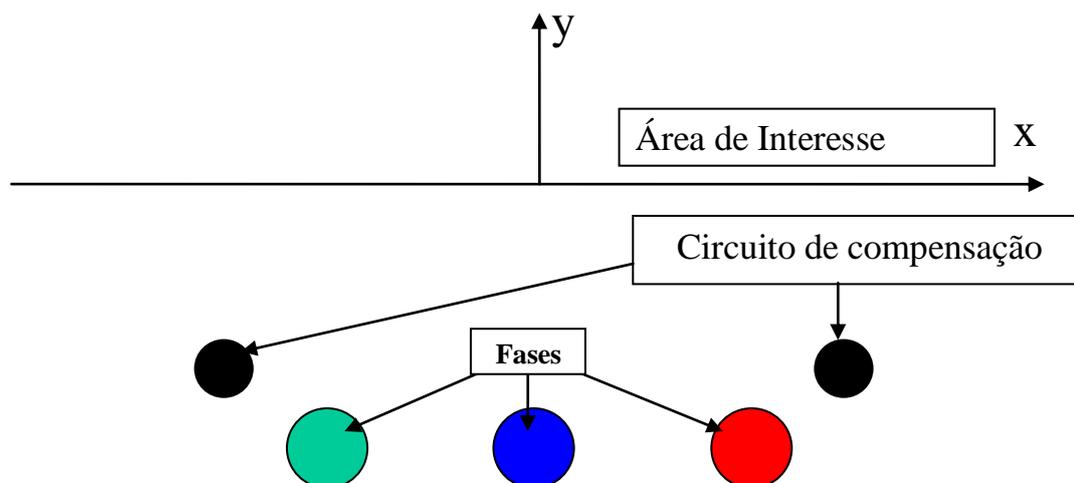


Figura 16 - Princípio da Compensação Passiva.

A compensação passiva consiste na colocação de dois condutores, curto-circuitados em suas extremidades, paralelos à linha. Neles circulará, por indução, uma corrente. O campo magnético gerado por esta corrente, soma-se vetorialmente ao campo magnético original e, como têm sentido oposto, o campo resultante é menos intenso na área de interesse.

Abaixo uma representação esquemática da geometria de uma linha subterrânea com circuito de compensação:



Esta técnica apresenta pontos negativos importantes, que diminuem sua utilização. As correntes induzidas geram perdas Joule no circuito compensador. O circuito compensador é formado por cabos, isto é, trata-se de um sistema caro.

A atenuação do campo magnético pode ser de até 25%, quando um circuito compensador é instalado e a 31% quando há a instalação de dois circuitos compensadores [9].

Outras possibilidades existem, elas são chamadas blindagens de campo ou *shielding* e consistem na colocação de uma tela ou folha metálica acima dos condutores principais. Veja o desenho:

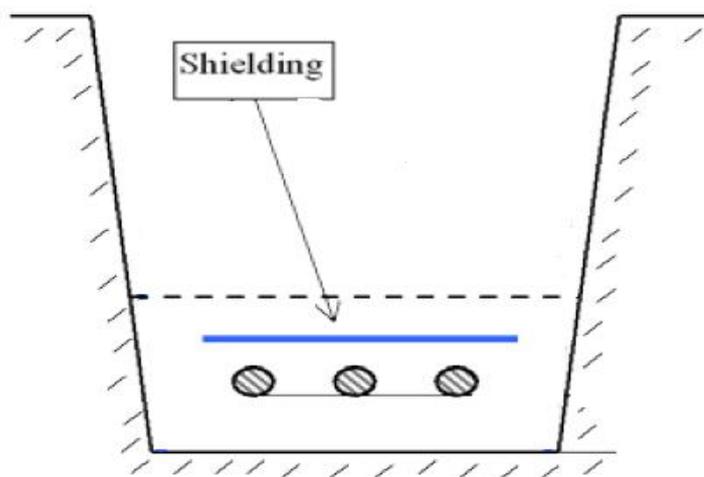


Figura 17 - Blindagem de campo magnético

Esta técnica é melhor que a anterior pois, ainda que também implique em perdas Joule, é mais barata. Quando uma tela metálica plana é posicionada a 10 cm dos cabos de fase, a atenuação do campo magnético na região de interesse pode alcançar 70%.

