UMA FORMULAÇÃO ÍNTEGRO-DIFERENCIAL DE 4A. ORDEM APLICADA À SIMULAÇÃO DE SISTEMAS DE ATERRAMENTO METRO-FERROVIÁRIOS

José Augusto P. da Silva, José Roberto Cardoso, Luiz Natal Rossi, Cleber R. Guirelli

LMAG – Laboratório de Eletromagnetismo Aplicado
PEA – Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Av. Prof. Luciano Gualberto, tr.3, n° 158 CEP 05508-900 São Paulo
Tel: +55-11-818-5124 Fax: +55-11-818-5719
email: cardoso@pea.usp.br

Resumo: Este trabalho apresenta uma nova metodologia aplicada na determinação de potenciais de toque ao longo de uma linha metro-ferroviária eletrificada em corrente contínua, bem como na determinação das distribuições das densidades de corrente de fuga.

Os objetivos principais do trabalho consistem em: avaliar o nível de tensão a que está sujeito o usuário e/ou equipes de Operação e Manutenção nas condições normais de operação e nas condições de defeito e o nível de degradação das instalações físicas provenientes da corrosão eletrolítica nas partes metálicas da própria instalação.

As equações diferenciais, oriundas da formulação matemática desenvolvida, acopladas às equações do circuito alimentador, contemplam o desempenho global de um sistema de aterramento metro-ferroviário. Estas equações diferenciais foram obtidas através do equacionamento de um trecho elementar do sistema de aterramento, representado por parâmetros distribuídos, possibilitando a determinação de um circuito elétrico equivalente para um trecho da linha. Este circuito, associado ao circuito alimentador, possibilita uma avaliação global do sistema, cuja solução, face à sua complexidade, levou-nos ao desenvolvimento de um software denominado PCAM (Programa para Cálculo de Aterramento Metro-ferroviário).

Para validação desse software foram realizadas medições na linha 2 - Verde do Metrô de São Paulo, sendo esses resultados comparados com os obtidos na simulação computacional.

Palavras-chaves: Aterramento, correntes de fuga, potencial de toque, corrosão eletrolítica.

Abstract: A new methodology to evaluate both the touch voltage and the leakage current density distribution along a DC electrified subway or railway track based on a 4th order integral/differential method is presented in this paper.

The main goals of this work concern not only the evaluation of the voltage level to which the users and/or the maintenance crews are submitted but also the degradation level evaluation due to electrical insulation failure caused by the leakage current in the soil.

The 4th order differential equation issued by the distributed model parameters based on the transmission line theory coupled with the network circuit equation, allows us to evaluate the complete performance of the sub/railway grounding systems.

The complexity of the mathematical formulation brought us to develop a software package with a user-friendly interface called PCAM.

This package allows us modeling, for instance, the low insulation in the parts of the track and in the switching machines not only in steady state operation, but also in a short circuit between the supplying conductor and the grounding systems.

The measurements were carried out in line 2 - Green of the Sao Paulo Metropolitan subway in order to validate the presented methodology.

The obtained data were compared with the PCAM results.

Artigo Submetido em 02/10/1998
1a. Revisão em 13/05/1999; 2a. Revisão em 31/08/1999
Aceito sob recomendação do Ed. Consultor Prof. Dr Jorge Coelho

1 INTRODUÇÃO

Uma das grandes preocupações existentes no transporte de massa é a segurança do usuário e do ambiente circunvizinho, na medida em que um acidente pode ter conseqüências sérias e de proporções nem sempre mensuráveis.

Quando se projeta um sistema de transporte sobre trilhos, seja ele uma Ferrovia ou uma linha de Metrô, levamos em consideração os métodos construtivos, as características dos materiais a serem empregados e as peculiaridades do solo onde implantaremos a via permanente.

Dois aspectos são de vital importância quando o sistema está em operação:

- O usuário do sistema deve estar totalmente protegido contra choques elétricos, e

- As correntes de fuga que aparecerem no sistema devem ser controladas.

Tendo como premissas básicas essas duas considerações, o trabalho proposto objetiva fornecer uma avaliação prévia das tensões entre os vários terras de um sistema sobre trilhos e das correntes circulantes entre esses terras.

Assim sendo, foi desenvolvida uma ferramenta computacional que permite avaliar os potenciais existentes no sistema elétrico tanto em condições normais de operação quanto em condições de defeito (curto circuito e baixa isolação entre os terras), e as correntes que aparecem no sistema nessas condições.

2 MODELAMENTO MATEMÁTICO

2.1 Caracterização do sistema de aterramento

A figura 1a mostra um sistema de aterramento metroviário constituído de 3 (três) terras:

TV - terra da via: Constituido pelos trilhos de rolamento, aos quais são conectados os terminais negativos das retificadoras;

TT - terra do túnel: Constituido pelas ferragens da estrutura do túnel ou galeria;

TE - terra externo: Constituido pelo ambiente exterior ao túnel que se estende ao infinito.

