

---

**PROGRAMA DIGITAL PARA ANALISAR A INFLUÊNCIA ELETROMAGNÉTICA  
SIMULTÂNEA DE DIVERSAS LT'S SOBRE UM DUTO RAMIFICADO****S.T.SOBRAL\***  
**ST&SC**  
**Brasil****J.AMON.F**  
**Furnas**  
**Brasil****G.M.TAVARES**  
**U.F.F**  
**Brasil****S.C.OBRAL**  
**ST&SC**  
**Brasil****M.J.IZYCKI**  
**Furnas**  
**Brasil**

**Resumo** Este artigo comenta que atualmente é muito comum que um oleoduto que se dirige para o Distrito Industrial de uma cidade, aproxime-se ou cruze diversas LT's de alta tensão que dirigem-se também para o mesmo local. Nesse caso é comum que diversas daquelas LT's conduzam simultaneamente correntes de seqüência zero, no caso de um curto-circuito que ocorra em um barramento de alta tensão de uma SE do Distrito Industrial. O artigo comenta também que é comum que uma LT mantenha-se aproximadamente em paralelo a um tronco de gasoduto de onde partem diversos ramais. Esses ramais alimentam clientes industriais e comerciais, postos de abastecimento, hospitais, hotéis etc. Frequentemente esses ramais cruzam as LT's indutoras com grande proximidade de suas torres e postes. Para contornar esses problemas de simulação, FURNAS está aperfeiçoando o programa digital DECOP, que já estava operando há cerca de 20 anos, para que seja capaz de representar em uma única simulação, a influencia eletromagnética de diversas LT's sobre um tronco de duto ramificado.

**Palavras Chave:** Método Desacoplado- Paralelismo Virtual- Tubos Isolados- Impedâncias Terminais- Propagação de Erros Relativos-Estratificação do Solo

## 1 INTRODUÇÃO

O programa DECOP, em operação há cerca de 20 anos, está sendo revisto dentro de um programa P&D de FURNAS. Como primeira fase, o programa original foi atualizado com as modificações de arquitetura que permitirão chegar ao produto final, descrito neste IT, por meio de extensões do trabalho em curso. O programa DECOP destina-se ao cálculo da diferença de potencial (d.d.p) aplicada no isolamento de uma ou diversas tubulações, instaladas numa faixa de dutos, devido a acoplamentos indutivos e resistivos decorrentes de curto-circuitos em uma LT próxima, ou de diversas LT's que conduzem simultaneamente correntes de defeito. Destina-se também ao cálculo dos potenciais de passo e de toque que surgem na faixa dos dutos.

## 2 CARACTERÍSTICAS FINAIS DE REPRESENTAÇÃO DO PROGRAMA DECOP

Em sua configuração final, o programa DECOP será capaz de representar como um caso único as seguintes situações:

- 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 simultânea em diversas LT's que influenciam o duto mencionado (ver Parte 1 da Figura 1);
- 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);
- Caso idêntico ao anterior agravado pelo fato do circuito duplo receber uma outra LT de circuito duplo, ligada em "tap" em um trecho intermediário da LT (ver Parte 3 da Figura 1);
- Existem vários exemplos de gasodutos com vários quilômetros de extensão que seguem por vias

urbanas mantendo-se a curta distância, ou cruzado 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 gasoduto. Esse geralmente ramifica-se a partir do tronco, podendo cruzar o corredor de passagem das LT's. Esses ramais do gasoduto 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

