

Avaliação de Desempenho e Possíveis Ajustes do Sistema de Proteção para Sistema Desequilibrado com Neutro Multi-Atterrado

A. U. Antunes, C. C. B de Oliveira, J. C. Guaraldo Daimon Engenharia e Sistemas
 A. P. Cunha, D. P. Duarte, H. P. Schmidt ENERQ/USP
 D. Pioli, R. Queiroga, H. G. B. de Souza AES ELETROPAULO

Resumo – Este artigo propõe uma sistematização de procedimentos visando aprimorar os ajustes do sistema de proteção de redes de distribuição primárias da AES ELETROPAULO, a luz de uma série de análises, ensaios em laboratório, avaliações de medições práticas e implementação computacional, relativo a três vertentes básicas que influenciam a atuação do sistema de proteção, a saber: análise das correntes de inrush; avaliação da impedância de falta em eventos de curto circuito que envolvam contato entre condutor e solo; análise dos desequilíbrios de corrente que podem sensibilizar o relé de neutro. São apresentados resultados e análises dos tópicos de abordagem citados e propostas algumas diretrizes que conduzam a uma melhoria efetiva da operação do sistema de proteção.

Palavras chave: proteção de redes de distribuição, ajustes da proteção, correntes de inrush, impedância de defeito.

I. INTRODUÇÃO

O presente artigo técnico tem por finalidade apresentar um conjunto de análises e procedimentos que sistematizem e propiciem um aprimoramento dos ajustes do sistema de proteção do sistema de distribuição de média tensão da AES ELETROPAULO no tocante a três tópicos básicos, a saber:

- Análise das correntes de inrush;
- Análise dos desequilíbrios de corrente oriundos do padrão de rede e distribuição da carga presente no sistema de distribuição da Empresa;
- Análise de eventos de curto circuito que envolvam contato entre condutor e solo, no qual, a principal dificuldade vincula-se a estimativa da impedância de defeito (principalmente, em faltas de alta impedância).

Para tanto, além das análises efetuadas nos estudos relativos aos 3 aspectos anteriores, também buscou-se complementar os modelos específicos com os seguintes tópicos:

- Desenvolvimento de modelo apropriado de cálculo elétrico visando subsidiar as análises de fluxo de potência e curto circuito para a característica do sistema de distribuição da AES ELETROPAULO, que

apresenta neutro multi-atterrado em diversos pontos do sistema, notadamente, nos postes onde há equipamentos instalados ou a uma distância de referência entre postes da ordem de algumas centenas de metros. Assim, viabiliza-se a separação da corrente de neutro e de terra, com um grande benefício em relação aos modelos de cálculo usuais, uma vez que boa parte deles ou trata os eventos de curto fase terra e fase neutro indistintamente, ou descartam o multi-atterramento;

- A partir da utilização de modelos adequados de cálculo elétrico, e de sistemáticas mais apuradas para avaliação das correntes de circulação do neutro e de terra, indicar a proposição de ajustes mais apropriados para os relés de sobrecorrente.

Estes tópicos de análise são abordados nos itens seguintes.

II. ANÁLISE DE CORRENTES DE INRUSH

A. Introdução

As correntes de inrush são devidas ao transitório eletromagnético de energização de cada transformador. Isto é, quando de sua energização o núcleo, de material ferromagnético, apresenta magnetismo residual decorrente da energização precedente e no instante de fechamento (aleatório) a tensão imposta exigirá variação de fluxo, o que pode resultar excursão do fluxo muito grande. A duração dessa corrente é da ordem de algumas centenas de ms e, dado o caráter transitório, não deve ocasionar a atuação do sistema de proteção [1].

Basicamente, o cálculo da corrente de inrush é dependente dos seguintes fatores:

- Magnitude e polaridade do fluxo residual;
- Instante de religamento;
- Potência de curto circuito no ponto de inserção dos transformadores.

Este cálculo é sobretudo complexo e exige, ainda, o conhecimento do ciclo de histerese do material magnético do núcleo do transformador. Desse modo, é usual estimar-se a corrente de inrush através de método empírico, em que se utiliza fator multiplicativo, a ser aplicado à corrente nominal dos transformadores, que é função da quantidade a ser reenergizada [1].