O TV e o TT são separados por placas de resistividade controlada (neoprene) sob os trilhos, possibilitando assim um fluxo de corrente elétrica entre estes dois terras e também para o ambiente externo. Este fluxo de corrente que flui para o ambiente é denominado de corrente de fuga, constituindo-se numa fonte de processos corrosivos em meios metálicos instalados na proximidade da via permanente.

O passageiro por sua vez, quando na plataforma, está em contato com o TT e ao adentrar-se na composição estará sujeito a uma diferença de potencial (potencial de toque) existente entre este e o TV, em cujo potencial se encontra também a referida composição.

Desta forma, as grandezas relevantes que este estudo contempla são a distribuição do potencial de toque e a densidade linear de corrente de fuga ao longo de toda a extensão da linha .

Sistema de 3 Terras

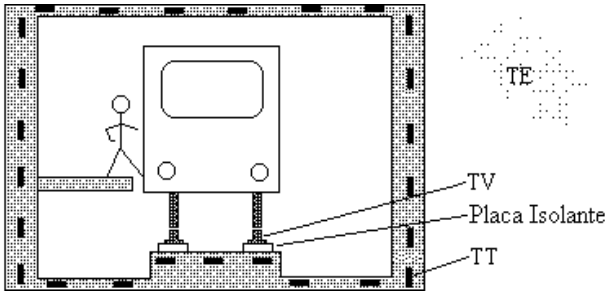

Figura 1a - Trecho de túnel com 3 terras

A figura 1b ilustra uma seção elementar (Δx) de uma via subterrânea com os 3 terras, cujos parâmetros distribuídos característicos são definidos, como seguem:

r_s: Resistência ôhmica dos trilhos por unidade de comprimento (ohm/km);

g_{st}: Condutância de isolação entre o TV e o TT por unidade de comprimento (S/km);

r_t: Resistência ôhmica das ferragens do túnel por unidade de comprimento (ohm/km);

g_{tt}: Condutância de aterramento do túnel por unidade de comprimento (S/km).

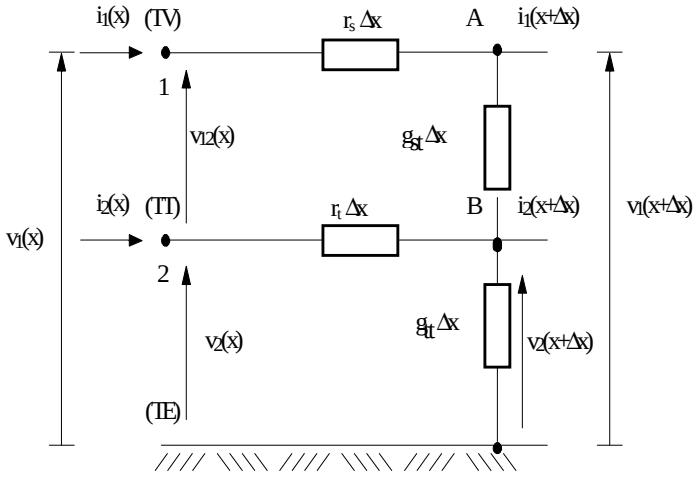

Figura 1b - Circuito equivalente para um trecho elementar Δx com 3 terras

As equações diferenciais que se seguem são obtidas através da aplicação das Leis de Kirchoff no circuito da figura 1b.

$$\frac{di_1(x)}{dx} = -g_{st}v_1(x) + g_{st}v_2(x) \quad (1)$$

$$\frac{di_2(x)}{dx} = g_{st}v_1(x) - (g_{st} + g_{tt})v_2(x) \quad (2)$$

$$\frac{dv_1(x)}{dx} = -r_s i_1(x) \quad (3)$$

$$\frac{dv_2(x)}{dx} = -r_t i_2(x) \quad (4)$$

Após sucessivas derivações chega-se a uma equação diferencial de 4a. ordem do tipo:

$$\frac{d^4 v_1}{dx^4} - (a+c)\frac{d^2 v_1}{dx^2} - (ab - ac)v_1 = 0 \quad (5)$$

onde, $a = r_s g_{st}$; $b = r_t g_{st}$; $c = r_t (g_{st} + g_{tt})$

A solução para esta equação diferencial é do tipo:

$$v_1 = C_1 e^{-\alpha x} + C_2 e^{-\beta x} + C_3 e^{\alpha x} + C_4 e^{\beta x} \quad (6)$$

sendo, $$\alpha = \sqrt{\left(\frac{a+c}{2}\right) + \sqrt{\left(\frac{a-c}{2}\right)^2 + ab}} \quad ;$$

$$\beta = \sqrt{\left(\frac{a+c}{2}\right) - \sqrt{\left(\frac{a-c}{2}\right)^2 + ab}}$$