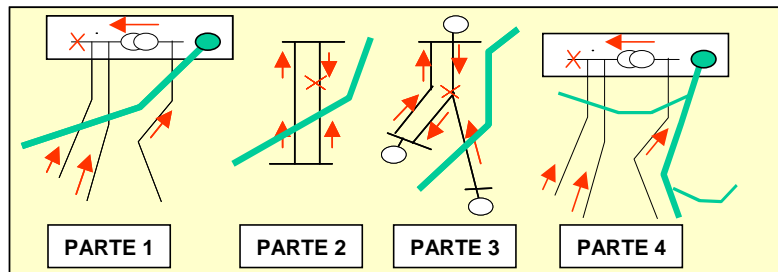


Figura 1 - Situações especiais a serem representadas pelo programa DECOP

### 3 A VANTAGEM DO PROGRAMA USAR A TEORIA DE CIRCUITOS

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

### 4 O FENÔMENO DE 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 em laboratório ou no campo, quando os dados utilizados pelo modelo são obtidos com precisão laboratorial. Isso 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 a 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, extensões de circuitos etc. A solução matricial direta de um circuito extenso, envolvendo acoplamentos eletromagnéticos exige bilhões de operações numéricas para sua solução. Usando dados típicos de engenharia em um modelo de cálculo muito complexo, pode-se obter resultados onde muitos ou todos os algarismos significativos são perdidos e o valor calculado não tem mais relação com o valor medido.

A propagação de erros relativos é uma degradação da informação devido a um número elevado de operações realizadas com os dados, 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.

### 5 EVITANDO O PROBLEMA DOS ERROS RELATIVOS EM CIRCUITOS COMPLEXOS USANDO O MÉTODO DESACOPLADO

Para evitar o problema da propagação dos erros relativos em circuitos complexos, o programa DECOP utiliza o Método Desacoplado, que tem sólido embasamento teórico [1,2,3,4,5,6,7,8] e experimental [9,10,11,12]. O programa evita uma representação matricial direta do circuito acoplado original. O sistema original pode ter milhares de elementos de circuitos correspondentes a centenas de vãos de pára-raios, acoplamentos mútuos com as fases, representação de trechos dos dutos, acoplamentos indutivo entre fases e

pára-raios com os dutos e acoplamentos resistivo 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 medidos se os dados fossem obtidos com precisão laboratorial. O Método Desacoplado faz automaticamente uma redução drástica do número de elementos do circuito, sem modificar sua topologia, substituindo os acoplamentos das fases, cabos pára-raios e torres com o duto por fontes de corrente, aplicadas no circuito “ladder” que representa o duto. O processo mencionado é uma simples aplicação do Teorema de Norton. 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. Assim sendo mesmo utilizando os dados usuais de engenharia, obtém-se resultados próximos aos medidos [1,2,5,7,9].

## 6 ESTRATIFICAÇÃO DO SOLO EM CAMADAS

Alguns artigos técnicos mostram que existem modelos digitais de solo estratificados em camadas horizontais com resistividade homogênea que conseguem reproduzir adequadamente os potenciais produzidos em laboratório por eletrodos instalados em um modelo reduzido de solo, com geometria semelhante. A nosso ver o assunto tem interesse basicamente teórico, pois 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 em um modelo complexo, é muito raro na prática. Além disso, os dados podem ser facilmente modificados por condições climáticas, altura do lençol freático e proximidade de malhas de terra de instalações existentes. O programa DECOP final, terá uma alternativa que permite representar os solos em camadas, para o caso de se pretender fazer pesquisa laboratorial usando o programa.

## 7 NECESSIDADE DE TESTAR OS PROGRAMAS E MODELOS DIGITAIS

Um modelo ou programa digital pode ser considerado confiável para pesquisa se ele obtém resultados próximos a um caso medido em laboratório. O uso do programa para resolver casos semelhantes produz geralmente 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].

## 8 IMPEDÂNCIAS MÚTUAS ENTRE TRECHOS PARALELOS

Quando um trecho do duto é paralelo a um trecho da LT, a impedância mútua entre as fases e o duto pode ser determinada com muita boa precisão, de uma maneira unívoca, usando-se a Teoria de Circuito, sem necessidade de arbitrar caminhos de integração, conforme mostrado no teste do Lactec [13,14].

O cálculo da impedância mútua ( $Z_{FD}$ ) entre eles é feito pela expressão  **$Z_{FD} = 0,0592 + j 0,1736 \log ( D_e / L )$ , em  $\Omega/\text{km}$** . Onde a distância (L), em metros, é a D.M.G (distância média geométrica) entre as fases e o duto.

