



**XXII SNPTEE  
SEMINÁRIO NACIONAL  
DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA**

BR/GPC/31  
13 a 16 de Outubro de 2013  
Brasília - DF

**GRUPO – V  
GRUPO DE ESTUDO DE PROTEÇÃO, MEDIÇÃO, CONTROLE E AUTOMAÇÃO DE SISTEMAS DE POTÊNCIA-  
GPC**

**MEDIDA DE VALORES DE IMPEDÂNCIAS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO  
E OBTENÇÃO DO FATOR DE TERRA**

**Marcelo Eduardo de Carvalho Paulino (\*)  
Adimarco**

**RESUMO**

Este trabalho apresenta um método avançado para medir e calcular os dados de impedância da linha de transmissão e a comparação com dados calculados. Todas as medições são realizadas com variação de frequência, abaixo e acima da frequência da rede e os resultados são interpolados, eliminando-se interferências de sistemas energizados. A partir destes resultados as impedâncias de sequência positiva e sequência de zero, bem como o fator K em vários formatos são calculadas. São mostrados testes realizados em linhas de transmissão no Brasil e no México.

**PALAVRAS-CHAVE**

Fator de terra, impedância de terra, impedância de linha, proteção de distância, impedância de sequência zero, testes e ensaios.

**1.0 - INTRODUÇÃO**

No caso de ocorrência de uma falha no sistema de transmissão, o desempenho dos relés de proteção da linha de transmissão é determinante para a estabilidade do sistema elétrico e a redução dos efeitos desta falha. Além disso, o sistema de proteção tem como objetivo principal eliminar, no menor tempo possível, as condições impostas pela falha. Isto compõe um dos objetivos principais no desenvolvimento das aplicações e os ajustes de cada relé.

Diferentes fatores influenciam o tempo de operação de um relé de proteção de linha. Esses fatores estão relacionados com o projeto e o princípio de funcionamento, além dos parâmetros de impedância da linha a ser protegida e da precisão dos cálculos das correntes de curto circuito. Isto implica na obtenção correta e precisa de parâmetros como o valor de sequência positiva e sequência zero ou o fator de terra correspondente (fator  $K_L$  ou  $K_0$ ).

As impedâncias de linha de transmissão utilizadas para o cálculo de curto circuito e a configuração dos relés de distância são normalmente obtidas dos resultados de cálculos realizados em programa de linha, utilizando de valores característicos genéricos constantes preestabelecidos. Devido ao grande número de fatores que influenciam esses cálculos (por exemplo, tipos de cabos do sistema de transmissão, resistividade do solo), eles podem apresentar erros.

A medida em campo da impedância da linha de transmissão e da impedância do loop de falta é a melhor maneira de assegurar que os ajustes dos relés de proteção sejam realizados de forma adequada. Ou seja, o conhecimento das impedâncias de cabos e de linhas aéreas é muito importante para o ajuste correto dos relés de proteção.

(\*) Av das Américas, n° 500 – sala 212 - Bloco 10 – CEP 22.640-100 Rio de Janeiro, RJ, – Brasil  
Tel: (+55 21) 24947140 – Email: mecgpaulino@yahoo.com.br, marcelo@adimarco.com.br

Para a determinação dos parâmetros desses ajustes, as impedâncias fase-fase podem ser calculadas com exatidão aceitáveis. Entretanto, as impedâncias fase-terra têm que ser medidas, pois sua determinação através de cálculos matemáticos não satisfaz as condições reais de resistência de terra específicas, levando-se em consideração as partes metálicas, cabos e outras partes condutoras aterradas que compõem a instalação. O acoplamento mútuo entre as linhas de transmissão também deve ser medido. Os métodos convencionais necessitam elevadas correntes de teste para obter uma relação sinal/ruído aceitável e não são muito precisos.

Esse trabalho descreve e mostra um método avançado para medir e calcular os dados de impedância da linha de transmissão e a comparação com dados calculados. Todas as medições são realizadas com variação de frequência, abaixo e acima da frequência da rede e os resultados são interpolados, eliminando-se interferências de sistemas energizados. A partir destes resultados as impedâncias de sequência positiva e sequência de zero, bem como o fator K em vários formatos são calculadas.