2.2 Circuito Equivalente para Linha Finita

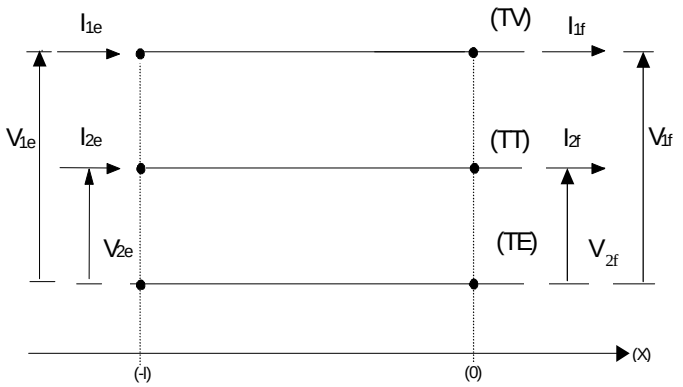

Figura 2 - Trecho finito de linha de comprimento l

Considerando um trecho finito de linha de comprimento (l), como indicado na figura 2,

através de manipulação das equações (1), (2), (3) e (4) e impondo as condições de contorno nos pontos x = 0 e x = (- l), podemos determinar as constantes C1, C2, C3 e C4, resultando:

$$C_1 = k_1 V_{1f} - k_2 V_{2f} + k_3 I_{1f} - k_4 I_{2f} \quad \textbf{(7)}$$

$$C_2 = -k_5 V_{1f} + k_2 V_{2f} - k_6 I_{1f} + k_7 I_{2f} \quad \textbf{(8)}$$

$$C_3 = k_1 V_{1f} - k_2 V_{2f} - k_3 I_{1f} + k_4 I_{2f} \quad \textbf{(9)}$$

$$C_4 = k_5 V_{1f} + k_2 V_{2f} + k_6 I_{1f} - k_7 I_{2f} \quad \textbf{(10)}$$

onde,

$$k_1 = \frac{c-\alpha^2}{2\left(\beta^2-\alpha^2\right)} \; ; k_2 = \frac{\left(c-\alpha^2\right)\left(c-\beta^2\right)}{2b\left(\beta^2-\alpha^2\right)} \; ;$$

$$k_3 = \frac{c-\alpha^2}{2\alpha\left(\beta^2-\alpha^2\right)} r_s \; ; k_4 = \frac{\left(c-\alpha^2\right)\left(c-\beta^2\right)}{2b\alpha\left(\beta^2-\alpha^2\right)} r_t \; ;$$

$$k_5 = \frac{\left(c-\beta^2\right)}{2\left(\beta^2-\alpha^2\right)} \; ; k_6 = \frac{\left(c-\beta^2\right)}{2\beta\left(\beta^2-\alpha^2\right)} r_s \; ;$$

$$k_7 = \frac{\left(c-\alpha^2\right)\left(c-\beta^2\right)}{2b\beta\left(\beta^2-\alpha^2\right)} r_t$$

Com o objetivo de se utilizar a Teoria dos Hexapolos, podemos expressar as correntes no fim da linha como uma função das tensões e das correntes no início, resultando:

$$I_{1^e} = \frac{1}{r_s}\left[\alpha C_1 e^{\alpha l} + \beta C_2 e^{\beta l} - \alpha C_3 e^{-\alpha l} - \beta C_4 e^{-\beta l}\right] \quad \textbf{(11)}$$

Como $\operatorname{senh}\alpha l = \frac{e^{\alpha l} - e^{-\alpha l}}{2}$ e $\cosh\alpha l = \frac{e^{\alpha l} + e^{-\alpha l}}{2}$,

podemos escrever, após algumas passagens matemáticas:

$$I_{1e} = \left(\frac{2\alpha}{r_s} k_1 \operatorname{senh}\alpha l - \frac{2\beta}{r_s} k_5 \operatorname{senh}\beta l\right) V_{1f} +$$
$$-\left(\frac{2\alpha}{r_s} k_2 \operatorname{senh}\alpha l - \frac{2\beta}{r_s} k_2 \operatorname{senh}\beta l\right) V_{2f} +$$
$$+\left(\frac{2\alpha}{r_s} k_3 \cosh\alpha l - \frac{2\beta}{r_s} k_6 \cosh\beta l\right) I_{1f} +$$
$$-\left(\frac{2\alpha}{r_s} k_4 \cosh\alpha l - \frac{2\beta}{r_s} k_7 \cosh\beta l\right) I_{2f}$$

Fazendo:

$$A = \frac{2\alpha}{r_s} k_1 \operatorname{senh}\alpha l - \frac{2\beta}{r_s} k_5 \operatorname{senh}\beta l$$

$$B = \frac{2\alpha}{r_s} k_2 \operatorname{senh}\alpha l - \frac{2\beta}{r_s} k_2 \operatorname{senh}\beta l$$

$$C = \frac{2\alpha}{r_s} k_3 \cosh\alpha l - \frac{2\beta}{r_s} k_6 \cosh\beta l$$

$$D = \frac{2\alpha}{r_s} k_4 \cosh\alpha l - \frac{2\beta}{r_s} k_7 \cosh\beta l$$

Resulta:

$$I_{1e} = AV_{1f} - BV_{2f} + CI_{1f} - DI_{2f} \quad \textbf{(12)}$$

Essa expressão nos sugere representar um trecho finito de linha (l) por um hexapolo como mostrado na figura 3.