O parâmetro ( $D_e$ ) é a distância das fases ao condutor equivalente de retorno, situado a uma profundidade ( $D_e$ ), segundo R. Rüdenberg:  $D_e = 658,4 \sqrt{\rho / f}$ , sendo ( $\rho$ ) a resistividade do solo em ohm.m e ( $f$ ) a frequência, em Hz. Da mesma forma a impedância mútua ( $Z_{GW,D}$ ) entre o trecho correspondente de cabos pára-raios e o duto é calculada pela expressão  **$Z_{GW,D} = 0,0592 + j 0,1736 \log ( D_e / L' )$ , em  $\Omega/\text{km}$** , onde ( $L'$ ), é a (D.M.G) entre os pára-raios da LT e o duto.

## 9 IMPEDÂNCIAS MÚTUAS ENTRE TRECHO NÃO PARALELOS

Suponha-se um trecho (a-b) dos cabos pára-raios de uma LT e o trecho correspondente do duto (r-p) (ver Partes 1 e 2 da Figura 2). A (D.M.G) entre os pontos (a) e (r) é ( $L_{ar}$ ). A (D.M.G) entre os pontos (b) e (p) é ( $L_{bp}$ ). Segundo as Referências [1,2,4], se uma dessas distâncias ( $L_{ar}$ ) ou ( $L_{bp}$ ) for no máximo 3 vezes maior que a outra, pode-se supor para efeito do cálculo da impedância mútua que os dois trechos (a-b) e (r-p) são “paralelos virtuais” e estão situados a uma distância equivalente ( $L'$ ), tal que (ver Partes 1 e 2 da Figura 2):

$L'' = \sqrt{(L_{ar}) \cdot (L_{bp})}$ . A impedância mútua entre os trechos de cabos pára-raios e duto é:

$Z_{Gw.D} = 0,0592 + j 0,1736 \log (De / L'')$ , em  $\Omega/km$ . Com procedimento semelhante calcula-se a impedância mútua entre o trecho de fases (a'-b') e o mesmo trecho de dutos (r-p):

$L''' = \sqrt{(L_{ar}) \cdot (L_{bp})}$ . A impedância mútua entre os trechos é  $Z_{F.D} = 0,0592 + j 0,1736 \log (De / L''')$ , em  $\Omega/km$ .

## 10 DISTRIBUIÇÃO DA CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO PELOS CABOS PÁRA-RAIOS

O cabo pára-raios de cada LT que interfere no duto é representado por um circuito “ladder”, terminado pela impedância de aterramento das SE's terminais. A tensão induzida pelas fases sobre os trechos do circuito “ladder” é transformada em fontes de corrente utilizando o Teorema de Norton [1,2,10] (ver parte 2 da Figura 3). Essas fontes de corrente são aplicadas nos terminais dos trechos correspondentes do circuito “ladder”.

Para minimizar a propagação de erros o programa DECOP corre o circuito “ladder” em apreço 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, resultando nos valores de corrente de seqüência zero que circula pelos trechos de cabos pára-raios e pelas torres. O número de operações necessárias para efetuar esses cálculos geralmente é muito menor do que seria necessário para inverter a matriz admitância do circuito “ladder”.

## 11 REPRESENTAÇÃO DAS LT'S E DUTOS

O usuário do DECOP indica as coordenadas (X,Y,Z) referentes ao ponto do solo onde está o centro de cada torre (ou estrutura de apoio) das LT's. Para cada torre o usuário indica também um número código referente ao tipo de torre, que consta de um arquivo geral de tipos de estrutura. Para cada tipo de torre está indicada a posição das fases e dos pára-raios na silhueta típica, uma descrição dos contrapesos, bem como as características elétricas dos cabos pára-raios utilizados. Os dutos são representados pelas coordenadas (X,Y,Z) de cada ponto de inflexão da tubulação. É indicado também pelo usuário um número código referente ao tipo de duto que consta de um arquivo geral, que indica o diâmetro, a espessura do isolamento, o tipo de isolamento e a profundidade a que esta o centro do tubo em relação à coordenada Z do solo.

Assim sendo, o usuário descreve um arquivo inicial de trechos de LT's e de trechos de dutos. Esses trechos serão subdivididos automaticamente pelo programa para formar os trechos de “paralelismo virtual” necessários para calcular as impedâncias mútuas fases/duto e pára-raios/duto.

