



**XX SNPTEE  
SEMINÁRIO NACIONAL  
DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA**

Versão 1.0  
22 a 25 Novembro de 2009  
Recife - PE

**GRUPO X  
GRUPO DE ESTUDO DE DESEMPENHO DE SISTEMAS ELÉTRICOS - GDS**

**PROBLEMAS ESPECIAIS DE INTERFERÊNCIA ELETROMAGNÉTICA DE UMA LT  
DE CIRCUITO DUPLO COM DUTOS ISOLADOS**

**Sérgio Toledo Sobral \***  
**Sérgio Cordeiro Sobral**

**ST&SC**  
**Serviços Técnicos Ltda**

**Eduardo Andreis**  
**Gláucio Antonio Weigert**

**COMPAGAS**  
**Companhia Paranaense de Gás**

**RESUMO**

O IT caracteriza 5 tipos especiais de cruzamentos e aproximações de dutos com vários circuitos de linhas de transmissão de energia elétrica. Nesses casos, durante um curto-circuito no sistema de transmissão, diversos circuitos conduzem simultaneamente correntes de seqüência zero.

O IT apresenta mais detalhes sobre o terceiro tipo especial de cruzamento mencionado, tomando como exemplo o cruzamento da LT de 230 kV Gralha Azul-Repar-São Jose dos Pinhais, da COPEL, em Curitiba, com o gasduto UEGA da COMPAGAS e com o gasduto GASBOL, da TGB, que cruzam a faixa da LT mencionada.

O IT discute ainda diversos aspectos metodológicos ligados as simulações e as mitigações de interferências, que ganham relevância especial nos casos especiais apresentados.

**PALAVRAS-CHAVE**

Indução, acoplamento resistivo, Teoria de Circuitos, Método Desacoplado, "ladder", representação de solos, contrapesos, descarregadores e filtros.

**1.0 INTRODUÇÃO: CASOS ESPECIAIS DE CRUZAMENTO E APROXIMAÇÃO DE UM OU DE DIVERSOS DUTOS  
COM DIVERSOS CIRCUITOS QUE CAUSAM INTERFERÊNCIA SIMULTÂNEA**

Descreve-se a seguir os 5 casos mencionados:

- a) Duto que alimenta um Pólo Industrial e cruza ou se aproxima de diversas LT que convergem para uma subestação que alimenta o Pólo. Nesse caso, um curto-circuito à terra num dos barramentos da SE mencionada, produz circulação de corrente de seqüência zero simultaneamente em diversas LT's que se aproximam ou cruzam o duto mencionado (ver Parte 1 da Figura 1).
- b) Uma LT de circuito duplo que cruza ou se aproxima de um duto. Dependendo da posição do curto-circuito, há trechos da LT onde a corrente de seqüência zero percorre os dois circuitos no mesmo sentido, e há trechos onde as correntes possuem sentidos opostos (ver Parte 2 da Figura 1).
- c) Caso idêntico ao anterior, agravado pelo fato do circuito duplo receber um terceiro circuito, ligado em "tap" em um trecho intermediário da LT (ver Parte 3 da Figura 1). Esse caso será examinado em mais detalhe em item a seguir.
- d) Existem vários exemplos de gasdutos com vários quilômetros de extensão que seguem por vias urbanas mantendo-se a curta distância, ou cruzando corredores de passagem de diversas LT's com diferentes níveis de tensão. Em alguns casos essas LT's seguem para SE's terminais comuns, podendo conduzir todas elas, simultaneamente, correntes de seqüência zero que influenciam o gasduto. Esse geralmente ramifica-se a partir do tronco, podendo cruzar o corredor de passagem das LT's. Esses ramais do gasduto geralmente alimentam indústrias, hospitais, hotéis, instalações comerciais etc, o que cria sérios riscos que tem que ser quantificados e mitigados (ver Parte 4 da Figura 1).
- e) Existem casos de dutos muito longos em que é possível e conveniente aterrar todas as tubulações de uma faixa de dutos nas duas SE's terminais, por meio de descarregadores ou por meio de filtros. Neste caso, durante curto-circuitos, circula pelo metal do duto uma corrente que pode chegar a centenas de amperes.

(\*) ST&SC -Rua Vice Governador Rubens Berardo 175 B1 grupo 1002 - Gávea - Rio de Janeiro - RJ  
CEP 22 451-070 – Tel/Fax 21-2294-6456 email: stsobral@terra.com.br

Neste caso, a impedância mútua entre os dutos, situada na faixa, tem que ser representada nas simulações, pois a mesma influencia o valor da corrente que circula pelo metal do duto. Influencia também a elevação do potencial de terra das SE's terminais e a curva de d.d.p aplicada no isolamento do duto ao longo de seu trajeto (ver Parte 5 da Figura 1).