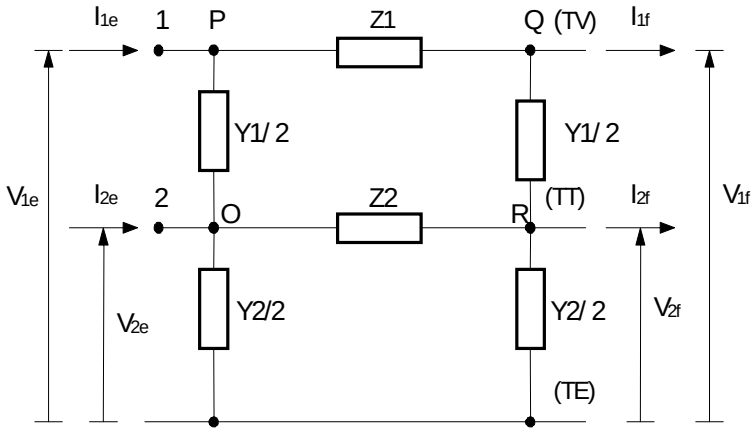

Figura 3- Hexapolo equivalente

Determinando-se I_{1e} a partir da solução do circuito da figura 3, em função dos parâmetros (Z_1, Z_2, Y_1 e Y_2) obtemos:

$$I_{1e} = V_{1f}\left[\frac{Y_1}{2} + \frac{Y_1}{2} + \frac{Y_1^2 Z_1}{4} + \frac{Y_1^2 Z_2}{4}\right] -$$
$$-V_{2f}\left[\frac{Y_1}{2} + \frac{Y_1}{2} + \frac{Y_1^2 Z_1}{4} + \frac{Y_1^2 Z_2}{2} + \frac{Y_1 Y_2 Z_2}{4}\right] + \quad \textbf{(13)}$$
$$+I_{1f}\left[1 + \frac{Y_1 Z_1}{2}\right] - I_{2f}\left[\frac{Y_1 Z_2}{2}\right]$$

Identificando as equações (12) e (13), obtemos os parâmetros do circuito equivalente, resultando:

$$A = \frac{Y_1^2 Z_1}{4} + \frac{Y_1^2 Z_2}{4} + 2\frac{Y_1}{2} \quad \textbf{(14)}$$

$$B = \frac{Y_1^2 Z_1}{4} + \frac{Y_1^2 Z_2}{2} + \frac{Y_1 Y_2 Z_2}{4} + 2\frac{Y_1}{2} \quad \textbf{(15)}$$

$$C = \frac{Y_1 Z_1}{2} + 1 \quad \textbf{(16)}$$

$$D = \frac{Y_1 Z_2}{2} \quad \textbf{(17)}$$

ou ainda,

$$\frac{Y_1}{2} = \frac{A}{D + C + 1} \quad \textbf{(18)}$$

$$Z_2 = \frac{D(D + C + 1)}{A} \quad \textbf{(19)}$$

$$\frac{Y_2}{2} = \frac{B - A}{D} \quad \textbf{(20)}$$

$$Z_1 = \frac{(C-1)(D+C+1)}{A} \quad \textbf{(21)}$$

Assim sendo, à semelhança do procedimento seguido nos estudos das LT's, a cada trecho uniforme do sistema de aterramento, no qual seus parâmetros são constantes, associamos um circuito igual ao indicado na Figura 3. Desta forma, o circuito equivalente final do sistema de aterramento será constituído de uma associação em cascata de diversos circuitos representativos de cada trecho de linha.

Adicionando-se as retificadoras, a catenária (ou terceiro trilho) e as composições nas suas posições correspondentes do circuito equivalente final, chegamos a uma rede, cuja solução fornece as grandezas procuradas.

3 O SOFTWARE

3.1 . Análise em regime permanente

A figura 4 mostra o circuito equivalente para um trecho finito de uma linha, contemplando a presença do alimentador e das fontes de corrente representativas das retificadoras ou das composições.