Dado o caráter de aleatoriedade da corrente de inrush, este método empírico mostra-se pouco eficaz e excessivamente conservativo (uma vez que tende a reproduzir a pior condição de chaveamento do conjunto de transformadores atendidos), impondo a necessidade de maior sofisticação na detecção e respectivo tratamento.

Na literatura técnica observam-se fatores multiplicativos para o máximo valor da corrente de inrush variando de 6 a 25 [1].

Os estudos mais recentes têm apontado para uma diretriz distinta no que concerne ao tratamento das correntes de inrush consistindo não em sua determinação, mas na identificação de suas características, embutidas em aspectos como frequência, espectro de amostragem, perfil de sua transitoriedade, entre outros, o que permite particularizar a corrente de inrush de outras grandezas transitórias que decorrem das ações de religamento e chaveamento dos alimentadores [2], [3] e [4].

B. Metodologia

Optou-se por fazer uma análise do modo tradicional de estimativa da corrente de inrush praticado nas Empresas, que consiste na utilização de fatores multiplicativos aplicados à corrente nominal do conjunto de transformadores atendidos pelo circuito, porém, utilizando-se um grande volume de informações oriundas de dados de medição de modo a viabilizar a apuração de valores mais realistas, bem como propiciar um posterior tratamento estatístico da corrente de inrush.

No presente estudo, a corrente de inrush foi avaliada segundo dois enfoques específicos:

- Análise em religamentos bem sucedidos do sistema de proteção, ou seja, onde houve eliminação de faltas de caráter temporário. Esta situação caracteriza a ocorrência de corrente de inrush em carga quente, analisando-se, desta forma, a intensidade e duração da corrente elétrica em cada religamento detectado;
- Análise em religamentos efetuados após operações de manutenção preventiva (desligamento do sistema por intervalo de tempo de algumas horas) ou após um desligamento vinculado a uma falta permanente, em que se verificou o desligamento de todo o alimentador. Esta situação caracteriza a ocorrência de corrente de inrush em carga fria.

A avaliação dos fatores multiplicativos consistiu na análise da corrente de inrush obtida por meio de cálculo elétrico e na análise da corrente de inrush verificada nas medições. O medidor utilizado é o Power Measurement 3720 atualmente instalado em 28 subestações da AES

ELETROPAULO. O registro da medição é efetuado na saída do alimentador na subestação. Este medidor disponibiliza dados instantâneos de corrente e tensão nas fases e no neutro dos alimentadores num passo de amostragem adequado, bem como registros de oscilografia.

O procedimento adotado consistiu nos seguintes passos:

- Escolha dos circuitos com registro de medição que obedeceu a um critério de levantamento de ocorrências;
- Cálculo das correntes de inrush (utilizando-se os valores tradicionais de fatores multiplicativos);
- A partir dos resultados obtidos de corrente elétrica, foram determinadas as respectivas correntes nominais do conjunto de transformadores atendidos;
- Considerando-se o conjunto dos valores instantâneos de corrente fornecidos pelo medidor (passo de amostragem de 1,042 ms) efetuou-se o cálculo da corrente de inrush integralizando-se os pares de valores corrente e tempo a partir do Método dos Trapézios [1];
- A partir da corrente nominal obtida e da corrente de inrush verificada no medidor, determinaram-se os fatores multiplicativos ajustados que conduzem o cálculo da corrente de inrush aos valores efetivamente medidos;
- Ao conjunto de fatores multiplicativos determinados, acrescentou-se um tratamento estatístico, admitindo-se que o comportamento obedece a uma distribuição normal. Com a média e desvio padrão da amostra e admitindo-se um intervalo de confiança apropriado, determinaram-se valores ajustados dos fatores multiplicativos, globais e individualizados em faixas das potências nominais do conjunto de transformadores atendidos pelo circuito.

C. Análise de Eventos

A figura 1 ilustra os fatores multiplicativos (k) referentes a 1 ciclo (16,67 ms) obtidos para 241 eventos vinculados a religamentos em carga quente, além do valor médio obtido.