O princípio de medição é realizado utilizando um processador digital de sinal (DSP) gerando sinais senoidais em uma faixa de frequência de 15 a 400 Hz. Este sinal é alimentado por um amplificador com fonte chaveada. Um transformador de saída associa a impedância interna do amplificador com a impedância do objeto em teste. A multiplicação dos sinais medidos com o sinal gerado e o sinal medido permitem uma excelente filtragem de ruído e uma medida das partes reais e imaginárias com alta precisão. Assim, as impedâncias complexas podem ser determinadas.

Essa variação de frequência vai garantir a medida em ambientes com interferência e ruídos. Quando as medições são realizadas em frequências diferentes da frequência da linha, elas também podem ser feitas em condições inadequadas, sem interferência de qualquer problema. O valor da impedância na frequência da linha pode ser determinado por interpolação da curva de impedância por frequência. O método descrito é ideal também para determinação de impedância de terra e medidas de acoplamento.

O trabalho descreve os procedimentos de teste e mostra os resultados de medida realizada em uma linha de transmissão de uma empresa de distribuição de energia elétrica e a comparação dos resultados medidos com os resultados de projeto.

## 2.0 - PROTEÇÃO COM FALHAS A TERRA

Para proteger linhas de transmissão aéreas ou cabos de potência são necessárias esquemas de proteção associados a dispositivos específicos. Quando ocorre uma falha no sistema de transmissão, seja entre as fases ou uma falha para terra, essa falha deve ser eliminada de forma seletiva, rápida e precisa.

A seletividade deve ser obtida com o isolamento da falha e a desconexão de linha de onde ocorreu a falha. Existem métodos básicos para se obter a seletividade em linhas de transmissão com esquemas de proteção de distância ou diferencial de linha.

No caso da atuação de uma proteção de distância em uma linha de transmissão, os IEDs nos extremos da linha medem a impedância até o ponto de ocorrência da falha. É determinada uma primeira zona de proteção, ajustada com alcance de 80% a 90% da impedância total da linha, com tempo de atuação instantâneo (tempo de ajuste de 0 segundos). Os erros de medida dos transformadores de corrente e tensão, e as estimativas da impedância de linha e terra impedem o ajuste de primeira zona a 100%.

Para falhas de uma ou mais fases para terra, a impedância do circuito de falha é composto por uma parte da impedância da linha de transmissão mais uma parte da impedância de retorno por terra. A impedância de curto circuito para terra então é ajustada pelo uso do fator de terra (ou fator de compensação para faltas à terra) denominado K<sub>0</sub> ou K<sub>L</sub>. Estão disponíveis várias maneiras de inserir o fator para permitir a entrada simples do parâmetro diretamente das configurações dos relés, como, por exemplo, a relação entre a impedância de linha (Z<sub>L</sub>) e a impedância de terra (Z<sub>E</sub>).

$$K_L = \left( \frac{Z_E}{Z_L} \right) = \frac{1}{3} \cdot \left( \frac{Z_0}{Z_1} - 1 \right) \quad (1)$$

Onde:

- Z<sub>0</sub> é a impedância de sequência zero da linha protegida
- Z<sub>1</sub> é a impedância de sequência positiva da linha protegida
- Z<sub>E</sub> é a impedância de terra do loop da falha (sem compensação)
- Z<sub>L</sub> é a impedância da linha até o alcance da falha.

No sistema de proteção de sistemas de potência é necessário em alguns casos assumir um risco, minimizando ao máximo as aproximações ou estimativas realizadas. Este é o caso da determinação do fator de terra K<sub>0</sub>, ajustando-se a primeira zona menor que a impedância da linha para evitar problemas de sobre-alcance. A precisão do K<sub>0</sub>

afeta a localização da falha pela proteção de distancia. Um estimativa inadequada do fator  $K_0$  provocará problemas de sobrealcance ou subalcance.

Para falhas a terra, a impedância vista pela pelo sistema de proteção é dado por:

$$Z_L = \left( \frac{U/I}{1 - K_0} \right) \quad (2)$$

O ajuste inadequado de  $K_0$  pode permanecer escondido no sistema potência por muitos anos sem causar nenhum problema até que a proteção seja necessária atuar levando em consideração o fator de terra. Assim essa inadequação do ajuste de proteção vai aparecer no momento mais inoportuno, seja no caso de sobrealcance com a perda de seletividade ou atuação errada em linhas paralelas ou seja no caso de subalcance com atraso na atuação da proteção.

