

Detecção de fuga a terra em sistemas de corrente contínua

Ederson C. dos Santos, CESP; Jorge M. Oura, VIRTUS; Paulo K. Maezono, VIRTUS; Takayuti Kobayashi, VIRTUS; Thiago V. Oliveira, ECIL; Paulo R. Andreus, ECIL;

Resumo- Este artigo descreve o desenvolvimento de um sistema de detecção de fuga a terra, em sistemas de corrente contínua. Uma ferramenta que possibilita a detecção de circuito defeituoso no sistema de alimentação auxiliar de corrente contínua, com fuga a terra, sem necessidade de intervenção com desligamentos, nem riscos de mau funcionamento de equipamentos alimentados em corrente contínua ou atuações indevidas de proteções causando desligamentos indesejáveis das unidades geradoras de usinas de grande porte, servindo a UHE Ilha Solteira como campo de atuação de pesquisa.

Palavras-chave— Corrente contínua, detecção, fuga a terra, ferramenta.

I. INTRODUÇÃO

É de conhecimento geral que há muita dificuldade de detecção de pontos de Fuga a Terra em circuitos de alimentação auxiliares de corrente contínua em instalações de energia elétrica. A delimitação do circuito defeituoso e, mais especificamente, do ponto defeituoso, é demorado e trabalhoso, exigindo excessiva mão de obra especializada e processo de tentativa e erro, com desligamentos de circuitos auxiliares CC, um a um.

Nesse processo, a única informação disponível, hoje, é a existência de ponto à terra no lado (+) positivo ou no lado (-) negativo, para cada grupo retificador / bateria, sem identificação de tronco, ramal ou circuito defeituoso. Associadas à demanda excessiva de mão de obra existem os aspectos não menos importantes: o tempo envolvido na busca e da interferência em circuitos são os que podem ter sua confiabilidade afetada pela intervenção para pesquisa de defeito, com manuseio de cabos de controle. Em uma usina geradora de grande porte, o problema se torna bastante complexo devido à quantidade e variedade de instalações elétricas auxiliares. O desenvolvimento de sistema de detecção proposto no presente trabalho de P&D com código ANEEL, 0061-007/2007, buscou através de pesquisa, propostas inovadoras na sua forma de implementação, procurando ferramenta

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica regulado pela ANEEL e consta dos Anais do VI Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica (VI CITENEL), realizado em Fortaleza/CE, no período de 17 a 19 de agosto de 2011.

Este Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) foi apoiado pela Companhia Energética de São Paulo (CESP).

Ederson Colleto dos Santos trabalha na CESP (e-mail: ederson.santos@cesp.com.br) Jorge Mitsuhiro Oura, Paulo Koiti Maezono e Takayuti Kobayashi trabalham na Virtus Consultoria e Serviços Ltda (e-mails: jorge.oura@virtuscs.com.br, pmaezono@virtuscs.com.br, tkobayashi@virtuscs.com.br); Thiago Vicente de Oliveira e Paulo Rodrigues Andreus trabalham na Ecil Informática (e-mails: pandreus@ecilinformatica.com.br, thiago@ecilinformatica.com.br).

poderosa para a detecção e identificação de circuito defeituoso específico, buscando o aumento da eficiência da manutenção, principalmente em situações de emergência. O projeto foi concluído com desenvolvimento de um protótipo, tendo como participantes as empresas ECIL Informática Ltda, VIRTUS Consultoria e Serviços Ltda, e CESP - Companhia Energética de São Paulo, o qual forneceu o suporte financeiro ao projeto.

II. LINHA DE PESQUISA ADOTADA

O projeto de P&D teve como linha de pesquisa as seguintes etapas:

- levantamento de dados do subsistema de corrente contínua da UHE Ilha Solteira;
- pesquisa de modelagem de capacitância entre cabos de controle e simulação de fuga à terra no sistema de corrente contínua;
- pesquisa sobre o funcionamento de diferentes sensores de correntes;
- desenvolvimento do equipamento detector de fuga à terra.

A. Levantamento de dados do subsistema de corrente contínua da UHE Ilha Solteira

A.1 Composição do Sistema

O Sistema da UHE Ilha Solteira é composto por seis sistemas “Retificadores/Baterias”, alimentados por fontes de corrente alternada em 440 Vca.

Cada um dos sistemas é composto por:

- Retificador: converte a corrente alternada em corrente contínua tendo como finalidade carregar as baterias.
- Baterias: dispositivo capaz de armazenar energia elétrica sob forma de energia química e fornecer a energia química armazenada sob a forma de energia elétrica.
- Quadro retificador: contém os instrumentos de medição de corrente e tensão AC e DC; Sinalização de positivo e negativo à terra; Sinalização de defeito no retificador; Sinalização de bateria em descarga; Ajustes de tensão de serviço, tensão de carga em serviço, flutuação, etc.
- Quadros de Distribuição: contém os disjuntores para a alimentação dos circuitos de alimentação
- Cabos de alimentação das cargas

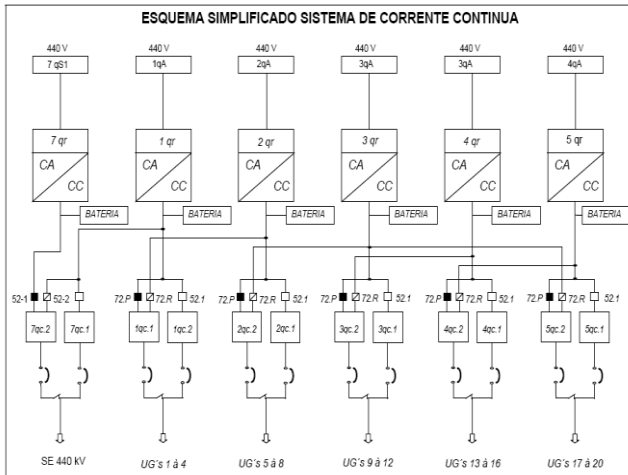


Figura 01 - Sistema de Alimentação de CC da UHE Ilha Solteira

B. Pesquisa de modelagem de capacitâncias entre cabos de controle e simulação de fuga à terra no sistema de corrente contínua

Este estudo mostra a melhor modelagem de sistema de corrente contínua para fins de simulação de fugas a terra. Após inúmeras modelagens analisadas, concluiu-se que o modelo abaixo é o que representa melhor o sistema de corrente contínua de uma subestação/usina.