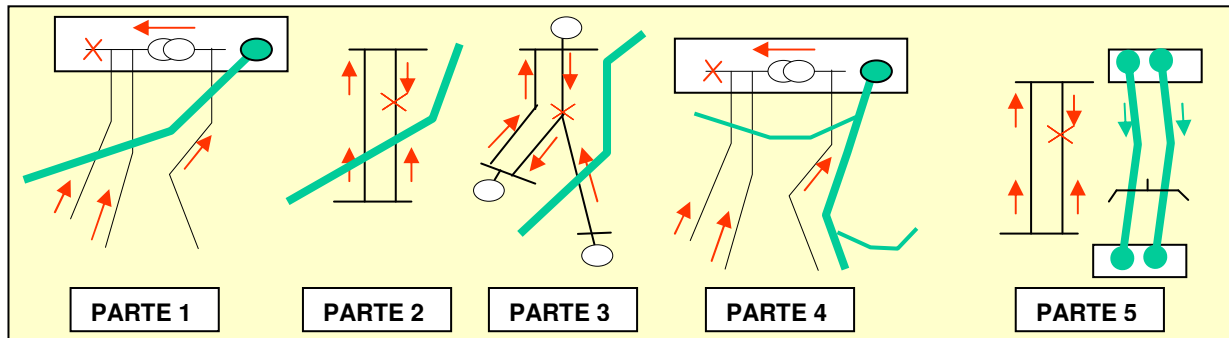


Figura 1 - Situações especiais de cruzamento e aproximação de dutos com LT's

## 2.0 CARACTERÍSTICAS ESPECIAIS DO TIPO 3

Essas características especiais são descritas com base nas interferências causadas pela LT de 230 kV Gralha Azul-Repar-São Jose dos Pinhais, da COPEL, em Curitiba, sobre o gasduto UEGA da COMPAGAS e o gasduto GASBOL, da TGB, que cruzam a faixa da LT mencionada (ver Figura 2)

As LT's possuem as seguintes características:

a) Trechos característicos:

- Da SE de Gralha Azul (GRL) até a "torre 3" em circuito simples (cerca de 250 m), com duplo pára-raios de alumínio com alma de aço (CAA);
- Da SE remota São José dos Pinhais (DJP) até a "torre 3", em circuito simples, com duplo pára-raios CAA; e
- Da "torre 3" até SE da Repar, em circuito duplo de mesma torre (cerca de 900 m), com duplo pára-raios CAA.

b) No trecho (torre 3 – Repar), os dois circuitos de mesma torre são percorridos por correntes de seqüência zero com direções opostas, para diversas posições do curto-circuito. Como consequência, é muito reduzida neste trecho a tensão induzida pelas fases sobre os dutos UEGA e GASBOL.

c) Os pára-raios são duplos, tipo (CAA), além de ser pequeno o valor das resistências de terra das malhas das SE's Repar e Gralha Azul. Resulta daí que a quase totalidade da corrente de defeito é drenada para as malhas terminais, percorrendo os cabos pára-raios mencionados (ver Figura 3).

Como consequência, é elevada a tensão induzida pelos cabos pára-raios sobre os dutos UEGA e GASBOL, no trecho de circuito duplo da LT em apreço.

Assim sendo, tem-se um fenômeno notável: *o efeito indutivo principal é causado pela corrente que percorre os cabos pára-raios. Dependendo da posição do curto-circuito, a corrente que circula nas fases pode operar como reforço da tensão induzida ou como blindagem.*

## 3.0 TÉCNICAS DE ATERRAMENTO TEMPORÁRIO DOS DUTOS

A seguir comenta-se as três principais modalidades de aterramento temporário dos dutos, utilizadas como medida mitigadora, quando a d.d.p aplicada no isolamento dos mesmos ultrapassa o valor limite considerado (geralmente 5 kV)

### 3.1 - A Tecnologia Clássica de Utilização de Aterramentos Temporários em Dutos

Na tecnologia clássica, um trecho de alguns quilômetros de duto é separado do solo por uma camada isolante. Nos terminais deste trecho, juntas de isolamento separam o mesmo do restante das tubulações.

*Durante curto-circuitos nas LT's próximas, cada um desses trechos de duto pode ser aterrado temporariamente em apenas um ponto, por meio de descarregadores (varistores, etc), ou por meio de filtros.*

Nesse caso, durante um curto-circuito à terra numa LT próxima, é praticamente nulo o valor da corrente que circula ao longo do duto, pois o mesmo está isolado. Quando o descarregador ou o filtro operam, a d.d.p aplicada no isolamento, no ponto de aterramento, cai para zero. Isso protege operadores, os dispositivos de proteção catódica e o pára-raios, que geralmente são instalados na proximidade dos descarregadores ou dos filtros.

A d.d.p eleva-se ao longo do trajeto do duto. Seu valor não deve ultrapassar um limite (geralmente tomado como 5 kV), para evitar danos ao isolamento e perfuração do duto por efeito térmico.