### 3.0 - CALCULO DO FATOR DE TERRA $K_0$

Existem muitas ferramentas de software para calcular os parametros da linha de transmissão e estimar o fator  $K_0$ , tais como ATP, CAPE, PowerFactory, etc.). São diversos os dados necessários para realizar o calculo da impedância de um linha e pode-se cometer erros. Para esse calculo é necessário:

- A configuração geométrica da torre de transmissão
  - A altura da torre
  - A distancia horizontal de cada condutor de fase e o cabo de terra
  - altura média dos cabos acima do solo,
  - valor médio das catenárias ao longo da linha
- A resistividade do terreno  $\rho$
- As características do condutores de fase e terra:
  - Resistência ôhmica
  - Características construtivas (GMR, condutores por fase, etc.)
  - Diâmetro

### 4.0 - MEDIDA DO FATOR DE TERRA $K_0$

O princípio de medição é realizado utilizando um processador digital de sinal (DSP) gerando sinais senoidais em uma faixa de frequência de 15 a 400 Hz. Este sinal é alimentado por um amplificador com fonte chaveada. Um transformador de saída associa a impedância interna do amplificador com a impedância do objeto em teste. A multiplicação dos sinais medidos com o sinal gerado e o sinal medido permitem uma excelente filtragem de ruído e uma medida das partes reais e imaginárias com alta precisão. Assim, as impedâncias complexas podem ser determinadas.

Atualmente, com as novas tecnologias disponivies nos equipamentos de teste primários, a medida dos parâmetros da linha, incluindo o fator de terra  $K_0$ , é relativamente simples e seguro. A medida é realizada com corrente entre 1 e 100 A, dependendo do tamanho da linha de transmissão. Como o princípio de medição é realizado utiliza um processador digital de sinal gerando sinais senoidais em uma faixa de frequência de 15 a 400 Hz, tem-se a filtragem de sinais com frequencia diferentes da frequencia de linha 50/60Hz, permitindo o teste com correntes reduzidas. Até este momento, as tentativas para medir as impedâncias de linha e fatores de terra eram muito difíceis e deveriam ser utilizados altos sinais de correntes para obter-se uma relação sinal/ruído adequado.

Os equipamentos da subestação são desconectados do sistema, deixando a linha desenergizada e isolados do sistema de potência. Conforme mostrado na figura 1, o sistema de teste é conectado à linha a ser testada, a saber:

- Unidade 1: Equipamento para geração dos sinais de teste e processamento de dados.
- Unidade 2: Unidade de acoplamento e medida do sistema testado.
- Unidade 3: Unidade de conexão e aterramento (dispositivo de segurança a contra surtos).

São realizadas sete medidas por cada sistema trifásico testado:

- Medidas das fases: AN, BN, e CN;
- Medidas entre fases: AB, BC, CA;
- Medida Trifásica: ABC.

Desta forma existe redundância das medições e permite fazer comprovações cruzadas dos resultados e o calculo do fator de terra  $K_0$  para cada fase. É importante ressaltar que as medidas de impedância não são realizadas na frequência de linha 50/60 Hz, conforme será mostrado na aplicação descrita neste trabalho.

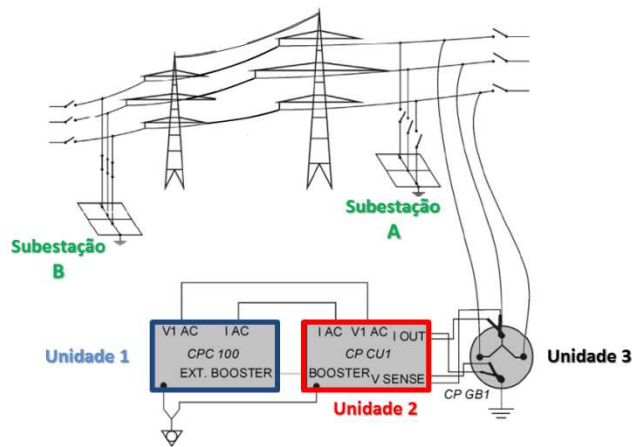


FIGURA 1 – Estrutura de teste e conexão dos equipamentos a linha de transmissão

A parte mais crítica do teste é a segurança do testador, especialmente em um circuito duplo, com uma linha paralela energizada, devido as sobretensões induzidas pelos efeitos capacitivo e indutivo do sistema de transmissão. Em alguns casos não será possível a realização do teste a menos que as duas linhas sejam postas fora de serviço.

