
**ESTUDO DO AMBIENTE ELETROMAGNÉTICO EM SUBESTAÇÃO
DE ALTA TENSÃO E A IMPORTÂNCIA DO ATERRAMENTO DA
BLINDAGEM DOS CABOS DE CONTROLE**

RICARDO LEITE EVANGELISTA

Monografia submetida à Comissão Coordenadora do Curso de Especialização em Engenharia de Sistemas Elétricos de Potência – CESEP, Ênfase: Proteção Elétrica, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do certificado da Especialização.

Aprovada em ____ de _____ de 2012

**Alberto Resende de Conti - Dr.
Supervisor**

**Silvério Visacro Filho - Dr.
Coordenador do CESEP**

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVOS.....	4
1.2 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO	4
2. AMBIENTE ELETROMAGNÉTICO EM SUBESTAÇÕES DE ALTA TENSÃO	6
2.1 COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA (EMC)	6
2.2 INTERFERÊNCIA ELETROMAGNÉTICA EM SUBESTAÇÕES (EMI)	7
2.3 CAMPOS ELETROMAGNÉTICOS EM REGIME PERMANENTE (60 Hz).....	9
2.4 CAMPOS ELETROMAGNÉTICOS EM REGIME TRANZITÓRIO.....	13
2.4.1 <i>Tranzitórios Causados por Chavamentos</i>	13
2.4.2 <i>Tranzitórios Causados por descargas atmosféricas</i>	13
3. MECANISMOS DE ACOPLAMENTO DE CAMPOS ELETROMAGNÉTICOS EM CABOS DE CONTROLE EM SUBESTAÇÕES	28
3.1 CABO DE CONTROLE BLINDADO.....	29
3.2 ACOPLAMENTOS EM CABOS DE CONTROLE EM SUBESTAÇÕES DE ALTA TENSÃO.....	33
4. TÉCNICAS DE MITIGAÇÃO DO PROBLEMA	38
4.1 REDUZINDO A INTERFERÊNCIA NOS CABOS DE BAIXA TENSÃO DA SUBESTAÇÃO	38
4.2 OUTRAS MEDIDAS DE MITIGAÇÃO DO PROBLEMA	41
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	46
5.1 CONCLUSÃO	46
5.2 PROPOSTAS DE CONTINUIDADE	47
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	48

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo o estudo dos efeitos aos quais os cabos de controle instalados em subestações de alta tensão estão sujeitos, bem como retratar o aterramento da blindagem destes cabos de modo que esta exerça sua função da melhor maneira possível. O trabalho consiste em um estudo teórico sobre os aspectos que envolvem os tipos de fenômenos aos quais os cabos de controle instalados em subestações estão expostos, caracterizando a relevância do problema, o ambiente eletromagnético em subestações de alta tensão, os mecanismos de acoplamento de campos eletromagnéticos, retratando técnicas de mitigação do problema.

ABSTRACT

This work aims at study the effects to which the control cables installed in high voltage substations are subject, as well as portray the grounding of the shield of these cables so that its function in the best way possible. The work consists of a theoretical study on the aspects that involve the kinds of phenomena to which the control cables installed in substations are exposed, characterizing the relevance of the problem, the electromagnetic environment in high voltage substations, the coupling mechanisms of electromagnetic fields portraying the problem mitigation techniques.

1 Introdução

As interferências eletromagnéticas são alguns dos grandes problemas existentes nas subestações de alta tensão da geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. Essas interferências comprometem o funcionamento dos equipamentos eletrônicos instalados nas subestações como relés de proteção, equipamentos de medição e faturamento, muitas vezes, danificando-os ou alterando seu funcionamento. Como esses equipamentos eletrônicos atendem os sistemas de supervisão, proteção, comunicação e controle das subestações, o funcionamento inadequado destes pode causar a interrupção no fornecimento de energia elétrica, fato que degrada a qualidade da energia fornecida, bem como pode acarretar multa as concessionárias de energia por parte do órgão regulador de energia.

No ambiente de uma subestação podem surgir correntes transitórias e campos eletromagnéticos de amplitudes significativas e de alta frequência quando comutadores de alta tensão são operados, caracterizando um *EMI (Eletromagnetic Interference)*. Normalmente, estes transientes de alta tensão ocorrem durante as atividades normais da subestação, como a abertura ou fechamento de chaves seccionadoras e disjuntores. Operações normais de chaveamento em subestações podem produzir transientes de corrente com duração de 5 a 20 microssegundos, com frequências de até 100 MHz e amplitudes de pico de pelo menos 400 A. Além disso, esses transientes também produzem campo elétrico e magnético na vizinhança do sistema de distribuição com as forças de pico de várias dezenas de kV / m, e A / m, respectivamente. Tais transientes podem também ocorrer como resultado de um acontecimento anormal, como uma falha. Estes transientes representam uma forma de interferência eletromagnética (EMI) significativa, que podem acoplar em circuitos de baixa tensão de controle e equipamentos eletrônicos, fazendo com que estes sejam danificados ou venham a falhar [1,2]. A figura 1 ilustra o transiente de corrente, os campos irradiados e a indução de corrente devido à operação de uma chave seccionadora.

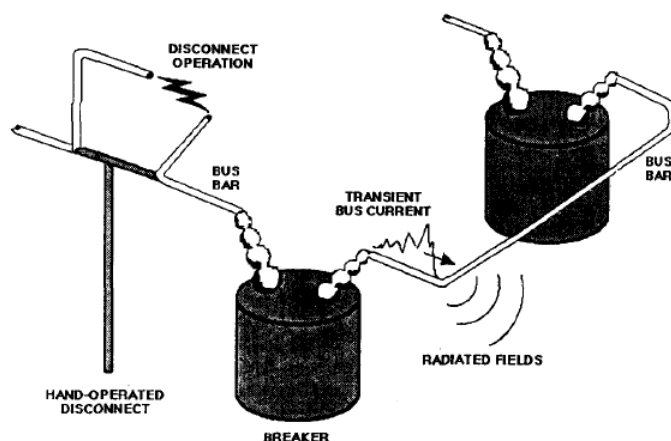


Figura 1. Seção de um barramento de alta tensão (Adaptado de [1]).

Os problemas causados por EMI em subestações de alta tensão passaram a ser considerados pelos engenheiros de sistemas de energia e subestações de alta tensão no início de 1960. Os trabalhos começaram através do estudo da interferência eletromagnética de circuitos de alimentação em cabos. Através de tais estudos, caminhos de acoplamento primários foram identificados. Um deles foi a partir dos circuitos de potência em cabos de controle e outro a partir dos circuitos de potência através de transformadores de potencial (TPs) e transformadores de corrente (TCs) para os cabos a eles conectados. Este trabalho levou ao teste IEEE-SWC (*Surge Withstand Capability*), publicado pela primeira vez em 1974 e agora faz parte da ANSI C37.90. Para a época algumas limitações de instrumentos dificultavam os estudos, fazendo com que não pudesse afirmar que as medições eram os transientes [3].

Em 1978, com o uso de microprocessadores no sistema de proteção, o EPRI (*Electric Power Research Institute*) iniciou um estudo (RP 1359) para investigar as interferências eletromagnéticas em subestações. O trabalho foi limitado ao estudo da vizinhança dos equipamentos da subestação, e os locais para instalação dos equipamentos eletrônicos. O estudo (RP 1359-2) foi continuado pela TAMU (*Texas A & M University*) [3].

Estas investigações a cerca do projeto RP 1359-2 da *Texas A & M* para o EPRI foram relevantes para outros trabalhos. Algumas das conclusões deste trabalho prévio indicaram: uma expectativa de que a EMI iria se tornar mais importante à medida que novos sistemas de automação fossem introduzidos em subestações; a necessidade de uma análise mais aprofundada da natureza irradiada dos transientes EMI em subestações; reconhecimento de que não existia norma adequada para determinar a susceptibilidade dos equipamentos para campos eletromagnéticos transitórios, particularmente para equipamentos localizados nas subestações, e uma necessidade de testes de susceptibilidade nestes equipamentos antes de sua aquisição.

Melhorar o projeto do equipamento, juntamente com o uso de dispositivos de supressão de surtos e caixas de proteção foi recomendado para mitigar os efeitos da EMI.

Em 1985 EPRI iniciou o projeto RP2674-1 com a *BDM International* para continuar a responder a estas preocupações. Sob o RP2674-1 tem havido uma forte tentativa em ampliar as caracterizações da EMI em ambientes de subestações e sua compreensão através do desenvolvimento de modelos válidos de alta frequência de ondas viajantes, bem como pela coleta adicional de medições detalhadas de EMI em subestações. A ênfase estava em apresentar os maiores níveis esperados de EMI na subestação, na casa de controle e em cabos de controle blindados em subestações de até 500 kV. Estas estimativas baseiam-se nos resultados de todas as medições e previsões do modelo para transientes de chaveamento e de falhas causadas por relâmpagos ocorridos na subestação. A maneira pela qual as fontes de EMI atuam do barramento de alta tensão para os cabos de controle blindado é discutida qualitativamente e quantitativamente. Os níveis de EMI em cabos de controle são comparados a fenômenos transientes rápidos e oscilatórios conforme teste de forma de ondas pelo SWC (IEEE / ANSI C37.90.1-1989). Os campos de EMI em subestações foram então identificados, porém ainda não existia um padrão com o qual se podia compará-los [2].

A fim de se proteger contra transitórios eletromagnéticos, é preciso entender e caracterizar a sua geração, propagação, mecanismos de acoplamento e níveis de ameaça para os equipamentos da subestação. Para proporcionar esta compreensão e para fornecer um meio para estimar a gravidade dos efeitos transitórios em situações em que as medições de caracterização dos efeitos são difíceis, se não impossível, um modelo de domínio do tempo, e um modelo de campo próximo foram desenvolvidos pelo EPRI através do projeto 2674-1, indicado anteriormente, que prediz três tipos de fenomenologia eletromagnética relacionado a transitórios [1]:

1. O modelo METAP (*McGraw-Edison Transient Analysis Program*) calcula transientes de tensão e corrente no barramento em termos de ondas viajantes quando se tem uma operação de comutação na subestação, e é utilizado em sistemas elétricos de potencia desde 1973 [1].
 2. O modelo TRAFIC (*Transient Field Integration Code*) calcula campos eletromagnéticos transitórios resultantes arbitrando pontos no espaço quando as ondas viajantes de corrente irradiam ondas eletromagnéticas, fazendo com o que o barramento de alta tensão funcione com uma antena não intencional [1].
-

3. O modelo CASSANDRA prevê o acoplamento de campos eletromagnéticos transitórios para o sensor de subestações e cabos de controle e determina o transitório de corrente resultante que serão entregues aos cabos ligados as cargas que compõem os circuitos de controle de proteção [1].

Uma vantagem particular para um modelo que prevê efeitos transitórios eletromagnéticos estará em prever os piores efeitos que possam ser causados por curto-circuito por faltas a terra, faltas fase-fase, ou descargas atmosféricas próximas à subestação. Antes de o modelo ser utilizado, no entanto, este deve ser validado através de comparação com transientes medidos durante uma operação na subestação. Este pode então ser usado com alguma confiança, quando extrapolados para prever os piores efeitos transitórios, que normalmente não podem ser encenados de modo a determinar suas características elétricas e gravidade.

Face ao exposto acima, daremos sequência no capítulo 2 ao estudo do ambiente elétrico em subestações no que diz respeito aos campos eletromagnéticos em regime permanente (60 Hz) e transitório.

1.1 Objetivos

O objetivo deste trabalho é apresentar um estudo do ambiente eletromagnético ao qual os cabos metálicos isolados blindados, que atendem os sistemas de supervisão, proteção, comunicação e controle de subestações de alta tensão 138 kV podem estar sujeitos. Será dada maior ênfase aos cabos blindados para sinais, comumente utilizados em subestações de alta tensão, visando identificar a suscetibilidade eletromagnética destes, frente às interferências eletromagnéticas provocadas por descargas atmosféricas, manobras de chaveamento, campo magnético na frequência de 60 Hz e pelo efeito corona, frequentes nas subestações das concessionárias de energia elétrica. Neste estudo, propõe-se uma análise das normas pertinentes ao tipo de instalação dos cabos de controle blindados. Além disto, apresenta-se uma análise sobre os métodos de aterramento da blindagem dos cabos analisados de modo a garantir a confiabilidade e a disponibilidade do sistema frente às interferências eletromagnéticas, frequentes nas subestações das concessionárias de energia elétrica e de consumidores, reduzindo-se assim, de forma significativa, os desligamentos.

1.2 Organização do Texto

- ✓ No capítulo 2 são apresentados os princípios da interferência eletromagnética (EMI), os problemas associados a esta, bem como as técnicas de mitigação. Serão
-

apresentadas ainda as normas pertinentes e as referências bibliográficas necessárias para o estudo relacionado à interferência eletromagnética.

- ✓ No capítulo 3 apresentamos os mecanismos de acoplamento entre os campos eletromagnéticos da subestação com os cabos de controle, descrevendo o cabo de controle, os modos de acoplamento em 60 Hz e transitório.
 - ✓ No capítulo 4 apresentamos as técnicas de mitigação para o problema de interferência eletromagnética entre a subestação e os cabos de controle.
 - ✓ No capítulo 5 apresentamos a avaliação de um projeto de subestação de 138 kV no que diz respeito a interferência eletromagnética. Ainda neste capítulo, apresentamos as recomendações de instalação para os cabos de controle blindados, bem como a maneira mais eficiente de proceder com o aterramento da blindagem dos mesmos.
 - ✓ Finalmente, no capítulo 6 encontram-se as conclusões da dissertação e as propostas para possíveis trabalhos futuros.
-

2 Ambiente Eletromagnético em Subestações de Alta Tensão

Subestações de alta tensão podem ser caracterizadas como um ambiente eletromagnético complexo, altamente hostil para dispositivos eletrônicos sensíveis. De acordo com as características do equipamento e da natureza dos fenômenos eletromagnéticos (conduzida ou irradiada, baixa ou alta frequência), os efeitos de interferência podem danificar ou não dispositivos sensíveis.

2.1. Compatibilidade Eletromagnética (EMC)

Segundo o *American National Standard Dictionary for Technologies of Electromagnetic Compatibility* (ANSI C63.14, 1998), a compatibilidade eletromagnética é definida como sendo a capacidade dos sistemas elétricos e eletrônicos, equipamentos e dispositivos de operar em seus ambientes eletromagnéticos planejados, dentro de uma margem definida de segurança e a níveis de desempenho de projeto, sem sofrerem ou causarem degradação inaceitável na presença da interferência eletromagnética. Ainda, segundo (ANSI C63.14, 1998), a interferência eletromagnética é definida como sendo qualquer distúrbio eletromagnético, intencional ou não, que interrompe, obstrui, degrada ou limita o desempenho efetivo de equipamento elétrico ou eletrônico.

Suscetibilidade eletromagnética é a incapacidade de um dispositivo, equipamento ou sistema de funcionar sem degradação na presença de um distúrbio eletromagnético. A

suscetibilidade é a falta de imunidade a interferências eletromagnéticas. A figura 2 ilustra de maneira esquemática a decomposição de um problema de compatibilidade eletromagnética.