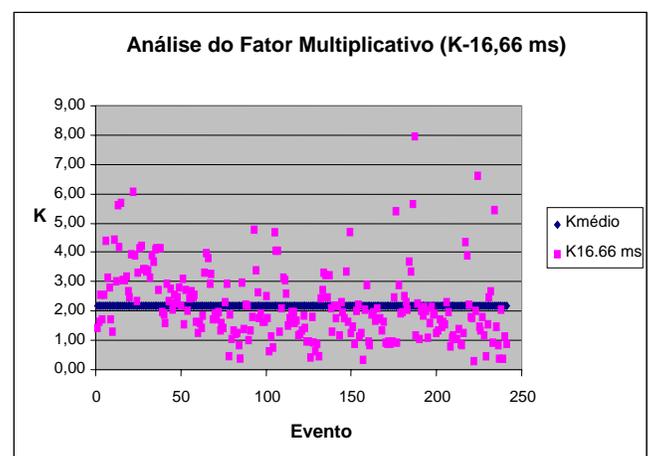


Figura 1 – Estimativa do fator multiplicativo k (religamentos em carga quente) referente ao instante de 1 ciclo (16,67 ms)

Sendo:

μ : Média da amostra
 $e\theta$: Intervalo de confiança
 $Z\alpha/2$: Probabilidade da confiança
 σ : Desvio padrão da amostra
 n : Número de amostra

Tem-se, para os 241 eventos vinculados a religamentos em carga quente:

μ : 2,19 (média aritmética do fator $K_{16,66\text{ ms}}$)
 σ : 1,23 (desvio padrão do fator $K_{16,66\text{ ms}}$)
 n : 241 (número de eventos analisados)

Para obtenção dos valores de referência para o fator multiplicativo k conforme as propriedades da Distribuição Normal, a análise será efetuada por meio de *Níveis de Confiança para Valores Críticos Inteiros* [7], no qual se tem as seguintes condições quanto aos valores de contorno determinados pelas faixas:

$\mu \pm 1\sigma \rightarrow 68,27\%$ de confiança
 $\mu \pm 2\sigma \rightarrow 95,45\%$ de confiança
 $\mu \pm 3\sigma \rightarrow 99,73\%$ de confiança

Adotando-se como referência em termos do ajuste do fator multiplicativo para análises da corrente de inrush a condição de média e duas vezes o valor do desvio padrão da amostra tem-se que:

$$\mu \pm 2\sigma \rightarrow 2,19 \pm 2 \cdot 1,23$$

Tendo em vista o objetivo de que os resultados obtidos sejam posteriormente sugeridos como novos parâmetros para cálculos das correntes de inrush, para fins práticos, será considerado sempre o intervalo superior, ou seja:

$$\mu \pm 2\sigma \rightarrow 2,19 \pm 2,46 = 4,65$$

Portanto, o resultado probabilístico alcançado entre os 241 eventos relativos a religamentos em carga quente foi 4,65.

Analogamente, a figura 2 ilustra os fatores multiplicativos obtidos para 50 eventos vinculados a religamentos em carga fria.

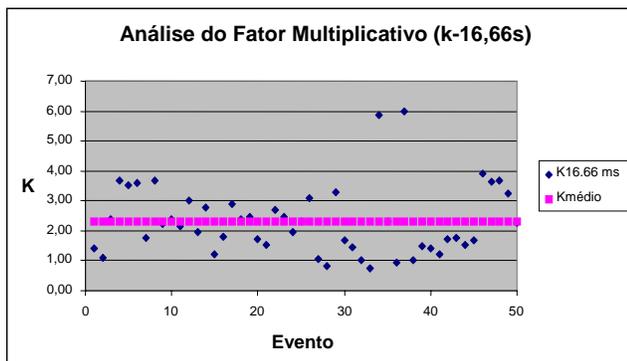


Figura 2 – Estimativa do fator multiplicativo k (religamentos em carga fria) referente ao instante de 1 ciclo (16,67 ms)

Tem-se, para os 50 eventos vinculados a religamentos em carga fria:

μ : 2,32 (média aritmética do fator $K_{16,66\text{ ms}}$)
 σ : 1,15 (desvio padrão do fator $K_{16,66\text{ ms}}$)
 n : 50 (número de eventos analisados)

Adotando-se a condição de média e duas vezes o valor do desvio padrão da amostra tem-se que:

$$\mu \pm 2\sigma \rightarrow 2,32 \pm 2 \cdot 1,15$$

Considerado-se, para fins de ajuste do sistema de proteção, o intervalo superior tem-se:

$$\mu \pm 2\sigma \rightarrow 2,32 \pm 2,30 = 4,62$$

Nestas condições, o resultado probabilístico alcançado entre os 50 eventos foi 4,62.