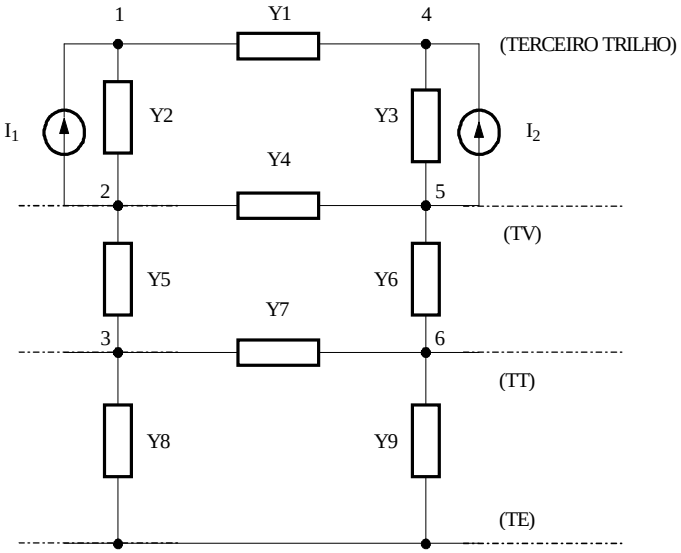

Figura 4 - Circuito equivalente para um trecho de linha

Com o objetivo de representar os elementos que compõem o trecho em questão, usamos a seguinte metodologia:

a) Cada trecho do sistema de aterramento é representado pelo hexapolo equivalente da figura 3.

b) A retificadora é representada pelo Norton equivalente.

c) A composição é representada por uma fonte de corrente ideal, cuja intensidade corresponde à corrente absorvida.

d) O condutor de alimentação (catenária ou terceiro trilho) é representado através da sua resistência quilométrica em (ohms/km).

De posse de todos esses parâmetros, os potenciais nos nós do circuito são determinados através da resolução da equação matricial oriunda da Análise Nodal:

[Y] * [V] = [I]

De posse dos potenciais nodais, a avaliação do potencial de toque (ddp entre TV e TT) é trivial. A densidade de corrente de fuga é obtida, ponto a ponto, multiplicando-se a diferença de potencial entre os terras considerados pela condutância por unidade de comprimento do trecho correspondente.

3.2 Análise em condição de defeito

3.2.1 Curto-Circuito

O curto circuito no sistema é modelado supondo-se que dois pontos, um na catenária e outro no terra da via (TV), são conectados diretamente.

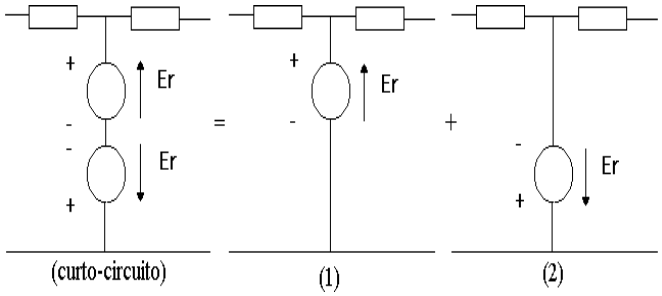

Figura 5 - Simulação de curto-circuito numa retificadora genérica

Este defeito é avaliado aplicando-se o Teorema da Superposição, como mostrado na figura 5, na qual o curto-circuito é modelado através de duas fontes de tensão em oposição, cuja f.e.m. é a igual ddp entre os pontos curto-circuitados antes da falta.

O circuito 1 da figura 5, corresponde à condição normal de operação. O circuito 2 corresponde à contribuição do curto-circuito, que também é resolvido por Análise Nodal.

Superpondo-se os efeitos, determinam-se as tensões e as correntes envolvidas no defeito.

3.2.2 Baixa isolação

O fluxo contínuo de correntes de fuga pelas partes metálicas da via permanente induz um processo corrosivo, cujos resíduos podem reduzir a resistência de isolação entre o TV e o TT, a qual é caracterizada pela condutância de isolação (g_{st}) existente entre os terras, agravando o referido processo corrosivo.

Assim sendo, este defeito é simulado através da alteração dos valores desta condutância nas seções da linha onde o problema se apresenta.

4 VALIDAÇÃO DO MODELO

Para testar a consistência da ferramenta desenvolvida, foram realizadas várias simulações do ramal Paulista da linha Madalena/Oratório do Metrô de São Paulo e, esses valores comparados com os obtidos nas medições efetuadas, quando um trem percorreu a linha por 3 horas com esse único objetivo.

Essa linha de Metrô tem 7.932m de extensão, possui 8 estações e interliga-se com a linha Jabaquara/Tucuruvi nas estações Paraíso e Ana Rosa, como ilustrado na figura 6.

