

ANÁLISE COMPARATIVA, VIA ATP, DA EFICIÊNCIA DE CABOS DE INSTRUMENTAÇÃO BLINDADOS QUANDO SE ATERRA UMA E AMBAS AS EXTREMIDADES DA BLINDAGEM

J. SAAD Jr.*
Cepel
Brasil

J. C. SALARI
Cepel
Brasil

R. M. AZEVEDO
Cepel
Brasil

M.V. GODOY
Chesf
Brasil

Resumo – O trabalho proposto objetiva demonstrar, de forma didática, os efeitos do aterramento das blindagens de cabos de supervisão e controle que se interligam a equipamentos do processo sujeitos a diferenças de potencial de terra a partir de descargas atmosféricas, faltas e manobras de seccionadoras. Estas diferenças de potencial são transferidas para os instrumentos interligados a estes cabos, principalmente na forma de surtos de tensão de modo comum que podem destruir o isolamento do transformador de entrada do instrumento. Esta condição ocorre, sobretudo, com as interligações de TPs e TCs de linha aos equipamentos a eles associados, como relés de proteção e remotas de aquisição de dados, com consequências que poderão ser graves para a planta no caso de relés de proteção. O trabalho objetiva elucidar as regras de aterramento da blindagem em cabos de controle e automação, apresentando uma simulação de cabo de instrumentação blindado típico de interligação de TPC a relé de proteção, onde se quantifica, através de simulação digital com o ATP – Alternative Transient Program –, o nível de tensão gerado na entrada do equipamento para cada condição de aterramento deste cabo.

Palavras chave: Compatibilidade Eletromagnética – EMC – CEM – Blindagem de cabos de controle

1 INTRODUÇÃO

Os TPs e TCs de linha caracterizam-se por estarem próximos de fontes de perturbações como pára-raios de linha, disjuntores e seccionadoras, o que facilita o acoplamento de altos níveis de perturbação em modo comum. As suas características construtivas de interligação capacitiva à linha de alta tensão, bem como a possibilidade de ter o seu circuito secundário aterrado localmente, reforçam esta condição de forte acoplamento de perturbações de modo comum aos instrumentos que recebem estes sinais. Ocorre que a isolação dos instrumentos às perturbações impulsivas de modo comum é limitada normalmente em 4 kV [1], [2] e pode ser rompida na presença de surtos superiores a este valor, sendo, portanto, fortemente recomendável a adoção de medidas que reduzam a amplitude deste tipo de perturbação. Consequentemente, em subestações de alta tensão, é praxe a utilização de cabos blindados para a sua interligação à instrumentação na sala de controle ou casas de relés [3]. Entretanto, devido ao desconhecimento das técnicas corretas de compatibilidade eletromagnética (EMC), frequentemente observa-se prática equivocada de aterramento em uma única extremidade da blindagem do cabo, caso apenas justificado a partir de situações distintas das interligações de TPs e TCs de linha.

O propósito da simulação deste trabalho, via emprego do ATP – Alternative Transient Program –, um programa computacional para simulação de transitórios eletromagnéticos gratuito e bastante difundido [4], é demonstrar o mecanismo básico de acoplamento de perturbações em modo comum, bem como as formas de reduzi-lo, sendo o aterramento de ambas as extremidades de uma blindagem um eficiente recurso para este propósito. Neste caso específico, a simulação apresenta a grande alteração no acoplamento de tensão em modo comum na entrada do instrumento ao se alterar o aterramento da blindagem.

Cabe ressaltar que, como a grande maioria das modelagens, esta apresenta simplificações que resultam em valores calculados da tensão desenvolvida na entrada do instrumento distintos daqueles encontrados nas situações reais de instalação. Entretanto, como os principais mecanismos de acoplamento de perturbação encontram-se presentes nesta modelagem, que é facilmente implementada com modelos disponíveis no ATP, a mesma é eficaz na representação e comprovação da atenuação da perturbação no caso do aterramento em ambas as extremidades.

O trabalho procurará deixar claro, também, os casos onde são recomendados o aterramento em uma única extremidade, bem como a importância do emprego do “cabo guarda” (ou de aterramento) nas canaletas. Como principal ganho deste trabalho, o mesmo permitirá mostrar o grande prejuízo no desempenho elétrico de cabos blindados, que normalmente têm custo muito superior aos cabos sem blindagem, se aterrados inadequadamente. Com isso espera-se um melhor entendimento por parte das empresas do Setor, visando o maior retorno possível dos custos dos cabos blindados, em termos de confiabilidade para o sistema.