## 12 ALGORÍTMO BÁSICO DE SUBDIVISÃO DA LT EM TRECHOS DE “PARALELISMO VIRTUAL”

O ponto inicial e final de cada trecho de pára-raios, fases e dutos são representados por coordenadas (X,Y,Z).

- 12.1 O programa toma cada trecho tal como (a-b), do arquivo de cabos pára-raios, e passa dois planos (A) e (B) perpendiculares ao trecho (a-b), passando pelos pontos (a) e (b) (ver Parte 3 da Figura 2). Corre então cada seguimento, tal como (r-s), do arquivo de dutos, verificando se o plano (A) e/ou o plano (B) cortam o seguimento (r-s).
- 12.2 Para cada corte no segmento (r-s), cria-se o novo ponto (p), numerado automaticamente, e o trecho original (r-s) é substituído por dois trechos (r-p) e (p-s), com todas as características do trecho substituído.
- 12.3 O programa toma então cada trecho, tal como (v-f), do arquivo de trechos de dutos, já modificado, e corre o arquivo de trechos de pára-raios, tomando cada trecho, tal como (c-d), por vez. Passa, então, planos (V) e (F), perpendiculares à direção (c-d), pelos pontos (v) e (f) do arquivo de trechos de dutos. Verifica se o plano (V) e/ou o plano (F) cortam o seguimento (c-d). Para cada corte no seguimento (c-d), cria-se um novo ponto (w), numerado automaticamente. O trecho original (c-d) é substituído pelos trechos (c-w) e (w-d), que tem o mesmo valor de corrente no cabo pára-raios calculado pelo programa para o trecho (c-d).

- 12.4 Repete-se o item (a) acima encontrando para cada trecho (a-b) do arquivo de trechos de pára-raios o trecho correspondente (r-p) do arquivo de dutos. Calcula-se a distancia (La), que é a D.M.G entre o ponto (r) do duto e as posições dos cabos pára-raios correspondentes ao ponto (a). Calcula-se a distancia (Lb), que é a D.M.G entre o ponto (p) do duto e as posições dos cabos pára-raios correspondentes ao ponto (b).
- 12.5 Se uma das distancias (La) e (Lb) não for 3 vezes maior que a outra, trata-se de um par de trechos que podem ser considerados de “paralelismo virtual” e a impedância mútua entre eles é calculada como no item (10.0) anterior. Caso contrário, o trecho de pára-raios e o trecho de duto são subdivididos para que as D.M.G atendam a relação menor que 3:1.
- 12.6 Repete-se o mesmo processo para os trechos de “paralelismo virtual” envolvendo fases e dutos.