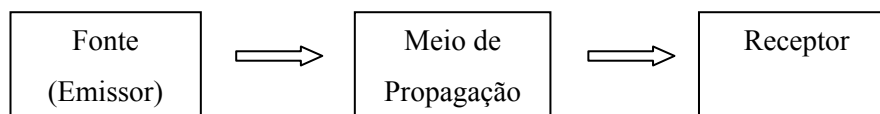


Figura 2. Decomposição básica de um problema de CEM (Adaptado de [4])

Do ponto de vista eletromagnético, a energia é transferida de um emissor (fonte), por meio de um acoplamento (meio), a um equipamento ou sistema qualquer (receptor). O campo eletromagnético radiado pela fonte pode interferir no desempenho do receptor, dependendo da suscetibilidade eletromagnética deste aos níveis de energia associados à fonte. Pode-se tomar como fontes de emissão ondas de rádio, celular, tevês, radares, arco voltaico, linhas de alta tensão, descargas atmosféricas, etc. Como meios de propagação pode-se citar como exemplo os cabos, suas blindagens quando houver aterramentos, linhas de energia e comunicação, etc. Os elementos receptores podem ser equipamentos de comunicação, de navegação, computadores, cabos, etc.

Ainda, segundo [4] a transmissão intencional ou recepção de energia eletromagnética não é necessariamente prejudicial, e sim o comportamento indesejado do receptor caracteriza a interferência.

2.2. Interferência Eletromagnética em Subestações (EMI)

A interferência eletromagnética é um problema presente em subestações de alta tensão que interligam as redes de transmissão. Este fenômeno interfere em dispositivos eletrônicos instalados dentro da própria subestação, tais como: equipamentos de medidas, de comandos e de controles causando falhas operacionais e até mesmo interrupção do fornecimento de energia elétrica.

Em subestações de potência, o número de equipamentos eletrônicos utilizados tem aumentado tanto no pátio como nas salas de controle. Operações de chaveamento, faltas ou descargas atmosféricas dentro da subestação podem causar danos decorrentes de interferências eletromagnéticas de alta frequência. Essas interferências podem afetar circuitos de controle e supervisão de baixa tensão e equipamentos eletrônicos se estes não estiverem adequadamente protegidos. Este ambiente de interferência eletromagnética transitória necessita ser completamente caracterizado pelas formas de onda e espectros de frequência para os níveis mais altos esperados em ambos os locais (pátio e dentro da sala de comando). Esses níveis de

interferências eletromagnéticas podem então ser comparados com os níveis de suscetibilidade dos equipamentos para verificação de distúrbios, danos e também da capacidade destes de suportarem os níveis de surtos aos quais estarão suscetíveis [2].

Para (WHITE, 1973), a interferência eletromagnética pode causar vários problemas nos equipamentos eletroeletrônicos, quando um condutor de eletricidade percorrido por uma corrente elétrica gera ao seu redor um campo eletromagnético. Dependendo da frequência e da intensidade da corrente, esse campo pode comprometer equipamentos mais sensíveis. Se a intensidade ultrapassar determinados valores, alguns defeitos podem ocorrer, tais como: falhas de comunicação entre equipamento e computador; erros na execução do programa, geralmente sem seguir um padrão específico; falhas intempestivas que não seguem uma lógica; danos aos circuitos eletrônicos, mesmo sendo novos e confiáveis.

As principais fontes de interferências são:

a) Circuitos Primários – Circuitos primários normalmente possuem tensões e correntes na frequência de 50/60 Hz. Eventos como chaveamentos, descargas atmosféricas e condições de faltas, podem ocasionar tensões e correntes com frequências até 10 MHz. Os circuitos primários incluem as linhas, barras, transformador de potencial e corrente.

b) Equipamentos Primários – Equipamentos primários são fontes de campos em altas frequências, tanto em funcionamento normal, quanto em transitórios. Transformadores podem, dependendo da sua função e construção, amplificar transitórios oriundos de chaveamentos. Dispositivos de potência, tais como, o conversor HVDC (*High Voltage Direct-Current*) e SVC (*Static Var Compensator*), são fontes de interferências de grande magnitude;

c) Circuitos Secundários – Transitórios de tensões podem ser induzidos nos circuitos do secundário, devido a operações de chaveamento. Os circuitos secundários incluem disjuntores, circuitos de desconexão de bobinas e todos os circuitos dos relés;

d) Descargas Atmosféricas – As descargas atmosféricas diretas nos circuitos primários, ou muito próxima deles (descargas indiretas), podem interferir nos equipamentos instalados nos circuitos secundários, dispositivos de medidas, comandos e sinais de proteção, por meio da radiação eletromagnética ou por meio de diferentes tensões de modo comum (aterramento), resultantes da descarga;

e) Problemas no Sistema de Medição – Nos circuitos primários de medição de tensão e corrente, durante um transitório, existirão componentes de frequência muito maiores que seus valores nominais de transferências desses sinais. Normalmente esses equipamentos trabalham

na faixa de até 10 kHz, portanto, durante os transitórios, surgirão medidas incoerentes na medição dessas grandezas.

2.3. Campos Eletromagnéticos em Regime Permanente (60 Hz)

As fontes de interferências eletromagnéticas mais importantes na condição de estado estacionário são: (i) campos elétricos e magnéticos produzidos no interior da subestação (acoplamentos irradiados), (ii) magnitudes de tensão e corrente (acoplamentos condutivos), (iii) as distorções de sinal causadas por dispositivos elétricos e eletrônicos [5].

Acoplamentos conduzidos são frequentemente referidos como acoplamentos condutivos ou acoplamento galvânico. Quando uma perturbação é conduzida por cabos, pode atingir um circuito vítima e influenciar a operação de dispositivos eletrônicos sensíveis, resultando em outro tipo de acoplamento que depende da impedância por onde a corrente passa (reatância, resistência, própria ou mútua) [5].

Acoplamentos irradiados ocorrem sem o contato elétrico entre os circuitos e podem ser indutivo, capacitivo ou irradiado dependendo das características dos campos eletromagnéticos.

O ambiente eletromagnético em uma subestação corresponde à totalidade dos fenômenos eletromagnéticos na subestação. Avaliar como esses campos eletromagnéticos (EMF) são distribuídos e como eles são acoplados no interior da subestação é essencial para evitar problemas de interferência eletromagnética (EMI) e assegurar um funcionamento regular de dispositivos eletrônicos sensíveis. Isso significa menor perda, melhor desempenho do sistema e um nível de compatibilidade eletromagnética (EMC) satisfatória [5].

Os campos eletromagnéticos são distribuídos em uma planta de subestação de acordo com o layout dos equipamentos, distâncias elétricas, conexões e sistemas de aterramento. O nível de EMC nas subestações deve estar em conformidade com as normas internacionais (IEC série 61.000). Porém as normas não definem a suportabilidade e a sensibilidade dos equipamentos que irão trabalhar dentro das subestações. Sendo assim as concessionárias de energia elétrica precisam analisar a distribuição de campo eletromagnético dentro da subestação de modo a assegurar que a mesma opere em condições normais.

Para caracterizar a distribuição de campo eletromagnético dentro de uma subestação em condições normais de operação em [5] foram realizadas medições de campo eletromagnético em uma subestação de 69/13,8 kV denominada “SE ALFA”, que possui dois transformadores abaixadores de 26,6 MVA, um banco de capacitor de 2,4MVAR, duas linhas de entrada em 69

kV e oito saídas em 13,8 kV, além de disjuntores e seccionadores para manobra, e TPs e TCs para medição e proteção.

Usando um medidor certificado (EFA 300 da *Narda Measurements*) que é capaz de medir campos isotrópicos e direcionais (x, y, z) em frequências que variam de 5 Hz a 32 kHz, além de analisar as formas de usando a transformada de Fourier (FFT). Para o campo elétrico isotrópico temos $E_e = \sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2}$ (em V / m), e para o campo magnético isotrópico temos $B_e = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2}$ (em Tesla).

A melhor visualização da distribuição do campo medido dentro desta subestação pode ser obtida através de uma representação gráfica que faz uma projeção do campo, medido sobre o layout da subestação. Esta projeção é um "3D-composto", considerando como coordenadas x e y o real (xy), a partir do ponto medido na instalação, e a coordenada z corresponde ao valor do campo medido. Uma vez que não é possível medir os campos eletromagnéticos em que os transformadores de potência estão localizados, um método de interpolação deve ser usado. Frequentemente, tem sido considerada a distribuição do campo aproximadamente linear.

As medidas foram realizadas a uma altura de um metro conforme recomendado pelo manual do equipamento, porem para uma maior aproximação com a altura humana poder-se-ia alterar a mesma para 1,7 metros.

Para melhor entendimento sobre as medições realizadas do campo eletromagnético em baixa frequência apresentamos abaixo o layout da subestação dividido conforme figura 3.

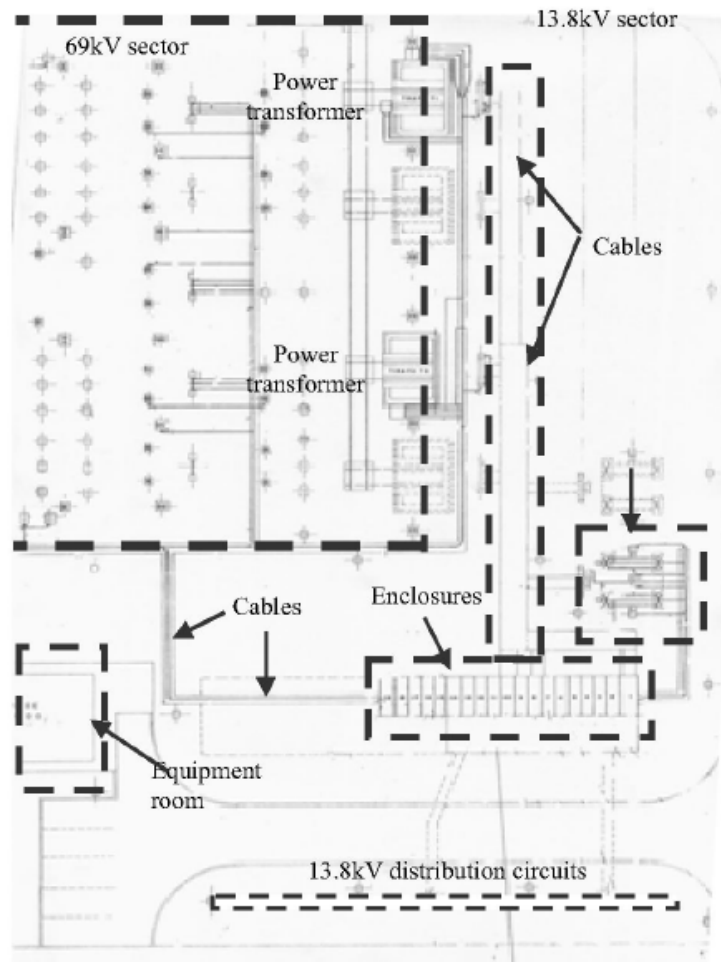


Figura 3. SE ALFA – Esquema de medição (Adaptado de [5]).

As figuras 4 e 5 mostram, como exemplo, as medições de campo eletromagnético (EMF) no sector de 69 kV, considerando a altura de 1 metro, tal como recomendado. As linhas transversais definem setores adicionais dentro do sector 69 kV.

A figura 6 mostra a mesma distribuição de EMF exibida na figura 4 como uma projeção sobre o plano XY, considerando o esquema de subestação.

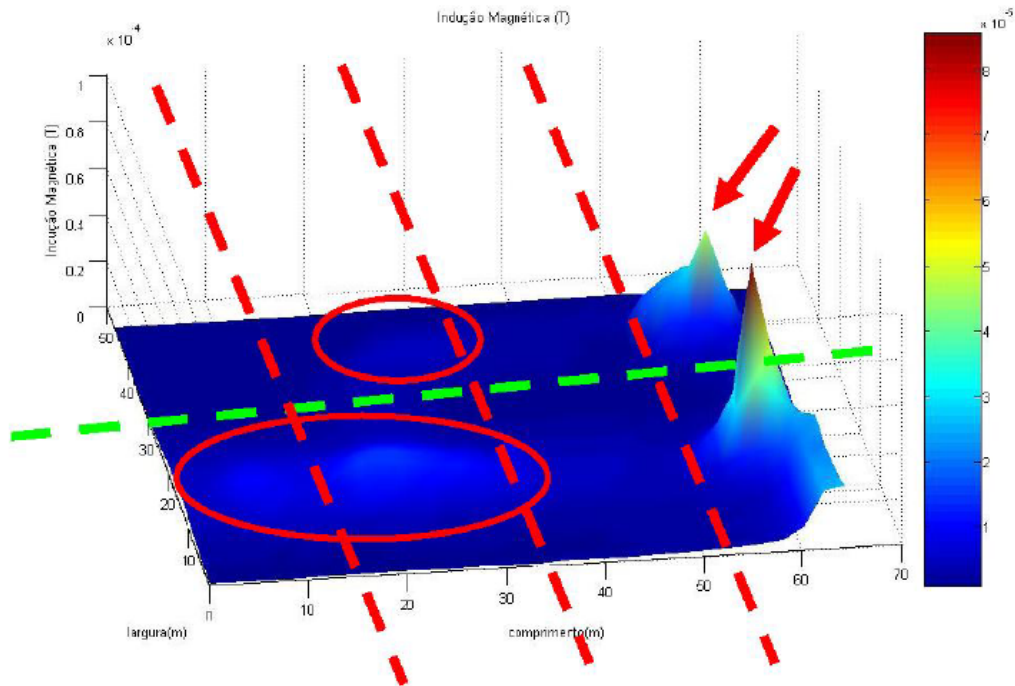


Figura 4. Setor 69 kV – Distribuição de campo magnético para altura de 1 metro (Adaptado de [5]).