Entre as principais conclusões obtidas pode-se citar:

- Os fatores multiplicativos tradicionalmente utilizados para determinação das correntes de inrush majoram demasiadamente este parâmetro (em alguns casos da ordem de dezenas);
- Verificou-se que a magnitude da corrente de inrush em carga fria tende a ser maior que a da corrente de inrush em carga quente (conforme observado, o valor médio do fator multiplicativo k foi superior para os religamentos em carga fria, embora com um desvio padrão menor);
- Embora de forma não regular, observa-se que o fator multiplicativo é decrescente com a corrente nominal do conjunto de transformadores atendidos pelo circuito.

III. ANÁLISE DO DESEQUILÍBRIO DA CARGA

As correntes de desequilíbrio constituem-se em aspecto complicador no sistema de distribuição da AES ELETROPAULO por conta de diversos transformadores de distribuição em configuração delta e delta aberto que impõem uma circulação de corrente no condutor neutro que pode atingir valores elevados dificultando o ajuste do relé de neutro. Além disso, o sistema de distribuição da Empresa apresenta, predominantemente, o neutro multi-aterrado.

Desta forma, concebeu-se um modelo mais completo de cálculo elétrico, tanto de fluxo de potência quanto de curto circuito que permite tratar adequadamente, o sistema de distribuição da AES ELETROPAULO, separando-se as correntes de neutro e de terra (parcela de corrente que flui pelos diversos pontos de aterramento do sistema). Este modelo é abordado no item IV.

Todavia, nas análises de desequilíbrio é comum observarem-se correntes de neutro medidas

significativamente distintas das calculadas. Esse aspecto pode ser explicado pela dificuldade em se associar os diversos consumidores atendidos pelos transformadores nas fases correspondentes e na aleatoriedade de seu consumo (algumas vezes não captadas nas curvas de cargas típicas as quais os modelos de cálculo elétrico se apóiam), ou mesmo em decorrência de perdas comerciais (ligações clandestinas) e/ou manobras não cadastradas (ou seja, problemas de ordem cadastral).

Especificamente, em relação a avaliação da corrente de circulação no neutro, utilizaram-se medições registradas no medidor Power 3720. Para cada evento, determinaram-se os graus de desequilíbrio de seqüência zero pela relação entre os módulos das correntes de seqüência zero e direta a partir da seguinte fórmula [1].

$$d_0 = \left| \frac{\dot{I}_0}{\dot{I}_1} \right| = \left| \frac{\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C}{\dot{I}_A + \alpha \dot{I}_B + \alpha^2 \dot{I}_C} \right| \quad (1)$$

Onde:

- do – Grau de desequilíbrio do sistema
- I_A, I_B, I_C – Correntes de fase
- I_0 – Corrente de seqüência zero
- I_1 – Corrente de seqüência direta
- α – Operador alpha ($\alpha = 1 \angle 120^\circ$)

Com isso, determinaram-se graus de desequilíbrio típicos para os alimentadores. A concepção básica no que tange ao ajuste do relé de neutro consiste em se utilizar o maior valor de corrente obtido ou pela aplicação convencional de cálculo ou pela aplicação do grau de desequilíbrio às correntes de fase.

IV. MODELO DE CÁLCULO ELÉTRICO PARA TRATAMENTO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO COM NEUTRO MULTI-ATERRADO

Concebeu-se um modelo de cálculo elétrico que permite tratar sistemas de distribuição multi-aterrados, ou seja, alimentadores com 3 fases e um neutro além de diversos pontos de aterramento, basicamente, em postes que contenham equipamentos (transformadores, pára-raios, capacitores, entre outros). Desta forma, a corrente de distribuição é função da resistência de aterramento e da impedância do cabo de neutro.

A figura 3 ilustra uma rede de distribuição nestas condições (e_{AN} , e_{BN} , e_{CN} representam as tensões de fase de alimentação do circuito; as setas indicam o sentido da corrente de retorno pelo neutro e pela terra).