2 ACOPLAMENTO DA PERTURBAÇÃO DE MODO COMUM ATRAVÉS DO CABO

A figura 1 representa um TPC em cujas cercanias pode haver uma descarga atmosférica direta, ou uma injeção de corrente a partir de um pára-raios de linha. A sua interligação com o instrumento associado é feita com um cabo blindado, e a figura representa as possibilidades de aterramento desta blindagem (vide símbolos “?”). Observa-se a distribuição de correntes para o solo a partir do cabo de aterramento, na medida em que se afasta do TPC. Esta distribuição é feita de forma tão mais decrescente quanto maior for a frequência da componente da corrente injetada, justificando o perfil do potencial igualmente decrescente representado naquela figura. Este mecanismo caracteriza o acoplamento condutivo ou por impedância comum, um dos responsáveis pela diferença de potencial de terra. Este potencial apresenta-se como valor de modo comum a ser rejeitado na isolação de entrada do instrumento, normalmente feito através de um transformador de isolamento.

Como o objetivo é a redução da tensão de modo comum que se apresenta sobre a isolação de entrada do instrumento, compatibilizando-a com o seu limite de suportabilidade, podemos simplificar a representação tornando o circuito secundário do TPC como sendo um circuito unifilar. Desta forma, facilita-se a visualização do acoplamento desta tensão de modo comum, bem como a visualização das formas de redução. A figura 2 apresenta este modelo unifilar. Observe-se que o circuito é aterrado no local do TPC, obedecendo à condição de aterramento do neutro do secundário do transformador.

Prosseguindo-se na análise da geração de tensão de modo comum, a figura 3 apresenta o loop formado pelo cabo de sinal e o cabo da malha de terra da subestação. Este loop enlaça o campo magnético predominantemente gerado pela corrente que percorre o cabo da malha de terra, gerando um fluxo total cuja derivada temporal também forma uma tensão de modo comum, que recairá sobre a mesma isolação de entrada do instrumento. Trata-se, portanto, do acoplamento magnético ou indutivo.

O emprego de um cabo de aterramento paralelo (CAP) ao longo do cabo de instrumentação, conforme apresentado na figura 4, constitui-se em uma forma de se reduzir os acoplamentos condutivo e indutivo. O CAP normalmente tem a mesma bitola do cabo de aterramento, deve ser lançado o mais próximo possível dos cabos de instrumentação, e deve ser interligado à malha de terra nas extremidades (perto do TPC em um lado e na casa de relés/controlador no outro lado). Graças ao aterramento em ambas as extremidades, o CAP permite uma circulação de corrente a partir da injeção de corrente na malha de terra. Observa-se que, nesta nova condição, a corrente do CAP injetada na outra extremidade reduz a diferença entre a tensão do terra do TPC e do terra junto à instrumentação. Ou melhor, o transiente injetado no circuito de sinal é igualmente injetado no CAP, resultando em uma redução na diferença de potencial entre o circuito de sinal e o terra local do instrumento, que recebe este transiente pelo CAP. Entretanto, a principal redução da tensão de modo comum sobre o isolamento de entrada ocorre pela redução do fluxo total enlaçado pelo loop formado pelo cabo de instrumentação e o CAP. Quanto mais próximo estiver o CAP do cabo de sinal, menor o fluxo enlaçado e, conseqüentemente, a tensão de modo comum. *Porém, isto só ocorrerá na condição de aterramento nas extremidades, de forma a criar este loop de menor área. Qualquer uma das extremidades suspensa remeterá ao caso da figura 3, onde a tensão desenvolvida no isolamento de entrada do instrumento é o resultado do enlace de todo o fluxo do grande loop formado entre cabo de instrumentação e malha de terra. A redução do acoplamento condutivo também dependerá do aterramento de ambas as extremidades.*