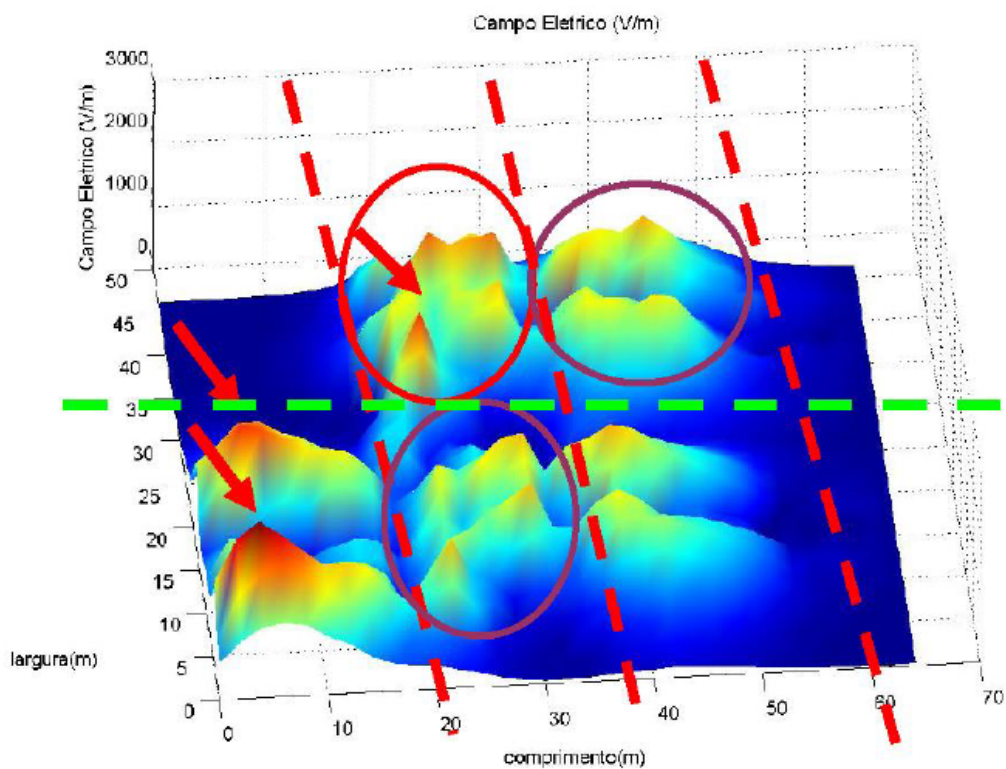


Figura 5. Setor 69 kV – Distribuição de campo elétrico para altura de 1 metro (Adaptado de [5]).

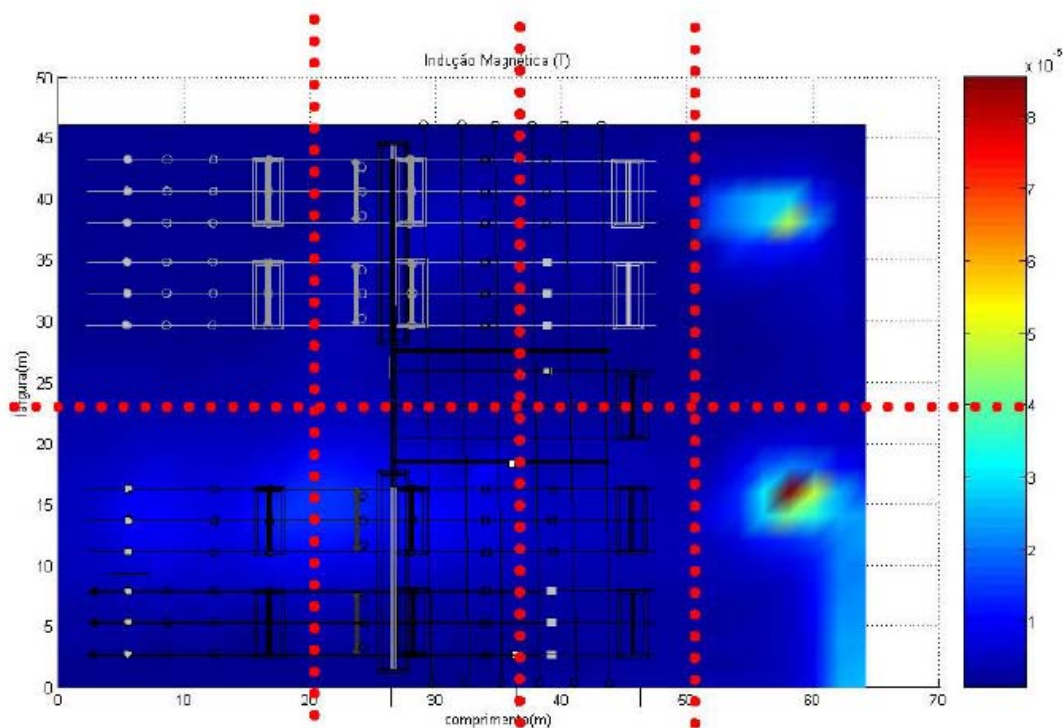


Figura 6. Setor 69 kV – Distribuição de campo magnético projetado no plano XY (Adaptado de [5]).

Feito o diagnóstico do EMF para esta subestação, é importante para avaliar os valores mais elevados de campo elétrico e magnético, a fim de identificar suas causas e prevenir seus efeitos.

Este trabalho [5] mostra que não se pode considerar uma subestação de alta tensão, em condições normais de operação livre de interferências eletromagnéticas, pois como observado nas figuras 4, 5 e 6 acima, existem pontos que podem requerer uma maior atenção por possuírem campos elétricos e magnéticos mais intensos, e que podem vir a causar danos nos circuitos e equipamentos mais sensíveis.

2.4. Campos Eletromagnéticos em Regime Transitório

2.4.1 Transitórios Causados por Chavamentos

Os campos elétricos e magnéticos medidos durante transitórios de chaveamento são caracterizados em termos de *macroburst* (série de transitórios) e *micropulse* (transitório individual) e suas propriedades são classificadas de acordo com a classe de tensão da subestação de 115kV a 500kV e o tipo de isolamento (AIS - *Air Insulated Substation* ou GIS - *Gas Insulated Substation*). *Macrobursts* de até 10.000 transientes individuais com amplitudes diferentes e frequências de repetição de pulso de 40 kHz ou mais podem ser produzidos durante a operação

de uma única operação de interrupção, dependendo do tipo de equipamento. As maiores amplitudes de campos transitórios *Micropulse* são obtidas de acordo com a tensão da subestação. Picos de campos elétricos verticais da ordem de 16 kV / m, e campos horizontais magnéticos da ordem de 212 A / m foram medidos ao nível do solo sob o barramento de 500 kV de uma subestação AIS durante uma desconexão. Componentes de campo eletromagnético apresentam valores de pico que chegam a sofrer variação à medida que se distancia do barramento na taxa de $1 / r$, podendo até chegar a dobrar. As frequências dominantes de transientes de comutação são entre 0,5 MHz e 120 MHz, variando inversamente com a tensão da subestação, e esta variação é ainda mais alta em subestações GIS [6].

Entre 1986 e 1990, doze programas de testes de comutação de transientes foram realizados em subestações no Novo México, Colorado, Alabama, Virgínia como uma tarefa sob o projeto do EPRI, o RP 2674-1. Foram registrados fenômenos transitórios em mais de 700 eventos de comutação, produzindo até quatro registros de dados por evento. Este programa de medição resultou em mais de 500 MB de dados de interferência eletromagnética em subestações que caracterizam fenômenos transitórios associados à geração, propagação, interação e efeitos de eventos de chaveamento. Os eventos medidos incluem desconexão de circuitos, operação de disjuntores, energização de linha, e simulação de falhas. As medições foram realizadas em 115 kV, 230 kV, 345 kV e 500 kV em subestações AIS e em 230 kV e 500 kV para subestações GIS [6].

O banco de dados completo contém muitas medidas referentes à interferência eletromagnética entre as fontes e os equipamentos afetados. Isso foi realizado através de medidas simultâneas de transitórios em barramentos, transitórios de campo elétrico e magnético, e transitórios de tensão e corrente acoplados na fiação do cabo de controle para um dado evento de atuação do relé. Os dados de interferência eletromagnética obtidos fornecem base para, em primeiro lugar, a compreensão sistemática de propagação da interferência eletromagnética e os mecanismos de acoplamento em subestações e, em segundo, a validação do número de modelos de EMI [6] usados para testar a compreensão dos fenômenos e para prever a interferência, seus efeitos e a eficácia das técnicas de mitigação em regimes que não são facilmente testados. Estes dados são coletados através da instalação de sensores próximos ao disjuntor, que geralmente fica situado em um ponto mais central da subestação.

Sensores de medição de campo elétrico e magnético foram colocados diretamente abaixo do barramento trifásico captando os campos de maior intensidade para uma determinada operação, e orientado de modo a registrar o máximo de componentes de campo esperados. As componentes de polarização dominantes são o campo elétrico vertical e o campo magnético horizontal (perpendicular ao barramento e paralelo ao solo). Ambas as localizações dos sensores

no plano de terra e no espaço livre (acima do solo) foram utilizadas para investigar variações do campo com a altura. A colocação de sensores de campo eletromagnético junto ao solo fornecem uma previsão da polarização do campo desde que as condições de contorno sejam conhecidas. A Figura 7 ilustra uma configuração típica para medição de campo eletromagnético transitório em subestações AIS.

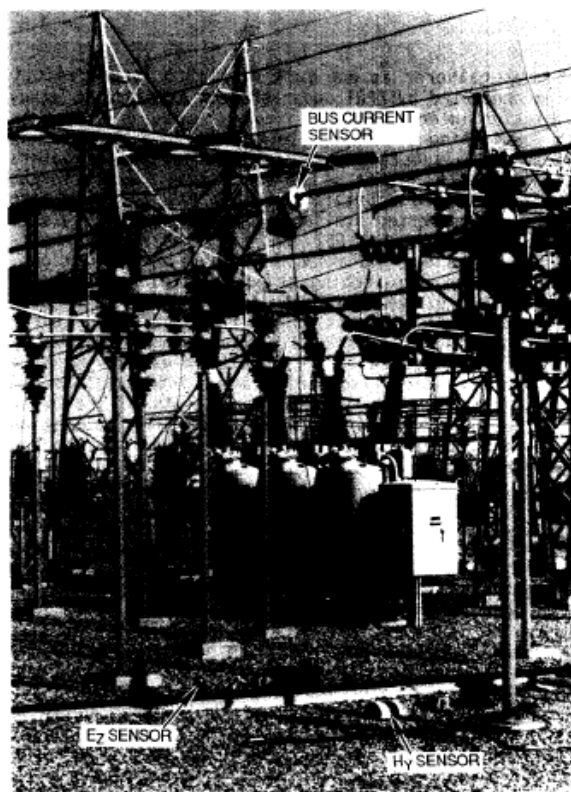


Figura 7. Geometria dos sensores em uma subestação de 115kV (Adaptado de [6]).

Para melhor caracterizar e comparar as medições de campo elétrico e magnético produzidos durante a operação de chaves seccionadoras e disjuntores em subestações AIS, em diferentes níveis de tensão, será apresentado a seguir os resultados das medições em termos de *macroburst* e *micropulse*, conforme definimos anteriormente.

Na tabela 1 apresentamos os resultados para campo elétrico e magnético transitórios resultante da operação de abertura de chave seccionadora de 115, 230 e 500 kV. A totalidade de transitórios produzidos durante a operação das seccionadoras é denominada como *macroburst*, e pode ser caracterizado em termos de duração, total de transitórios produzidos e pela variação da amplitude entre a menor e a maior, e pela frequência das repetições (PRF – *Pulse Repetition Frequency*), sendo o PRF recíproco ao tempo entre cada transitório. Na tabela 1 a operação da seccionadora possui dois tipos, sendo uma manual (HOD – *hand-operated disconnects*), e a outra motorizada (MOD – *motor-operated disconnects*).

	115 kV (HODs)	230 kV (HODs)	500 kV (MODs)
Campos E ou H - <i>Macroburst</i>			
Duração	0,04 – 2 seg	≤ 2 seg	~ 0,6 seg
Quantidade	60 - 10000	≤ 10000	≤ 3000
Variação da amplitude	60 dB	≥ 60 dB	≥ 60 dB
PRF	120 Hz – 40 kHz	≥ 120 Hz	≥ 120 Hz

Tabela 1. Transitórios de desconexão em AIS – *Macroburst* (Adaptado de [6]).

Conforme tabela 1, podemos observar que a duração do transitório pode durar até 2 segundos com 120 ciclos em 60Hz, e pode produzir até 10.000 transitórios. Para este tipo de operação, quando os contatos são fechados ao mesmo tempo cerca de 350 transitórios de amplitude muito baixa, podem ocorrer em um intervalo correspondente a meio ciclo (8,334 ms). Isto corresponde a um PRF de 42kHz. Quando os contatos estão praticamente separados (no fim ou no início da operação da chave seccionadora) e um arco voltaico persiste entre eles, um transitório único e de elevada amplitude é produzido a cada meio ciclo (correspondendo a um PRF de 120 Hz). Assim, para uma operação de seccionamento manual, o PRF vai variar de 120 Hz a 40 kHz durante um simples *macroburst* [6]. Um exemplo de *macroburst* produzido pela operação manual de uma seccionadora pode ser visto através da figura 8.

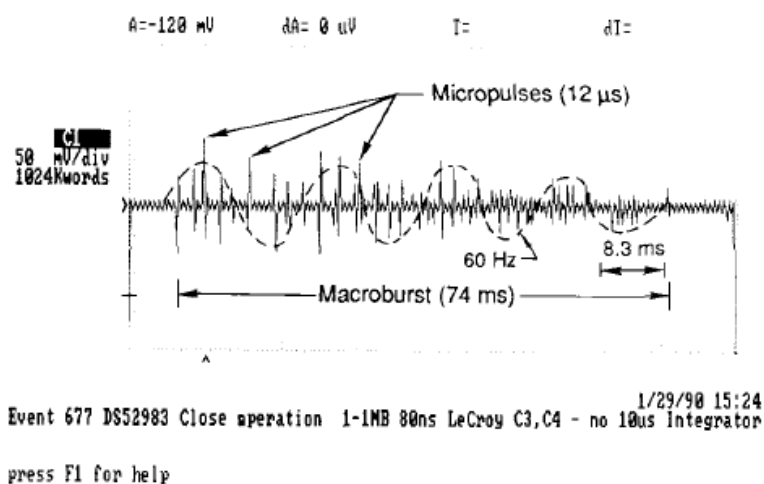


Figura 8. *Macroburst* de campo magnético devido a uma operação manual de seccionamento em uma subestação de 115 kV (Adaptado de [6]).

A estrutura geral dos *macrobursts* são diferentes para as operações de desconexão de abertura e fechamento. Os transitórios de maior amplitude são produzidos durante a operação de fechamento, e os de menor amplitude durante a operação de abertura. Assim, os *macrobursts* para estas operações são o inverso do outro. Operações de abertura e fechamento produzem transitórios de igual amplitude de pico. Além disso, quanto mais altas for a tensão da subestação, mais rápido será a operação do motor usado para desconexão (MODs), o que produzirá *macrobursts* de duração mais curta e com menos transitórios, como mostrado na Tabela 1 [6].

Os *micropulses* são transitórios individuais de um *macroburst*. Cada *micropulse* é o resultado de um único arco voltaico que ocorre entre os polos de uma mesma fase durante a operação de desconexão, seja de abertura ou fechamento, de uma seccionadora. Cada arco excita transitórios de tensão e corrente no barramento da subestação que por sua vez irradia energia em forma de campo elétrico e magnético. A tabela 2 caracteriza os transitórios de campo elétrico e magnético produzidos por operações de desconexão em subestações de 115, 230 e 500 kV. Os valores reportados na tabela 2 são as mais elevadas amplitudes típicas de *macroburst* causados devido à operação de seccionamento. *Micropulses* de campo elétrico e magnético são caracterizados em termos da magnitude da polarização da componente principal, das principais frequências, duração e formas de onda. A polarização da componente principal corresponde ao campo elétrico vertical entre o barramento e a terra, e o campo magnético corresponde àquele campo perpendicular ao barramento e horizontal ao em relação à terra. Estas direções são relativas à seção do barramento excitada próximo a localidade da medição do campo.