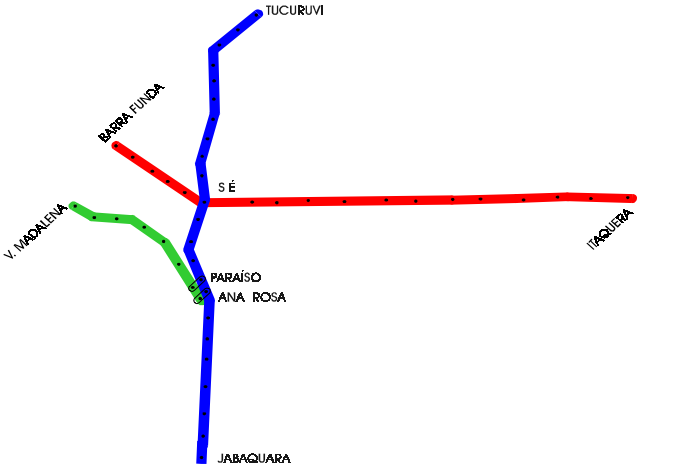

Figura 6 - Rede básica do Metrô de São Paulo (abril/99)

Os parâmetros característicos deste sistema foram calculados, como segue:

1. Foram levantadas as estratificações do solo, ao longo da linha, através de medições de resistividade por processo clássico, nos canteiros de obra das 8 estações.

2. Através destas medições e por levantamento estatístico, foi estimada uma estratificação representativa para toda a extensão da linha.

3. Os parâmetros do sistema de aterramento foram calculados com o auxílio do software LMAG-2D, baseado no Método dos Elementos Finitos, utilizando-se o procedimento indicado nos itens 1 e 2 e dados obtidos junto aos fabricantes, temos:

Resistência longitudinal do terceiro trilho	4,25 mΩ/km
Resistência longitudinal do TV	10 mΩ/km
Resistência longitudinal do TT	190 mΩ/km
Condutância transversal TV/TT	0,03 S/km
Condutância transversal TT/TE	0,333 S/km
F.e.m. da retificadora	825 V
Resistência interna da retificadora	12,5 mΩ

Os valores máximos das tensões medidas entre o TV e o TT variaram entre –11V e 28V na condição de partida da composição (I=5.000 A).

A figura 7 representa o potencial de toque e as densidades de corrente de fuga entre os terras quando um trem parte da estação Ana Rosa (condição do ensaio).

No ensaio realizado durante a condição de pico (6 trens circulando) foram novamente efetuadas medições em diversos pontos da linha; as tensões encontradas entre o TV e o TT variaram entre - 7V e 20V.

A figura 8 apresenta o potencial de toque e as densidades de corrente de fuga obtidas através da simulação no horário de pico.

Observa-se que os valores extremos do potencial de toque obtido por simulação são da ordem de grandeza dos valores medidos.

As diferenças obtidas são inerentes da dificuldade de precisão em medições em sistemas de aterramento, no qual uma série de variáveis fogem ao controle da equipe de medição, bem como da hipótese adotada, neste caso, de uniformidade dos parâmetros em toda a extensão da linha.