Um dado adicional fornecido pelo teste é que, com as medidas da impedância de sequência zero  $Z_0$  por fase é possível analisar a simetria da linha e determinar a necessidade da realização de uma transposição para o balanceamento da mesma e a obtenção de todos os benefícios conhecidos.

#### 5.0 - ESTUDO DE CASO – TESTE EM LINHA DE TRANSMISSÃO DE 138 KV – 20 KM - BRASIL

Foram utilizados neste trabalho os testes realizados em uma linha de transmissão de 138 kV na região sul do Brasil como objetivo de demonstrar a técnica descrita. Não foram obtidos os dados calculados para comparação. A linha de transmissão possui 20,1 km de extensão. A figura 2 mostra o esquema de conexão conforme procedimento descrito e a disposição dos equipamentos em campo para medida, onde:

- A.** Equipamento CPC100: unidade de geração dos sinais com variação de frequência e processamento de dados. Possui Processador Digital de Sinal (DSP) que gera sinais senoidais numa faixa de frequência de 15 a 400 Hz e medidores seletivos para medidas em diferentes frequências.
- B.** Equipamento CPCU1: Unidade de acoplamento e medida do sistema testado.
- C.** Equipamento CPGB1: Unidade para proteção contra sobretensão, destinada a conectar a unidade CPCU1 ao sistema ou equipamento em teste. Se ocorrer uma sobretensão entre os terminais de teste, um supressor de surto atuará curto-circuitando o sinal para o aterramento, protegendo o pessoal técnico e equipamentos.

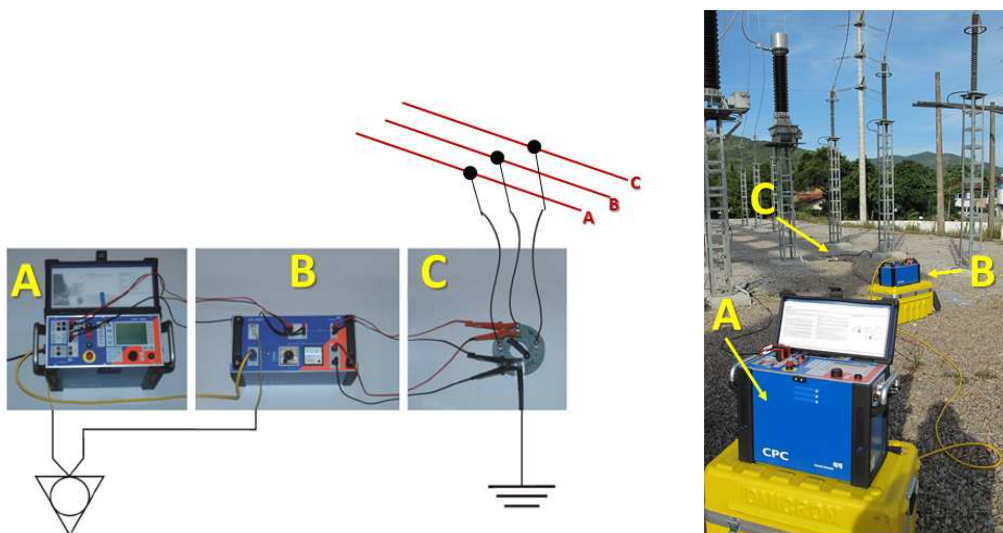


FIGURA 2 – Disposição dos equipamentos em campo para medida.

Conforme descrito anteriormente, foram realizadas medidas monofásicas, bifásicas e trifásicas na linha de transmissão. Para exemplificar as medidas realizadas, a tabela 1 mostra os resultados das medidas realizadas na fase A para terra (AN).