	<i>115 kV (HODs)</i>	<i>230 kV (HODs)</i>	<i>500 kV (MODs)</i>
Campo Elétrico - E			
Magnitude (0 – pico) [kV/m]	7	5,5	14
Amplitude Máxima [kV/m]	9,3	7	16
Frequência dominante [MHz – DC]	2 - 3	1 - 2	0,5
Duração [ms]	25 μ s – 10 ms	\leq 10	\leq 10
Tipo de forma de onda	unipolar	unipolar	unipolar
Campo Magnético [H]			

Magnitude (pico – pico) [A/m]	37	70	157
Amplitude Máxima [A/m]	49	84	212
Frequência dominante [MHz]	2 - 3	1 - 2	0,5
Duração [μ s]	10	10	10
Tipo de forma de onda	bipolar	bipolar	Bipolar

Tabela 2. Transitórios de desconexão em AIS – *Micropulse* (Adaptado de [6]).

Os transitórios de campo elétrico são caracterizados como unipolar, pois as formas de onda alcançam a máxima amplitude em algumas centenas de nano segundos, sofrendo uma queda em após 10 a 15 μ s, permanecendo com amplitudes elevadas (determinado pela tensão do barramento) entre 25 μ s a até 10 ms. A duração do último transitório de campo elétrico resultante de um processo de desconexão pode chegar a ser maior que 10 ms, dependendo do tempo entre os arcos. Na figura 9 podemos observar exemplos de transitórios rápidos de campo elétrico para diferentes níveis de tensão. Na figura 10 é mostramos uma medição de transitório de campo elétrico que enfatiza componente atrasada (DC) entre arcos no barramento. A grande variação na duração do transitório de campo elétrico é o resultado de uma alta variação no PRF mostrado na tabela 1, bem com a influência de arcos voltaicos nos barramentos adjacentes. Geralmente as maiores amplitudes de transitórios de campo elétrico duram de 5 a 10 ms, ou seja, o tempo entre arcos consecutivos que ocorrem com cerca de meio ciclo de intervalo.

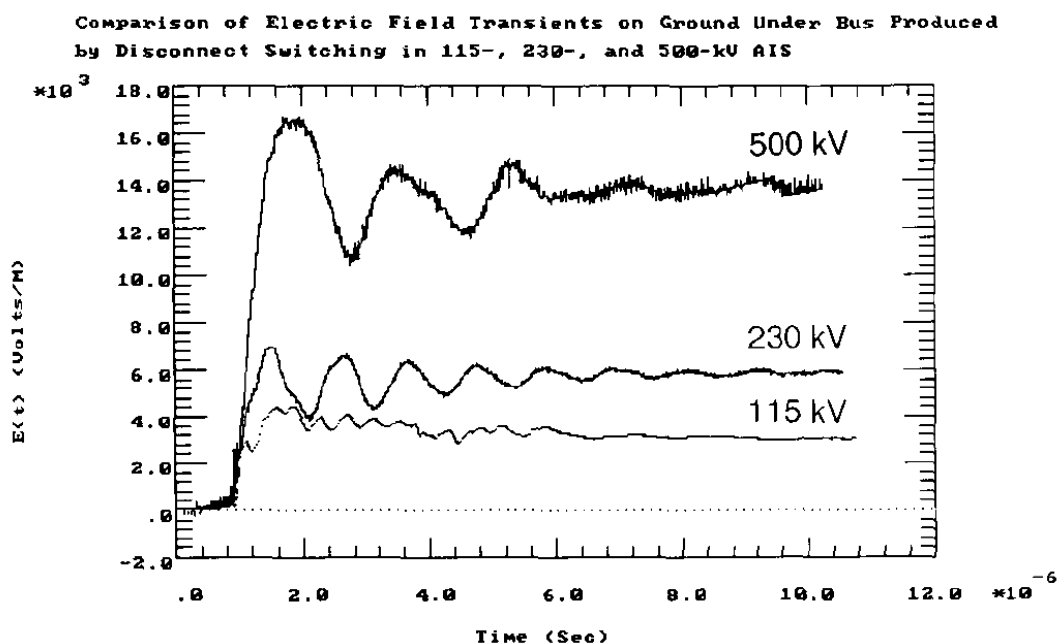


Figura 9. Comparação entre os primeiros instantes de transitórios de campo elétrico em subestações AIS para diferentes tensões (Adaptado de [6]).

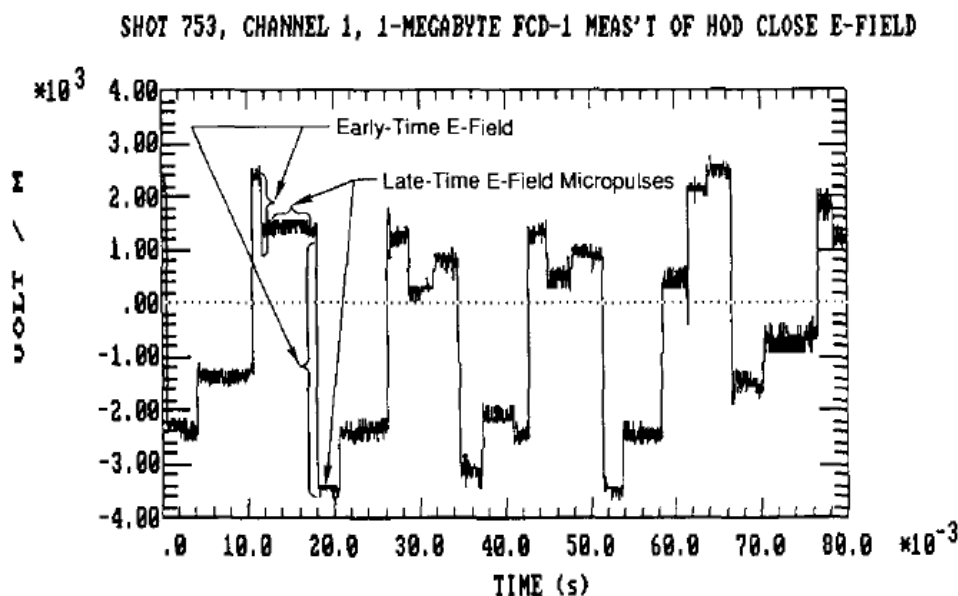


Figura 10. Porção de um *macroburst* de campo elétrico em 115 kV enfatizando o atraso entre os transitórios (Adaptado de [6]).

As maiores amplitudes de transitórias de campo elétrico ocorrem um vez a cada meio ciclo, e alternam a polaridade entre positivo e negativo. A tabela 2 indica tanto o valor médio quanto o valor máximo de pico medido para o campo elétrico, quando se estava tentando obter a maior amplitude na faixa de medição para aquela localidade. Em média, as amplitudes de pico de campo elétrico transitório no solo abaixo do barramento foram de 7 kV / m, 5,5 kV / m, e 14 kV / m para 115 kV, 230 kV e 500 kV respectivamente para AIS. Embora tenhamos alguma tendência para que os picos de campo aumentem com o aumento da tensão da subestação seja observado, o escalonamento não é conforme o esperado. Picos de amplitudes em 115 kV são muito altas ou aqueles em 230 kV e 500 kV são muito baixos. Uma vez que os valores indicados na Tabela 1 são calculados com base muitos disparos e mostrou pouca variação entre os disparos, alguma outra explicação deve ser procurada. As diferenças na altura do barramento não contam para isso. Uma possibilidade é que uma vez que apenas seções curtas do barramento foram excitadas durante a operação em 230 kV e 500 kV, que ambos os dados podem incluir interferências mais destrutivo para o sensor de campo elétrico devido a influências de estruturas vizinhas [6].

Ao contrário do campo elétrico, os transitórios de campo magnético são caracterizados por possuírem forma de onda com característica bipolar (dupla polaridade), atingindo amplitude de pico em várias centenas de nano-segundos, mas passando por uma decadência oscilatória de

amplitude zero entre 10 e 15 μs . Assim, enquanto a forma de onda de campo elétrico transitório reflete o comportamento temporal da tensão no barramento, o campo magnético transitório segue o barramento de corrente. As maiores amplitudes de campo magnético transitório ocorrem uma vez a cada meio ciclo e revertendo a polaridade. Os picos de amplitude positiva e negativa de um campo magnético transitório são muitas vezes bastante diferentes em magnitude, assim inversões de polaridade são facilmente observados. Em média, picos de transitórios de campo magnético sobre o chão abaixo do barramento são 37 A / m, 70 A / m, e 157 A / m para 115 kV, 230 kV e 500 kV AIS, variando assim diretamente com a tensão da subestação. As maiores de amplitudes de campo magnético transitório são também indicados na tabela 2. Exemplos de *micropulses* de campo magnético medidos em subestações de diferentes níveis de tensão apresentadas na Figura 11 [6].

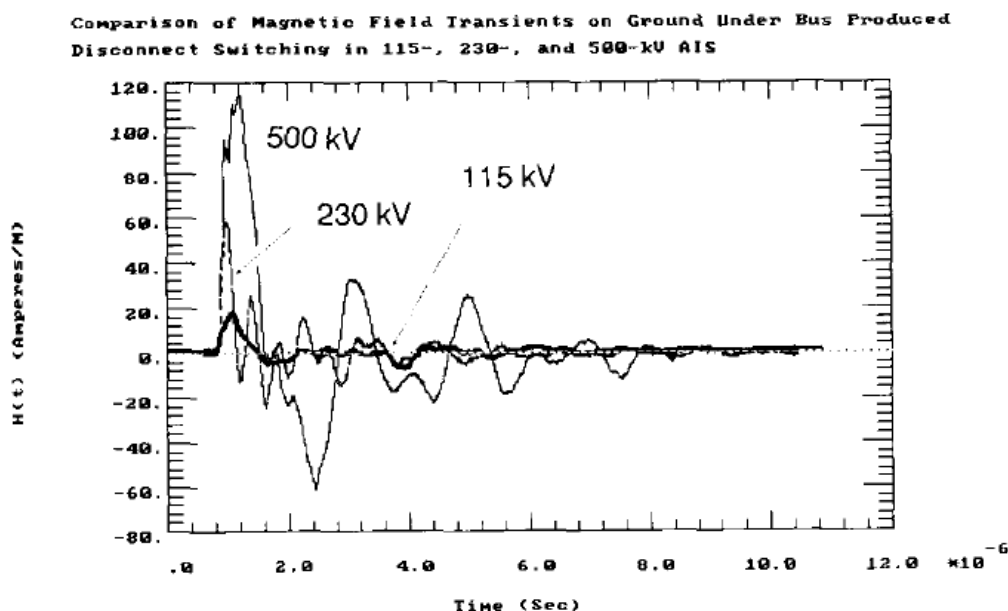


Figura 11. Comparando transientes de *micropulse* de campo magnético em subestações de tensão diferente. Amplitudes Máximas de *Micropulses* extraídas de cada *Macroburst* (Adaptado de [6]).

A Tabela 2 também indica as frequências dominantes observados em transientes de campo elétrico e magnético e como eles variam com a tensão da subestação. Nota-se que, com exceção para a componente DC do campo elétrico resultante da carga armazenadas entre arcos, os campos E e H exibem as mesmas frequências dominantes. Estas frequências situam-se entre 0,5 e 3 MHz para as três diferentes tensões das subestações e descrevem o comportamento oscilatório visto nas figuras 9 e 11. Esta frequência dominante está associada com as reflexões das ondas transitórias que viajam a partir de pontos em ambos os lados do equipamento que está sendo operado onde há uma mudança significativa na impedância, onde tipicamente há um disjuntor com o circuito aberto e no outro lado há um transformador de potencia. À medida que

a tensão da subestação aumenta a separação entre estes pontos e as frequências de oscilação diminuem. Isso explica a escala inversa da frequência dominante nos transitórios de tensão com o aumento do nível de tensão da subestação [6].

Na tabela 3 mostra a variação nas amplitudes de campo elétrico e magnético em detrimento da variação da altura da medição entre o solo e o barramento. O campo elétrico na vertical e o campo magnético na horizontal foram medidos abaixo do bus em alturas de 0 m, 1 m, e 2,3 m acima do solo. A altura do barramento até o ponto de medição do campo é observado na tabela. Os dados estão completos apenas para subestações de 115 kV, mas poderiam fornecer uma base para estimar valores para subestações de 230 kV e 500 kV. A partir da Tabela 3, nota-se que a amplitude de pico de campo elétrico dobra em apenas 1 m acima do solo, enquanto que o campo magnético aumenta mais gradual.

	<i>115 kV</i>	<i>230 kV</i>	<i>500 kV</i>
Amplitude de Campo Elétrico - E			
h = 0 (solo) [kV/m]	7	5,5	13,5
h = 1 m [kV/m]	14	-	-
h = 2,3 m [kV/m]	15,4	-	-
Amplitude de Campo Magnético - H			
h = 0 (solo) [A/m]	36,7	70,4	157
h = 1 m [A/m]	45,2	82,2	-
h = 2,3 m [A/m]	56,1	-	-
Altura do barramento [m]	4,88	5,18	8,33

Tabela 3. Transitórios de campo elétrico e magnético devido a chaveamento, variando a altura em relação ao solo (Adaptado de [6]).

A tabela 4 mostra como as amplitudes de pico do campo elétrico e magnético diminuem a medida que nos afastamos a distâncias de 0 m, 10 m, e 20 m do barramento. Em todos os casos, os campos foram medidos no nível do solo e foram escalonadas para o valor de pico visto sob o barramento. Na maioria dos casos, todas as três medições de campo foram realizadas simultaneamente. Nas subestações de 115 e 230 kV, as medições foram efetuadas externamente

ao perímetro do barramento, mas para a subestação de 500 kV as medições foram feitas no lado de dentro. Para a subestação de 500 kV, a medição a 20 metros foi realizada de maneira equidistante em ambos os lados da barra em anel.

	<i>115 kV</i>	<i>230 kV</i>	<i>500 kV</i>
Ampl. de Pico Campo Elétrico [E]			
d = 0 m, h = 0 m [kV/m]	9,3	6,8	15,2
d = 10 m, h = 0 m [kV/m]	1,8	1,7	6,6
d = 20 m, h = 0 m [kV/m]	0,6	0,8	1,3
Ampl. de Pico Campo Magnético [H]			
d = 0 m, h = 0 m [A/m]	49	83,8	212
d = 10 m, h = 0 m [A/m]	7,2	20,6	37,5
d = 20 m, h = 0 m [A/m]	2,4	4,2	25,8

Tabela 3. Transitórios de campo elétrico e magnético devido a chaveamento, variando a distância do barramento (d) e mantendo a altura em relação ao solo (h) igual a zero (Adaptado de [6]).