A otimização deste recurso se dá ao utilizarmos uma blindagem como CAP, conforme ilustrado na figura 5. Neste caso, o fluxo residual entre os cabos internos e a blindagem seria nulo (idealmente), a partir do fato de que a corrente de modo comum que percorre a blindagem gera um campo magnético externo a si, logo não enlaçado pelo loop interno formado entre os cabos internos e esta blindagem. A inexistência de fluxo residual no loop interno representa a inexistência de indução de tensão de modo comum. Ocorre que, na realidade, uma fração do campo magnético externo gerado pela corrente superficial da blindagem poderá se localizar no loop interno (blindagem e os condutores internos), em maior ou menor grau, dependendo das características construtivas desta blindagem. Este fenômeno determina uma pequena indução de tensão de modo comum a partir da corrente de superfície da blindagem, indução esta diretamente proporcional ao comprimento do cabo. Define-se como “impedância de transferência” [5] do cabo (Z_{t_cm}) a relação entre a tensão induzida (V_{ind_cm}) no circuito interno e a corrente de superfície da blindagem (I_{blind}). Este parâmetro é um fator de qualidade de cabos blindados, é definido por metro, e apresenta uma componente resistiva e uma componente indutiva ($Z_{t_cm} = V_{ind_cm} / I_{blind} = R_t + j \omega L_{cm}$). É um parâmetro raramente apresentado pelos fabricantes, apesar de ser útil para o cálculo da interferência acoplada ao instrumento de medição a partir das correntes de superfície impostas por fatores externos. O conceito de impedância de transferência pode ser aplicado a qualquer tipo de CAP, não apenas aos cabos blindados, e permite avaliar o grau de acoplamento de tensão de perturbação em um circuito a partir da circulação de corrente de modo comum em um CAP. A figura 6, obtida da recomendação IEC61000-5-2 [5], apresenta alguns tipos de CAPs e as respectivas impedâncias de transferência. Deve ser observado que estamos tratando neste trabalho de cabos blindados com um par (ou mais) de condutores internos. Em cabos coaxiais de comunicações, a tensão induzida no único condutor central se somará ao sinal, sendo, portanto, considerada como uma tensão de modo diferencial. Neste caso a impedância de transferência é representada simplesmente como

$$Z_t = V_{ind} / I_{blind} = R_t + j \omega L .$$

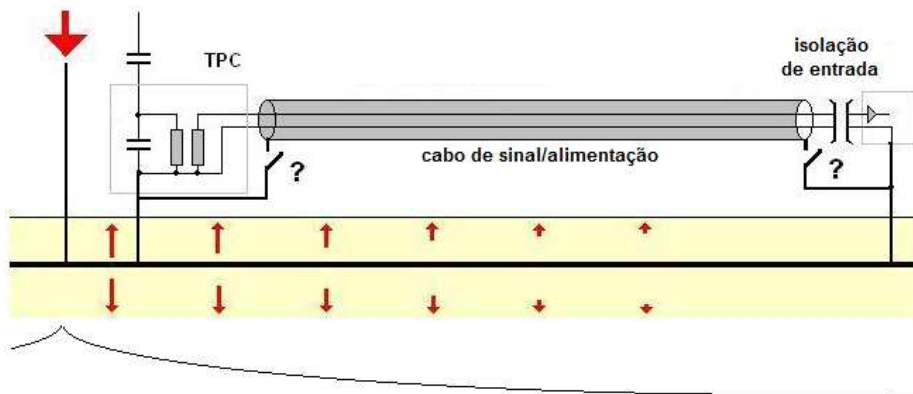


Fig. 1 – Modelo para a demonstração dos efeitos do aterramento da blindagem de cabos de supervisão e controle que se interligam a equipamentos do processo sujeitos a perigosas diferenças de potencial de terra.

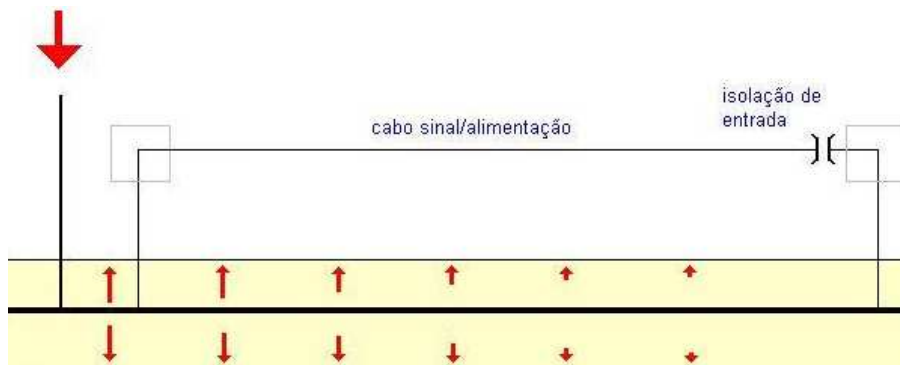


Fig. 2 – Representação unifilar para simulação do acoplamento em modo comum.