## 6. Equipamentos Acessórios

Nesta área, o estudo das linhas de transporte de energia a cabos isolados aproxima-se ao estudo convencional das linhas aéreas. Ambas as tecnologias exigem equipamentos acessórios que garantam o bom funcionamento e a segurança da transmissão de corrente elétrica. Ainda assim, é fundamental apresentar alguns dispositivos importantes, pois foram citados recorrentemente durante o trabalho.

### Limitadores de Sobretensão

Os limitadores de sobretensão têm papel de destaque na segurança das ligações. Em momentos de falha são eles que possibilitam a absorção da corrente de curto-circuito pela terra.

Estes componentes têm características não-lineares de operação. A figura abaixo é um esboço da relação tensão - corrente de um limitador de sobretensão:

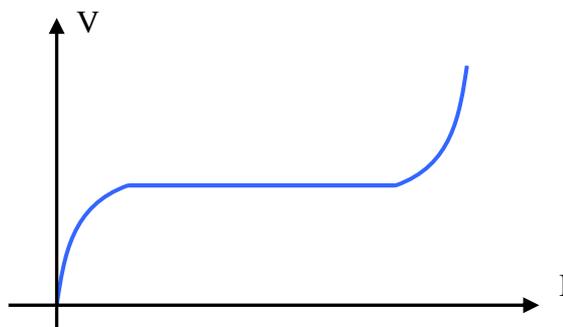


Figura 18 - Característica Tensão x Corrente de um LST

Eles são dimensionados para funcionarem como isolantes em regime permanente e, em regime de falta ou de sobretensão, sua característica muda e ele estabelece contato entre o circuito de blindagens e a terra.

O estudo das tensões induzidas e da elevação do potencial elétrico nas extremidades isoladas de uma ligação é muito importante para viabilizar economicamente um projeto, pois os limitadores de sobretensão são equipamentos caros e sensíveis.

## **Junções**

A fabricação de um cabo isolado de alta tensão é limitada em comprimento. Não há como transportar grandes comprimentos inteiros, pois as bobinas - grandes carretéis - usadas não devem permitir o enrolamento do cabo em um raio pequeno demais. Para cobrir uma distância de alguns quilômetros são empregados, então, vários pedaços menores e várias junções.

Para evitar que hajam perdas nas junções, muito se estudou e trabalhou no sentido de evoluir o equipamento. As junções devem promover um contato perfeito do condutor central sem que haja falha ou fragilidades no isolamento. Além disto, deve-se garantir a impermeabilidade e possibilitar a conexão das blindagens entre si ou com a terra.

A figura abaixo, retirada de um projeto gráfico em três dimensões, mostra como as junções podem ser grandes. No caso, trata-se de uma linha subterrânea dinamarquesa que transmite eletricidade a 400 kV.



## Extremidades ou Terminações

As extremidades são, como diz o nome, os equipamentos que delimitam a linha a cabos isolados. Esta delimitação deve possibilitar a conexão com geradores, transformadores, e até mesmo uma linha aérea de transmissão:



Figura 19 - Conexão subterrânea entre postes.



Figura 20 - Conexão aero-subterrânea.



Figura 21 - Conexão em sifão.

Nos pontos de conexão, estão localizadas as maiores fragilidades da rede. São pontos onde há maiores perdas e maior dificuldade na isolação. O estudo e o projeto das extremidades são etapas complexas da implementação de uma linha. Abaixo um desenho técnico de uma extremidade em polímero sintético de uma linha de 170 kV:

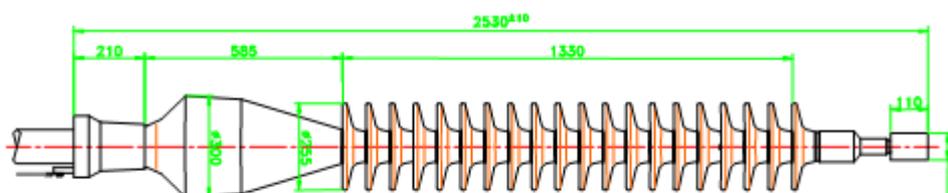


Figura 22 - Projeto de uma Terminação

## **7. Conclusões**

Passo a passo, com o crescimento da conscientização e o avanço das políticas ambientais, o emprego de cabos isolados na transmissão de energia elétrica desponta como tecnologia mais adequada face à transmissão por linhas aéreas. Porém, até os dias atuais, o estudo dos cabos e suas peculiaridades não é apresentado aos estudantes durante a graduação.