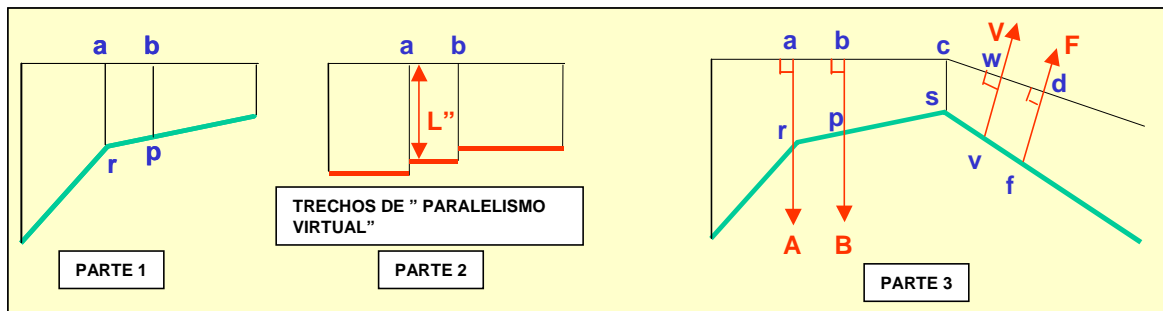


Figura 2 - Trechos de paralelismo virtual e algoritmo de subdivisão de trechos

### 13 CÁLCULO DAS TENSÕES INDUZIDAS EM CADA TRECHO DE PARALELISMO VIRTUAL

Ao fim do processo estarão determinadas todas as impedâncias mútuas entre os trechos de duto e o(s) trecho(s) correspondente(s) das fases e dos cabos pára-raios. Suponha-se que o trecho (30-70) do duto forme pares de “paralelismo virtual” com dois trechos (10-200) e (33-220) das fases e as impedâncias mútuas correspondentes sejam ( $Z_1$ ) e ( $Z_2$ ), em ohms (ver Parte 1 da Figura 3). Os trechos correspondentes das fases são percorridos por correntes de seqüência zero ( $+I_1$ ) e ( $-I_2$ ). O trecho (30-70) do duto forma também pares de “paralelismo virtual” com os trechos (330-380) e (415-490) dos cabos pára-raios e as impedâncias mútuas correspondentes são ( $Z_1'$ ) e ( $Z_2'$ ) em ohms. Os trechos correspondentes dos cabos pára-raios são percorridos por correntes de seqüência zero ( $-I_1'$ ) e ( $+I_2'$ ). A tensão induzida no trecho (30-70) do duto será  $V_{30-70} = I_1.Z_1 - I_2.Z_2 - I_1'.Z_1' + I_2'.Z_2'$ . O mesmo é feito para todos os trechos do duto (ver Parte 1 da Figura 3).

### 14 TRANSFORMAÇÃO DO DUTO EM UM CIRCUITO “LADDER” DESACOPLADO DAS FASES E DOS CABOS PÁRA-RAIOS

Pelo Teorema de Norton, a fonte de tensão ( $V_{30-70}$ ) em série com a impedância ( $Z_{30-70}$ ) do trecho (30-70) do duto, é equivalente a uma fonte de corrente ( $I_{30-70} = - (V_{30-70}) / (Z_{30-70})$ ) em paralelo com a impedância do trecho (30-70). Isso corresponde a retirar a corrente ( $I_{30-70}$ ) do nó (70) e reinjetar o mesmo valor de corrente no nó (30). No final do processo, todos os pontos dos trechos dos dutos estão submetidos a fontes de corrente, que substituem exatamente os acoplamentos do duto com as fases e os cabos pára-raios.

O usuário estabelece o tamanho do vão de circuito “ladder” que vai representar o duto. Vamos supor 10 metros. Supondo-se que o trecho de duto (30-70) tenha 50m, este trecho do duto será representado por um circuito “ladder” de 5 pis com impedâncias longitudinais ( $Z_L$ ) e transversais ( $Z_T$ ). A impedância ( $Z_L$ ) corresponde à impedância longitudinal de 10 m de duto, em ohms. A impedância ( $Z_T$ ) corresponde à impedância transversal de 10 m de duto, levando em conta os componentes resistivo e capacitivo do isolamento do duto (ver Partes 2 e 3 da Figura 3). No final do processo toda a extensão do duto foi substituída por um circuito “ladder” e todos os acoplamentos indutivos foram substituídos por fontes de corrente aplicadas em alguns nós do circuito “ladder”.

### 15 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 o programa DECOP utiliza uma solução que emprega técnicas de circuito “ladder”, conforme descrito a seguir.

## **16 CÁLCULO DO DUTO JÁ DESACOPLADO UTILIZANDO TÉCNICAS DE CIRCUITOS “LADDER”**

O programa DECOP 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”, o efeito das diversas fontes de corrente aplicadas no circuito podem ser superpostas, obtendo-se os valores de corrente que circulam nos trechos longitudinais e transversais do circuito “ladder”, bem como as tensões entre os nós e a terra. O número de operações necessárias geralmente é bem menor do que seria necessário para inverter a matriz admitância do circuito “ladder”.

## **17 CÁLCULO DA ELEVAÇÃO DO POTENCIAL DE TERRA CAUSADA PELAS CORRENTES DE TORRES E CORRENTES DE MALHAS DE TERRA**

Para cada ponto (p) do duto, correspondente a um nó do circuito “ladder” que representa a tubulação, calcula-se a elevação de potencial de terra ( $V_p$ ), aplicada na superfície externa da camada isolante do duto. O parâmetro ( $V_p$ ) caracteriza o acoplamento resistivo agindo sobre o ponto (p), causado por todas as torres que injetam corrente no solo e pelas malhas de terra das SE's terminais. Tem-se que  $(V_T) = \sum (r_i) \cdot (I_i)$ , onde  $(I_i)$  é o valor da corrente injetada no solo em cada torre e na malha da SE terminal, e  $(r_i)$  é a resistência mútua correspondente, determinada em função da distância, da resistividade do solo e da forma do contrapeso ou malha.