Cada operação de comutação em uma subestação produz uma multiplicidade de transientes do campo elétrico e magnético cujo número, magnitude e forma de onda podem variar muito, dependendo do tipo e da tensão da subestação, o tipo de equipamento que será operado, a velocidade de operação, as características elétricas do barramento a ser excitado, e a localização do ponto de medição do campo em relação ao barramento excitado. Estes campos transitórios representam um componente significativo de irradiação de interferência eletromagnética (EMI) que podem ser prejudiciais a diversos equipamentos em uma subestação.

2.4.2 Transitórios Causados por descargas atmosféricas

Em subestações de alta tensão danos causados por mau funcionamento de equipamentos elétricos e eletrônicos são comumente causados por operações de chaveamento em circuitos primário (alta tensão, 138 kV por exemplo), faltas para terra e descargas atmosféricas. Estes equipamentos quando situados em salas de controle geralmente comandam toda a operação da subestação, inclusive a abertura e fechamento de equipamentos como chaves seccionadoras e disjuntores, bem como a comunicação com outras subestações e centros de operação. Logo a

confiabilidade do sistema está diretamente ligada ao correto funcionamento dos diversos tipos de equipamentos elétricos e eletrônicos nesta situados.

Os problemas causados pelas descargas atmosféricas e seus transitórios estão diretamente ligados aos equipamentos de medição e controle da subestação, em especial aos equipamentos digitais que utilizam microprocessadores como base, e que por sua vez são altamente sensíveis a sobretensões e sobrecorrentes. Equipamentos de proteção e controle mais antigos, com base de funcionamento eletromecânico, tinham uma isolação melhor e por isso eram menos suscetíveis a interferências eletromagnéticas. Porém, em ambos os casos, as os transitórios que chegam até os equipamentos através dos cabos de controle a eles ligados, são um grande causador de mau funcionamento.

Tensões transitórias podem também alterar as características de um componente eletrônico, sem qualquer sinal de imediato de danos. A menos que haja uma maneira de determinar as tensões transitórias, tais anomalias podem atuar despercebidas e, eventualmente, levar a uma falha prematura e inesperada de um componente [7].

Tensões ou correntes transitórias podem ser medidas ou calculadas para condições de descargas atmosféricas. Aproximação de campo elétrico e magnético é mais complicada. Não há nenhum método rápido, como por exemplo, um osciloscópio digital para gravar campo o elétrico ou o campo magnético transitório no ar, sem que haja alguma perturbação. Além disso, deve ser notado que o campo elétrico e magnético causado por um impulso interage diretamente em dispositivos elétricos e sistemas eletrônicos [7].

Para analisar os campos elétricos e magnéticos em virtude de impulso atmosférico o autor em [7] propõem a utilização de uma modelagem matemática e simulações através do software HIFREQ. A simulação é baseada em uma subestação com barramento de entrada em 110 kV com disjuntor, barramento de transformação com dois transformadores de 110 / 15 kV de 16 MVA. O autor havia modelado esta subestação previamente em outro trabalho, e além dos equipamentos, a modelagem conta com uma malha de terra com condutores metálicos enterrados a 80 cm da superfície com seção do condutor metálico de 80 mm². A resistividade do solo utilizada foi de 100 Ωm e a permissividade relativa igual a um. A fonte de incidência do impulso atmosférico da simulação foi arbitrada a 22 metros de altura, considerando uma corrente de impulso de 100 kA (pico) e tempo de 10 / 350 μs. O modelo utilizado como base é ilustrado pela figura 12.

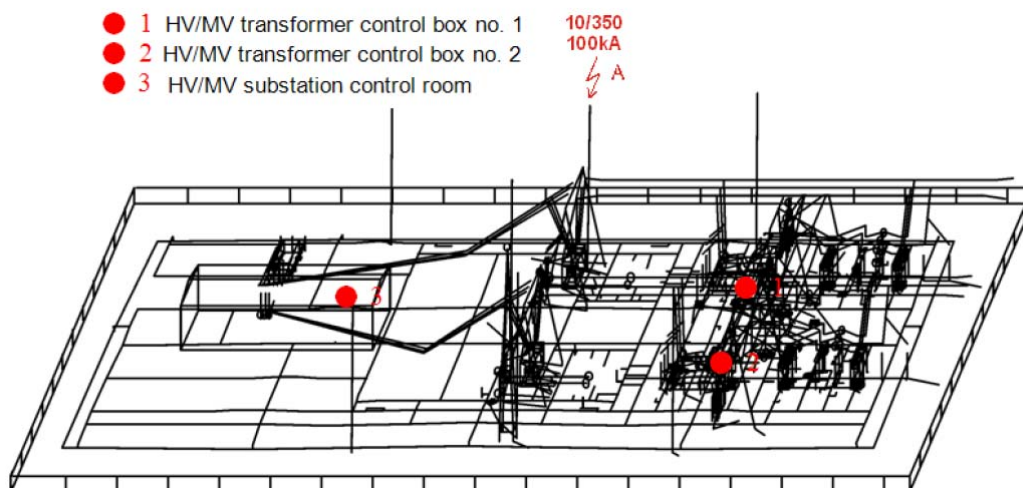


Figura 12. Representação gráfica do modelo simplificado da subestação – modelo 3D (Adaptado de [7]).

A metodologia de cálculo utilizada em [7] assume a decomposição da frequência surto no domínio do tempo, computações no domínio da frequência para uma única unidade de corrente harmônica e sobreposição dos cálculos no domínio da frequência modulada pela amplitude da corrente do raio.

Os resultados providos pela simulação mostrados nas figuras de 13 a 18 representam os resultados dos cálculos no domínio do tempo para pontos de incidência da descarga próximo a caixa de controle do transformador 1, transformador 2 e sala de controle.

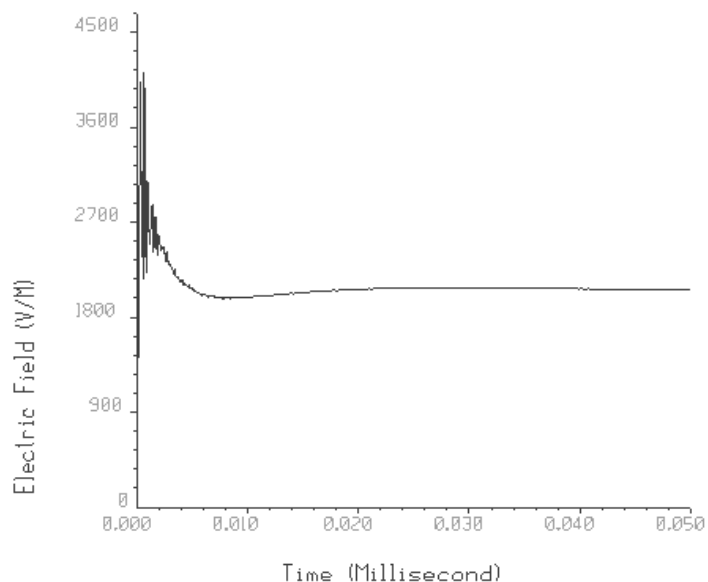


Figura 13. Campo elétrico próximo a caixa de controle do transformador 1 medido a 0,01 m de altura (Adaptado de [7]).

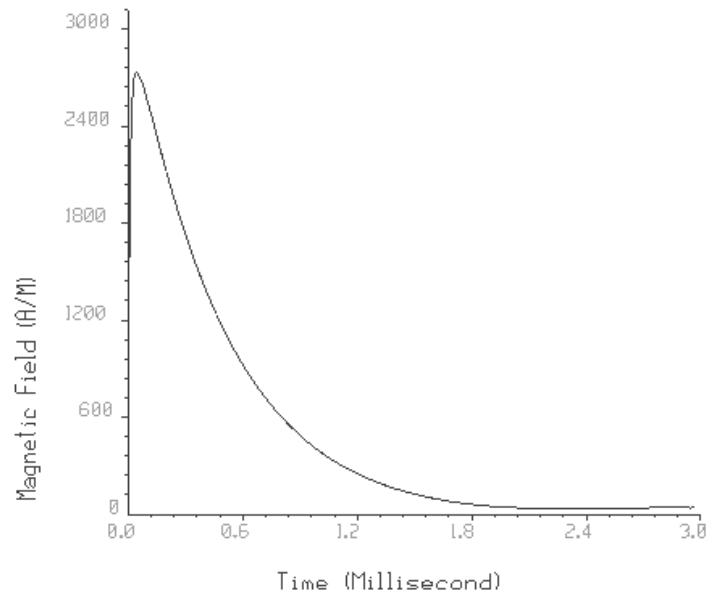


Figura 14. Campo magnético próximo a caixa de controle do transformador 1 medido a 0,01 m de altura (Adaptado de [7]).

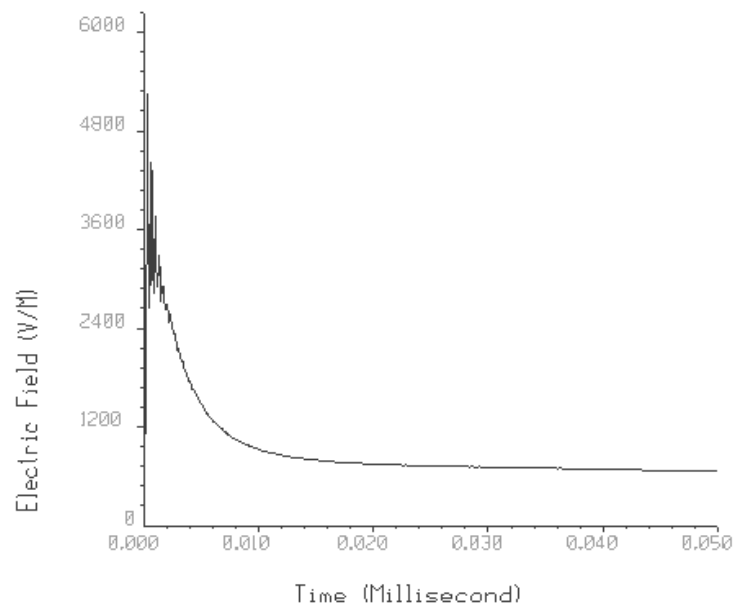


Figura 15. Campo elétrico próximo a caixa de controle do transformador 2 medido a 0,01 m de altura (Adaptado de [7]).

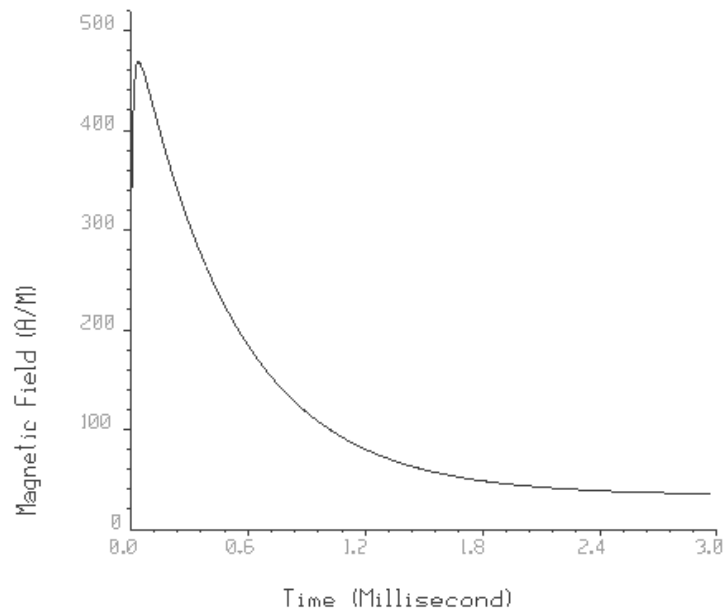


Figura 16. Campo magnético próximo a caixa de controle do transformador 2 medido a 0,01 m de altura (Adaptado de [7]).

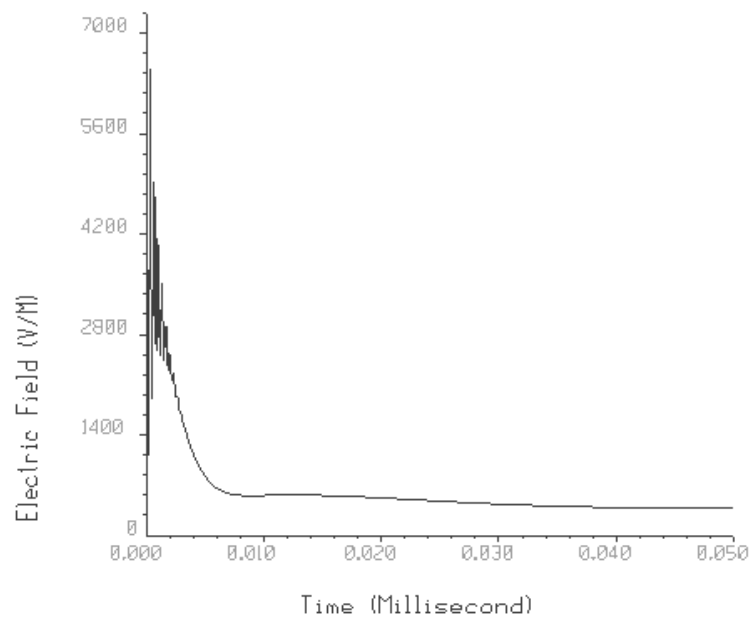


Figura 17. Campo elétrico medido a 0,01 m de altura na casa de controle da subestação (Adaptado de [7]).

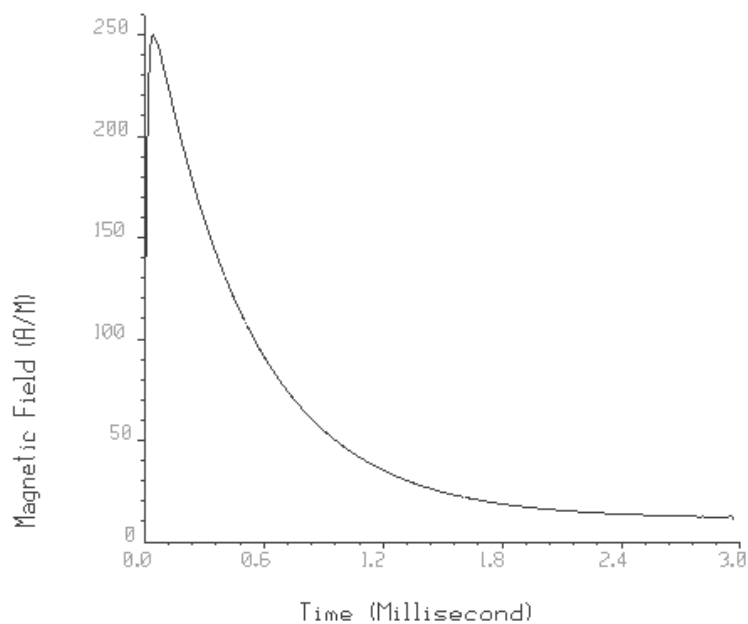


Figura 18. Campo magnético medido a 0,01 m de altura na casa de controle da subestação (Adaptado de [7]).