Ainda que se trate de um trabalho teórico, baseado em muita pesquisa e leitura, o presente texto permitiu ao estudante aprofundar seus conhecimentos em um assunto muito promissor. Espera-se que este texto auxilie, mesmo que em um nível introdutório, a pesquisa dos alunos interessados no assunto.

O capítulo sobre a constituição dos cabos aborda com mais ênfase as técnicas e materiais atuais. Contudo, traz informações que capacitam o leitor para a interpretação de catálogos e trabalhos sobre as diversas tecnologias existentes. Fica mais uma vez exposto o caráter introdutório desta monografia.

Sobre a parte que trata das disposições e dos aterramentos, vale ressaltar que as possibilidades de disposição são infinitas e, aquelas apresentadas, ilustram e indicam o quanto a geometria de uma ligação influe em seu funcionamento. Já as três técnicas de aterramento são realmente as mais difundidas.

O cálculo analítico das tensões induzidas torna-se complexo à medida em que a linha tem maior número de seções ou circuitos paralelos. Fora isto, o método é simples e pode ser implementado em aplicativos leves e úteis ao projeto de novas linhas.

Diferentemente do cálculo das tensões induzidas, o cálculo do campo magnético emitido é complexo. Os programas existentes no mercado são caros, mas contém diversas funcionalidades que facilitam e dinamizam a análise de campo. Muitas empresas investem no desenvolvimento de seu próprio software para evitar a compra das versões comerciais.

Para finalizar, àqueles que desejarem avançar nos estudos da transmissão de energia por cabos isolados, sugere-se a seleção de uma área mais específica para o aprofundamento. Por exemplo, o estudo dos campos magnéticos emitidos ainda tem muito a ser explorado.

## 8. Referências Bibliográficas

- [1] Pays, M. 1999. *Câbles de Transport d'Énergie. Technologies. Caracteristiques.*
- [2] Bogoróditski, N. P., Pásinkov, V. V., Taréiev, B. M., 1979. *Materiales Electrotécnicos.* Ed Mir Moscu. Tradução para espanhol de Antonio Molina Garcia.
- [3] Argaut, P., MIKKELSEN, S. D. 2003. *New 400 kV Underground Cable System Project in Jutland (Denmark).*
- [4] <http://pt.wikipedia.org/wiki/Extrus%C3%A3o>, Apenas imagem da máquina de extrusão.
- [5] <http://community.myelectrical.com/wikis/myelectricalwiki/xlpe-water-tree.aspx>
- [6] Prysmian Cables & Systems. *Les Progrés Technologiques sur les câbles isoless.* SEE 2009.
- [7] Dorison, E. 2008. *Earth Potential Rises. CIGRE2008.*
- [8] Vo Van Huy, H. 1999. *Optimisation des Techniques de Mise à la Terre des Ecrans des Câbles Haute et Très Haute Tensions.*
- [9] Ben Hammadi, K. 2009. *Rapport de fin de stage:Modélisation des Câbles de Haute Tension Souterrains.*
- [10] Doulet, A. 2009. *Distribuição de energia elétricas e cabos subterrâneos.* Cabos'09, Maceió, Brasil.
- [11] Vargas, J., Guzmán, A., Robles, J. 1999. *Proteção para cabos subterrâneos/submarinos usando esquema de comparação direcional de sequência-negativa.* SEL.
- [12] Silec Cable. 2009. *High & Extra High Voltage Solutions.* Catálogo de publicidade.
- [13] Silec Cable. 2010. *High & Extra High Voltage Solutions.* Catálogo de publicidade.