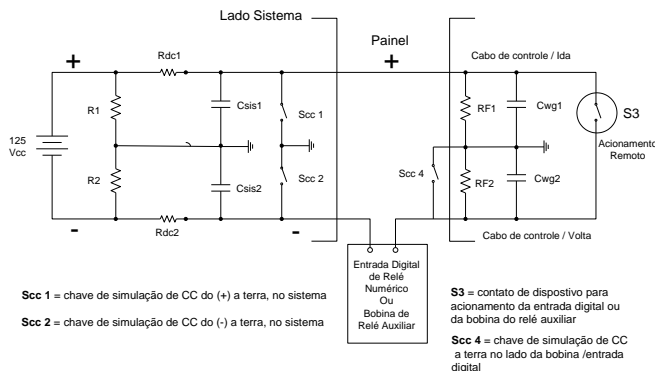


Figura 02 - Modelagem para simulação no laboratório das capacitâncias de cabos e fuga no sistema de CC

No modelo apresentado acima:

$$R1 = R2 = 10 \text{ k}\Omega$$

$$Rdc1 = Rdc2 = 0 \Omega$$

$$Cwg1 = Cwg2 = 220 \text{ nF}$$

$$RF1 = RF2 = 5,6 \text{ M}\Omega \text{ (isolação do sistema)}$$

Como RF1 e RF2 são muito maiores que R1 e R2, e são utilizados para isolamento do sistema, pode-se, por uma boa aproximação, considerá-la como um circuito aberto.

Já neste caso, é importante observar que:

Csis1 e Csis2 = representam as totalidades das capacitâncias do Sistema de Corrente contínua, com exceção da capacitância dos cabos entre contato de acionamento e a bobina acionada (Cwg2).

Cwg1 existe, mas nem precisaria ser representada, pois seria parte do Csis1.

Como Csis1 e Csis2 representam a totalidade da capacitância, seus valores são muito maiores que Cwg2.

As chaves S1 e S2 representam curtos a terra no sistema de CC ou, através de resistores podem representar fuga a terra através de resistências.

Este modelo parece ser adequado para representar, em laboratório, um sistema de corrente contínua, simulando faltas a terra ou fugas a terra através de S1 e S2. A chave S4, apesar de simular um CC, não seria necessário uma vez que não representa falta de um trecho ativo.

C. Pesquisa sobre o funcionamento de diferentes sensores de correntes

A pesquisa abaixo teve como finalidade determinar os sensores que melhor se adequaria para detecção de fuga à terra no sistema de corrente contínua.

O circuito da Figura 03 tem como finalidade detectar a corrente de fuga à Terra no pólo positivo e no pólo negativo do sistema de corrente contínua. Para isso, o modelo proposto consiste na inserção de uma corrente alternada de baixa frequência e amplitude para não causar interferência nos equipamentos, aplicado em modo comum entre os pólos do sistema e o aterramento, isolando a fonte de alimentação com um transformador comum com relação 1:1. Na presença de algum curto entre as fases com o aterramento, há uma circulação de corrente do sinal AC injetado em relação ao aterramento, podendo ser monitorada pelos circuitos de sensores.

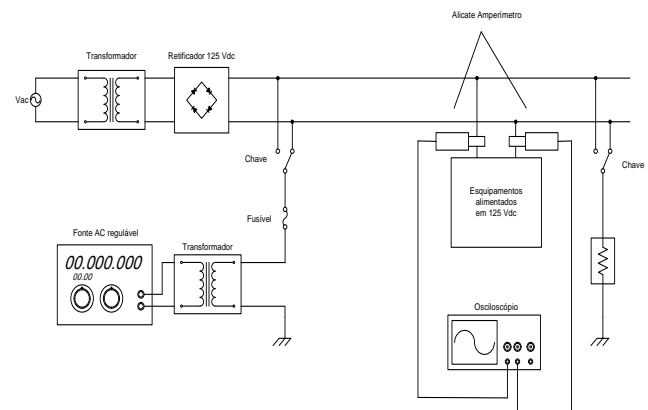


Figura 03 - Modelagem de um sistema para detecção de fuga à terra no sistema de CC

C.1 Sensores analisados

- Transformador de corrente (TC)
- Sensor de Efeito Hall
- Bobina de Rogowski
- Resistor Shunt

Transformador de Corrente (TC)

O transformador é um dispositivo que compreende dois ou mais circuitos elétricos acoplados magneticamente. Consiste de dois ou mais enrolamentos interligados por um campo magnético mútuo. Se em um dos enrolamentos, o primário, for conectado a uma fonte de tensão alternada, um fluxo alternado será produzido e a amplitude dependerá da tensão do primário e do número de espiras. O fluxo mútuo que une o outro enrolamento, o secundário, induzirá uma tensão cujo valor dependerá do número de espiras da bobina do secundário. Pela proporção do número de espiras do primário e do secundário, chega-se a uma relação desejada da tensão, através da relação de transformação. O transformador consiste de um núcleo magnético com dois enrolamentos independentes, concatenados com um fluxo magnético mútuo.

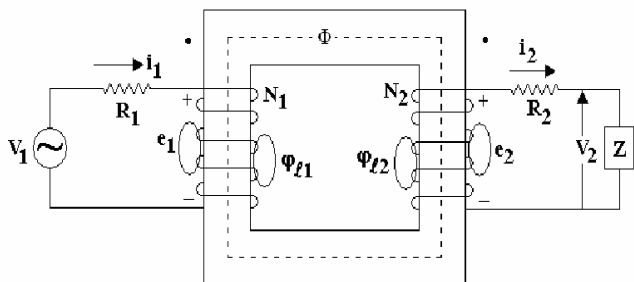


Figura 04 - Diagrama esquemático de um transformador

- V_1 - Tensão no primário
- i_1 - Corrente no primário
- R_1 - Resistência do enrolamento primário
- e_1 - Tensão induzida no enrolamento primário
- V_2 - Tensão no secundário
- i_2 - Corrente no secundário
- R_2 - Resistência do enrolamento secundário
- e_2 - Tensão induzida no enrolamento secundário
- N_1 - Número de espiras do primário
- N_2 - Número de espiras do secundário
- Φ - Fluxo responsável pela transferência de potência do primário para o secundário
- ϕ_{11} - Fluxo de dispersão do enrolamento primário
- ϕ_{12} - Fluxo de dispersão do enrolamento secundário

O princípio de funcionamento do transformador depende somente da existência do fluxo mútuo alternado ligando os dois enrolamentos e a utilização do conceito de indutância mútua. É claro que isso pode ser obtido se um núcleo de ar for usado, mas muito mais eficiência se obtém com o núcleo de material magnético.