Fig. 3 – Representação do acoplamento magnético da perturbação em modo comum

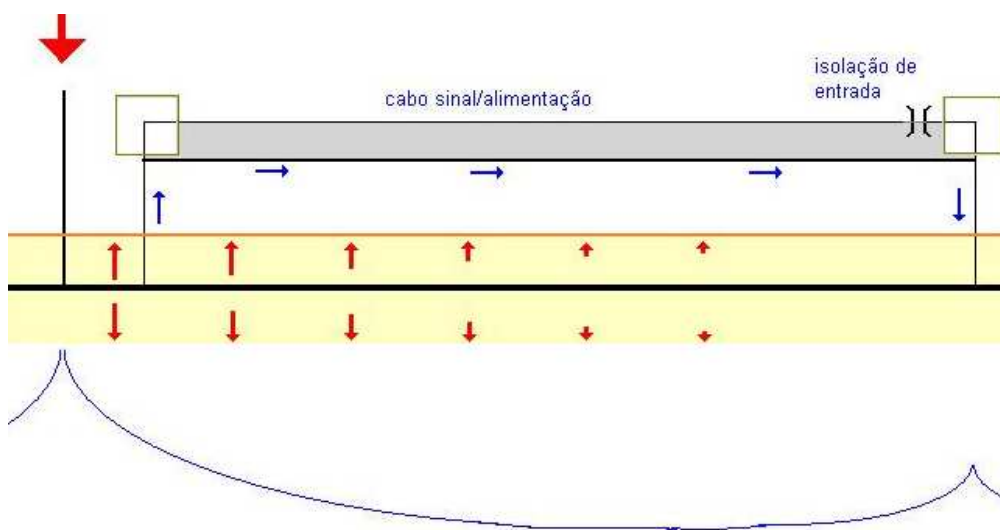


Fig. 4 – Representação dos efeitos de um cabo de aterramento paralelo (CAP)