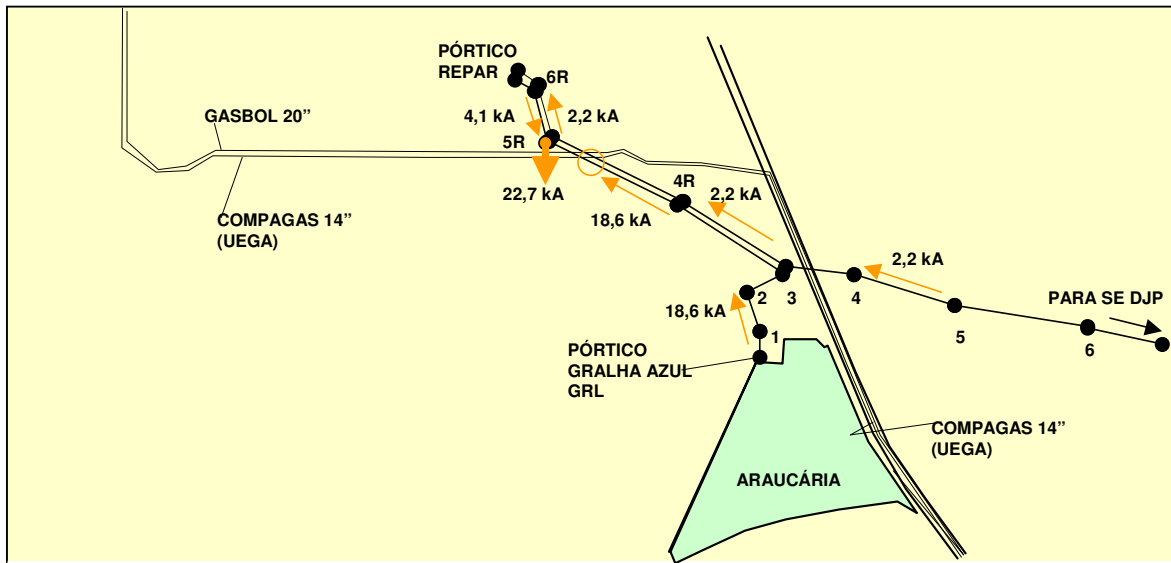


Figura 2 – Exemplo do Tipo 3 - configuração das LT's e dutos

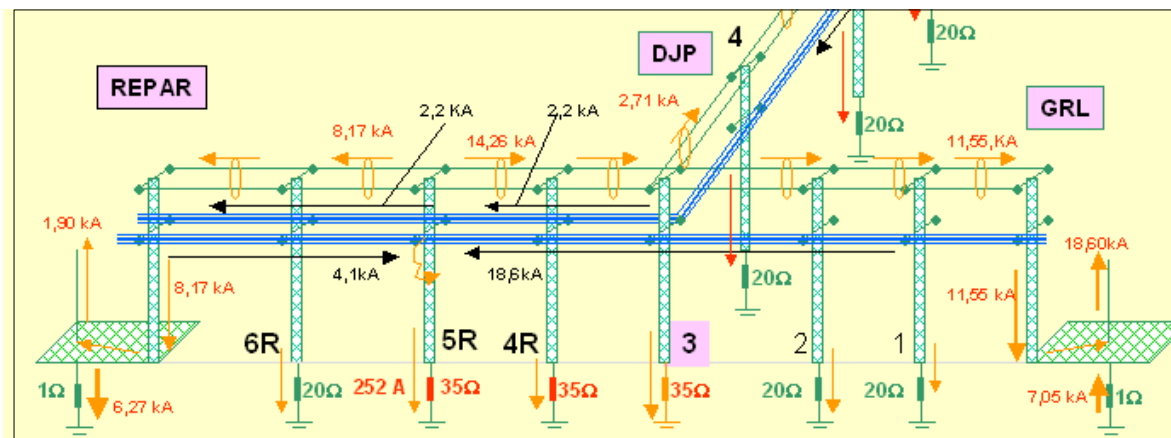


Figura 3 – Exemplo do Tipo 3 - correntes nas fases, cabos pára-raios e malhas de terra

### 3.2 - Subdivisão do Duto em Trechos Menores

Quando um duto acompanha por dezenas de quilômetros uma, ou diversas LT's, o valor da d.d.p aplicada no isolamento do duto durante um defeito à terra nas LT's mencionadas pode superar de longe o limite de 5 kV.

Uma das soluções é subdividir o duto em trechos menores por meio de novas juntas de isolamento.

Neste caso é recomendável instalar o descarregador, bem como o dispositivo de proteção catódica e o pára-raios na parte central do novo trecho do duto, separado pelas juntas de isolamento interpostas.

A vantagem é que, no caso de ser aplicada ao longo do duto uma tensão induzida longitudinal de, por exemplo 5 kV, resultará em uma d.d.p nula no centro do trecho e +2,5 kV numa extremidade e - 2,5 kV na outra.

Cada junta de isolamento tem que suportar 5 kV, ou seja, (+2,5 kV - (-2,5 kV)), o que não é problemático para as juntas disponíveis no mercado. Cada trecho de duto separado por juntas isolantes deve ter, portanto, sua proteção catódica própria (por corrente impressa ou proteção galvânica). A localização do descarregador na parte central de um trecho, pode ser escolhida nas proximidades do ponto de onde derivam os ramais mais importantes do gasduto. Isso reduz o valor da elevação de potencial levada para o interior dos postos de abastecimento, hospitais, hotéis etc, servidos pelos ramais.