Pela figura representativa do transformador (Fig. 04), o campo magnético é determinado pelas correntes em ambos os enrolamentos. De acordo com a lei de Lenz as tensões sobre os enrolamentos primário e secundário são definidas como:

$$e_1 = \frac{d\lambda_1}{dt} \quad e_2 = \frac{d\lambda_2}{dt}$$

Onde λ_1 e λ_2 são os enlaces de fluxo dos respectivos enrolamentos, produzidos pelo efeito total de ambas as correntes.

As equações das malhas correspondentes ao primário e ao secundário definem V_1 e V_2 .

$$V_1 = R_1 i_1 + e_1 = R_1 i_1 + \frac{d\lambda_1}{dt}$$

$$V_2 = R_2 i_2 + e_2 = R_2 i_2 + \frac{d\lambda_2}{dt}$$

Em condições ideais, todo fluxo está confinado no núcleo, as resistências dos enrolamentos são desprezíveis, as perdas no núcleo são desprezíveis e a permeabilidade do núcleo é infinita. Assim, $\Phi_1 = \Phi_2 = \Phi$. Então:

$$V_1 = N_1 \frac{d\Phi}{dt}$$

$$V_2 = N_2 \frac{d\Phi}{dt}$$

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} = a$$

Onde a é a relação de transformação, ou relação de espiras.

Esta equação estabelece que a tensão em cada enrolamento de um transformador ideal é diretamente proporcional ao número de espiras do enrolamento. Se a permeabilidade do núcleo é infinita, temos que $N_1 i_1 - N_2 i_2 = 0$. Portanto,

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{a}$$

Ou seja, num transformador ideal as correntes nos enrolamentos são inversamente proporcionais ao número de espiras dos enrolamentos.

O transformador de corrente (TC) pode ser definido como um transformador no qual qualquer condição no primário é reproduzida no circuito secundário com exata proporção e relação de fase.

Porém em um transformador real temos perdas relacionadas ao núcleo magnético e as perdas por dispersão do fluxo em cada um dos enrolamentos. As perdas no núcleo podem ser divididas em duas partes, uma delas é a perda de Foucault que representa o aquecimento do núcleo. E a outra parte é a perda de histerese ocasionada devido à magnetização cíclica.

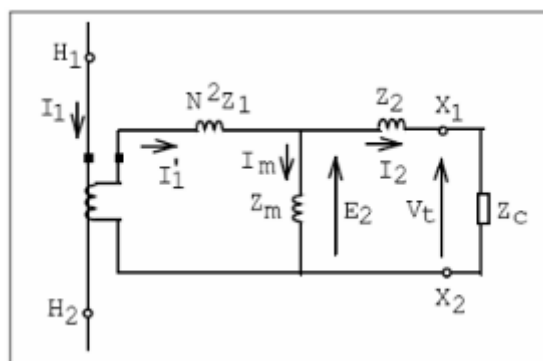


Figura 05 - Circuito equivalente de um TC

Onde:

I_1 : Valor eficaz da corrente primária

$N = \frac{N_2}{N_1}$: Relação de espiras ao secundário

$I_1' = I_1/N$: Corrente primária referida ao secundário

Z_2 : Impedância do enrolamento secundário

Z_1 : Impedância do enrolamento primário, referida ao secundário

Na Fig 05 está representado o circuito equivalente de um TC, com todas as grandezas referidas ao secundário. Deste circuito constata-se que parte da corrente primária é consumida na excitação do núcleo: $I_1' = I_m + I_2$. A f.e.m (força eletro-motriz) secundária (E_2) é função da corrente de excitação (I_m), da impedância secundária (Z_2) e da carga (Z_c). Os erros dos TCs resultam da corrente de excitação.

Características

Os núcleos dos TCs de medição são feitos de materiais de alta permeabilidade magnética (pequena corrente de magnetização, conseqüentemente pequenas perdas e pequenos erros), entretanto entram em saturação rapidamente quando uma corrente no enrolamento primário atinge um valor próximo de quatro vezes a corrente nominal primária.

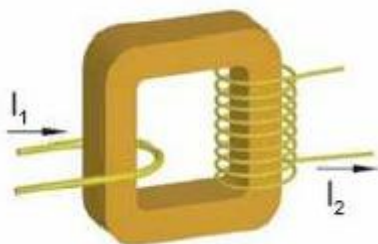


Figura 06 - Representação de um transformador de corrente

Os núcleos dos TCs de proteção são feitos de materiais que não têm a mesma permeabilidade magnética dos TCs de medição, no entanto só irão saturar para correntes primárias muito superiores ao seu valor nominal (da ordem de 20 vezes), refletindo conseqüentemente em seu secundário uma corrente cerca de 20 vezes o valor nominal desta.

Portanto temos uma dualidade com a precisão da medida em relação à corrente de saturação do núcleo magnético, isto é, correntes muito altas em TCs de medição saturam o núcleo magnético e TCs de potência são pouco precisos. A figura abaixo demonstra esta característica.

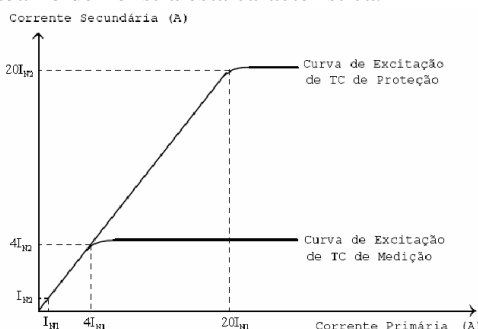


Figura 07 - Curvas de saturação de TCs de proteção e medição

Sensor de Efeito Hall

O efeito Hall é uma conseqüência direta da força de Lorentz. Esta força é aplicada a uma carga elétrica em movimento imersa em um campo magnético pela seguinte relação:

$$\vec{F} = q(\vec{u} \times \vec{B})$$

q → Carga elétrica

\vec{u} → Velocidade da carga

\vec{B} → Indução Magnética

Esta força magnética sobre as cargas provoca uma corrente perpendicular a direção de propagação da corrente inicial. Isto promoverá o aparecimento de uma região com concentração de cargas positivas e a outra de cargas negativas, criando um campo elétrico perpendicular ao campo magnético B. Esta corrente cessará quando o balanço de cargas, positivas e negativas crie uma força elétrica que anule a força magnética sobre as cargas. E a força elétrica causa uma diferença de potencial que será proporcional à corrente a ser medida.