Com base nas simulações apresentadas em [7], e acima representadas podemos inferir que impulsos atmosféricos resultam em valores elevados de campo elétrico (na ordem de 6 kV/m) e magnético (na ordem de 2,7 kA / m) não só onde incidem, mas também em estruturas e equipamentos próximos devido a propagação das ondas transitórias resultante da descarga atmosférica. Percebe-se ainda que a presença de sucessivas reflexões das ondas de campo elétrico, conforme observado nas figuras 13, 15 e 17, onde a influência da impedância de aterramento fica evidente na dissipação do impulso atmosférico para o solo.

3 Mecanismos de Acoplamento de Campos Eletromagnéticos em Cabos de Controle em Subestações

Este capítulo tem como objetivo analisar a interferência eletromagnética em cabos de controle, bem como avaliar a utilização de blindagem em cabos de controle nas subestações de alta tensão, de modo que estes se tornem menos suscetíveis aos fenômenos eletromagnéticos em uma subestação.

3.1. Cabo de Controle Blindado

Os cabos, quando blindados, possuem uma menor suscetibilidade a interferências eletromagnéticas, mas para que tal função seja exercida de modo a garantir a confiabilidade do sistema, este cabo deve ser corretamente dimensionado no que diz respeito a sua blindagem. Além disso, sua utilização deve seguir as normas como a IEEE Std 789-1988 “*Performance Requirements for Communications and Control Cables for Application in High Voltage Environments*”, que trata dos requisitos de desempenho para cabos de controle utilizados em ambientes onde há alta tensão.

Antes de seguir para o próximo item deste capítulo, convém apresentarmos algumas definições relevantes apresentadas pela IEEE STD 789-1988. Uma dessas definições é a blindagem (*cable shield*), que segundo a norma é um invólucro, composto por fios metálicos, tira ou chapa metálica que inclui um fio ou grupo de fios, ou por cabo, construído de modo que substancialmente todos os pontos sobre a superfície do isolamento subjacente ou envoltório do núcleo estão ao potencial de terra ou em algum potencial predeterminada em relação à terra.

Outra definição relevante que a norma traz refere-se ao cabo de comunicação (*communication cable*), que é definido como um cabo que transporta um baixo nível de energia elétrica, geralmente utilizado para a transmissão de frequências de comunicação. Um cabo de telefone seria um exemplo, pois consiste de dois ou mais condutores, sólidos, isolados, torcidos, emparelhados, blindados, ou condutores não blindados, que variam de 19 a 26 AWG.

Por fim, a norma IEEE STD 789-1988 define como cabo de controle (*control cable*) o cabo que carrega geralmente baixos níveis de corrente, utilizados para fins de indicação ou para mudar o estado de funcionamento um dispositivo de utilização em um sistema auxiliar de controle ou proteção. Um cabo de controle geralmente consiste de dois ou mais condutores isolados, não pareados, blindados ou não. Os diâmetros do condutor podem variar entre 22 a 14 AWG (0,3 mm² a 1,5 mm²), sendo estes condutores sólidos ou flexíveis. O isolamento do condutor, normalmente, tem classe de tensão entre 300 V, 600 V, ou 1000 Vrms. Os cabos de controle trabalham com tensões de até 250 Vcc ou 120 Vca, no caso da corrente esta pode ser na casa dos miliamperes, a até 20 A para alguma função de *tripping* do disjuntor por exemplo. Em relação às frequências, estas podem variar de 17 a 60 Hz para controle em corrente alternada, e entre 5 kHz e 3 MHz para sinais analógicos de sistema *carrier*, conforme definido em [12].

Os cabos com blindagem podem ser singelos ou múltiplos, são fabricados com condutores de cobre, para tensões de 0,6/1 kV, apresentando isolação extrudada de PVC, EPR,

XLPE ou silicone. Estão disponíveis vários modelos: PVC/PVC, EPR/PVC, EPR/EPR e XLPE/PVC, para instalações fixas, em circuitos de geração e distribuição de energia elétrica; Silicone 200°C 0,6/1 kV, para uso em resistências elétricas, estufas e ligações de aparelhos portáteis, em aplicações nas quais são necessários condutores resistentes ao calor; Cabo XLPE, empregados em circuitos internos de instalações elétricas de baixa tensão e linhas de distribuição de energia elétrica; e Silicone 400°C 1 kV, para aplicações em ambientes ou em equipamentos que trabalham com altas temperaturas, como estufas, fornos, injetoras e estressoras [8, 9].

Entre a parte externa da isolação e o condutor, existe uma diferença de potencial e, portanto, um campo elétrico. Este campo elétrico não é uniforme, pois a superfície do condutor não é uniforme e o potencial no exterior do cabo também não. Dependendo das linhas do campo elétrico, podem surgir pontos no interior da isolação onde o gradiente de tensão seja maior que o suportável pelo material. Gradientes elevadas podem envelhecer ou até romper a isolação. Para evitar este risco é feita a blindagem do condutor e da isolação [9].

A blindagem pode ser feita em três níveis dependendo da classe de tensão do cabo. Abaixo apresentamos estes níveis [9]:

- 1. Blindagem do condutor:** a blindagem do condutor consiste na aplicação de material semicondutor sobre o condutor encordado. Esta camada (extrudada) preenche os vazios entre a isolação e os fios do condutor, evitando a ionização do ar por ventura existente. Com o material semicondutor, o campo elétrico forma linhas mais uniformes entre o condutor e a isolação, evitando a concentração de linhas de campo.
 - 2. Blindagem da isolação:** para evitar a distribuição irregular do campo elétrico ao redor da isolação, também é feita uma blindagem externa. A deformação das linhas de campo deve a influencia de potenciais externos ao cabo, principalmente condutores próximos. Para eliminar este efeito se aplicam uma camada de material semicondutor envolvida por metal condutor (não magnético), que equaliza o potencial ao redor da isolação. Esta blindagem confina o campo elétrico ao interior da isolação, evitando a influencia em condutores próximos e deixando as linhas de campo com distribuição radial. A camada semicondutora da blindagem da isolação é chamada parte não metálica, e pode ser realizada com pó de grafite e fita têxtil semicondutora ou através de uma camada de composto polimérico semicondutor extrudada. A camada de cobre, parte metálica da blindagem, pode ser realizada por uma fita delgada de
-

cobre enrolada sobre a isolação, ou por fios de cobre dispostos longitudinalmente, formando uma coroa concêntrica. Atualmente a 1ª camada semicondutora, a isolação, e a 2ª camada semicondutora são extrudadas simultaneamente, num processo chamado tríplice extrusão, recebendo depois a blindagem metálica de fios ou fita de cobre. A blindagem geralmente não é necessária em baixa tensão, porem, em media tensão os campos elétricos são intensos, sendo importante uma blindagem confiável. A presença de impurezas entre as camadas semicondutoras e a isolação pode comprometer a eficiência da blindagem, sendo importante um processo de fabricação que minimize esta possibilidade. Outra função da blindagem da isolação é servir como um caminho de baixa impedância para a correntes de curto circuito, aumentando a segurança da instalação.

- 3. Blindagem eletrostática:** em cabos de controle, instrumentação e comunicações, existe outro tipo de blindagem: a blindagem eletrostática. Esta tem por objetivo evitar a influencia de campos eletromagnéticos externos nos sinais transmitidos. Constitui-se de uma camada de material condutor envolvendo o cabo. Pode ser realizada com fitas de cobre, fios de cobre trançado ou fita de poliéster aluminizado, dependendo do tipo de cabo. Deve ter continuidade elétrica e ser aterrada, para permitir a circulação de correntes que anulem ou minimizem o campo magnético incidente. O aterramento também garante o potencial de terra ao redor do cabo. Geralmente sobre a blindagem é extrudada uma capa interna de composto polimérico para evitar o atrito do cobre com a isolação das veias. Em cabos de instrumentação a fita metalizada é acompanhada por um condutor nu ou estanhado, que garante a continuidade elétrica.

A blindagem de cabos de controle é recomendada quando estes estão instalados em ambientes eletromagneticamente carregados, como é o caso de uma subestação de alta tensão.

Existem basicamente no mercado dois tipos de blindagem utilizada em cabos de controle, sendo uma delas a blindagem com fita metálica (em geral de alumínio, podendo ser de cobre conforme opção do cliente), conforme figura 19, aplicada elicoidalmente entre a isolação e a capa protetora que cobre o cabo. Pode-se ainda se utilizar uma fina camada de poliéster para aumentar a resistência mecânica do cabo. Este tipo de cobertura fornece uma cobertura de 100% dos condutores que rodeia. Alguns destes cabos podem ainda conter o fio dreno, que é em geral um conduto de cobre nu utilizado para conectar a blindagem a terra.



Figura 19. Cabo de controle blindado 0,6/1kV por fita metálica (Adaptado de [8]).

Outro tipo de blindagem encontrada é a composta por uma malha de fios de cobre trançado helicoidalmente entre a isolação e a capa protetora que cobre o cabo, conforme figura 20. A trança pode ser definida como uma malha tecida de fios de cobre nu, estanhado ou não. A trança fornece uma baixa resistência para a terra, sendo ainda de fácil conexão deste a terra através de solda ou conector. Mas escudos trançados não fornecem 100% de cobertura. Eles permitem pequenas falhas na blindagem. Dependendo do aperto da malha, as tranças fornecem tipicamente entre 70% e 95% de cobertura. Quando o cabo é estacionário, 70% são normalmente suficientes. Na verdade, aumentar o percentual de cobertura não aumenta a eficácia da blindagem. Os cabos blindados por malha trançada tem o diâmetro superior ao cabo blindado por fita, e seu custo é um pouco mais elevado.



Figura 20. Cabo de controle 0,6/1kV blindado por malha de fios de cobre trançado (Adaptado de [8]).

A principal função da blindagem é atuar como uma gaiola de Faraday, de modo a reduzir os ruídos externos provenientes de diversas fontes conforme discutido anteriormente, que podem afetar os sinais que este tipo de cabo transporta. Conectando a blindagem a terra se faz com que os ruídos sejam drenados para terra, sem interferir no sinal transportado.

3.2. Acoplamentos em Cabos de Controle em Subestações de Alta Tensão

Existem três mecanismos de interferência entre fonte e circuito vítima: i) acoplamento por campo elétrico, ii) acoplamento por campo magnético e iii) acoplamento por campo eletromagnético. Em alguns casos, somente um desses mecanismos pode efetivamente existir, enquanto em outros casos, todos podem estar presentes [10].

Os ruídos podem ser classificados quanto ao modo de propagação, ao tipo e quanto à duração. Quanto ao modo de propagação, os ruídos classificam-se em irradiados e conduzidos, conforme definido [12]:

- ✓ Ruídos irradiados - São campos magnéticos e elétricos que se propagam pelo ar, semelhantes às ondas de rádio. Eles são gerados em algum ponto do sistema e acoplados eletromagneticamente a algum trecho de circuito no qual interferem. Esse trecho de circuito acaba funcionando como uma antena para esse tipo de ruído. Afetam com maior intensidade os aparelhos de áudio e de medição e em redes de computadores apresentam uma importância menor.
- ✓ Ruídos conduzidos - Os ruídos que se propagam por condução, utilizam algum meio físico para atingir o circuito que interferem (cabearamento, conduítes, etc). Geralmente, o meio físico inicial é a linha de distribuição de energia, que recebe toda sorte de interferência devido à complexidade e tamanho da malha elétrica e porque alimenta diversos tipos de equipamentos. O ruído aí presente se propaga facilmente pelas linhas de fase e neutro até o aparelho no qual interfere.

Quanto ao tipo:

- ✓ Ruído de modo comum: são aqueles que se propagam pelas linhas de fase e neutro simultaneamente, fechando o circuito pelo plano de terra. Este por sua vez pode ser causado por:
 - a) indução eletrostática. Com capacitância igual entre os fios de sinal e os arredores, a tensão de ruído desenvolvido irá ser a mesma em ambos os fios de sinal.
 - b) indução eletromagnética. Com o campo magnético que liga os fios de sinal de igual modo, a tensão de ruído desenvolvido irá ser a mesma em ambos os fios de sinal.
-

- ✓ Ruídos de modo diferencial - Este tipo de ruído se propaga apenas pela linha de fase, fechando o circuito pelo neutro ou pelo plano de terra. Em computação, é o que menos afeta os equipamentos.

Quanto à duração, os ruídos são classificados em permanentes (causados por indução), semipermanentes (curto-circuito e partida de motores elétricos) e transitórios (descarga atmosférica, chaveamento de equipamentos de potência como disjuntores, seccionadoras, etc).

Outro fenômeno conhecido, e grande causador de interferência eletromagnética é o Crosstalk ou diafonia, que pode ser definido como inerência eletromagnética entre circuitos elétricos vizinhos [13].

Do ponto vista dos cabos de uma subestação, não existe uma resposta única que atenda a todas as questões relativas às interferências eletromagnéticas. No ambiente de uma subestação, as interferências eletromagnéticas envolvem frequências que vão desde 60 Hz até 20 MHz. Devido, principalmente, às capacitâncias parasitas presentes nos cabos e nos equipamentos e circuitos terminais, o desempenho das soluções para mitigação de problemas de interferência eletromagnética não se apresenta com comportamento uniforme em todo o espectro de frequências de interesse [10].

Medições feitas no pátio da subestação e na sala de controle mostram que altas tensões transitórias que afetam os cabos de controle em uma subestação são provenientes de operações de comutação dos equipamentos do pátio (seccionadores e disjuntores), conforme discutido em [6]. Em [11] descreve-se os mecanismos de acoplamento que geram as tensões transitórias, além de uma comparação entre os transitórios previstos e medidos. No caso analisado o cabo de controle que interliga o disjuntor de 138 kV a sala de controle não é blindado.

O acoplamento de transitórios elétricos com cabos de controle ocorre devido a fonte de arco voltaico que se forma entre os contatos do disjuntor durante sua operação, gerando campos elétricos e magnéticos de alta frequência [6]. Os ruídos produzidos podem ser irradiados, acoplados capacitivamente e indutivamente ao cabo de controle. Estes ruídos indesejados produzem tensões de modo comum e tensões de modo diferencial que interrompem o funcionamento do equipamento de microprocessado (relé / CLP - Controlador Lógico Programável) [11].

Na Figura 21 temos o diagrama do circuito agressor ilustrando a corrente perturbação, onde (I_s) é a corrente a ser injetada no solo (na malha de terra) em torno do disjuntor. A corrente retorna a sala de controle através dos condutores do aterramento entre o disjuntor e a sala de

controle (CCPD). O acoplamento ocorrerá em a parte dos cabos de sinal que são paralelos aos condutores da malha de terra. Os circuitos, positivo e negativo formam um *loop* com os cabos localizados na canaleta entre a o disjuntor e sala de controle [11].

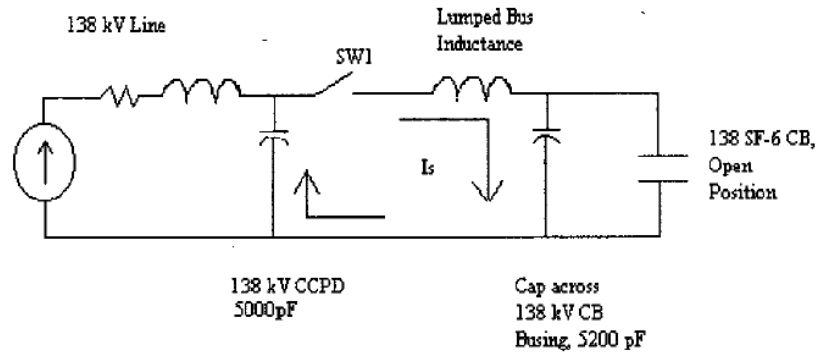


Figura 21. Transitório de corrente, circuito agressor (Adaptado de [11]).

