



**GRUPO X**  
**SOBRETENSÕES, COORDENAÇÃO DE ISOLAMENTO E INTERFERÊNCIAS (GSI)**

**COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA EM SUBESTAÇÕES DE ALTA TENSÃO**

Guilherme A. D. Dias

\*Marcos Telló

PUCRS

**RESUMO**

Este trabalho está dividido em duas partes. A primeira parte apresenta os critérios utilizados para resolver o problema de danificação em modems, microcomputadores e outros equipamentos, ocasionados em uma instalação de alta tensão que é empregada para telecontrolar uma série de outras instalações de porte semelhante, na região de Porto Alegre. Para tanto foi realizado um diagnóstico dos problemas de compatibilidade eletromagnética (CEM), bem como simulações computacionais e critérios para mitigar/eliminar a probabilidade de ocorrência de novos danos. A segunda parte refere-se às avaliações realizadas para validar os critérios de projeto a serem adotados nas várias instalações e proporcionar um conhecimento dos parâmetros numéricos das fontes de interferência existentes nas instalações de alta tensão.

**PALAVRAS - CHAVE**

Compatibilidade eletromagnética, Interferência, Subestações, Surtos, Aterramento

**1.0 - INTRODUÇÃO**

Em uma subestação de alta tensão existem muitos fenômenos que podem causar perturbações. No caso da subestação em análise os principais problemas se deveram a surtos injetados nos equipamentos do sistema de telecontrole de subestações de alta tensão (69 kV e acima), via condutores metálicos de comunicação, causando a queima de modems, microcomputadores, monitor colorido, drives, sistema não interruptível, etc. A Figura 1, apresenta um esquema geral da instalação de controle da subestação.

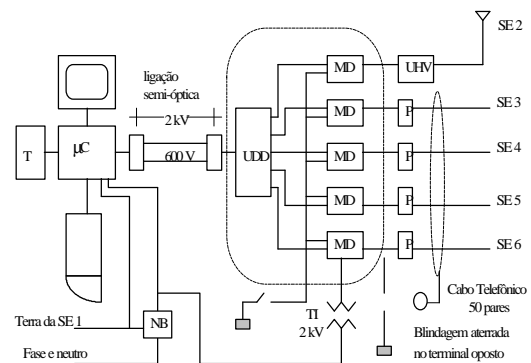


Figura 1 - Sistema de telecontrole.

**2.0 - CRITÉRIOS BÁSICOS**

Do ponto de vista técnico e econômico, a mitigação dos problemas de interferência deve conjugar medidas definidas em uma filosofia integrada, baseada nos seguintes pontos: minimização dos sinais interferentes, ensaios de equipamentos, equalização de potenciais em aterramentos para alta frequência e aterramento seguro através de ligações adequadas de circuitos, chassis, etc.

Considerando os danos que venham a ocorrer nos vários sistemas de telecontrole, foram preparadas as recomendações expostas adiante com base nos parâmetros de dimensionamento apresentados, para que o sistema de proteção tenha resposta adequada à compatibilidade EletroMagnética, devendo ser integrados os seguintes itens:

- Condutores
- Aterramento
- Proteção contra surtos eletromagnéticos
- Blindagem eletromagnética

- Proteção contra descargas atmosféricas

A seguir comentam-se cada um dos itens acima indicados.

## 2.1 Condutores

Para evitar interferência por acoplamento entre circuitos, ou por indução eletromagnética externa, deverão ser adotados os seguintes procedimentos na instalação de telecontrole:

- a) Segregação entre condutores de sinal (digital ou analógico) e de força (comando e controle em BT ou de energia em AT) através de rotas (canaletas e eletrodutos) distintas.
- b) Blindagem entre condutores de sinal e de força provida por eletrodutos metálicos.

Uma medida suplementar corresponde a segregar os cabos dos circuitos de baixo nível de sinal, dos cabos de baixa tensão CA ou CC dos circuitos de força (onde os surtos podem ser gerados / induzidos e propagados). Cabos blindados devem ser empregados em todos os circuitos de proteção, comando, sinalização, medição e telecomunicações de subestações de EAT. Para circuitos de sinais de baixo nível, particularmente àqueles ligados a equipamentos sensíveis, cabos duplamente blindados (empregando a tubulação metálica como blindagem externa), devem ser empregados. A blindagem dos cabos deve ser aterrada na sala de comando. A tubulação metálica deve ser aterrada nas extremidades e em pontos intermediários.