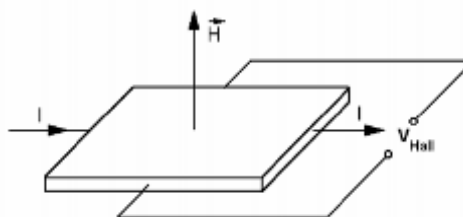


Figura 08 – Diagrama de um Sensor de Efeito Hall

Apesar de o efeito Hall existir em qualquer material condutor, seu efeito é mais intenso em materiais semicondutores. Entretanto, os semicondutores apresentam variações de lote para lote, necessitando de um circuito eletrônico auxiliar para ajustar o sinal do efeito Hall para um valor calibrado do campo magnético.

A grande vantagem do sensor Hall como elemento de medida do campo magnético é a capacidade de medir tanto campos contínuos (DC) como alternados em um único instrumento.

Bobina de Rogowski

O funcionamento da Bobina de Rogowski baseia-se na presença de um campo magnético quando um condutor é submetido a uma corrente elétrica, segundo a Lei Circuitual de Ampère e na indução magnética prevista pela Lei de Faraday-Lenz.

Quando um condutor percorrido por corrente elétrica variável no tempo é posicionado no interior do enrolamento do transdutor uma força eletromotriz (fem) é induzida neste enrolamento. Como um circuito acoplado ideal, o condutor

no qual se pretende medir a corrente elétrica interage com o enrolamento do transdutor.

Pela Lei Circuital de Ampère temos:

$$\oint H \times dl = i(t)$$

Como neste caso temos que o ângulo de 90° entre o campo magnético H e o diferencial dl , o produto vetorial é igual ao produto escalar de ambos:

$$\oint H dl = i(t)$$

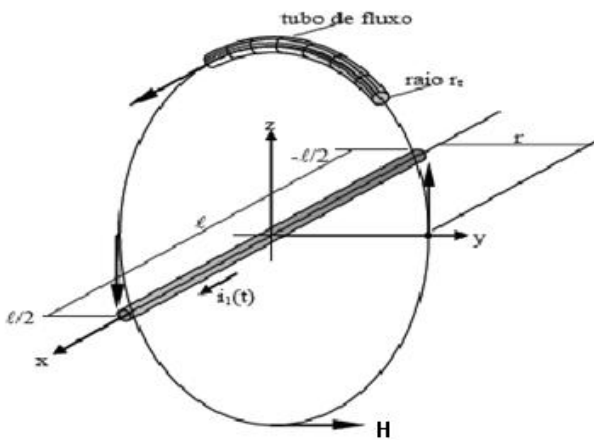


Figura 9 – Tubo de fluxo magnético de um condutor

Utilizando-se a aproximação em que $l \gg r$, podemos aproximar a integral em:

$$H(t) = \frac{1}{2\pi r} i(t)$$

Como o núcleo da bobina de Rogowski é de ar temos a relação entre a intensidade do campo H com a densidade de fluxo B da seguinte forma:

$$B(t) = \mu_0 H(t)$$

$$B(t) = \frac{\mu_0}{2\pi r} i(t)$$

Para expressarmos o valor em fluxo magnético temos que considerar a área da seção transversal da bobina que vale πr_t^2 :

$$\varphi(t) = \frac{\mu_0 r_t^2}{2r} i(t)$$

Se ao longo do tubo tivermos N espiras, o fluxo concatenado do enrolamento será:

$$\lambda(t) = N\varphi(t)$$

Por fim quando a corrente no condutor é variável ocasionamos um fluxo concatenado também variável no núcleo do toróide. Essa variação de fluxo induz tensão na bobina de acordo com a Lei de Lenz.

$$u(t) = \frac{d}{dt} \lambda(t)$$

$$u(t) = N \frac{\mu_0 r_t^2}{2r} \frac{d}{dt} i(t)$$

Desta forma se integrar a tensão induzida e multiplicarmos o resultado por uma constante terá a corrente que queremos medir.

$$i(t) = \frac{1}{K} \int u(t) dt$$

$$K = N \frac{\mu_0 r_t^2}{2r}$$

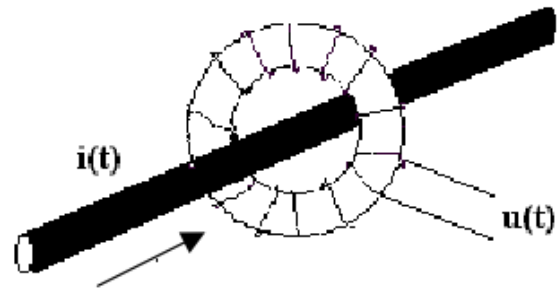


Figura 10 – Desenho esquemático da Bobina de Rogowski

No item anterior foi explicado o princípio de funcionamento da Bobina de Rogowski aplicada como sensor de corrente alternada.

A principal limitação deste sistema para medição de corrente é quando temos baixos valores de amplitudes e frequência. Isto se deve ao fato de a permeabilidade magnética do ar ser muito baixa ($\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$), portanto alta relutância magnética e com isso a tensão induzida é muito pequena, perdendo precisão na medida.

A principal aplicação deste tipo de sensor está baseada na medição de descargas elétricas e pulsos de corrente elétrica. Em ambos os casos temos uma alta frequência ou alta amplitude de corrente.

Tendo a bobina de Rogowski um núcleo composto de ar o que afetará a medição será apenas a perda por acoplamento magnético. Este fato é mais significativo nas bobinas flexíveis por terem um acoplamento mais imperfeito, logo eles se tornam mais imprecisos apesar de não precisarem interferir fisicamente no circuito.

Resistor shunt

Os Resistores Shunts são elementos sensores de baixa resistência que são inseridos diretamente no circuito da corrente. Operam pelo princípio estabelecido pela Lei de Ohm e podem ser utilizados para medir correntes contínuas e alternadas até dezenas de MHz. Isto é, o valor da corrente que passa pelo condutor será linearmente proporcional a queda de tensão medida em paralelo ao resistor.

As vantagens destes dispositivos consistem no baixo custo e excelente precisão na medida, não possuindo restrição ao tipo de sinal (AC ou DC).