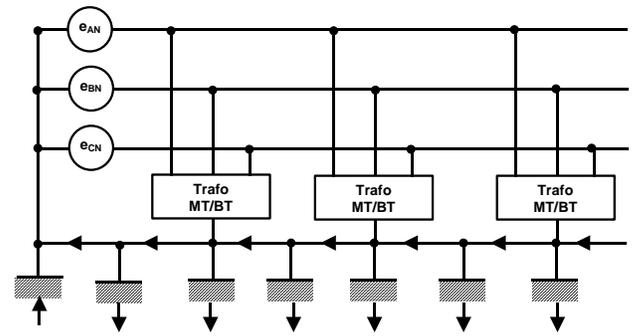


Fig. 3 – Rede de distribuição com neutro multi-aterrado

Por este modelo, tanto em simulações de fluxo de potência quanto de curto circuito, é possível se obter, com boa precisão, a corrente efetiva de neutro, parte da qual composta por correntes de retorno pela terra nos diversos pontos de aterramento.

O modelo pode ser resumido nos seguintes passos:

- Utilização do Método de Gauss e da matriz de admitância nodais (relaciona o vetor de correntes injetadas na rede e o vetor de tensões nodais);
- Representação de geradores (tensões conhecidas), das cargas (geradores de corrente vinculados à tensão na carga de tipo potência, corrente e/ou impedância constante, podendo ser monofásicas, bifásicas e ou trifásicas);
- Representação dos trechos de redes (a 4 fios; modelo pi, ou seja, metade da capacitância total em cada barra terminal);
- Representação de transformadores trifásicos (tap 1: relação de transformação; nas ligações de tipo YY, YD e DY);
- Aterramento do fio neutro nas barras (adiciona-se a impedância de aterramento correspondente);
- Com as representações anteriores obtém-se a matriz de admitâncias nodais completa;
- Resolução do sistema de equações (processo iterativo).

Este modelo de cálculo elétrico de fluxo de potência e curto circuito foi implementado computacionalmente num programa específico para análise do ajuste da proteção de sistemas de distribuição de média tensão, denominado Interprote – Planejamento Integrado de Redes de Distribuição para Estudos de Proteção.

V. ANÁLISE DE FALTAS QUE ENVOLVEM CONTATO DE CONDUTOR E SOLO: AVALIAÇÃO DA IMPEDÂNCIA DE DEFEITO POR MEIO DE CÁLCULO ELÉTRICO

A. Introdução

Este tópico de análise consistiu na avaliação das faltas do sistema de distribuição que envolvam contato do condutor e do solo (curtos circuitos fase terra e dupla fase terra).

Nestas condições o parâmetro mais difícil de análise consiste na estimativa da impedância de falta correspondente. Usualmente, utilizam-se alguns valores de referência que carecem de um respaldo mais apurado. Estes valores situam-se entre 20 e 40 ohms [1].

Porém, há evidências empíricas de que este parâmetro pode atingir valores bem mais elevados, o que caracteriza as faltas de alta impedância, onde as correntes de defeito podem ser, inclusive, inferior à condição de operação normal. Os ajustes do sistema segundo o enfoque tradicional podem levar à completa inexistência de proteção nestes casos.

B. Metodologia

Basicamente, consiste em se determinar, a partir dos valores registrados de corrente em ocorrências de eventos de curtos circuitos que envolvam contato entre condutor e solo, qual o valor correspondente de impedância de falta que conduz à igualdade de resultados entre os valores calculados e medidos.

Esta concepção foi utilizada na análise de alguns eventos de curto circuito registrados na rede de distribuição da AES ELETROPAULO, a partir do seguinte procedimento.