O emprego de equipamentos para desacoplar circuitos, como transdutores, transformadores de potencial e corrente, relés auxiliares e acopladores ópticos para trazer os sinais do pátio de alta tensão para equipamentos dentro do prédio de comando, é outra forma de atenuar os sinais interferentes.

## 2.2 Aterramento

Todos os sistemas alimentados com CA ou CC devem ser aterrados para segurança. Adicionalmente ao aterramento para segurança, os equipamentos eletrônicos disponíveis para sistemas digitais são usualmente aterrados para minimizar ruídos no sistema. Este aterramento é considerado como aterramento de referência de sinal. É essencial, entretanto, que o aterramento de segurança e de sinal sejam integrados de sorte a atender os requisitos de segurança e de CEM.

O aterramento de sinal requer considerações sobre a equalização de potenciais elétricos em alta frequência,

o que torna a tarefa difícil, se forem consideradas as amplitudes e frequências do sinal perturbador presente no ambiente de uma subestação de alta tensão. A minimização ou atenuação dos sinais interferentes, junto com os aterramentos de sinal e de segurança, são requisitos de projeto que podem ser complementados pela aplicação correta de equipamentos (hardware).

Os aterramentos de segurança e de sinal devem ser projetados como sistemas integrados; um sistema de alimentação em CA com quatro fios a fim de prover equalização dos potenciais a 60 Hz e atuação rápida da proteção de faltas à terra (medidas de segurança); um transformador de isolamento para prover filtragem do ruído de modo comum, quando a fonte alternativa está fornecendo energia ao sistema; ligar cada barra comum de sinal associada aos vários sistemas de alimentação CC dentro do sistema eletrônico, ao aterramento de segurança através do sistema de aterramento de referência de sinal; considerar a blindagem dos cabos como parte integrante do sistema de aterramento de sinal; decidir onde cada ligação à terra deve ser realizada sendo o sistema analisado para a minimização de *laços* no circuito de aterramento; Empregar malhas de referência de sinal ou uma barra de referência para estabelecer o aterramento de referência de sinal

## 2.3 Proteção contra surtos eletromagnéticos

Para evitar a queima dos componentes dos sistemas que compõe o telecontrole, deverão ser instalados protetores contra sobretensões (supressores de surto) com capacidade suficiente para absorver surtos com alto conteúdo energético, conforme previsto nas etapas iniciais do projeto.

Os dispositivos para proteção contra surtos devem ser instalados, sendo que o emprego adequado destes, depende basicamente do nível de proteção requerido e dos níveis de corrente e energia dos surtos que se espera atinjam os equipamentos. Como regra, é recomendado o uso dos seguintes dispositivos de proteção:

- Circuitos de baixa tensão (conectado a equipamentos sensíveis): 1 ou 2 varistores de óxido metálico coordenados;
- Circuitos de sinal e controle: combinação de varistor e centelhador a gás;
- Serviços auxiliares, barramentos principais de CA e CC: capacitor de surto.

Nos circuitos de força é interessante instalar fusíveis com os dispositivos de proteção, para evitar uma interrupção de energia durante um curto-circuito nestes dispositivos (o circuito continuará energizado porém sem proteção contra surtos).

A Figura 2 apresenta os conceitos de categoria e de localização apresentados na IEEE C62.41.

	CATEGORIA DE LOCALIZAÇÃO C	CATEGORIA DE LOCALIZAÇÃO B	CATEGORIA DE LOCALIZAÇÃO A
	Ambiente externo e entrada de serviço	Circuitos longos e ramais curtos	Tomadas e ramais longos
Tensões	10 kV ou mais	Impulso ou oscilante de 6 kV	Oscilante de 6 kV
Correntes	10 kA ou mais	Impulso de 3 kA ou oscilante de 500 A	Oscilante de 200 A

Figura 2 - Níveis de tensão e corrente esperados em uma instalação, segundo a IEEE C62.41-1991.

O padrão americano (IEEE) apresentado na Figura 2, sugere um número de níveis de proteção inferior ao das normas internacionais (IEC), sendo este um dos motivos que facilitam a sua aplicação, fato este que a torna de emprego mais freqüente. Para a categoria IV, a indicação (6) 4 kV, significa 6 kV 1,2/50  $\mu$ s para sistema 240 V e 4 kV 1,2/50  $\mu$ s para sistema 120 V.