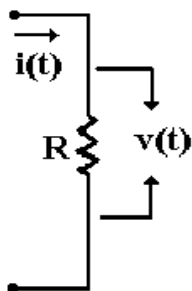


Figura 11 – Esquemático de um Resistor Shunt.

$$i(t) = \frac{v(t)}{R}$$

As desvantagens do sensor resistivo são a necessidade da inserção em série com o circuito e o aquecimento pelo efeito Joule para altas correntes. Uma forma de minimizar o aquecimento é diminuir a resistência do Shunt ou instalar mais de um Resistor Shunt em paralelo, diminuindo a resistência equivalente.

C.2 Testes em Laboratório

Com base na fundamentação teórica de cada um dos sensores apresentados e no modelo proposto inicialmente como solução para monitoramento da corrente de fuga à Terra, foram realizados alguns testes que serão descritos nos próximos itens.

Os testes em laboratório foram realizados utilizando diferentes tipos de sensores de corrente, conforme lustram as fotos a seguir.



Figura 12 – Transformador de Corrente especial imune a ruídos externos (TC-1)



Figura 13 – Transformador de Corrente especial para medição em baixa frequência (TC-2)



Figura 14 – Transformador de Corrente Toroidal (TC-3)

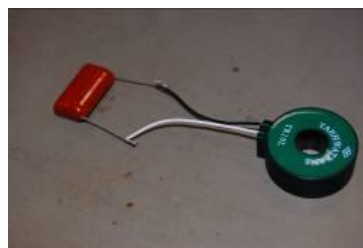


Figura 15 – Bobina de Rogowski



Figura 16 – Sensor de efeito Hall em formato de alicate amperímetro

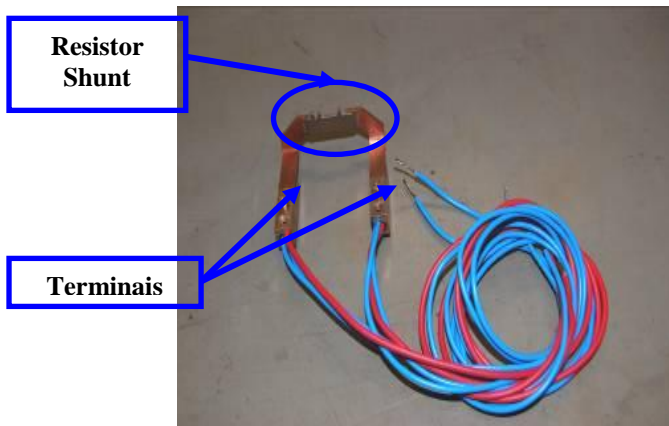


Figura 17 – Resistor Shunt de $300\mu\Omega$

Primeiramente, foram adicionados, em paralelo ao secundário de cada um dos TCs, um Resistor, para acondicionar a grandeza em tensão, e um Capacitor, para filtrar o ruído, conforme ilustra a Figura 18.

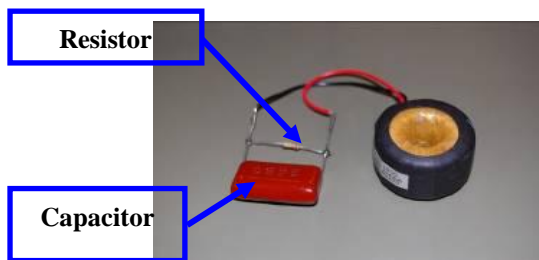


Figura 18 – Detalhe do Resistor e Capacitor em paralelo ao secundário do TC

Foi adicionado também, em paralelo ao secundário da Bobina de Rogowski, um Capacitor para filtrar o ruído, conforme ilustra a Figura 19.

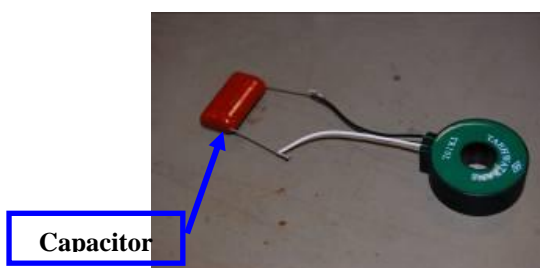


Figura 19 – Bobina de Rogowski

Em seguida, foi passado um fio através do centro da abertura dos sensores (exceto o Resistor Shunt) a fim de constituir o primário do circuito.

Utilizando a Fonte de Corrente AC e o Gerador de Funções, foram aplicados diversos níveis de amplitude e frequência, sendo monitorados pelo osciloscópio digital. A Figura 20 ilustra a Fonte de Corrente AC e o Gerador de Funções e a Figura 21 ilustra o circuito montado.

Para o Resistor Shunt, foi utilizando uma Fonte de Corrente AC, injetando-se uma extensa faixa de amplitude da ordem de centenas de μA a dezenas de A. A tensão nos terminais do Resistor Shunt foi monitorada com o osciloscópio digital, além disso, foi monitorada sua temperatura com um termômetro infravermelho (pirômetro).



Figura 20 – Fonte de corrente AC e Gerador de Funções

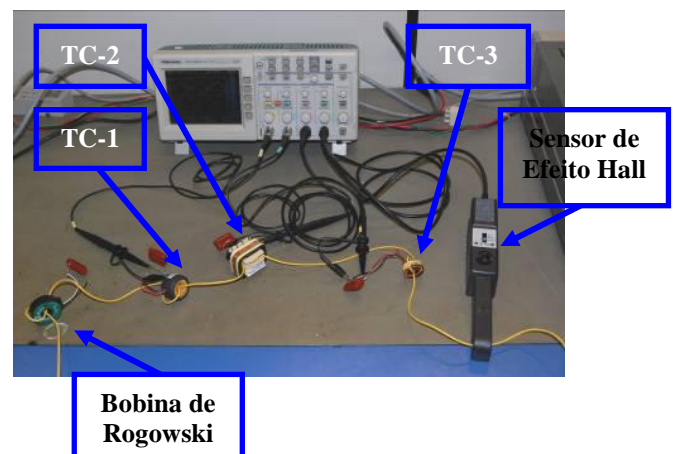


Figura 21 – Circuito montado. Detalhe de cada tipo de sensor utilizado

C.3 Análise dos Resultados

A partir dos estudos e testes realizados no laboratório, foi possível analisar as características de construção e funcionamento dos sensores de corrente existentes no mercado atual. Dessa forma, foram observados os seguintes aspectos de acordo com cada um dos sensores estudados:

Transformador de Corrente TC

Foi possível observar que embora os TCs fossem construídos para operar com correntes AC mais elevadas, um sinal DC, próximo a região de saturação AC dos TCs, satura o núcleo magnético e impossibilita as medições de corrente.