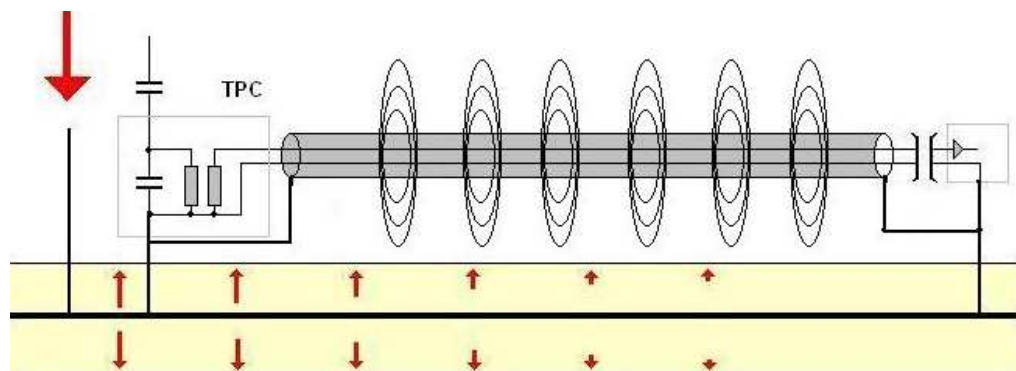


Fig. 5 – Representação de par blindado

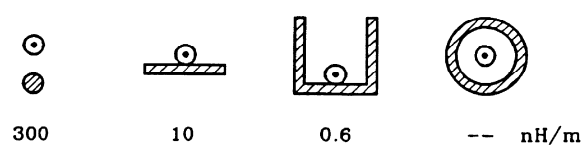


Fig. 6 – Formatos de blindagens e respectivas impedâncias de transferência

Cabe acrescentar que, no caso de par blindado conforme apresentado na figura 5, o pequeno campo magnético no interior da blindagem, responsável pela indução de tensão de modo comum entre os cabos e a blindagem, também pode induzir, entre os condutores internos, uma tensão que se somará ao sinal que os percorre. Esta tensão, portanto, se apresenta como uma tensão de modo diferencial e, pelo fato de ser um mecanismo unicamente indutivo, a relação $Z_{t_dm} = V_{ind_dm} / I_{blind} = j \omega L_{dm}$ é válida e, também, medida por unidade de comprimento. Esta capacidade de induzir uma tensão de perturbação de modo diferencial diretamente sobre o sinal pode ocasionar problemas em cabos blindados provenientes do campo com sinais de baixa amplitude, como sinais analógicos de 4-20 mA gerados por transdutores de tensão, corrente, potências ativa e reativa, frequências, temperatura, pressão, etc. Interligações de dados, sinais de vídeo e/ou áudio etc, também se classificam nesta categoria de sinais que podem ser mais facilmente interferidos. Neste tipo de cabo com sinais de baixa amplitude, o aterramento em ambas as extremidades da blindagem pode trazer perturbações importantes, apesar da redução da tensão de modo comum. De fato, nestes casos de sinais sensíveis com a presença de grandes diferenças de potencial de modo comum de terra, a blindagem é aterrada em apenas uma extremidade, porém, é necessária a adoção de medidas complementares como o emprego de uma segunda blindagem, ou cabo guarda, ou conduíte metálico, aterrados em ambas as extremidades. Assim, em virtude dos problemas nestes tipos de sinais, criou-se um temor generalizado do duplo aterramento da blindagem. Entretanto, normalmente para as interligações de TPs e TCs de linha, o aterramento das extremidades das blindagens não é prejudicial aos sinais internos devido à grande amplitude dos mesmos ($V_{nominal}$ de 115 Vrms e $I_{nominal}$ de 5 A, respectivamente). Assim sendo, nestes casos, esta prática torna-se altamente recomendada para a redução da tensão de modo comum potencialmente perigosa para os isolamentos dos instrumentos conectados a estes cabos. Evidentemente, o aterramento da blindagem no lado do equipamento eletrônico (na casa de comando ou de relés) deverá ser feito com critério para reduzir induções sobre o mesmo. Para tanto, o ponto de aterramento das blindagens destes cabos deve localizar-se logo no entrada do painel, a certa distância dos equipamentos eletrônicos.

3 MODELAGEM NO ATP

O objetivo desta modelagem é, utilizando o ATP, a comprovação comparativa da atuação do aterramento da blindagem em apenas uma e em ambas as extremidades. Na figura 7 observa-se o modelo básico usado para a modelagem, onde temos um cabo longo (30 m) enterrado, representando um trecho de malha de terra submetido à injeção de corrente impulsiva. Esta injeção ocorre próxima ao ponto onde se encontra aterrado um TPC, de cujo secundário sai o cabo de sinal para o seu instrumento localizado na sala de controle. A representação deste sinal do secundário é feita por apenas um condutor, visto que o nosso interesse é a análise da tensão de modo comum que aparece sobre o isolamento galvânico na entrada do instrumento. Tanto o transformador quanto o instrumento remoto são referenciados localmente ao cabo enterrado (malha de terra).

Ressalta-se que este é um exemplo de fenômeno onde é necessário considerar adequadamente o acoplamento eletromagnético entre perturbações e o cabo de sinal. Aqui, tal acoplamento é considerado no ATP indiretamente por intermédio do uso do modelo básico LCC, que simula um trecho de linha de transmissão. Este modelo LCC é bidimensional e desenvolvido para cabos paralelos e, conseqüentemente, limitando o acoplamento eletromagnético entre os cabos ao trecho em que o modelo é considerado, mas o que não invalida a verificação comparativa entre os casos de aterramento da blindagem.

A figura 8 mostra o modelo com base no emprego de dez segmentos de 3 m de comprimento de linha de transmissão (LCC). Simulações com número maior de elementos LCC de menor comprimento mostraram que o erro quantitativo é pequeno e não altera o objetivo final que é a análise comparativa entre as opções de aterramento. No ATP, define-se no elemento LCC o número de fases que o mesmo deve ter, bem como as suas características. Conforme pode ser observado na figura 8, na nossa simulação, o LCC dispõe de quatro fases com as seguintes finalidades: a fase inferior representa o cabo de malha de terra, e as três fases superiores representam o cabo de sinal blindado, sendo que a fase central representa (de forma unifilar) o cabo de instrumentação e as fases vizinhas superior e inferior representam a blindagem do cabo. Observa-se que a fase 4 foi posicionada bem mais próxima do terra de referência do modelo, uma vez que representa o cabo enterrado no solo. Entre cada elemento LCC, incluiu-se uma condutância à terra a partir da fase 4, de forma a simular a drenagem de corrente do cabo de aterramento para o solo. As demais fases 1, 2 e 3

(condutores de sinal e blindagens) estão afastadas do cabo terra, simulando o distanciamento natural dos cabos de instrumentação da malha de terra. O dimensionamento e posicionamento relativo de cada fase foi tal que a impedância de transferência Z_t (relação entre a tensão induzida na fase 2 e a corrente total das fases 1 e 3 representando a blindagem) apresenta valores numéricos semelhantes aos dos cabos reais empregados nas instalações de supervisão e controle. Este artifício de “Engenharia”, de cunho extremamente simples, mostrou-se eficiente para a presente simulação. A injeção de corrente na malha de terra está representada pela fonte de corrente entre esta e a terra de referência do modelo.