- Utilizando-se o sistema *Gerenciador de Ocorrências da Distribuição* (GOD) da AES Eletropaulo selecionaram-se algumas ocorrências em que se registraram cabos primários partidos e que tiveram contato com o solo. Nesta etapa levantaram-se algumas informações como, por exemplo: Nome do alimentador; data e hora da ocorrência; tipo de solo; número da ocorrência; equipamento ou instalação mais próxima do evento;
- Análise das respectivas oscilografias de tensão e correntes de cada uma das ocorrências levantadas;
- Calcularam-se os níveis de curto-circuito em cada uma das barras das subestações que atendem os alimentadores nos quais se verificaram as ocorrências;
- Utilizando-se aplicativos computacionais adequados que permitem o cálculo elétrico de curto circuito determinaram-se as correntes de defeito nos pontos de ocorrência avaliados;
- Compararam-se os níveis de curto-circuito determinados pelos modelos de cálculo elétrico (automatizados pelos aplicativos computacionais citados), com os valores de corrente de curto-circuito correspondentes medidos nas oscilografias do medidor Power 3720. Admitiu-se a corrente de curto-circuito com o menor valor ao longo da oscilografia de um determinado evento, para assim obter-se o valor máximo da impedância de defeito registrada durante a falta;
- Em cada ocorrência ajustou-se o valor da impedância de defeito até se observar a convergência dos valores de curto-circuito calculado e medido.

C. Aplicação

Utilizando-se a metodologia descrita anteriormente foram analisados 15 (quinze) eventos de curto circuito.

A tabela I ilustra os dados medidos de corrente elétrica referentes a cada uma das 15 ocorrências de evento de curto circuito (a partir do medidor Power 3720) e o valor correspondente de impedância de defeito obtido.

Em relação à tabela I, o valor médio obtido para a impedância de defeito é de aproximadamente 44 Ω .

Embora se constitua num método de aplicação prática bastante viável, seu alcance tem algumas limitações, principalmente, pela impossibilidade de se detectar faltas de alta impedância (não sensibilizam os patamares de disparo do medidor). Em vista disso, os resultados obtidos de resistência de contato foram convencionais (em torno de algumas dezenas de ohms).

TABELA I
ANÁLISE DAS IMPEDÂNCIAS DE DEFEITO A PARTIR DE
CÁLCULO ELÉTRICO

Circuito	Data	Tipo Solo	Zdef (Ω)
CRA-115	19/9/2004	Asfalto	28,0
BEM-108	10/11/2004	Asfalto	30,0
BEM-113	17/1/2005	Asfalto	15,0
MAD-113	27/1/2005	Asfalto	9,7
PRE-106	6/11/2004	Asfalto	39,0
PRE-107	27/10/2004	Terra	10,0
SAC-104	5/1/2005	Asfalto	34,0
TSE-107	17/1/2005	Asfalto	280,0
TSE-108	2/10/2004	Asfalto	0,5
TSE-113	4/10/2004	Asfalto	17,0
DIA-106	3/10/2004	Asfalto	85,0
MOC-107	11/11/2004	Asfalto	27,0
PRE-107	11/11/2004	Desconhecido	11,0
PRE-102	21/11/2004	Terra	7,0
PRE-102	11/1/2005	Terra	65,0

VI ANÁLISE DE FALTAS QUE ENVOLVEM CONTATO DE CONDUTOR E SOLO: ENSAIO EM LABORATÓRIO

A. Metodologia

O arranjo de ensaio mostrado esquematicamente na figura 4 foi baseado na pesquisa bibliográfica realizada [5].

Todavia, para se atingir a condição definitiva de medição foram realizados diversos ensaios preliminares. Após a avaliação dos primeiros resultados foram sugeridas diversas alterações no circuito de ensaio, com a finalidade de obter um arranjo que simulasse o mais adequadamente possível, dentro das limitações de potência e espaço de um Laboratório de Alta Tensão, as condições de campo.

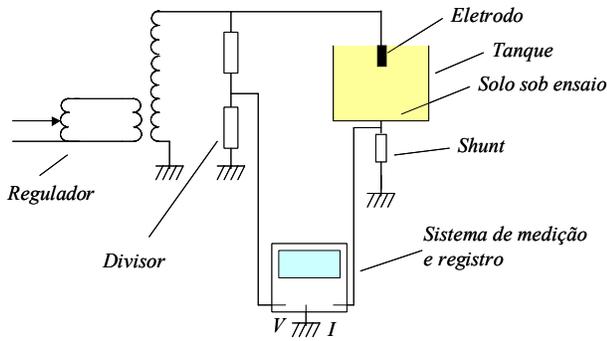


Figura 4. Arranjo de ensaio

Após a avaliação dos primeiros resultados foram sugeridas algumas alterações no circuito de ensaio. As melhorias no arranjo incluíram o aumento das dimensões do tanque para 1 m³, a redução da impedância do transformador (15 kVA, 240 V/7810 V, z = 2,75 % @ 75°C) e a introdução de sistema de armazenamento das formas de onda para permitir análise, que permitiram uma maior uniformidade do campo de correntes dentro do tanque e uma diminuição da impedância série.