## **18 CÁLCULO DO POTENCIAL DE PASSO NAS IMEDIAÇÕES DO DUTO**

Fazendo-se o ponto (p) percorrer a região nas proximidades do duto, pode-se determinar as curvas de potencial de terra na região e determinar os potenciais de passo produzidos.

## **19 D.D.P APLICADA NO ISOLAMENTO DO DUTO**

A d.d.p aplicada no isolamento do duto corresponde à elevação de potencial do metal do duto subtraída da elevação do potencial de terra aplicada na superfície externa do isolamento do duto, caracterizada no item (18). Esse valor não pode ultrapassar um limite, geralmente fixado em 5 kV, para que o isolamento do duto ou o próprio duto não sejam danificados.

## **20 LOCALIZAÇÃO DO CURTO-CIRCUITO QUE PRODUZ A D.D.P MAIS ELEVADA NO ISOLAMENTO**

Um curto-circuito situado que ocorra a 5-10 km do cruzamento da LT com um duto, produz geralmente a maior d.d.p aplicada no duto devido ao acoplamento indutivo. Por outro lado, um curto-circuito que ocorra em uma torre que forma o vão de cruzamento, geralmente produz a maior d.d.p aplicada no isolamento do duto causado por acoplamento resistivo. O curto-circuito que produz a maior d.d.p total devido aos acoplamentos indutivo e resistivo agindo simultaneamente, está geralmente entre os pontos mencionados.

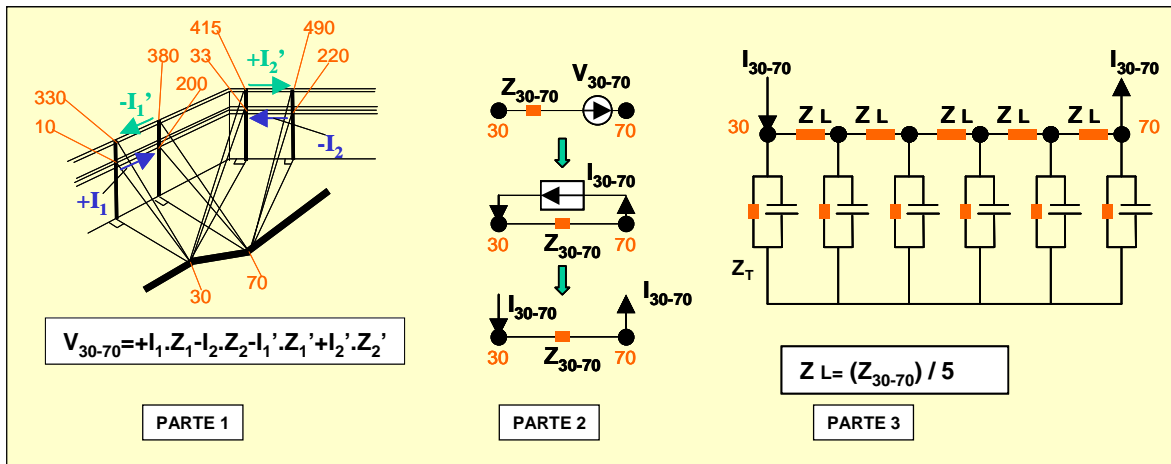


Figura 3 – Desacoplamento de um trecho (30-70) do duto

## 21 CONCLUSÕES

O artigo mostra que programa DECOP, já em operação há cerca de 20 anos, depois de totalmente revisto, permitirá realizar com facilidade todas as simulações requeridas pela atual indústria de transporte via tubulações. Mostra também problemas metodológicos, bem como a vantagem de usar a Teoria de Circuitos ao invés da Teoria de Campo. O artigo mostra ainda como a utilização do Método Desacoplado evita o problema de propagação de erros relativos. O artigo lembra também a necessidade de comparar os resultados de programas e modelos matemáticos com medições de laboratório, testes de campo e experiência operacional.