Para a subestação avaliada, o pulso de corrente de alta frequência que chega a sala de controle cria uma fonte de tensão elevada. Na Figura 22, a impedância da malha de terra perto do disjuntor é muito grande a partir da alta frequência da corrente no solo, e a tensão transitória acopla capacitivamente entre os cabos de controle e o cabo do aterramento porque eles estão fisicamente próximos.

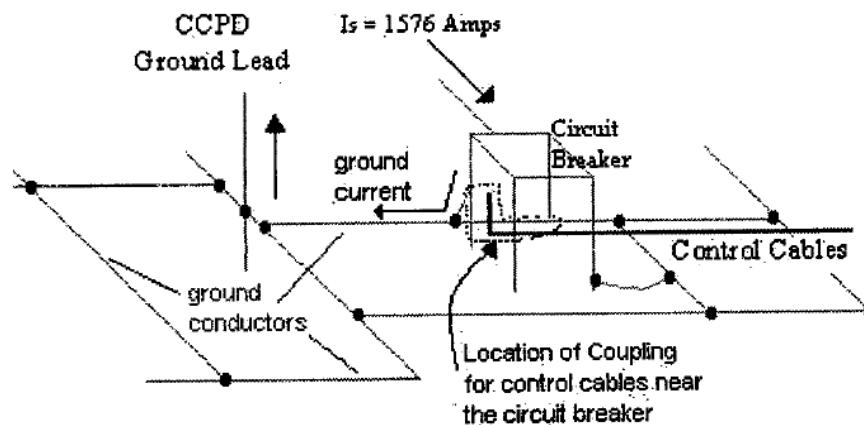


Figura 22. Acoplamento devido a transitórios de corrente no aterramento (Adaptado de [11]).

A tensão transitória gerada nos cabos existentes pode ser reduzida através da utilização de cabos de controle com blindagem total de cobre fita para reduzir o acoplamento do campo eléctrico e magnético nos cabos do circuito. A penetração do campo eléctrico na blindagem é altamente dependente da frequência do sinal, por exemplo, um campo eléctrico com uma frequência de 700 kHz irá ter uma profundidade de pele de 3 mils (1 mil = 0,0254 mm). Uma

fita de cobre de 5 mil terá uma perda de absorção de 14 dB a 700 kHz, que irá reduzir o campo eléctrico que colide sobre os cabos de controle [11].

Na Figura 23 a corrente transitória (I_N), induz uma corrente na blindagem I_{SN} , e uma corrente de mesma magnitude e polaridade sobre o cabo de controle I_{CN} . O fluxo de corrente I_{SN} cria um *loop* completo, tendo ambas as extremidades da blindagem aterrada. Um campo magnético é criado para inibir a mudança na indução (lei de Lenz), a qual induz uma corrente de polaridade oposta à I_{SN} para o cabo de controle. Esta corrente I_{CS} , onde $I_{CS} = -I_{CN}$, reduz acentuadamente a magnitude da corrente resultante induzida sobre os cabos de controle. Ao deixar um espaço aberto, não haveria a corrente I_{CS} e a corrente resultante seria aproximadamente igual à I_{SN} .

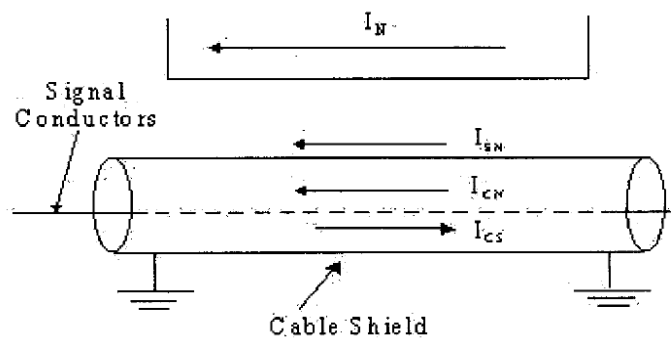


Figura 23. Corrente transitória em cabo de controle (Adaptado de [11]).

Foram realizados ainda testes na subestação utilizando o analisador de forma de onda *Dranetz 658 Power Waveform Analyzer* para monitorar as tensões no disjuntor e na entrada do relé na sala de controle. Após a abertura do disjuntor, uma chave seccionadora foi manobrada uma série de vezes de modo a se medir as tensões transitórias de modo diferencial [11].

As tensões de pico medidas, durante as sucessivas manobras da chave seccionadora, foram na ordem de 620 V nos terminais dos cabos de controle dentro da sala de controle. O espectro de frequência medido no disjuntor mostrou uma frequência dominante na ordem de 729 kHz, o que foi próximo aos 750 kHz calculados em [11].

Com a utilização de um cabo de controle par trançado blindado, aterrado somente em uma extremidade, a tensão de modo diferencial foi reduzida de 600 V para 300 V, conforme mostrado na figura 24 [11].

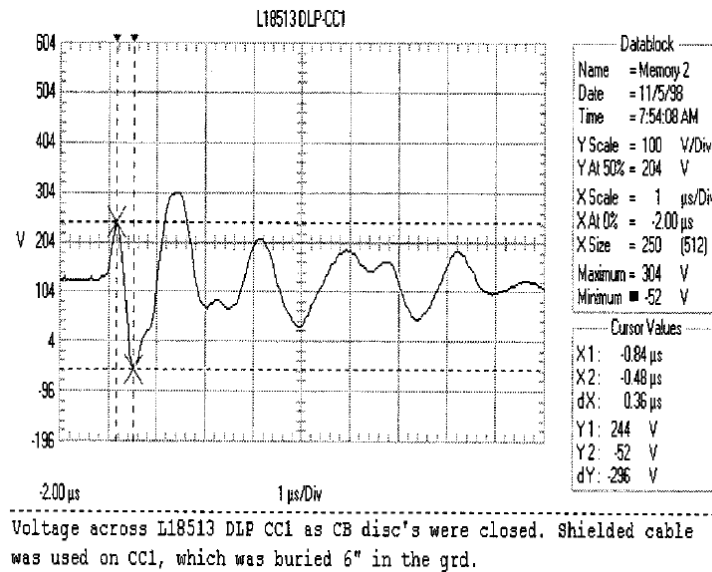


Figura 24. Tensão de modo diferencial no cabo de controle blindado (Adaptado de [11]).

Em suma o cabo de controle blindado foi instalado a partir do disjuntor para a sala de controle e foi aterrado em um ponto apenas. O que durante as medições resultou em uma redução nas tensões de modo diferencial de 50%. Se a blindagem do cabo de controle fosse aterrada nas duas extremidades, as tensões induzidas também teriam sido reduzidas. Utilizando-se um cabo de controle par trançado blindado e aterrando a blindagem em ambas as extremidades do circuito, também irá reduzir os acoplamentos de modo diferencial de circuitos em cabos de controle [11].

No capítulo seguinte discutir-se a sobre as técnicas de mitigação para o problema de interferência eletromagnética.

4 Técnicas de Mitigação do Problema

As interferências em cabos de controle estão relacionadas a campos eletromagnéticos transitórios ou permanentes que podem provocar danos aos equipamentos, ou leva-los a um mau funcionamento. Estas interferências eletromagnéticas vêm dos circuitos de alta tensão e causam interferências em circuitos de baixa tensão.

O objetivo deste capítulo é apresentar propostas para mitigação do problema, baseando-se, como referência em artigos técnicos que tratam de problemas semelhantes.

4.1 – Reduzindo a Interferência nos Cabos de Baixa Tensão da Subestação

Conforme exposto em [14], a natureza do estudo era determinar a causa e o custo efetivo para solução dos problemas relacionados à EMI no cabeamento da subestação. No caso avaliado o problema esta relacionado a disjuntores de 230 kV isolados a SF6 e transformadores de potencial capacitivo (CCVT – *Capacitive Coupled Voltage Transformers*) onde sérios problemas relacionados a EMI estavam acontecendo durante a operação do disjuntor.

Os problemas com EMI em subestações são conhecidos há algum tempo. As maiorias das concessionárias de energia têm lidado com o problema usando cabos blindados. No entanto, os problemas ainda surgem. Há muita confusão sobre se blindagens devem ser aterrada em multipontos, e o uso de condutor de terra paralela [14].

Existem três itens necessários para que se tenha um problema de EMI [14]:

1. Uma fonte de interferência (ruído).

2. Um canal de acoplamento.
3. Um receptor suscetível ao ruído.

Conforme relatado anteriormente, a fonte de ruído esta no arco voltaico gerado durante a desconexão de uma chave seccionadora ou disjuntor, que através de pulsos excitam os circuitos indutivamente ou capacitivamente gerando nestes transitórios de tensão e corrente [14].

Existem três maneiras principais de acoplamento ou canais de energia ao qual o ruído pode interferir nos cabos de controle [14]:

1. Acoplamento de campos elétricos e magnéticos irradiados.
2. Acoplamentos realizados através transformadores de potencial capacitivo (TPC) e transformadores de corrente (TC).
3. Diferenças de potencial no solo.

Os testes para detecção da fonte de interferência foram realizados em [14] na seção da mostrada na figura 25 da subestação *Saratoga* em 1989 após a substituição do disjuntor a óleo por um isolado a SF6. A maioria das medições foi realizada na caixa de junção do TPC (JB34) e na caixa de junção (JB4) do disjuntor (HVCB 242) durante a operação da chave seccionadora (SW 243).

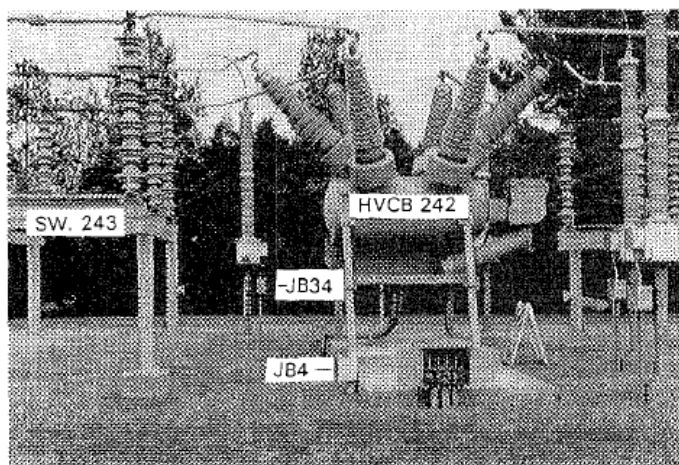


Figura 25. Foto da seção analisada da subestação *Saratoga* 230 kV(Adaptado de [14]).

Como resultado das medições foram encontrados transitórios de corrente da ordem 1003 A no TPC (JB34), que possuem amplitude maior que a corrente nominal do barramento da subestação que é de 685 A. Transitórios de tensão da ordem de 7,7 kV (0 a pico) foram

medidos, e uma característica que também foi observada é que a maioria das componentes são de modo comum. Na caixa de junção do disjuntor foram da ordem de 1 kV a 0,85 kV (0 a pico). Maiores detalhes das medições e gráficos são encontrados em [14].

Para uma melhor caracterização da necessidade de se utilizar cabos de controle blindados em subestações de alta tensão na tabela 4 temos uma comparação de medições utilizando cabos sem blindagem e com blindagem na caixa de junção (JB34) do TPC e na sala de controle.

		Cabo sem Blindagem	Cabo com Blindagem
JB34	Corrente [A]	50	14
	Tensão [V]	7700	700
Sala de Control	Corrente [A]	-	9
	Tensão [V]	1500	400

Tabela 4. Resultado do teste em cabos com e sem blindagem (Adaptado de [14]).

Algumas considerações importantes feitas em [14] são fundamentais, para que se consiga minimizar os problemas de EMI, como por exemplo, a questão dos *loops* no aterramento.

Normalmente, um único ponto de aterramento é usado para proteger sinais de baixa intensidade. Correntes que fluem em um loop no aterramento formado por dois pontos de ancoragem da blindagem poderiam induzir tensões na blindagem do cabo via transferência de impedância. Colocando-se um condutor de terra paralelo ao cabo blindado poderia reduzir a área de *loop* e assim reduzir o ruído na blindagem. Em frequências superiores a 50 kHz, qualquer vantagem de um único ponto de aterramento é perdida devido ao acoplamento capacitivo da blindagem com a terra formando vários loops com a mesma [14].

Isto indica a importância do aterramento da blindagem nas duas extremidades. Contudo, com uma ligação sólida a terra o acoplamento capacitivo cria uma mudança de fase na corrente da blindagem reduzindo fortemente a eficácia da blindagem [14].

Com relação à escolha do tipo de blindagem, a melhor escolha seria uma blindagem sólida. Blindagens utilizando malha trançada e fitas de cobre helicoidais normalmente fornecem entre 60 e 98% de cobertura e são menos eficazes como escudos de condutores sólidos. Blindagens trançadas geralmente oferecem uma ligeira proteção contra campo elétrico, mas

consegue reduzir bastante o efeito do campo magnético na blindagem. A razão é que a malha trançada e a fita distorcem a uniformidade da blindagem de corrente.

Outro assunto relevante é a terminação adequada da blindagem, já que esta é necessária para manter as correntes de ruído sobre a blindagem de modo a não induzir ruídos de tensão nos condutores internos. Para tal, uma conexão em 360° seria necessária. Esta conexão é conhecida como conexão *backshell*, onde o conector envolve completamente a blindagem em torno do seu perímetro [14].

Estrangulando a blindagem em conjunto para formar uma terminação tipo rabicho pode-se ter ruído de origem magnética a partir da blindagem para os condutores internos. Usando um rabicho que é apenas uma fracção do comprimento total da blindagem de um cabo blindado, pode-se ter um efeito significativo de acoplamento dos ruídos totais sobre os condutores internos [14].

No entanto, não há boa maneira de usar um conector tipo *backshell* sobre um quadro de distribuição ou uma caixa de junção, para cabos blindados unipolares ou multipolares. A alternativa é a de encerrar a blindagem usando um rabicho em ângulo reto tão curto quanto possível [14].

A questão da terminação da blindagem é de fundamental importância não só para interferência da própria blindagem no cabo que esta protege como também para interferência de circuitos vizinhos, também conhecida como diafonia (*crostalk*).

Com base em resultados obtidos em [15], vale a pena minimizar ou se possível eliminar, a utilização de rabichos em conectores, a fim de manter a plena eficácia da blindagem na redução da interferência de outros cabos que são terminados na mesma caixa de junção ou painel. A instalação de um grande número de cabos blindados dentro de um mesmo painel não é certamente um problema simples. No entanto, a redução de secções rabicho parece ter um mérito considerável. São claros os benefícios potenciais de se reduzir o comprimento dos rabichos, reduzindo assim a diafonia, o que pode significar uma melhoria na compatibilidade eletromagnética geral de um sistema [15].