### 3.3 - Trecho de Duto com Diversos Pontos de Aterramento Temporário

Se o duto mostrado na Parte 1 da Figura 4 for aterrado simultaneamente, por exemplo, nos pontos 30 e 70, a parte transversal do circuito "ladder" que representa o duto é by-passada e a tensão induzida longitudinal é aplicada diretamente na impedância longitudinal ( $Z_{30-70}$ ).

Como a impedância típica de um duto é da ordem de 0,8 ohm/km, se o mesmo estiver localizado a poucas dezenas de metros de uma LT, durante um curto-circuito, o duto poderá ser percorrido por correntes de várias centenas de amperes. Essa corrente será injetada nos pontos de aterramento do duto.

*No caso de gasdutos urbanos, os pontos de aterramento são locais próximos a postos de abastecimento, hotéis, hospitais, lojas, pequenas indústrias, etc. As malhas de aterramento nesses locais não foram geralmente projetadas para injetar no solo correntes desta magnitude. A elevação de potencial de terra pode criar problemas de segurança para pessoas e instalações.*

Deve ser lembrado ainda que se um curto-circuito ocorrer em um ponto da LT correspondente a um ponto do duto a meio caminho de dois aterramentos, o duto pode ser submetido a tensões induzidas de digamos +6 kV em um trecho e - 6 kV no outro, resultando numa corrente nula pelo duto.. Nesse caso, o bi-aterramento não consegue reduzir a d.d.p aplicada no isolamento. Assim sendo, nos dois trechos, a d.d.p aplicada no isolamento permanece acima de 5 kV, e pode danificar o revestimento do duto. Há diversas condições menos extremas em que o multi-aterramento não consegue controlar a d.d.p aplicada no isolamento do duto.

*Pelo exposto, o aterramento temporário de um trecho de um duto por meio de dois ou mais descarregadores ou filtros é uma medida que deve ser reservada para aplicações não urbanas, onde os riscos podem ser melhor controlados.*

## 4.0 ASPECTOS METODOLÓGICOS

Relacionam-se a seguir diversos aspectos metodológicos que ganham relevância ainda maior quando se analisa um dos 5 tipos especiais de interferências, tratados neste IT:

### 4.1 - A Vantagem do Programa Digital Utilizar a Teoria de Circuitos ao Invés da Teoria Eletromagnética

As referências [13,14] descrevem uma medição feita no laboratório do LACTEC, na cidade de Curitiba, envolvendo um indutor, um condutor de blindagem e um induzido. As medições foram feitas com o condutor de blindagem em 3 situações: isolado, mono-aterrado ou bi-aterrado.

Em todas as condições mencionadas a Teoria de Circuito permitiu calcular quase exatamente o valor da tensão induzida. Não é do nosso conhecimento que se tenha conseguido até o momento, algo semelhante, utilizando a Teoria Eletromagnética, principalmente para o caso da blindagem bi-aterrada.

Como no acoplamento de LT's com dutos os cabos pára-raios operam como uma blindagem multi-aterrada, a conveniência de utilizar a Teoria de Circuitos nos cálculos é evidente.

### 4.2 - Necessidade de Testar os Programas Digitais

Infelizmente, instalou-se numa pequena parte do meio acadêmico nacional o perigoso hábito de criar modelos digitais e programas, utilizá-los sem comparar seus resultados com medições de laboratório, de campo ou com experiência operacional, tirar conclusões sobre práticas de engenharia, e ensinar o modelo a uma legião de alunos como uma verdade comprovada.

Um modelo ou programa digital pode ser considerado confiável para uma pesquisa específica se ele consegue reproduzir o resultado de um teste de laboratório. O uso do programa para resolver casos semelhantes geralmente produz resultados confiáveis. Se o programa consegue replicar os resultados medidos no campo ou confirmados pela experiência operacional, ele pode ser considerado válido para aplicações de engenharia que não se afastem muito do caso certificado pela medição de campo ou pela experiência operacional [13,14].

### 4.3 - Localização do Curto-Circuito à Terra que Produz a Maior Diferença de Potencial no Isolamento do Duto

Quando um curto-circuito ocorre a uma distância de 5 a 10 km do cruzamento, ou da aproximação, de uma LT com um duto, grande parte da corrente dos cabos pára-raios é injetada no solo pelas torres intermediárias entre o ponto de defeito e o cruzamento ou a aproximação. Por esse motivo, é mínimo o valor da corrente de blindagem que percorre os cabos pára-raios no vão de cruzamento ou de aproximação, o que torna máximo o valor da d.d.p (V), causada pela indução, aplicada entre o metal do duto e a terra, no trecho de cruzamento. Como o ponto de curto-circuito está muito afastado do cruzamento é muito reduzida a elevação de potencial de terra ( $V_T$ ) aplicada sobre o duto, no trecho de cruzamento ou aproximação.

Por outro lado, no caso de um curto-circuito numa torre de cruzamento, o valor da d.d.p (V), causado por indução, é relativamente pequeno, porque é elevado o valor da corrente de blindagem circulando nos cabos pára-raios no vão de cruzamento. Além disso, o valor da elevação de potencial de terra ( $V_T$ ) é elevado no cruzamento o que torna pequeno o valor da d.d.p =  $V - V_T$ .