Tabela 1 – Resultados de medidas na fase AN

Medida	Frequência	I [A]		V [V]		R [Ω]	X [Ω]
1	40,0Hz	10,0546A	0,0°	103,6192V	69,2°	3,65953568 Ω	9,63379567Ω
2	40,0Hz	10,0547A	0,0°	103,6188V	69,21°	3,65784009 Ω	9,63439704Ω
3	80,0Hz	10,0521A	0,0°	189,0176V	76,66°	4,338625 Ω	18,29661091Ω
4	80,0Hz	10,0529A	0,0°	189,0215V	76,69°	4,32878913 Ω	18,29780141Ω
5	100,0Hz	10,0404A	0,0°	231,7127V	78,47°	4,61286053 Ω	22,61232419Ω

Pode-se observar que as medidas foram realizadas nas frequências de 40, 80 e 100 Hz para eliminar a influência do sinal na frequência da linha de transmissão testada. Na figura 3 tem-se o gráfico dos dados mostrados na tabela 1, com a determinação da resistência e reatância na frequência de 60 Hz através da interpolação da curva de impedância pela frequência.

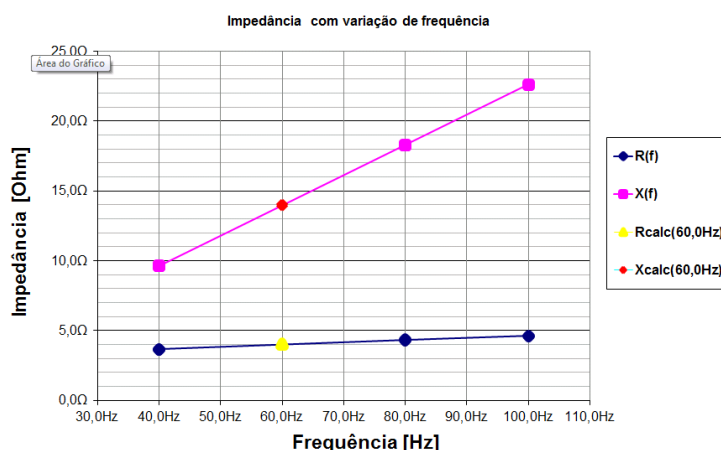


FIGURA 3 – Medidas realizadas – representação gráfica da impedância com a variação de frequência.

Assim, o cálculo das impedâncias da linha de transmissão testada e o fator de terra  $K_0$  foram determinados de forma automática em uma planilha previamente preparada. As figuras 4 e 5 mostram os resultados obtidos.

Medidas:	R [Ω]	X [Ω]	Z [Ω]	Phi (°)
L1-L2: $Z_{L1} + Z_{L2}$	4,077	17,920	18,378	77,18°
L2-L3: $Z_{L2} + Z_{L3}$	4,067	18,080	18,532	77,32°
L3-L1: $Z_{L3} + Z_{L1}$	4,111	19,959	20,378	78,36°
L1-E: $Z_{L1} + Z_E$	3,949	13,966	14,513	74,21°
L2-E: $Z_{L2} + Z_E$	3,758	14,551	15,028	75,52°
L3-E: $Z_{L3} + Z_E$	3,681	14,920	15,368	76,14°
L1L2L3-E: $Z_{L1}/Z_{L2}/Z_{L3} + Z_E$	2,448	8,243	8,599	73,46°

Resultados de Impedância:	R [Ω]	X [Ω]	Z [Ω]	Phi (°)
Impedancia sequência positiva $Z_1$	2,043	9,327	9,548	77,65°
Impedancia sequência zero $Z_0$	7,343	24,730	25,797	73,46°

FIGURA 4 – Parâmetros da linha de transmissão obtidos.

Fator de Compensação Residual (Fator de Terra)		
$k_L = Z_E / Z_L$	$k_L$ [1]	Phi (°)
	0,569	-6,64°
$R_E / R_L$ e $X_E / X_L$		
	$R_E/R_L$ [1]	$X_E/X_L$ [1]
	0,865	0,551
$k_0 = Z_0 / Z_1$		
	$k_0$ [1]	Phi (°)
	2,702	-4,19°

FIGURA 5 – Fator de Terra calculado.

## 6.0 - ESTUDO DE CASO – TESTE EM LINHA DE TRANSMISSÃO – MÉXICO [2]

Após a saída parcial de operação do sistema Peninsular mexicano na região de Yucatán, ocasionando a perda de 15000MW, os estudos indicaram a ocorrência de problemas de sobrealcance na proteção de distância. Foram então realizadas medidas de acordo com os procedimentos apresentados neste trabalho e os resultados são apresentados na tabela a seguir.