Outro fator limitante se dá pela dificuldade de se construir um TC com núcleo aberto (em forma de alicate) para medições de corrente na ordem de 100 μ A (nível de corrente estipulado para indicação de alarme no caso de uma possível fuga à Terra).

De acordo com diversos fabricantes de transformadores, como o nível de corrente é muito baixo, qualquer abertura no núcleo afetará fortemente o acoplamento magnético causando maiores perdas por dispersão de fluxo, além de ser necessário um grande número de espiras no secundário.

Sensor de Efeito Hall

Foi possível observar que este tipo de sensor possui as mesmas características de saturação em relação aos TCs, porém, é menos sensível a um acoplamento imperfeito e assim a construção de um alicate para medição é mais factível.

A maior dificuldade é a montagem física desse sensor junto ao núcleo magnético, uma vez que sua posição afeta diretamente na medição do fluxo de corrente. Além disso, necessita de um circuito eletrônico muito preciso para realizar a calibração.

Bobina de Rogowski

Foi possível observar a imunidade a campos elétricos provenientes de correntes DC, o que o tornaria ideal para a aplicação em questão, onde no sistema a ser monitorado circula corrente contínua.

Por outro lado como o ar tem baixa permeabilidade magnética, em consequência, alta relutância, é necessária uma alta frequência no condutor ou valores muito altos de amplitude. Como o sinal de interesse tem baixa frequência e amplitude, não conseguimos magnetizar suficientemente o núcleo de ar para induzirmos tensão nos terminais do toróide.

Resistor Shunt

Foi possível observar que a solução utilizando o Resistor Shunt seria ideal, tendo em vista as características lineares, o custo e a facilidade de condicionamento do sinal monitorado.

Porém, a principal desvantagem é a necessidade de “abrir” o circuito para instalar os Resistores Shunt em série, impossibilitando o desenvolvimento de uma solução portátil.

A partir do comportamento observado de cada um dos sensores analisados, foi traçada uma tabela (dividida em duas partes) comparando as principais características de cada um:

Tabela 1 – Comparativo entre as principais características dos sensores analisados

Características	SENSORES			
	TC	Rogowski	Hall	Shunt
Custo	Médio	Baixo	Alto	Baixo
Faixa de Frequência	0.1 Hz ~ 100 MHz	0.1 ~ 100 MHz	< 1 MHz	DC ~ 10 MHz
Leitura DC	Não	Não	Sim	Sim
Sensibilidade	1 V/A	10 mV/(A/ μ s)	10 Gauss	mV/A
Saturação/Histerese	Sim	Não	Sim	Não
Linearidade	Boa	Ótima	Média	Ótima
Temper. de Operação	-50 ~ 150 $^{\circ}$ C	-20 ~ 100 $^{\circ}$ C	-40 ~ 125 $^{\circ}$ C	-55 ~ 125 $^{\circ}$ C
Tecnologia	Simple	Simple	Complexa	Simple

Com base nos dados apresentados e nos testes realizados, a principal limitação do sistema a implementar, independente da tecnologia do sensor escolhido, é o nível de corrente DC presente nos cabos, uma vez que esse nível poderá ser da ordem de miliampères até dezenas de ampères, dificultando o modelamento do sensor. Diante deste problema optou-se por uma solução utilizando chaveamento do DC.

D. Desenvolvimento do equipamento detector de fuga à terra

D.1 Desenvolvimento do modelo

Técnica de detecção de fuga à terra no sistema de corrente contínua com chaveamento no DC

O princípio de funcionamento consiste em gerar uma corrente de teste limitada a um valor que não represente risco de atuação indevida de relés de proteção ou interferência em qualquer equipamento eletrônico, com um tempo periódico definido.

Uma vez que a corrente de teste é aplicada com referência à terra, ela flui do gerador de sinais através dos condutores e à terra por onde existe falha no isolamento. Através do Transformador de medida, pode ser detectada a circulação de uma corrente alternada no condutor.

Percorrendo-se o condutor que conduz a corrente de teste com o Transformador de medida, pode-se localizar o local onde está ocorrendo a fuga à terra.

A corrente de teste deve ser limitada a:

- 1 mA a 2,5 mA e em caso extremo a 10 mA, para circuitos de comando.

- 10 mA a 25 mA e em caso extremo a 50 mA, para circuitos de potência.

D.2 Circuito Eletrônico do Protótipo

O protótipo foi desenvolvido com o intuito de ser um equipamento prático e funcional, mantendo as características funcionais especificadas no projeto.

Dessa forma, o protótipo foi dividido em três partes: Gerador de Sinais, Analisador de Sinais e Alicete Amperímetro.

A – Gerador de sinais

O gerador de sinais foi desenvolvido com o objetivo de atender as seguintes características:

Tensão de entrada: 110/220 VAC @ 50/60 Hz

Tensão de saída: 10 Vp @ 40 Hz

Corrente de saída: de 1 mA a 20 mA selecionável

Dessa forma, o circuito foi dividido em 6 estágios, conforme ilustra o diagrama de blocos da Fig. 22.

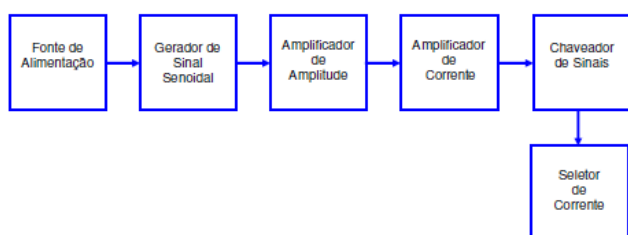


Figura 22 - Diagrama de blocos do gerador de sinais

Fonte de Alimentação

A Fonte de Alimentação consiste em dois estágios: o 1º estágio converte o nível de tensão AC (110 V ou 220 V AC) da entrada de alimentação em +15 V e -15 V DC. Esses níveis de tensão DC são utilizados para alimentar o circuito gerador de sinal, amplificador de amplitude e amplificador de corrente.