4.2 – Outras Medidas de Mitigação do Problema

Com base em análises de EMC, é possível identificar as principais fontes de EMI no ambiente de uma subestação. Isto pode levar-se tanto a sua eliminação ou redução para níveis

aceitáveis, em especial para os dispositivos sensíveis (painéis de proteção e controle, circuitos de comando e medição) na instalação [16].

Através da análise da tensão medida e transientes de corrente apresentados nas seções anteriores, é possível avaliar uma série de ações para mitigar os problemas da EMI que podem causar falhas em relés de proteção. As medições são importantes para identificar os fenômenos e caracterizá-los em termos de magnitudes de tensão e corrente transitórias [16].

Uma questão importante no controle dos fenômenos eletromagnéticos está associada com a ligação à terra da subestação e da disposição apropriada dos equipamentos, a fim de assegurar seu funcionamento correto. O arranjo de ligação a terra é muito importante para melhorar o nível de compatibilidade eletromagnética em subestações [16].

As soluções mais simples são apresentadas abaixo [16]:

- Segregar e identificar circuitos de potência e circuitos de controle;
- Manter uma distância segura entre os cabos de força e os cabos de controle;
- Usar cabos de força e controle blindados;
- Aterrar as estruturas metálicas para melhorar os requisitos de proteção;
- Posicionar a sala de controle longe de equipamentos de potência, tais como transformadores seccionadores, disjuntores, para-raios, linhas de transmissão e distribuição e bancos de capacitores;
- Modificar a malha de aterramento próximo a dispositivos sensíveis para melhor drenar as componentes de alta frequência;
- Usar cabos de fibra óptica onde for possível para conectar equipamentos sensíveis e de automação do sistema.

Na subestação avaliada em [16], as soluções adotadas tiveram de ser efetivas e de fácil implementação, já que subestação encontrava-se pronta e em fase de operação. As seguintes soluções que foram propostas e implementadas em [16] e podem também ser expandidas a outras subestações de alta tensão caso problemas semelhantes sejam detectados na mesma:

- ✓ Usar cabos de controle blindado. No caso avaliado em [16], por se tratar de uma subestação de 69 kV alguns cabos utilizado não eram blindados.
-

- ✓ Aterrar a blindagem dos cabos de controle em ambas as extremidades. Normalmente, estas são aterradas em apenas uma extremidade, mas para melhor a eficácia da proteção deve-se aterrar a mesma nas duas extremidades conforme verificado anteriormente [14, 15].
- ✓ Certificar-se que a localização da malha de aterramento para os relés sensíveis sejam instaladas longe da área de aterramento das chaves seccionadoras e disjuntores. Observou-se que a base dos relés estavam aterradas próximas a base dos *switches* (equipamento para comunicação e distribuição de rede). Isto tem sido indicado como uma das causas dos defeitos dos relés, e conseqüentemente, os transitórios poderiam estar sendo injetados diretamente nos relés;
- ✓ Inserir hastes de aterramento verticais na malha de terra onde estas não existam, principalmente perto do equipamento sensível e disjuntores.

Para uma melhor representação da efetividade das soluções apresentadas em [16], as figuras 26 e 27 comparam a forma de onda transitória de tensão obtida através da medição de transitórios eletromagnéticos em uma operação de abertura de uma chave seccionadora, na fase de identificação do problema e depois das soluções estarem implementadas. Nas figuras 28 e 29 o mesmo comparativo é feito para a corrente transitória.

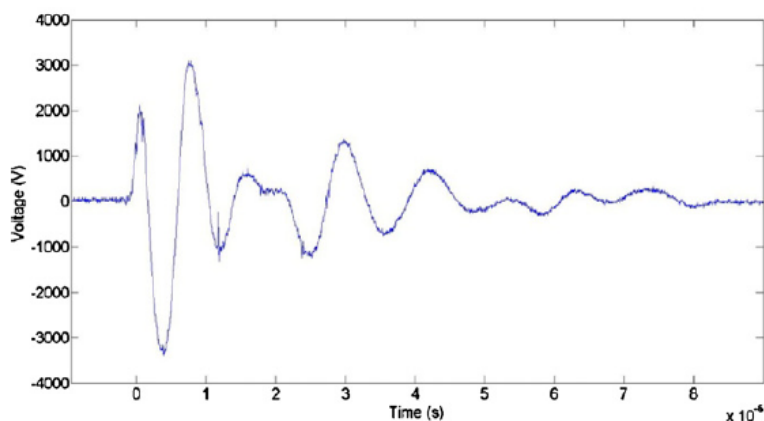


Figura 26. Transitório de tensão durante a abertura de uma chave seccionadora antes das medidas de mitigação serem implementadas (Adaptado de [16]).

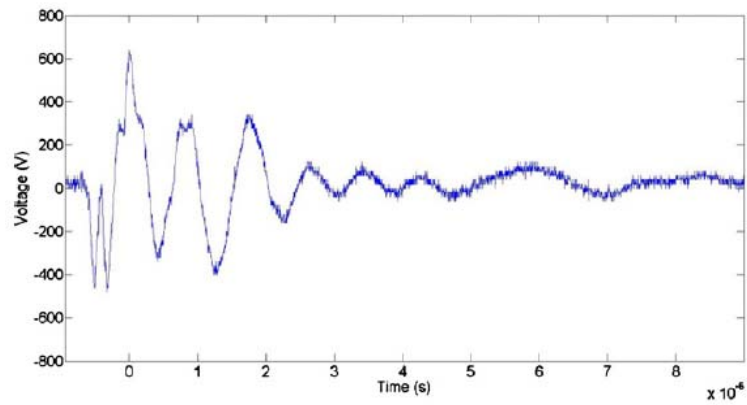


Figura 27. Transitório de tensão durante a abertura de uma chave seccionadora após as medidas de mitigação serem implementadas (Adaptado de [16]).

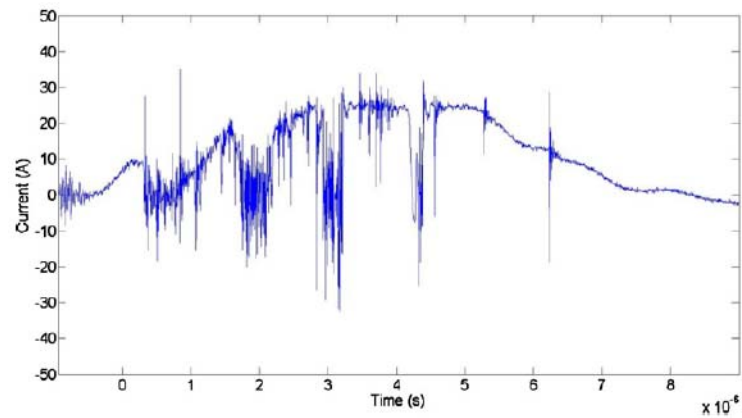


Figura 28. Transitório de corrente durante a abertura de uma chave seccionadora antes das medidas de mitigação serem implementadas (Adaptado de [16]).

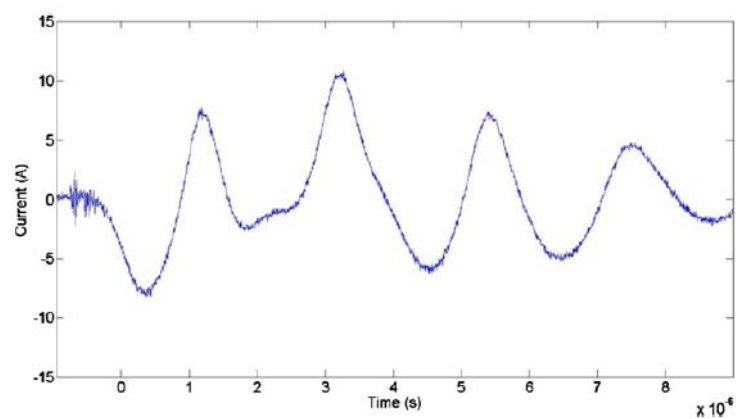


Figura 29. Transitório de corrente durante a abertura de uma chave seccionadora antes das medidas de mitigação serem implementadas (Adaptado de [16]).

Nota-se uma que diminuição de cerca de 80% foi obtida no pico de tensão (3000 para 600 V). No que diz respeito à corrente, houve uma diminuição de cerca de 50%. Uma diminuição também pode ser observada na gama de frequências a partir da corrente medida. Os resultados obtidos após a adoção das soluções propostas acima, provaram ser eficazes [16].

As medidas de mitigação e recomendações relatadas neste capítulo também podem ser observadas em [12, 13].

5 Considerações Finais

5.1 – Conclusão

O objetivo do presente trabalho foi apresentar um estudo do ambiente eletromagnético de em subestações de alta tensão. Para tal, foi realizada uma abordagem teórica sobre os diversos fenômenos eletromagnéticos encontrados em subestações de alta tensão, devido a descargas atmosféricas, manobras de equipamentos como disjuntores e chaves seccionadoras, e curto-circuito.

A avaliação do ambiente eletromagnético foi necessária para demonstrar os tipo de interferência eletromagnética a que os cabos de controle de uma subestação estão sujeitos, e como estes fenômenos podem ser danosos aos cabos, e aos equipamentos aos quais estes estão conectados. Para minimizar tais efeitos uma solução conhecida é o uso de cabos de controle blindados, de modo que os sinais por estes transportados cheguem aos equipamentos de proteção e controle no interior da sala elétrica sem ruídos, ou sobretensões e correntes indesejadas.

Sabe-se que apenas a utilização de blindagem nos cabos de controle não são suficientes, é necessário que a blindagem seja conectada a terra, para que sua eficácia não seja comprometida. Este quesito, no entanto é alvo de constates discussões e artigos técnicos sobre o assunto. Com isso este trabalho foi motivado de modo a apresentar o tipo de blindagem que deve ser escolhida, bem como a maneira correta de efetuar sua conexão a terra.

No capítulo 3 foi apresentado os tipos de cabos blindados, e os tipos de blindagem mais comum encontrado no mercado. É de consenso com os artigos utilizados nesta dissertação, que os cabos de controle para subestações de alta tensão devem possuir blindagem, para que os condutores internos fiquem blindados contra fenômenos rápidos de alta frequência, que é a principal característica dos fenômenos resultante de descargas atmosféricas e chaveamento de

equipamentos. Ressalta-se ainda que a blindagem deva ser aterrada em ambas as extremidades, já que o objetivo é prevenir que ruídos externos interfiram no sinal transportado, e que elevações de potencial indesejadas cheguem aos equipamentos de proteção e controle fazendo com que estes operem de maneira indesejada, ou mesmo venham a sofrer danos, podendo até mesmo queimar.

Para finalizar, espera-se que este trabalho venha a orientar engenheiros, e interessados no assunto, de maneira que o presente trabalho sirva como um guia básico e introdutório sobre o assunto “Interferência Eletromagnética, Subestações de Alta Tensão, Cabo de Controle Blindado, Aterramento de Blindagem de Cabos de Controle”.

5.2 – Propostas de Continuidade

Como proposta de continuidade para este trabalho, pretende-se fazer o acompanhamento do projeto de uma subestação de 138 kV que será construída no município de Itabirito, Minas Gerais, para atender a uma planta de beneficiamento de minério de ferro de uma grande mineradora, no intuito de se aplicar os conceitos e conhecimentos adquiridos durante a execução do presente trabalho.

Pretende-se ainda acompanhar a fase de implantação final do projeto até sua fase operacional, para que os conceitos e recomendações aqui apresentados possam ser efetivamente utilizados.

Referências Bibliográficas

- [1] WIGGINS, C. M.; THOMAS, D. E.; KO, C. D.; WRIGHT, S. E.; SALAS, T. M.. **“Prediction of Electromagnetic Field and Current Transients in Power Transmission and Distribution Systems”**. EUA: IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, No 1. January 1989.
- [2] WIGGINS, C. M.; THOMAS, D. E.; NICKEL, F. S.; WRIGHT, S. E.; SALAS, T. M.. **“Transient Electromagnetic Interference in Substations”**. EUA: IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 9, No 4, October 1994.
- [3] RUSSEL D. B., HARVEY M. S., NILSSON L. S.. **“Substation Electromagnetic Interference - Part 1: Characterization and Description of the Transient EMI Problem”**. IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-103, No. 7, July 1984.
- [4] PAUL, C. R., **“Introduction to Electromagnetic Compatibility”**, 2ª edição, Editora John Wiley & Sons, New Jersey, Estados Unidos da América, 2006.
- [5] SILVEIRA, C. A.; COSTA, C. A.; SILVA, R. C.; SOARES, L. A.; GUIMARÃES, J. C., **“Electromagnetic Environment Measurement under Steady-State Conditions in Utility Substations”**, IEEE, 2006.
- [6] WIGGINS, C. M.; WRIGHT, S. E., **“Switching Transient Fields in Substation”**, EUA: IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 6, No 2. April 1991.
- [7] MARKOWSKA, R. A.; SOWA, A.; WIATER, J., **“Electric and Magnetic Field at the HV Substation during a Lightning Strike”**, BIALYSTOK, POLAND. ISSN 1392 – 1215 Electronic and Electrical Engineering, No 10. 2010.
- [8] PRYSMIAN CABLES & SYSTEMS, **“Catálogo Cabo Sintenax Flex Controle”**, disponível em www.prysmian.com.br.
- [9] MD POLICABOS, **“Cabos Blindados”**, disponível em www.cabosblindados.com.
- [10] PAVIĆ, A.; STIH, Z.. **“The Influence of cables on the electromagnetic fields around the power system substation”**, CROATIA: IEEE MELECON, Dubrovnik, Croatia. Melcom publ., 2004.
- [11] LODWIG, S., G.; SCHUETZ, C., C.; **“Coupling to Control Cables ins HV Substations”**, EUA: IEEE Willowbrook, IL, 2001.
- [12] **IEEE Std 789-1988 – “Standard Performance Requirements for Communications and Control Cables for Application in High Voltage Environments”**. Power Systems Communications Committee of the IEEE Power Engineering Society. Approved June 9, 1988 IEEE Standards Board.
- [13] **IEEE Std 525-1992 – “Guide for the Design and Installation of Cable Systems in Substations”**, Substations Committee of the IEEE Power Engineering Society. Approved September 17, 1992 IEEE Standards Board. Approved February 25, 1993 American National Standards Institute.
- [14] GAVAZZA, R. J., WIGGINS, C. M.. **“Reduction Interference on Substation Low Voltage Wiring”**. EUA: IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, No 3. July 1996.
-

[15] PAUL, C. R.. **“Effect of Pigtails on Crosstalk to Braided-Shield Cables”**. EUA: IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. EMC-22, No 3. August 1980.

[16] L.H.A. de Medeiros, P.A.C. Rosas, Z.D. Lins, H.L. Ferreira, J.M.S. Melo, N.G. Santos. **“High frequency transients and electromagnetic interference within 69 Kv substations”**. Electric Power Systems Research 81 (2011) 1534–1540.