Assim sendo, um curto-circuito na torre de cruzamento só pode conduzir ao maior valor de d.d.p no isolamento do duto caso o mesmo passe muito próximo de uma torre. Nesse caso o valor de ( $V_T$ ) pode ser tão elevado que o valor

absoluto da d.d.p torna-se maior do que 5 kV:  $d.d.p = |V - V_T| > 5 \text{ kV}$ .

#### 4.4 - O Fenômeno da Propagação de Erros Relativos

*Um modelo muito complexo de cálculo, cuja solução envolva bilhões de operações numéricas, só apresenta resultados parecidos com os valores medidos quando os dados utilizados pelo modelo são obtidos com precisão laboratorial.*

Isto ocorre, pois cada grandeza medida tem duas componentes: o valor correto, que seria medido em um laboratório, e o erro de medição. Quando se opera duas grandezas, opera-se o valor correto e também o erro, que tende a crescer, à medida que o número de operações aumenta.

Nas aplicações práticas de engenharia, os dados são obtidos geralmente com erros relativamente grandes, principalmente os que envolvem resistividade do solo, valores de corrente de curto-circuito, a extensão de cada circuito etc. A própria solução matricial direta de um circuito extenso, envolvendo acoplamentos eletromagnéticos, exige bilhões de operações numéricas para sua solução.

Assim sendo, utilizando-se dados típicos de engenharia em um modelo de cálculo muito complexo, pode-se obter resultados onde muitos ou todos os algarismos significativos são perdidos. Nesse caso, o valor da solução calculada pode não ter qualquer semelhança com o valor que seria medido.

*A propagação de erros relativos é uma degradação da informação devido a um número elevado de operações realizadas com a mesma, e nada tem a ver com erros de arredondamento. Os erros de arredondamento podem ser sanados aumentando o número de dígitos utilizados no cálculo, mas não os erros relativos, que ocorreriam mesmo que se utilizasse nos cálculos um número infinito de dígitos.*

#### 4.5 - Estratificação do Solo em Camadas

Alguns artigos técnicos comparam as medições feitas em laboratório com um modelo reduzido onde se cria um solo estratificado em camadas horizontais, cada uma com resistividade uniforme, com os valores calculados com um modelo correspondente.

O assunto é relevante do ponto de vista teórico. Infelizmente o solo real geralmente não é estratificado em camadas horizontais com resistividade uniforme, nem as superfícies de separação, quando existem, são horizontais.

O que se faz é tentar representar um solo real com geometria bastante aleatória, por um modelo idealizado, acreditando que com isso se consegue maior precisão. Pode ocorrer justamente o oposto, pois se aumenta o número de operações numéricas necessárias para resolver o modelo, agravando o problema de propagação de erros relativos.

Na verdade, obter dados confiáveis de resistividade do solo, tais como os necessários para utilizar um modelo complexo de solo, é problemático na prática. Os dados podem ser facilmente modificados por condições climáticas, altura do lençol freático e proximidade de malhas de terra de instalações existentes.

Alguns programas calculam inicialmente a corrente injetada no solo pelas torres e malhas, que são representadas inicialmente como resistências concentradas.

O cálculo das resistências mútuas entre as torres, malhas e eletrodos é determinado na continuação do processo, em função da distância entre eles, do valor da corrente injetada no solo por cada eletrodo e da forma dos eletrodos e do modelo do solo considerado. A influência da forma do eletrodo e do modelo do solo é informado ao programa por meio de um gráfico (per unit de corrente) que caracteriza a variação do potencial no solo com a distância e com a direção, nas imediações dos contrapesos das torres e das malhas. Esse gráfico digital é preparado como dado de entrada do programa, com o uso de outros programas ou de testes de laboratório. A idéia é desvincular o cálculo do modelo do solo dos cálculos do programa principal, para evitar a propagação de erros relativos.

#### 4.6 - Condutores de Equalização de Potencial Enterrados nas Proximidades de um Duto

Essa medida geralmente é utilizada para reduzir o valor do potencial aplicado na superfície externa do isolamento do duto, pelas correntes injetadas no solo pelas torres e suportes das LT's, o que caracteriza o acoplamento resistivo.

Pode ser utilizado também para reduzir o valor do potencial de passo na faixa do duto.

A sua utilização eficaz recomenda que sejam de cobre. Frequentemente esses condutores têm que ser terminados em aterramentos de baixa resistência, instalados em poços artesianos.

O cálculo da eficácia dessa medida fica prejudicado pelos problemas de representação do solo, citados no item (4.5) anterior.

*Mas o problema crucial dessa medida corretiva é a vandalização dos condutores de cobre, que perdem grande parte de sua eficácia corretiva se um trecho do mesmo for roubado. Também é discutível a aplicação de materiais de cobre nas proximidades do duto, devido a possíveis interferências com o sistema de proteção catódica do mesmo*

## 5.0 VANTAGENS DO MÉTODO DESACOPLADO PARA EVITAR A PROPAGAÇÃO DE ERROS RELATIVOS EM CIRCUITOS COMPLEXOS

### 5.1 - Um Sumário Sobre o Método Desacoplado

Para evitar o problema da propagação dos erros relativos em circuitos complexos, como os 5 Tipos tratados neste IT, pode-se utilizar o Método Desacoplado, que tem sólido embasamento teórico [1,2,3,4,5,6,7,8] e experimental [9,10,11,12]. O Método evita uma representação matricial direta do circuito acoplado original.