A figura 9 apresenta o modelo completo do ATP e a figura 10 mostra, em detalhe, as partes à esquerda e à direita do referido modelo, onde se pode observar os detalhes de injeção de corrente e da carga representando o isolamento.

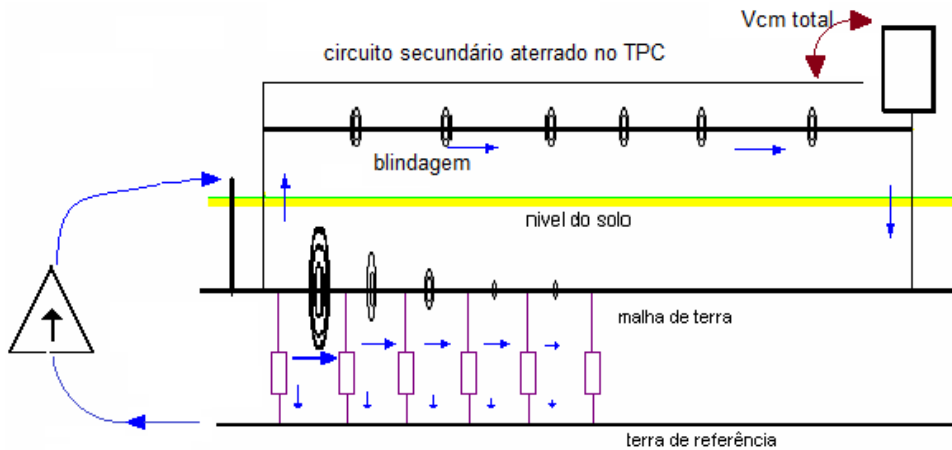


Fig. 7 – Modelo básico simulado

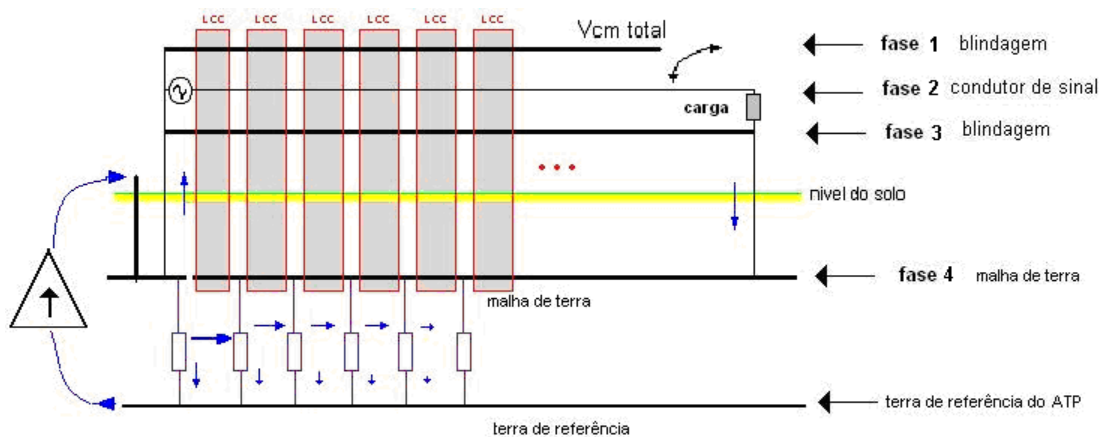


Fig. 8 – Representação dos elementos do circuito na forma adequada para o emprego de modelos disponíveis no ATP

As seguintes condições foram adotadas nesta simulação:

- Fonte de corrente: amplitude de 1 kA, tempo de frente de 1 μ s e tempo de meia onda de 11 μ s.
- Resistor de 400 Ω em paralelo com a fonte de corrente representando a impedância do canal de uma descarga atmosférica.
- Cabo de sinal e blindagens a 1 m acima do cabo de aterramento da SE.
- Resistor de carga com 1000 Ω , representando a isolamento galvânica.
- Segmentos de linha de transmissão (LCC) com 3 m de comprimento cada, perfazendo um total de 10 segmentos.
- Resistência dos aterramentos de 100 Ω , representando uma resistência total de aterramento de 10 Ω .
- Aterramento da blindagem (fases 1 e 3) na extremidade da carga.