#### 2.4 Blindagem eletromagnética

Usualmente a blindagem eletromagnética é empregada para minimizar interferências eletromagnéticas produzidas no ambiente externo da instalação (descargas atmosféricas, descargas de contornamento de isoladores, etc.), devendo ser efetiva na faixa de freqüências de 10 kHz até 500 kHz, correspondendo a frentes de onda da ordem de 25  $\mu$ s e 1  $\mu$ s, respectivamente. Genericamente as características de um campo eletromagnético são determinadas pela sua fonte, pelo meio de propagação e pela distância da fonte até onde está situado o equipamento/componente susceptível. Em um ponto próximo ao local de geração do campo eletromagnético, as propriedades deste são determinadas principalmente pelas características da fonte. Em um ponto afastado da fonte perturbadora, as características do campo são determinadas pelo meio de propagação, daí ser o espaço dividido em duas regiões. Perto da fonte está o chamado *campo próximo*. A uma distância maior que um comprimento de onda  $\lambda / 2$ , está o chamado *campo afastado* ou *radiação*. Esta zona pertence às chamadas ondas planas (campo eletromagnético). Assim, a transição entre os dois tipos de campo está na região próxima a  $\lambda / 2$ , sendo o comprimento de onda emitido pela fonte considerada. Genericamente analisa-se uma blindagem eletromagnética em termos da atenuação por absorção, atenuação por reflexão e atenuação por reflexões múltiplas.

Se numa blindagem é utilizado material magnético, ao invés de um bom condutor, ter-se-á um aumento de permeabilidade e uma diminuição da condutividade. Isto implica num aumento de perdas por absorção e uma diminuição de perdas por reflexão. Se existir um campo magnético de baixa freqüência, pode haver vantagem por não possuir o material magnético, quase nenhuma perda por reflexão. No caso de ondas planas, tem-se uma diminuição da efetividade da blindagem por ser o mecanismo de reflexão o principal método de atenuação das ondas planas. No caso de campos elétricos, ter-se-á o mesmo efeito pela mesma razão. Os materiais magnéticos, ao aumentar a sua freqüência, diminuem sua permeabilidade, e esta também depende da intensidade do campo. Os materiais de alta permeabilidade são adequados para freqüências menores do que 10 kHz. Dependendo da faixa de freqüências envolvidas, podem ser adotadas blindagens simples ou duplas, material tipo chapa plana ou perfurada, etc.

#### 2.5 Proteção contra descargas atmosféricas;

Em instalações de alta tensão empregam-se métodos probabilísticos na avaliação contra descargas atmosféricas diretas. A aplicação destes métodos permite definir índices de desempenho empregados na escolha da melhor alternativa dentre as alternativas estudadas, sabendo-se que tais alternativas envolvem o posicionamento de cabos, hastes ou sistemas contendo ambos os elementos. O critério básico é de que todas as descargas que possam penetrar na blindagem prevista possuam correntes inferiores a corrente crítica, o que se espera não cause danos aos equipamentos. Consideram-se duas situações distintas, o pátio de alta tensão e o prédio de comando, onde estão instalados os EES - Equipamentos Eletrônicos Sensíveis. Simplificadamente pode-se afirmar que a forma de avaliação para ambos os casos é similar, diferindo na forma de se definir a corrente crítica de blindagem que para os equipamentos de alta tensão é definida em função da tensão de impulso atmosférico suportada pelos equipamentos, enquanto que para prédios se define um valor máximo de 5 kA.

Considerando que os prédios conterão os EES, estes deverão estar protegidos da melhor forma possível, o que consiste em dizer que os equipamentos deverão estar contidos em uma Gaiola de Faraday composta de cabos condutores em forma de malha, espaçados convenientemente. Nesta configuração, pode-se optar por duas formas básicas de blindagem que são compostas pela própria super estrutura do prédio ou por uma malha externa superposta ao prédio. Apesar de ambas as opções serem válidas, esta segunda opção é a mais recomendada devido ao efeito adicional de

blindagem proporcionada pela superestrutura do prédio o que propicia uma redução das sobretensões induzidas nos EES.