B. Calibrações

Inicialmente procedeu-se a determinação das curvas de calibração, de forma converter as medições nos valores reais das grandezas. O levantamento dos pontos para a calibração da tensão medida está apresentado na tabela II.

TABELA II
CURVA DE CALIBRAÇÃO DE TENSÃO

Tensão (kV)	
Real (kV)	Medida (V)
2,031	0,72
4,011	1,44
6,011	2,15
7,86	2,79

A regressão linear dos pares de ponto das tabela II apresenta um coeficiente de correlação igual a 1,0 e fornece a curva de calibração:

$$V_{real} (kV) = 2,815 V_{medida} (V) - 0,019 \quad (2)$$

Para a calibração das correntes foi realizada uma medição da resistência do *shunt* a partir do qual foram coletados os sinais de tensão.

C. Medições com Areia na Condição Original

O primeiro conjunto de resultados foi obtido com o tanque cheio de areia em sua condição original. Embora não

tenha sido determinado seu conteúdo de umidade, pode-se afirmar que a areia estava numa condição intermediária, não totalmente seca nem úmida.

As medições com haste enterrada foram realizadas com o objetivo de caracterizar a resistividade do solo dentro do tanque. Para o cálculo da resistividade foi utilizada a equação (3).

$$\rho = \frac{2 \pi LV}{I \left[\ln \left(\frac{8L}{d} \right) - 1 \right]} \quad (3)$$

Onde:

- ρ : resistividade ($\Omega \cdot m$);
- L: comprimento (mm);
- d: diâmetro da haste (mm);
- V: tensão (kV);
- I: corrente (A).

A tabela III apresenta os resultados das medições realizadas com uma haste de diâmetro 17 mm, com comprimento enterrado de 200 mm na parte central do tanque. Nestas condições a área de contato com a areia é de 0,0109 m².

Na tabela IV encontram-se os resultados das medições realizadas com a haste de diâmetro 17, mas com comprimento enterrado de 600 mm na parte central do tanque. A área de contato com a areia foi estimada como de 0,0323 m².

Para simular uma condição mais realista, foi empregado um eletrodo plano com dimensões de 119 mm X 119 mm, correspondente a uma área de 0,0142 m². Os resultados das medições estão apresentados na tabela V.

Para avaliar o efeito do aumento da área de contato, foi utilizado um eletrodo plano com dimensões de 330 mm x 400 mm (área de 0,132 m²). O posicionamento foi feito na parte central do tanque. A tabela VI mostra os resultados.

No caso de eletrodo plano, a resistividade foi calculada com a equação (4):

$$\rho = \frac{\pi LV}{I \left[\ln \left(\frac{8L}{w} \right) - 1 \right]} \quad (4)$$

Onde (demais parâmetros análogos à expressão 3):
w: largura (mm).

TABELA III
RESISTÊNCIA E RESISTIVIDADE COM HASTE CURTA.

Tensão (kV)	Corrente (A)	Resistência (Ω)	Resistividade ($\Omega \cdot m$)
2,01	0,13	1,54E+04	5,46E+03
4,01	0,29	1,37E+04	4,84E+03
5,87	0,35	1,69E+04	5,98E+03
7,47	0,45	1,68E+04	5,94E+03

TABELA IV
RESISTÊNCIA E RESISTIVIDADE COM HASTE LONGA.

Tensão (kV)	Corrente (A)	Resistência (Ω)	Resistividade ($\Omega.m$)
1,98	0,40	4,92E+03	4,00E+03
3,84	0,80	4,77E+03	3,87E+03
5,78	1,29	4,47E+03	3,63E+03
7,44	1,75	4,25E+03	3,45E+03

TABELA V
RESISTÊNCIA E RESISTIVIDADE COM PLACA DE 119 X 119 MM.