Tabela 2 – Resultados de medidas em sistema de transmissão - México

		R [ $\Omega$ ]	X [ $\Omega$ ]	Z [ $\Omega$ ]	Angulo
Resultados de Medida	Z1	8,337 $\Omega$	54,72 $\Omega$	55,352 $\Omega$	81,337
	Z0	29,314 $\Omega$	136,185 $\Omega$	139,304 $\Omega$	77,853
Resultados de Software	Z1	8,86 $\Omega$	54,78 $\Omega$	55,49 $\Omega$	80,81
	Z0	39,286 $\Omega$	160,25 $\Omega$	165 $\Omega$	76,22
Calculo de Erro	Erro% Z1	-6,27%	-0,11%	-0,25%	0,65%
	Erro% Z0	-34,02%	-17,67%	<b>-18,45%</b>	2,10%

Os resultados apresentam valores de Z1 e Z0 calculados por meio de um software e os valores diretamente medidos no sistema de transmissão em estudo. A comparação dos resultados mostra um pequeno erro, -0,25%, para a impedância de sequencia positiva Z1. Entretanto, pode-se observar um erro de -18,44%, explicando a operação por sobrealcance da proteção associada a linha de transmissão testada.

## 7.0 - CONCLUSÃO

Uma estimativa incorreta do fator de terra K0 pode provocar uma operação equivocada da proteção de distância, seja por subalcance ou por sobrealcance. Ainda que existam programas para cálculo dos parâmetros de linha cada vez mais sofisticados, as incertezas na determinação da impedância de terra podem induzir erros nessas estimativas. O trabalho mostra que é possível a medida real dos parâmetros de uma linha de transmissão e os resultados são usados para o cálculo correto de Z1, Z0 e a correta estimativa de K0. O trabalho mostrou ainda um caso de medida no Brasil e um caso de medida no sistema Mexicano.

## 8.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) M. E. C. Paulino, M. Krueger: "Utilização de Nova Tecnologia para Medida de Valores de Impedância de Linhas Aéreas: Interferência Eletromagnética entre Linhas e Cabos Aéreos e Impedância de Terra em Subestações". Apresentação no III Workshop sobre Novas Tecnologias e Métodos Aplicáveis à Manutenção da Transmissão - ABRATE, Belo Horizonte, Brasil, 2004.
- (2) M. Gutiérrez: "Medición de la Impedância de Línea y Tierra para una Correcta Estimación del Factor de Tierra (K0) en Líneas de Transmisión y Mejora de la Confiabilidad de la Protección de Distancia", PACW, Florianópolis, Brasil, 2012.
- (3) Th. Hensler, R. Kaufmann, U. Klapper, M. Krüger, Z. Schreiner, 2003, III Workshop sobre "Novas Tecnologias e Métodos Aplicáveis à Manutenção da Transmissão "Portable testing device", US Patent 6608493
- (4) S. Kaiser: "Different Representation of the Earth Impedance Matching in Distance Protection Relays". ProceedingsOMICRON User Conference Germany 2004"

## 9.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



**Marcelo Eduardo de Carvalho Paulino** é Engenheiro Eletricista e Especialista em Manutenção de Sistemas Elétricos pela na Escola Federal de Engenharia de Itajubá (EFEI). Gerente Técnico da Adimarco. Autor e coautor de mais de 90 trabalhos técnicos em eventos no Brasil e no exterior. Professor convidado do Curso de Especialização em Manutenção de Sistemas Elétrico e Curso de Especialização em Automação de Sistemas Elétricos da UNIFEI. É instrutor certificado pela OMICRON electronics. Membro ativo de sociedades profissionais nacionais e internacionais. Representante brasileiro nos WG B5.32 Functional testing of IEC61850 based systems e WG B5.06 Maintenance Strategies for Digital Substation Automation Systems. Membro do WG A2.44 Guide on Transformer Intelligent Condition Monitoring e GT A2.05 do Guia de Manutenção para Transformadores de Potência do Cigré. É Secretário da CE-03:057.01 - do COBEI/ABNT responsável pela nacionalização da Norma IEC 61850 e representante brasileiro na IEC no TC57.(mecpaulino@yahoo.com.br)