O sistema elétrico original pode ter milhares de elementos de circuitos, correspondentes a centenas de vãos de pára-raios, seus acoplamentos mútuos com as fases, além da representação de trechos dos dutos, bem como os acoplamentos indutivos entre fases e cabos pára-raios com os dutos (ver Parte 1 da Figura 4). Há ainda a considerar os acoplamentos resistivos entre cada torre e o duto.

A solução matricial direta de um circuito com essas características exigiria bilhões de operações numéricas. Por esse motivo, os resultados obtidos só seriam próximos aos valores que poderiam ser medidos na realidade, se os dados fossem obtidos com precisão laboratorial.

Para evitar esse problema, o Método Desacoplado faz automaticamente uma redução drástica do número de elementos do circuito, sem modificar sua topologia. Para isso, substitui os acoplamentos entre fases, cabos pára-raios e os dutos por fontes de corrente, que são aplicadas no circuito "ladder" que representa o duto. O processo mencionado é uma simples aplicação do Teorema de Norton [1,2,5,7,9].

A idéia básica do desacoplamento é mostrada na Parte 1 da Figura 4.. A LT e os dutos são subdivididos em trechos de "paralelismo virtual". Por exemplo, o trecho (30-70) do duto está acoplado com os trechos das fases (10-200) e (33-220) caracterizando as impedâncias mútuas ( $Z_1$ ) e ( $Z_2$ ). O mesmo trecho (30-70) do duto está acoplado também com os trechos (330-380) e (415-490) dos cabos pára-raios, caracterizando as impedâncias mútuas ( $Z_1'$ ) e ( $Z_2'$ ).

O cálculo da tensão induzida ( $V_{30-70}$ ) está mostrado na Parte 1 da Figura 4.. O desacoplamento do trecho 30-70, usando o Teorema de Norton está mostrado na Parte 2 da Figura 4. O desacoplamento resulta na substituição de todos os acoplamentos com as fases e cabos pára-raios por duas fontes de correntes aplicadas nos pontos correspondentes do circuito ladder que representa do duto, como mostrado na Parte 3 da Figura 4.

O circuito exato resultante é geralmente milhares de vezes menor que o circuito original e sua solução matricial (ou usando técnicas de circuito "ladder") envolve um número drasticamente menor de operações numéricas. Assim sendo, mesmo utilizando os dados usuais de engenharia, obtém-se geralmente resultados próximos dos que poderiam ser confirmados por meio de medições.

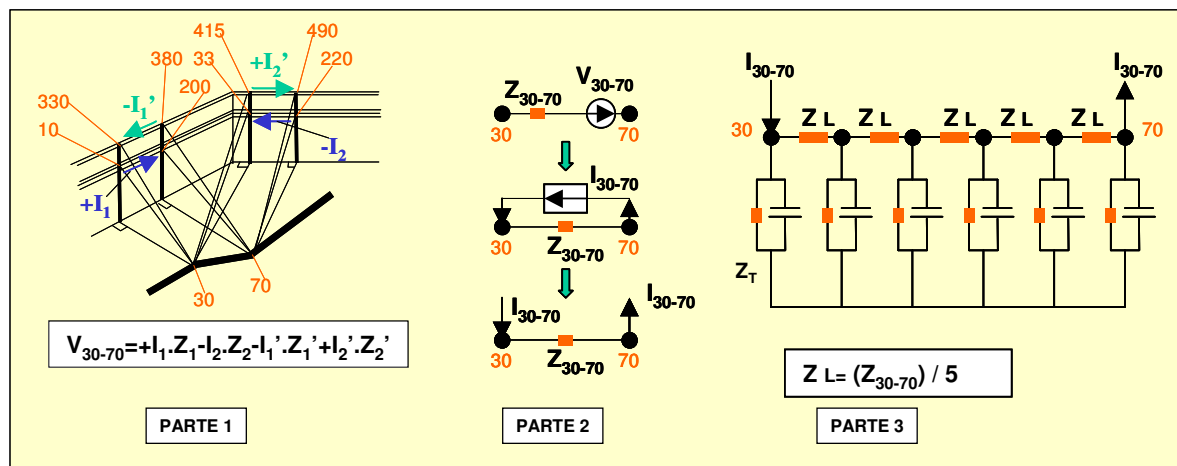


Figura 4 – Desacoplamento de um trecho (30-70) do duto

### 5.2 - Distribuição da Corrente de Curto-Circuito ao Longo dos Cabos Pára-Raios e Torres

O assunto ganha importância especial quando existem diversas LT's conduzindo simultaneamente correntes de seqüência zero.

O circuito formado pelos cabos pára-raios de cada LT que interfere no duto e suas torres é representado por um circuito "ladder", terminado pela impedância de aterramento das SE's terminais. A impedância de aterramento de cada SE corresponde a uma resistência de sua malha em paralelo com as impedâncias terminais dos cabos pára-raios das outras LT's que chegam a SE.