### 3.0 - AVALIAÇÕES REALIZADAS

As avaliações realizadas são compatíveis com os itens definidos nos critérios básicos de projeto. A partir desta definição, foram levantados os parâmetros de dimensionamento necessários para realizar a avaliação da Compatibilidade eletromagnética (CEM) entre os sistemas de força, telecontrole e comunicações. Tais parâmetros compreendem as características dos equipamentos (de telecontrole, de comunicação), do solo, das descargas atmosféricas e dos surtos eletromagnéticos.

#### 3.1. Condutores

Aplicando-se para os condutores, os critérios de segregação, aterramento, blindagem, etc., foram avaliados numericamente os vários coeficientes de acoplamento com circuitos de alta tensão, impedâncias de surto, e outros itens, optando-se pelas configurações que apresentassem os menores valores.

#### 3.2. Avaliação do sistema de aterramento

O sistema de aterramento de uma subestação de alta tensão é avaliado em termos da segurança propiciada para os seres humanos e para os equipamentos em termos de tensões produzidas no solo a frequência industrial.

Face a extensão das instalações, utilizam-se malhas de terra de grandes dimensões. A resposta à surtos de um sistema de aterramento é função da frequência ou do tempo de crescimento deste, influenciando em uma região tanto menor quanto maior for a frequência ou menor o tempo de crescimento do surto. Isto posto, observa-se que o projeto básico do sistema é realizado em termos do seu desempenho a 60 Hz, sendo a avaliação quanto a resposta deste aos surtos de alta frequência e pequeno tempo de crescimento localizado, realizado somente em regiões de interesse. Existem diversas formulações matemáticas para a avaliação de sistemas de aterramento, sejam estas para a frequência industrial, sejam para surtos. As formulações dos diversos métodos compreendem duas grandes famílias que são a dos métodos simplificados de fórmula, onde predomina o da IEEE Std 80 para 60 Hz, e os sofisticados que empregam o MEF - Método dos Elementos Finitos, Método dos Coeficientes de Potencial, Transmission Line Modelling (TLM), etc.. Os parâmetros obtidos na avaliação do sistema de aterramento foram resistência de aterramento a 60 Hz

da ordem de 3,5  $\Omega$ , impedância de surto da ordem de 50  $\Omega$  e tensões de surto aplicadas aos equipamentos superiores as toleradas.

#### 3.3. Proteção contra surtos eletromagnéticos

As avaliações foram realizadas para definir o melhor protetor a ser empregado no Sistema de Telecontrole, baseado nas tensões impostas e suportadas pelos equipamentos e na energia que deve ser suportada pelo próprio protetor, levaram em consideração as seguintes informações a seguir expostas. Para considerar a injeção de um surto de tensão cuja amplitude é controlada por um protetor, empregou-se o diagrama conceitual indicado na Figura 3. Tal diagrama apresenta o par telefônico metálico, o elemento de proteção contra surtos de tensão de grande amplitude (protetor) e o equipamento eletro-eletrônico sensível (modem, microcomputador, etc.) a proteger.

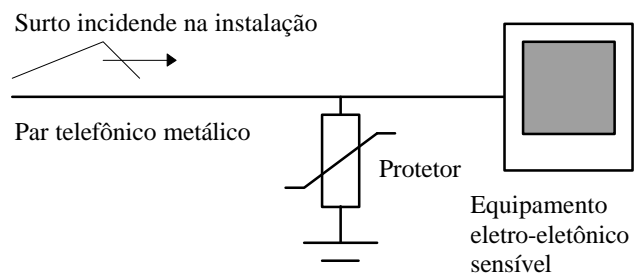


Figura 3 - Diagrama da instalação modelada.

Para modelar matematicamente tal sistema elétrico, foi empregado um programa não comercial de simulação de circuitos elétricos, conhecido como SIMAT.

O circuito elétrico equivalente empregado para realizar a análise da propagação do surto, foi elaborado considerando a linha telefônica como sendo um circuito R, L e C, um protetor com característica tensão x corrente não linear e o equipamento eletro-eletrônico sensível com impedância constante.