O 2º estágio converte o nível de tensão AC (110 V ou 220 V AC) da entrada de alimentação em +5 VDC, onde será utilizado para alimentar o circuito do microcontrolador, relés e seus respectivos “drivers”.

Gerador de Sinal Senoidal

O Gerador de Sinal Senoidal consiste em um circuito integrado oscilador modelo XR-2206 da Exar Corporation, configurável em amplitude, frequência e forma de onda (triangular, quadrada e senoidal). O circuito foi ajustado para um sinal senoidal com 5 Vp (Volts de pico) de amplitude, 40 Hz de frequência e com a mínima distorção harmônica possível.

Amplificador de Amplitude

O Amplificador de Amplitude consiste em um circuito Amplificador operacional modelo TL064, da ST Microelectronics, na configuração não-inversor, com a finalidade de amplificar o sinal proveniente do circuito Gerador de Sinal Senoidal em um nível de amplitude de 10 Vp. Além disso, como o sinal gerado pelo circuito integrado XR-2206 possui um off-set de 6 V, foi utilizado um capacitor para retirar o nível DC, ficando apenas o sinal AC.

Amplificador de Corrente

O Amplificador de Corrente consiste em um circuito com transistores BC337 e BC327 com a finalidade de fornecer um ganho de corrente para o sinal amplificado. Esse sinal passa por um diodo retificador com a finalidade de realizar o acoplamento ao Sistema Retificador 125 VDC. Dessa forma, o sinal na saída do amplificador de corrente será de meia-onda com 10 Vp.

Chaveador de Sinais e Seletor de Corrente

O Chaveador de Sinais consiste em um circuito lógico-processado utilizando um microcontrolador da família PIC modelo 16F84A da Microchip Technology Inc. Esse dispositivo realiza o chaveamento entre o pólo positivo e o pólo negativo, ou seja, alterna os ciclos em que o sinal positivo e negativo permanece em cada conector de saída (“+” e “-”). Para realizar o chaveamento dos sinais, foram utilizados dois relés. Como o nível de corrente de saída dos pinos de entrada/saída do microcontrolador somente é capaz de drenar correntes da ordem de unidades de miliampère, foi necessário adicionar um circuito de potência, composto de um circuito integrado ULN2003 para fornecer a corrente necessária às bobinas dos relés.

O Seletor de Corrente consiste em uma chave com 6 estágios, sendo que 5 deles possui uma resistência determinada a fim de limitar a corrente máxima que será injetada no Sistema Retificador 125 VDC. O 6º estágio é um circuito em “aberto” com o objetivo de desligar a injeção de sinal.

B – Analisador de Sinais

O Analisador de Sinais foi desenvolvido com o objetivo de atender as seguintes características:

Tensão de entrada: 5 VDC @ 500 mA

Faixa de medição: de 100 uA a 100 mA

Mostrador Digital

Bateria interna

Dessa forma, o circuito foi dividido em 6 estágios, conforme ilustra o diagrama de blocos da Figura 14.

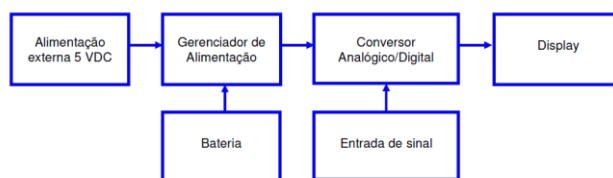


Figura 23 – Diagrama de blocos dos estágios do circuito

Alimentação externa 5 VDC

A Alimentação externa 5 VDC consiste em uma fonte chaveada com entrada 110/220 VAC 50/60 Hz e saída 5 VDC @ 500 mA para fornecer energia ao gerenciador de alimentação.

Gerenciador de Alimentação

O Gerenciador de Alimentação consiste em um circuito integrado BQ24070 da Texas Instruments, com a finalidade de alimentar os circuitos adjacentes ao mesmo tempo em que realiza a carga da bateria.

A entrada do gerenciador é protegida por filtros, para eliminar de ruídos de alta frequência.

O gerenciador de alimentação tem saída com amplitude de 4.4 VDC. Como o circuito do conversor analógico/digital é alimentado com 3.3 VDC foi necessário adicionar um circuito regulador de tensão modelo LP3856ET-ADJ da National Semiconductor. O modelo do regulador de tensão foi escolhido de acordo com sua característica de necessitar de apenas 100 mV de diferença de potencial para manter a saída fixa em 3.3 V, ou seja, uma tensão de 3.4 V na entrada do regulador já seria suficiente para funcionar. Isso é interessante no caso do circuito estar sendo alimentado por bateria, onde a tensão poderá chegar por volta de 3.2 V quando a mesma estiver descarregada, aumentando a eficiência do circuito.

Bateria

A Bateria utilizada é de Íons de Lítio de 3.7 V @ 2200 mA/h, devido ao seu baixo custo, durabilidade, e principalmente suportar grandes ciclos de carga e descarga, sem afetar sua vida útil.

Conversor Analógico/Digital

O Conversor Analógico/Digital consiste em um microcontrolador modelo ADE7169 da Analog Devices, sendo escolhido por ser em apenas um invólucro um circuito dedicado à medição de corrente, conversor A/D de 24 bits além de controle de display alfanumérico.

D.3 Montagem Mecânica do Protótipo

As Figuras 24 e 26 ilustram o acondicionamento mecânico dos componentes eletrônicos.

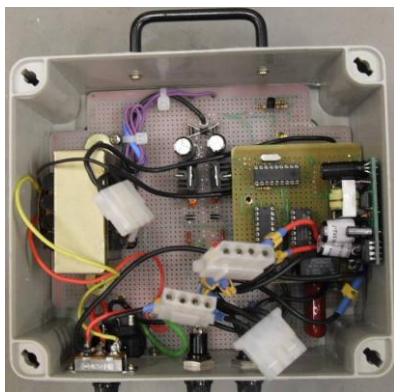


Figura 24 – Acondicionamento mecânico do circuito Gerador de Sinais



Figura 25 – Vista frontal do Gerador de Sinais



Figura 26 – Analisador de Sinais



Figura 27 – Analisador de Sinais vista frontal



Figura 28 – Alicate Amperímetro SR -759

O Alicate Amperímetro utilizado foi o modelo SR759 da AEMC Instruments, com as seguintes características principais:

Faixa de medição: 1 mA à 1200 A (selecionável)

Frequência de medição: 30 Hz à 30 kHz

Tamanho máximo do condutor: 52 mm
Tensão máxima do circuito: 600 Vrms
Terminação de saída: conectores “banana”

E. Testes funcionais

O Gerador de Sinais foi dimensionado para aplicar um sinal de saída da ordem de 10 Vp @ 40 Hz, alternando entre os pólos positivo e negativo em relação ao Terra. O intervalo é de 5 segundos, ou seja, o sinal é injetado no pólo positivo em relação ao Terra durante 5 segundos, depois permanece 5 segundos sem injetar sinal, em seguida o sinal é injetado no pólo negativo em relação ao Terra durante 5 segundos e finalmente volta a permanecer durante 5 segundos sem injetar sinal, fechando um ciclo completo de 30 segundos. A Figura 29 ilustra o intervalo em que o sinal é injetado nos pólos positivo e negativo em relação ao Terra.