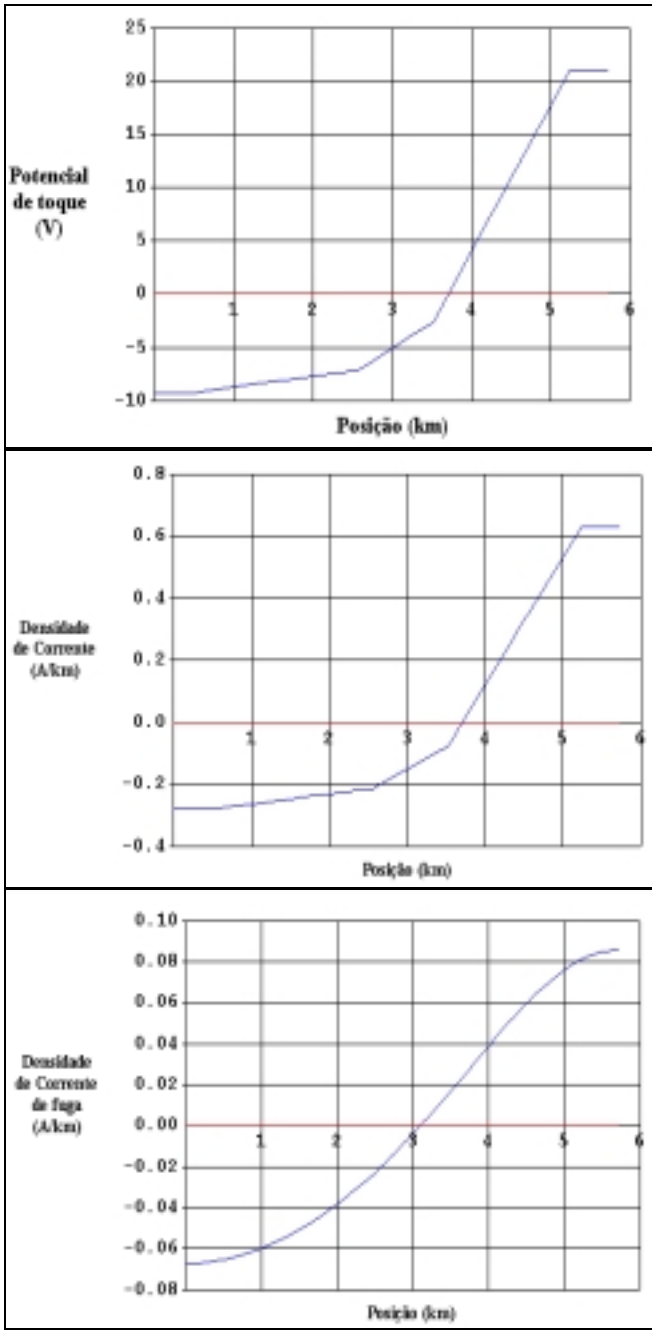

Figura 7 - Trem partindo da estação ANA ROSA

5 CONCLUSÕES

Foi apresentada uma metodologia integro-diferencial de 4a. ordem para a avaliação da distribuição de potencial de toque ao longo de uma linha metro-ferroviária para um dado carregamento do sistema de tração. A não homogeneidade do sistema, face às suas dimensões, é contemplada na formulação, possibilitando uma análise mais fiel do comportamento deste quando energizado. A comparação entre os valores máximos obtidos através da simulação e dos ensaios, atendem aos requisitos de engenharia para efeitos de garantia da segurança pessoal. A ferramenta computacional desenvolvida pode ser aplicada na fase de concepção do sistema de tração, para efeitos de dimensionamento dos equipamentos de proteção, como também em sistemas em operação, na análise de alternativas de modificações oriundas de expansões.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

FUMI, A. e NANNARONE, G. (1984). Le corrente disperse ed i pericoli di corrosione nei ferri di armatura dei

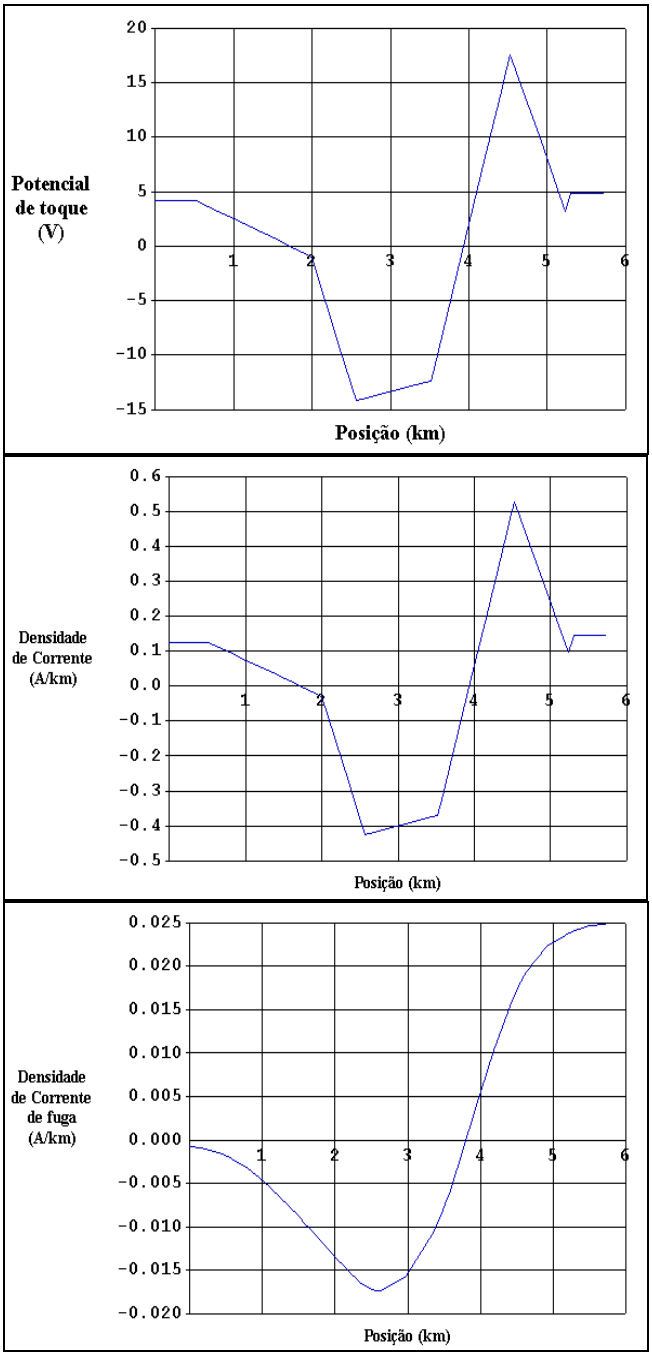

Figura 8 - Caso do horário de pico

viadotti e della gallerie. *Ingegneria Ferroviaria*, (Mag.), pp. 251-258.

STEVENSON JUNIOR, W.D. (1974). *Elementos de análise de sistemas de potência*. McGraw-Hill do Brasil, São Paulo.