Os parâmetros dos vários componentes elétricos modelados, tais como a linha telefônica, o protetor e o equipamento eletro - eletrônico sensível, foram obtidos a partir de catálogos de fabricantes e ensaios. O equipamento eletro - eletrônico sensível foi modelado matematicamente por impedância constante de 100  $\Omega$ . A onda incidente de tensão que adentra na SE 5 via par telefônico, foi modelada como uma onda do tipo impulso atmosférico padrão 1,2 x 50  $\mu$ s, com amplitude de 2,5 kV, valor este julgado como sendo o nível de isolamento em corrente contínua - 1 minuto,

do par telefônico. As simulações (ora em andamento) foram realizadas para definir o melhor protetor a ser empregado no Sistema de Telecontrole da CEEE, baseado nas tensões residuais suportadas pelos equipamentos e na energia que deve ser suportada pelo próprio protetor, apresentaram os seguintes resultados parciais: Níveis de tensão a que são submetidos os EES:  $\leq 200$  V. Níveis de energia a que são submetidos os protetores:  $\leq 0,5$  kJ/ $\Omega$ .

### 3.4. Blindagem eletromagnética

A utilização de blindagens eletromagnéticas é definida em situações especiais, ou seja, quando se tem consciência prévia da sua necessidade ou quando após realizada a instalação, ocorrerem danos em equipamentos ou má operação destes. Genericamente avalia-se uma blindagem eletromagnética em termos da seguinte equação:

$$At = A + R + B$$

onde:

- At - atenuação do sistema de blindagem;
- A - atenuação por absorção;
- R - atenuação por reflexão;
- B - atenuação por reflexões múltiplas.

Adicionalmente ao apresentado, os termos desta expressão levam em conta a frequência do sinal produtor da interferência, o tipo de campo produtor do sinal interferente, a geometria do sistema de blindagem, os materiais empregados, etc. Nas avaliações realizadas tem-se uma atenuação da ordem de 40 dB, empregando-se uma malha de cobre para frequências da ordem de 1 MHz.

### 3.5. Proteção contra descargas atmosféricas

Para o dimensionamento da blindagem contra descargas atmosféricas diretas de edificações, a corrente crítica de descarga ( $I_c$ ) é definida como sendo a maior intensidade de corrente que incide diretamente nos condutores energizados da instalação sem produzir ruptura de seus isolamentos, isto é, o limite de corrente que não produza descargas através do ar em torno dos isoladores. Em edificações (pavilhões industriais de grandes dimensões, edifícios comerciais ou residenciais de grande porte) o valor recomendado para  $I_c$  é da ordem de 5 kApico.

O dimensionamento dos captos compreende quatro etapas, a saber: escolha do tipo, definição da bitola mínima, locação e determinação da altura mínima. A escolha do tipo recai em uma análise técnico - econômica onde são avaliadas as características do objeto protegido bem como a possibilidade de utilização de estruturas existentes (coberturas

metálicas, postes metálicos, etc.). A localização dos captos é função da geometria do objeto a ser protegido e da zona de proteção definida pelos diversos captos do sistema escolhido. Inicialmente posicionam-se os captos de modo que as bases das zonas de proteção do conjunto dos captos cubram todo o objeto sem superposições desnecessárias. empregados cabos horizontais e sistemas híbridos. O risco de falha  $R_f$  de um SPCDA consiste na convolução entre a área exposta, para a penetração das descargas atmosféricas através da blindagem, e a sua probabilidade de ocorrência. Para um sistema compreendido por N sub - áreas de proteção, o risco de falha é dado pelo somatório do risco  $R_i$  de cada sub - área isoladamente, ou seja:

$$R_f = \sum_{i=1}^N R_i \quad \left[ \frac{\text{falhas}}{\text{ano}} \right]$$

$$R_i = N_g \cdot (A * P)(I_B) = N_g \cdot \int_0^{I_B} A(\phi) \cdot P(I_B - \phi) d\phi$$

$$\left[ \frac{\text{falhas}}{\text{ano}} \right]$$

onde:

$N_g$  - número de descargas atmosféricas para o solo na sub - área considerada  $\left[ \frac{\text{raios}}{\text{km}^2 \cdot \text{ano}} \right]$ ;

$I_B$  - corrente real de blindagem da sub - área considerada [kApico];

$A(\phi)$  - área exposta, na sub - área considerada, para correntes de descarga menores que  $\phi$  [km<sup>2</sup>] e

$P(\phi)$  - probabilidade de ocorrência de correntes de descarga inferiores a  $\phi$  [pu]. Ainda, nas avaliações realizadas chegou-se a um risco de falha da ordem de 1 falha em 1.000 anos, com um reticulado de 10 x 20 m.

## 4.0 - CONCLUSÕES

Considerando o sistema de proteção integrado, apresentam-se a seguir, as conclusões referentes aos levantamentos e estudos realizados para sistemas de telecontrole de subestações.