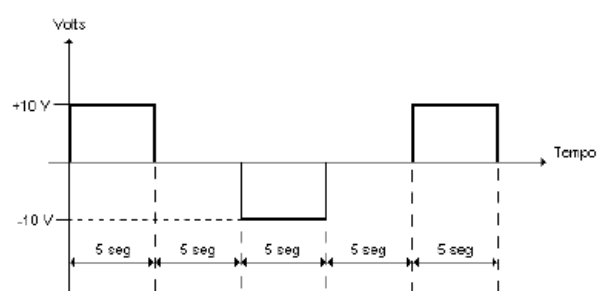


Figura 29 – Forma de onda do sinal injetado nos pólos positivo e negativo em relação à terra

Dessa forma, é possível realizar uma única montagem ao circuito em que se deseja detectar a fuga, facilitando as conexões e aumentando a segurança de operação.

Os testes funcionais foram realizados com a finalidade de testar todas as faixas de corrente disponíveis. Para isso, foi simulado um “curto franco” em cada um dos pólos em relação ao Terra (um pólo de cada vez) para que fosse possível injetar a corrente máxima de acordo com a escala selecionada.

No decorrer dos testes foi observado que para uma melhor exatidão na leitura do sinal, o condutor a ser monitorado deverá estar o mais próximo possível de uma das laterais do alicate amperímetro. Isso provavelmente se deve ao fato de o sinal injetado ser meia onda.

Dessa forma, uma faixa amarela na lateral do alicate foi adicionada para facilitar o posicionamento do condutor a ser monitorado, conforme ilustra a Figura 30.



Figura 30 – Detalhe da faixa amarela indicando o melhor posicionamento do condutor

Os equipamentos foram desenvolvidos para que fosse possível realizar a instalação no sistema de alimentação de corrente contínua 125 VDC de uma UHE sem a necessidade de dispositivos adicionais. A Figura 31 ilustra um diagrama típico de conexão com o sistema de alimentação em corrente contínua 125 VDC de uma UHE.

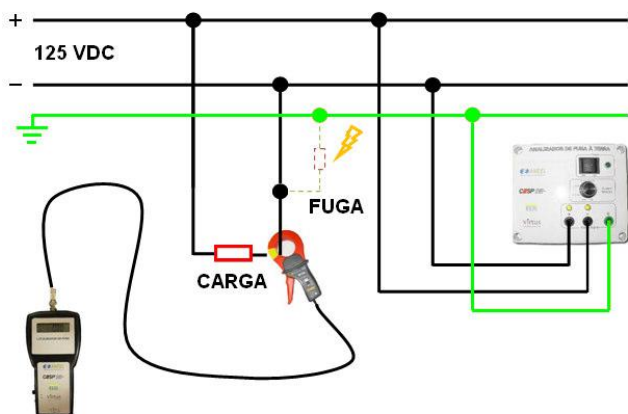


Figura 31 – Diagrama de conexão com sistema típico de alimentação CC de uma UHE

III. CONCLUSÕES

Os resultados dos testes funcionais foram satisfatórios de acordo com as características funcionais previstas no projeto, sendo possível detectar fugas à Terra em sistemas de corrente contínua com o equipamento desenvolvido.

Os testes comprovaram a funcionalidade do equipamento e foi aprovado para aplicação como equipamento detector de Fugas à Terra em circuitos de corrente contínua 125 V de UHEs, atendendo os requisitos técnicos do projeto P&D.

IV. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem as contribuições da equipe de Operação e Comando e Controle, das usinas de Ilha Solteira e Paraibuna, que contribuíram nos levantamentos e ensaios de campo. Agradece também ao Eng. Thiago Vicente de Oliveira da ECIL, que sem a sua dedicação e empenho, não teria sido possível o desenvolvimento deste projeto.

V. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Camboa, Luis R.A. Ensaios Elétricos em Equipamentos de Subestações e Usinas. Curso de Treinamento. Lactec - Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento. Curitiba, Setembro 2003.
- [2] FLUKE CORPORATION. Manual da Pinça de Baixa Corrente de Fuga LK60. Fluke 2004.
- [3] LACTEC | Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento. Sensor Ativo para a Medida de Corrente de Fuga. Curitiba. Lactec 2003.
- [4] OMNIA. Manual do Modelo 8106 - Corrente de Fuga. OMNIA 2004.
- [5] TEX INSTRUMENTOS. Testadores de Corrente de Fuga. Tex 2005.
- [6] C. R. Pacheco, Uma Contribuição a Análise de Desempenho de cabos Isolados no Contexto da Qualidade da Energia Elétrica, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Maio 2002.

[7] S Yamaguchi, S. Soda, N Takada, Development of a New Type Insulation Diagnostic for Hot-Line XLPE Cables, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 4, Iss..3, July 1989.

[8] Z. Wei, Z. Yutao, Y. Baitun, 'Study on DC Component Method for Hot-Line XLPE Cable Diagnosis, IEEE International Symp. Electr. Ins, Pittsburgh, June, 1994.

[9] K. Soma, M Aihora, Y. Kataoka, Diagnostic Method for Power Cable Insulation. IEEE Trans. on Electrical Insulation, Vol. EI-21, Iss..2, December, 1986.

[10] Y. Yagi, H Tanaka, Study on Diagnostic Method for Water Treed XLPE Cables by Loss Current Measurement", Symp. Electr]. Ins. June 1990.

[11] T. Nakayama, On-Line Cable Monitor Developed in Japan, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 6, Iss..4, October 1991.

[12] Manual de Operação, RDI BENDER

[13] ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 5410, Instalações elétricas de baixa tensão, Novembro 1997.