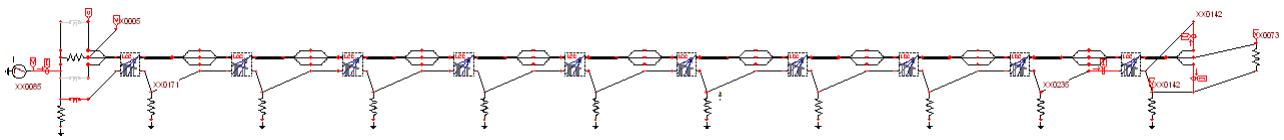


Fig. 9 – Representação do modelo completo no ATP

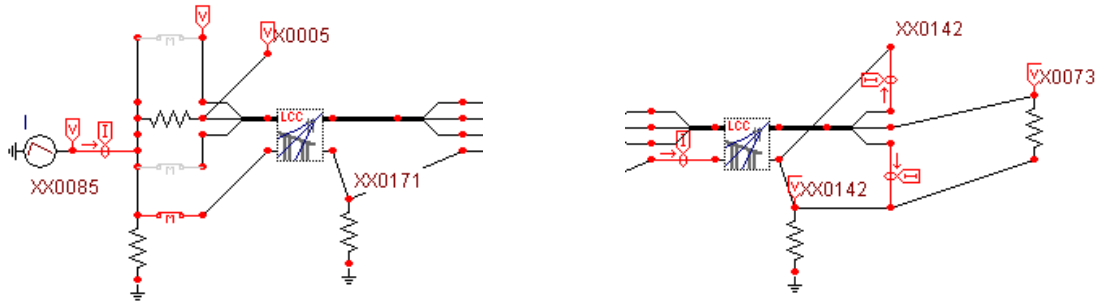


Fig. 10 – Detalhe das partes à esquerda (fonte de corrente) e à direita (carga) do modelo completo no ATP

4 RESULTADOS

Na figura 11 apresenta-se a forma de onda da tensão sobre a carga (representando a ddp de modo comum sobre o isolamento de entrada) com a blindagem conectada apenas no lado da carga; i.e., desconectada no lado do TPC. Na mesma figura apresenta-se a corrente esperada em uma das fases utilizadas como blindagem. Observa-se claramente uma sobretensão oscilatória de 16,8 kV de pico. O caráter oscilatório explica-se pelo acoplamento entre o cabo de sinal e a blindagem, que ocorre internamente no cabo, uma vez que a corrente de blindagem é oscilatória face à reflexão resultante do descasamento de impedâncias na extremidade desconectada.

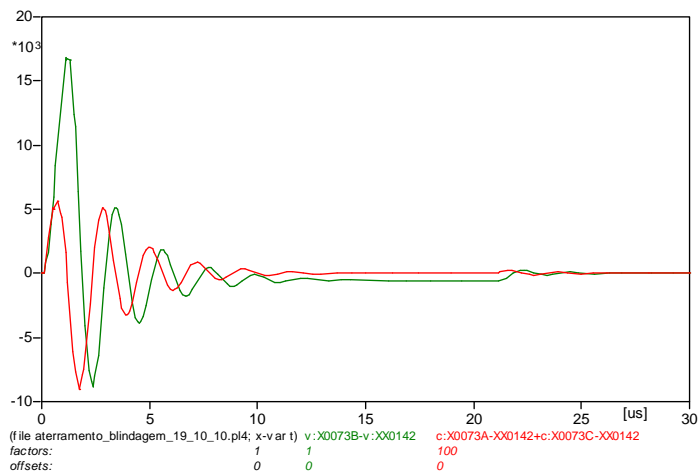
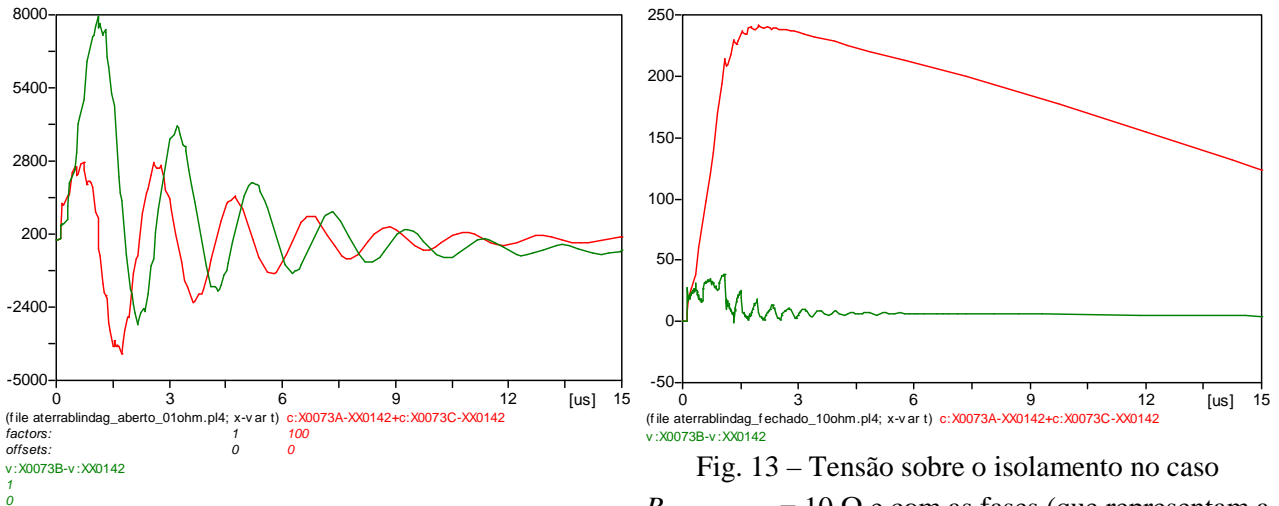