## REFERÊNCIAS

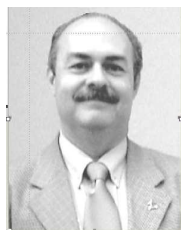
- [1] S.T.Sobral, W.G.Castinheiras, M.Nielsen (PETROBRAS), V.S.Costa (ELETROBRAS), D.Mukhedkar (ECOLE POLYTECHNIQUE DE MONTREAL). "Interferences Between Faulted Power Circuits and Communication Circuits or Pipelines- Simplification Using the Decoupled Method" IEEE paper 91 WM 107-3 PWRD, Winter Meeting, 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 (ITAIPIU), 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 (ITAIPIU), 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 S.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 (Incluido 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 (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 S.Meeting 1990.
- [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] Sobral,Sérgio Toledo (ST&SC), Peixoto,Carlos A.O, Amon, Jorge F,Tavares (FURNAS), Geraldo Martins (UFF), Izycki, Marcos José (FURNAS), Rigueira, Alexandre (UFF). "Advantages of Steinmetz Circuit Theory Over Schelkunoff Transfer Impedance Theory". IEEE Transactions on Power Delivery, October 2009, Volume 24, Number 4, ITPDE5 (ISSN 0885-8977) pp-1876-1882



**Sérgio Toledo Sobral** nasceu em Vitória, Espírito Santo, em 2.08.39. Recebeu seu B.Sc da PUC-Rio em 1964 como Engenheiro Eletricista. Foi Superintendente do Departamento de Estudos de Sistemas e depois Diretor de Projetos (subestações, linhas de transmissão e distribuição) da Internacional de Engenharia S.A Foi Consultor Especial no Projeto Itaipu. Desde 1990 esta com sua própria Companhia, ST&SC Serviços Técnicos Ltda, especializada em estudos e projetos de aterramento e controle de interferências eletromagnéticas. Preparou 67 artigos técnicos apresentados no IEEE, CIGRE, ERLAC e SNPTEE. Preparou e implantou com sucesso critérios de projeto relacionados com aterramento e controle de interferências para 4 importantes Concessionárias brasileiras: FURNAS, COPEL, ESCELSA, ENERSUL.



**Jorge Amon Filho** nasceu no Rio de Janeiro, RJ-Brasil em 8 de Agosto de 1952. Recebeu seu B.Sc. (1975) e seu M.Sc. (1986) em Engenharia Elétrica pela PUC-Rio de Janeiro, Brasil. Trabalha em FURNAS Centrais Elétricas, desde 1976. No momento é o Chefe da Divisão de Estudos para Equipamentos do Departamento de Planejamento da Transmissão. É também membro do CIGRÉ SC A3.



**Geraldo Martins Tavares** nasceu em São Sebastião do Alto, RJ – Brasil 10.05.47. Recebeu seu B.Sc. (1970) e seu M.Sc. (1975) em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil. Recebeu seu D.Sc. (1998) em Engenharia da Produção da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil. É professor do Departamento Elétrico da Universidade Federal Fluminense, em Niterói, Rio de Janeiro, desde 1992. Trabalhou durante 22 anos em Concessionárias Federais brasileiras tais como a CHESF e ELETROSUL, e em consultoras brasileiras tais como a MILDOR KAISER, ENGEXIX e IESA.



**Sérgio Cordeiro Sobral** Engenheiro Eletricista – UERJ – Rio de Janeiro – 1993; Foi professor de Sistemas de Potencia na PUC entre 1996 -1997; Recebeu seu M.Sc. em Power System – PUC – Rio de Janeiro – 1997; Trabalhou para o CEPEL entre 1997-1999. Trabalhou para a Eletrobras entre 1999 - 2001; Trabalhou no ONS desde 2001; Graduado em MBA on Electric Engineering – Rio de Janeiro – 2006.



**Marcos José Izycki** nasceu em São Paulo, SP – Brasil em 8.12. 74. Recebeu seu B.Sc. em Engenharia Elétrica pela UNIP-São Paulo, Brasil (2002). Trabalha em FURNAS Centrais Elétricas, desde 2006. No momento é engenheiro da Divisão de Estudos de Equipamentos do Departamento de Planejamento da Transmissão