A tensão induzida pelas fases sobre os trechos do circuito "ladder" é transformada em fontes de corrente, como comentado no item anterior.

Essas fontes de corrente são aplicados nos terminais dos trechos correspondentes do circuito "ladder" que representa os cabos pára-raios.

O valor da corrente que circula em cada pi do circuito "ladder" corresponde a corrente que circula em cada vão do cabo pára-raios e em cada torre. O cálculo pode ser feito matricialmente. Entretanto, isso pode demandar um grande número de operações e uma propagação de erros relativos significativa.

Para evitar que isso ocorra o circuito dos cabos pára-raios pode ser resolvido por uma técnica de circuitos ladder semelhante à descrita no item 5.4 deste IT.

### 5.3 - Solução Matricial do Duto Desacoplado

A solução matricial do circuito "ladder" desacoplado que representa o duto é resumida na seguinte expressão:

$[A]^{-1} \cdot (I) = (V)$ , onde  $[A]$  é a matriz admitância do circuito "ladder" desacoplado que representa o duto,  $(I)$  é o vetor de fontes de correntes aplicados nos nós do circuito "ladder" e  $(V)$  é o vetor da d.d.p aplicada no isolamento do duto, devido ao acoplamento indutivo com as fases, reduzido do efeito de blindagem dos cabos pára-raios.

Como a matriz  $[A]$  pode ser de grandes dimensões, sua inversão pode necessitar de um número muito elevado de operações o que dispararia a propagação de erros relativos. Por causa disso pode-se utilizar uma solução que emprega técnicas de circuito "ladder", conforme descrito a seguir.

### 5.4 - Solução do Duto Desacoplado Usando Técnicas de Circuito Ladder

O programa corre o circuito "ladder" desacoplado que representa o duto, do início até o fim calculando a impedância vista de cada nó até o início do circuito. Depois corre o mesmo circuito "ladder" do fim até o início calculando a impedância vista de cada nó até o fim do circuito. Com base nesse par de impedâncias associadas a cada nó do circuito "ladder", as diversas fontes de corrente aplicadas no circuito podem ser superpostas, obtendo-se os valores de corrente finais que circulam nos trechos longitudinais e transversais do circuito "ladder", bem como as tensões entre os nós e a terra, correspondentes ao vetor  $(V)$  do item (5.3). O número de operações necessárias geralmente é bem menor do que seria necessário para inverter a matriz admitância do circuito "ladder"

## 6.0 CONCLUSÕES

O IT apresenta 5 tipos de situações onde diversos circuitos influenciam simultaneamente um ou diversos dutos isolados. Apresenta comentários sobre as dificuldades técnicas e metodológicas relativas aos 5 casos. Apresentam-se mais detalhes sobre o caso 3, onde pode ocorrer uma situação em que os cabos pára-raios da LT, ao invés de operarem como blindagem, podem reforçar a indução. Apresenta-se ainda um sumário sobre os principais meios de mitigação atualmente em uso.

## 7.0 REFERÊNCIAS

- [1] S.T.Sobral, W.G.Castinheiras, M.Nielsen (PETROBRAS), V.S.Costa (ELETROBRAS), D.Mukhedkar (ECOLE POLYTECHNIQUE DE MONTREAL).  
"Interferences Between Faulted Power Circuits and Communication Circuits or Pipelines- Simplification Using the Decoupled Method" IEEE paper 91 WM 107-3 PWRD, Winter Meeting, 1991, New York
- [2] S.T.Sobral, J.R.Medeiros (FURNAS).  
"Interference Among Overhead Transmission Lines and Pipelines – A New Approach"  
CIGRE-paper 36-83 (SC) 09 IWD, 1983 Copenhagen
- [3] R.Sanz, O.G.Vera (AGUA Y ENERGIA), D.O.C.Brasil, A.M.França (CEPEL), R.Daconti (CHESF), J.R.Medeiros (FURNAS), S.T.Sobral (IESA).  
"Induced Effects Caused by Overhead Transmission Lines on Metallic Structures" CIGRE paper 36-202, 1990, Paris
- [4] S.T.Sobral, C.A.O.Peixoto (FURNAS), D.Mukhedkar (ECOLE POLYTECHNIQUE DE MONTREAL)  
"Ground Potential Distribution on the Neighbourhood of Itaipu Generation Complex"  
IEEE, Summer Meeting, 1985, Vancouver Vol.PWRD-1 JAN 1986 pp:85-90
- [5] S.T.Sobral (IESA), G.P.Fleury, J.R.Villalba (ITAIPU), Dinkar Mukhedkar (ECOLE POLYTECHNIQUE DE MONTREAL)  
"Decoupled Method for studying Large Interconnected Ground Systems Using Microcomputers – Part I – Fundamentals"  
IEEE Summer Meeting, 1986, Cid. México Trans. On Power Delivery, Vol.PWRD-3, N<sup>o</sup>4, OCT 1988 pp 1536-1544
- [6] S.T.Sobral (IESA), G.P.Fleury, J.R.Villalba (ITAIPU), Dinkar Mukhedkar (ECOLE POLYTECHNIQUE DE MONTREAL).  
"Decoupled Method for studying Large Interconnected Ground Systems Using Microcomputers – Part II – Utilization on Itaipu Ground System and Complementary Aspects" IEEE Summer Meeting, 1986, Cid. México Trans. On Power Delivery, Vol.PWRD-3, N<sup>o</sup>4, OCT 1988 pp 1545-1552
- [7] S.T.Sobral (IESA), J.O.Barbosa, J.V.C.Nunes, E.Chinelli, A.Ferreira Netto (LIGHT), D.Mukhedkar (ECOLE POLYTECHNIQUE DE MONTREAL).  
"Ground Potential Rise Characteristics Of Urban Step-Down Substations Fed By Power Cables- A Practical Example"  
IEEE Summer Meeting, 1987, San Francisco IEEE Trans. On Power Delivery, Vol.PWRD-3, N<sup>o</sup>4, OCT 1988 pp 1564-1572
- [8] S.T.Sobral, M.S.Campos, B.Goldman (IESA), V.S.Costa (ELETROBRAS), D.Mukhedkar (ECOLE POLYTECHNIQUE DE MONTREAL)  
"Dimensioning of Nearby Substations Interconnected Ground System"  
IEEE- Summer Meeting, 1987, San Francisco. IEEE Trans. On Power Delivery, Vol.PWRD-3, N<sup>o</sup>4, OCT 1988 pp 1605-1614