Fig. 11 – Em verde, tensão de modo comum sobre o isolamento de entrada (16,8 kV_p); em vermelho, corrente ($\times 100$) na blindagem (-87,8 A_p) junto ao instrumento.

Na figura 12 observa-se simulação semelhante, onde se representou um solo de muito baixa resistividade, por intermédio da redução das resistências de aterramento do cabo terra de 100 Ω para 10 Ω , perfazendo, assim, um aterramento total de 1 Ω . Neste caso de muito baixa resistividade, observa-se uma melhora (redução) na tensão de isolamento na entrada do instrumento, porém muito acima (aprox. 8 kV) da suportabilidade deste isolamento (4 kV).

Na figura 13 vemos o resultado da tensão de modo comum obtida sobre o isolamento, no caso das duas fases (representando a blindagem) aterradas em ambas as extremidades. Observa-se, dos resultados desta figura, que o aterramento da blindagem em ambas as extremidades leva ao aumento da sua corrente, o que proporciona drástica redução da tensão sobre o isolamento pelo efeito de neutralização do acoplamento magnético, além da elevação da tensão de terra no lado do instrumento, colaborando para a redução da ddp de terra entre fonte de sinal e instrumento.



5 CONCLUSÕES

Observa-se nas simulações e resultados acima apresentados a grande diferença entre aterrar, ou não, ambas as extremidades da blindagem dos cabos no caso da presença de diferenças de potencial de terra que recaem sobre o isolamento dos instrumentos. O problema é particularmente importante em cabos de TPs e TCs de linha em subestações de alta e extra alta tensão em função do maior acoplamento de tensão de modo comum potencialmente perigosa para a entrada dos equipamentos de supervisão e proteção. Os cabos blindados normalmente empregados nestes tipos de interligações justificam-se pelo ambiente hostil apresentado nestas subestações, e apresentam um alto custo que não se justifica no caso do aterramento em uma única extremidade. O trabalho procurou apresentar os mecanismos de acoplamento de perturbações de modo comum e modo diferencial de forma a que o critério de aterramento das blindagens dos cabos não seja uma “receita de bolo”, mas que seja adequadamente aplicado aos diversos tipos de cabos e sinais.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] IEC, 2001, Technical Specification IEC 61000-6-5: “Electromagnetic Compatibility (EMC), Generic standards – Immunity for power station and substation environments.
- [2] IEC, 1995, International Standard IEC 61000-4-5: Electromagnetic Compatibility (EMC) - Surge immunity test.
- [3] CIGRÉ – CIGRÉ WG 36.04, 1997, *Guide on EMC in Power Plants and Substations*, Guide 124.
- [4] L. Prikler, H.K. Høidalen, 2002, ATPDraw version 3.5 for Windows 9x/NT/2000/XP – User’s Manual.
- [5] IEC, 1997, Technical Report IEC 61000-5-2: “Electromagnetic Compatibility (EMC), Installation and Mitigation Guidelines Earthing and Cabling.