CARDOSO, J. R. (1992). Análise de sistemas de aterramento de instalações metroviárias. *Engenharia*, n. 488, pp.93-96.

FAVRIN, W. e ALONSO, N. (1988). *Isolação elétrica de AMV's do Metrô de São Paulo*. Apresentado ao II Encontro Nacional de Trilho, Juiz de Fora.

GIURIATI, M. e FREIRE, G.A.L.M. (1983). *Métodos para minimização das correntes de fuga e medições para controle***.** São Paulo, Companhia do Metropolitano de São Paulo, v.1.

GIURIATI, M. (1982). Orientação dada ao projeto das obras civis no Metrô de São Paulo para minimização das correntes de fuga (linha Norte-Sul). *In*: Giuriati, M. e Freire, G.A.L.M., *Métodos para minimização das correntes de fuga e medições para controle*, Companhia do Metropolitano de São Paulo, v.2, trabalho no. 3.

CARDOSO, J.R. (1989). *Modelamento do sistema de aterramento do Metrô de São Paulo*. Figueiredo Ferraz Eng. de Projetos, documento interno.

VDE 0115/3.65 *Normas para ferrovias elétricas*. Título original, *Bestimmugen für elektrische Bahnen*. Tradução da Companhia do Metropolitano de São Paulo, por Jensch, E.C.F.

VDE 0150/3.65 *Normas para proteção de encanamentos e cabos contra corrosão devido a correntes de dispersão oriundas de instalações de corrente contínua***.** Título original, *Leitsätze zum Schulz von Rohrleitungen und Kabeln gegen Korrosion durche Streuströne aus Gleichsstromanlagen*. Tradução da Companhia do Metropolitano de São Paulo, por Jensch, E.C.F.

VÖV 04.740.5 *Recomendações para medidas a tomar para reduzir o perigo da corrosão elétrica devido a correntes de dispersão e para execução de medidas de proteção contra a permanência de tensões de contato excessivamente altas em túneis para ferrovias de corrente contínua.*

ANSI/IEEE 80 (1986). *Guide for safety AC substation grounding*, New York, IEEE.

RAMOS, D.S. e DIAS, E.M. (1982). *Sistemas elétricos de potência*: regime permanente. vol. 2, Guanabara Dois, Rio de Janeiro.

DANTAS, M.D. (1970). *Elementos de equações diferenciais*. Ao Livro Técnico, Rio de Janeiro.

HOCQUET, R. (1980). Courants vagabonds: corrosion et moyens de protection. *Revue Génerale de l'Electricité*, (Jan.), v.89, n.1, pp.23-26.

GUIRELLI, C.R. e LIMA, C.R. (1993). *Programa para análise de sistemas de aterramento de instalações metroviárias*. São Paulo, EPUSP. Apresentado à disciplina PEA-600.

CARPENTER, D.C. e Hill, R.J. (1993). Continuous-function ground conductivity model for the determination of electrical railway earth conductance. *IEEE transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v.31, Iss.5, pp.953-960.

FINZI, V. e PICASSO, M. (1978). Le corrosioni elletrolitiche delle rotaie sulla linea succursale dei Giovi. *Ingegneria Ferroviaria*, (Giug.), pp.537 - 552.

FINZI, V. (1990). Le corrosioni elletrolitiche nelle armature del cemento armado. *Ingegneria Ferroviaria*, (Ago.), pp.565 - 571.

BREGOLI, G.; PALLOTTA M. e PATRIARCA, M. (1994). La corrosioni nelle opere in Terra Armata, a sostegno di linee ferroviarie in c.c. *Ingegneria Ferroviaria*, (Apr.), pp.219 - 230.

MALDONADO, P.D. (1994). Correntes de fuga e a corrosão eletrolítica: uma contribuição ao seu controle. *Anais do 1º Congresso Internacional de Material Rodante e Via Permanente*, 1º, Brasília. *Anais* Brasília, CB 06 ABNT. pp.130-149.

WELLSCH, J. e Neto, V.L. (1994). Proteção contra efeitos provocados por correntes de fuga. *Anais do 1º Congresso Internacional de Material Rodante e Via Permanente*, 1º, Brasília, 1994. *Anais* Brasília, CB 06 ABNT. pp.439 - 459.

PEREIRA DA SILVA, J. A.; CARDOSO, J. R. e GUIRELLI, C. R. (1997). A new methodology to evaluate grounding systems performance for subways and railways. World Congress on Railway Research (WCRR-97), Florença, Itália, vol. C, pp. 119 - 125.

PEREIRA DA SILVA, J. A. (1997). *Uma Nova Metodologia para a Avaliação de Sistemas de Aterramento Metro-Ferroviários.* Tese de Doutoramento, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, EPUSP, São Paulo - SP.

CARDOSO, J.R. (1994). *FEM Modelling of Grounded System with Unbounded Approach*, USA, IEEE Transactions on Magnetics, V.30 No. 5.