- [9] S.T.Sobral, M.S.Campos, B.Goldman (IESA) , V.S.Costa (ELETROBRAS), D.Mukhedkar (ECOLE POLYTECHNIQUE DE MONTREAL) “Análise de Circuitos “ladder” de Parâmetros Concentrados Excitados Por Fontes de Corrente”  
IX SNPTEE- Belo Horizonte, 1987 IT BH/GSE/15
- [10] S.T.Sobral (IESA), C.A.O.Peixoto (FURNAS), D.Fernandes (FURNAS), Dinkar Mukhedkar (ECOLE POLYTECHNIQUE DE MONTREAL).  
“Grounding Measurements at Itaipu Generation Complex Using the Extended Eleck Method” IEEE Summer Meeting, 1986,Cid. México Trans. On Power Delivery, Vol.PWRD-3, N<sup>o</sup>4, OCT 1988 pp 1553-1563 (Este trabalho foi incluído como referência no Standard IEEE-81)
- [11] S.T.Sobral, J.J.H.Santos (IESA), D.Mukhedkar (ECOLE POLYTECHNIQUE DE MONTREAL). “A Proposal For Ground Measurement Techniques in Substations Fed Exclusively by Power Cables” IEEE-Winter Meeting, 1988, New York IEEE Trans. On Power Delivery, Vol.PWRD-3, N<sup>o</sup>4, OCT 1988 pp 1403-1409 (Este trabalho foi incluído como referência no Standard IEEE-81)
- [12] S.T.Sobral, Domar Leite (IESA), M.L.S.Siqueira,J.Ribeiro, C.Celso Brasil Camargo, Duílio D.Figueiredo (ELETROSUL).  
“Ground Parameter Measurements at Four Brazilian Substations in 500 and 230 kV” IEEE paper 90 SM398-8 Summer Meeting 1990, Minneapolis
- [13] Sérgio T. Sobral (ST&SC), A.P.Reis Miranda (Consultor), Sérgio C. Sobral (ONS), Georges Azzam (ST&SC)  
“Conceitos E Procedimentos De Engenharia Que Estão Sendo Revisados” (XIX SNPTEE- Grupo XIII)
- [14] Sérgio T.Sobral (ST&SC), C.A.O. Peixoto, Jorge Amon F. (FURNAS), M.J.Izycki (FURNAS), Geraldo Tavares (UFFE), Alexandre Rigueira (UFFE) “Advantages of Steinmetz Circuit Theory Over Schelkunoff Transfer Impedance Theory”.  
IEEE- artigo aprovado em Março de 2009

## 8.0 - DADOS BIBLIOGRÁFICOS

**Sérgio Toledo Sobral** Graduado: PUC / RJ - Rio de Janeiro, 1964 – Engenheiro Eletricista  
Companhia: ST & SC Serviços Técnicos Ltda. Cargo: Diretor e proprietário

**Sergio Cordeiro Sobral** Graduado UERJ Engenheiro Eletricista (1994), Mestrado PUC/RJ (1997) e MBA PUC/RJ (2006)  
Companhia: Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), desde 2001.  
Cargo: Engenheiro Sênior de Sistema de Potência

**Eduardo Andreis** Graduado: (UFPR) Engenheiro Mecânico (1994).

Companhia: .Companhia Paranaense de Gás, desde 1999 Cargo: Gerente de Operações

**Gláucio Antonio Weigert** Graduado: (CEFET-PR) Tecnólogo em Construção Civil (2003) , (UTFPR) Engenheiro Industrial Elétrico -Eletrotécnico (2005)

Companhia: Companhia Paranaense de Gás..., desde ..2001 Cargo: ..Técnico de Operações 3