- Implantado o sistema proposto, não se esperam danos nos sistemas de telecontrole;
- Mesmo considerando-se que o prédio que contém os EES seja de concreto armado - possuindo armação de ferro - e mesmo que se encontre próximo de edifícios de grande altura (blindagens naturais parciais), recomenda-se que seja colocada uma gaiola de Faraday externamente ao mesmo;
- A segregação e blindagem dos condutores - através de, no mínimo, o emprego de eletrodutos metálicos aterrados, é essencial ao sistema de telecomando, para evitar a propagação de surtos conduzidos via cablagem de sinal

- Para reduzir os efeitos de surtos conduzidos pela cablagem de controle, devem ser empregados protetores escalonados, especificados adequadamente em termos de níveis de tensão compatíveis com as sobretensões suportadas pelos EES e com a energia máxima prevista para a instalação.

Ensaio serão especificados para avaliar a susceptibilidade dos equipamentos para surtos gerados em circuitos de baixa tensão, por campos eletromagnéticos irradiados e por descargas eletrostáticas (interferência causada por descargas de correntes eletrostáticas diretamente no equipamento ou por campos eletromagnéticos irradiados produzidos por uma descarga eletrostática em outro equipamento).

## 5.0 - REFERÊNCIAS

[01]DIAS, G. A. D., TELLÓ, M. et al. SE Uruguaiiana 2, SE Uruguaiiana 3, SE Uruguaiiana 5, Telecontrole - Proteção contra descargas eletromagnéticas diretas, STT/DPS/SPECS, Julho de 1991.

[02] ALVES, M. F., RIBEIRO, E. E., Designing electronic systems for high voltage substation environment, ISEMC'94 - International Seminar on Electromagnetic Compatibility, São Paulo dezembro de 1994.

[03] ELETROBRÁS - Centrais Elétricas Brasileiras S.A., DGE - Diretoria de Gestão Empresarial, DGTI - Departamento de Desenvolvimento Tecnológico e Industrial, GADUS - Grupo de Automação de Usinas e Subestações, Análise da aplicação de tecnologia digital a controle de processos de usinas e subestações - Módulos Básicos - Volume II/III 1a Edição - 1991,.

[04]IEEE C62.41-1991, IEEE Recommended practice on surge voltage in low - voltage AC power circuits.

[05]ANSI/IEEE C62.45-1987, IEEE Guide on surge testing for equipment connected to low - voltage AC power circuits.

[06]ANSI/IEEE C62.42-1987, IEEE Guide for the application of gas tube arrester low - voltage surge - protective devices.

[07]LEWIS, W. H., The use and abuse of insulated / isolated grounding, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 25, No. 6, NOV/DEC 1989.

[12]DIAS, G. A. D., HAFFNER, S. L., TELLÓ, M., Curso de aterramento para telecomunicações, UFRGS Pró-Elétrica, outubro de 1995.

[13]DIAS, G. A. D., TELLÓ, M. et al. Telecontrole da região metropolitana de Porto Alegre - Avaliação de compatibilidade eletromagnética. Companhia Estadual de Energia Elétrica, dezembro 1995.

[14]DEGAUQUE, P. e HAMELIN, J, Compatibilité électromagnétique, Edição Dunod, Paris, 1990.

## 8.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Guilherme A. D. Dias, nasceu em Porto Alegre em 28 de abril de 1950, graduou - se em Engenharia Elétrica - Ênfase Eletrotécnica em 1975, pela UFRGS, Pós - graduado em Energia em 1996, pela UFRGS, em doutoramento pela UFRGS, Professor da Engenharia Elétrica da PUCRS, Ex - Engenheiro da Companhia Estadual de Energia Elétrica e AES Sul Distribuidora de Energia Elétrica, publicou com outros autores, mais de oitenta artigos técnicos no Brasil e exterior.



Marcos Telló, nasceu em Ijuí em 25 de novembro de 1956, graduado em Engenharia Elétrica em 1981 pela PUCRS, Mestre em Engenharia (Sistemas Elétricos) em 1991 pela UFSC, Professor da PUCRS desde 1982. Integrante do GCEM - Grupo de Compatibilidade EletroMagnética desde 1992, em doutoramento pela UFRGS, Engenheiro da CEEE desde 1982, publicou com outros autores, mais de oitenta artigos técnicos no Brasil e exterior.