Tensão (kV)	Corrente (A)	Resistência (Ω)	Resistividade ($\Omega.m$)
2,06	0,07	3,17E+04	1,10E+04
4,04	0,13	3,12E+04	1,08E+04
5,92	0,21	2,87E+04	9,93E+03
7,64	0,27	2,80E+04	9,70E+03

TABELA VI
RESISTÊNCIA E RESISTIVIDADE COM PLACA 330 X 400 MM.

Tensão (kV)	Corrente (A)	Resistência (Ω)	Resistividade ($\Omega.m$)
1,98	0,19	1,05E+04	1,20E+04
3,98	0,43	9,31E+03	1,06E+04
5,92	0,64	9,28E+03	1,06E+04
7,61	0,78	9,78E+03	1,11E+04

Uma análise gráfica dos resultados e das formas de onda é apresentada nas figuras 5 a 7 seguintes.

Na figura 5 tem-se o comportamento tensão-corrente. Pode-se verificar uma relação aproximadamente linear com as menores resistências (menores inclinações), para um mesmo tipo de eletrodo, às maiores áreas de contato.

Uma forma de onda típica, registrada no ensaio com haste longa (resultados expostos na tabela IV) está apresentada na figura 6. Nela é possível observar que a corrente apresenta uma distorção em um semiciclo, fato registrado na literatura [6].

Em função do comportamento observado nos ensaios precedentes terem sido realizadas mantendo-se a aplicação de tensão por um período curto (alguns segundos) foi feita uma aplicação sustentada de tensão visando aferir a influência deste parâmetro. Este ensaio foi efetuado numa duração de cerca de 5 min utilizando-se a placa 119 x 119 mm, e a forma de onda correspondente pode ser vista na figura 7. Nestas condições as formas de onda registradas mostram uma gradativa redução do valor da corrente, com a interrupção da corrente para os níveis de tensão instantânea mais baixos (próximos da passagem por zero).

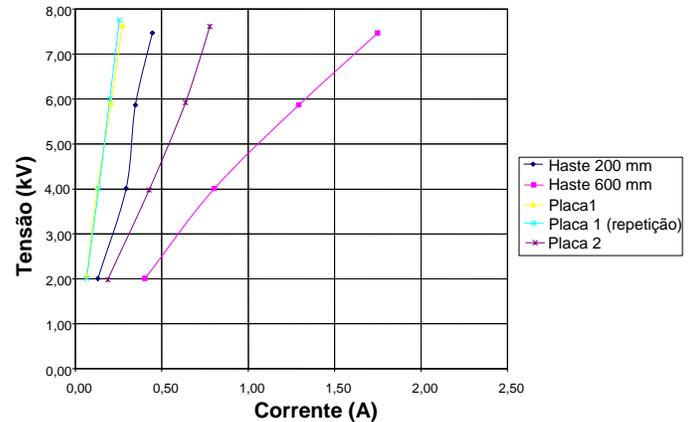


Figura 5. Comportamento tensão-corrente com areia na condição original.

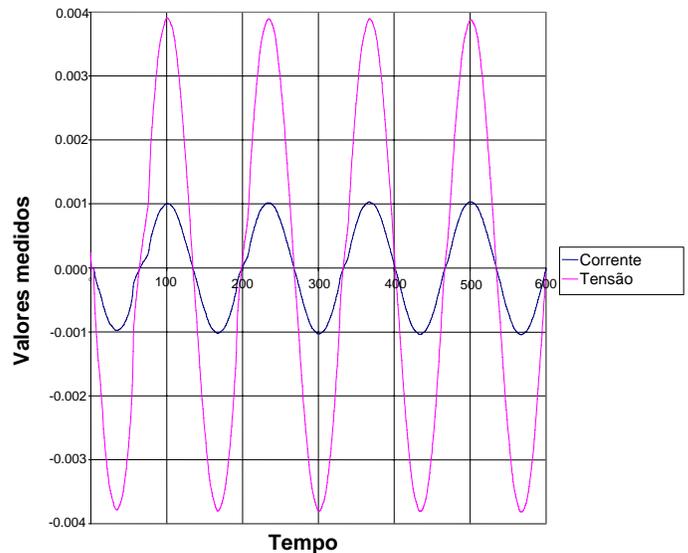


Figura 6. Forma de onda típica, com distorção da corrente.

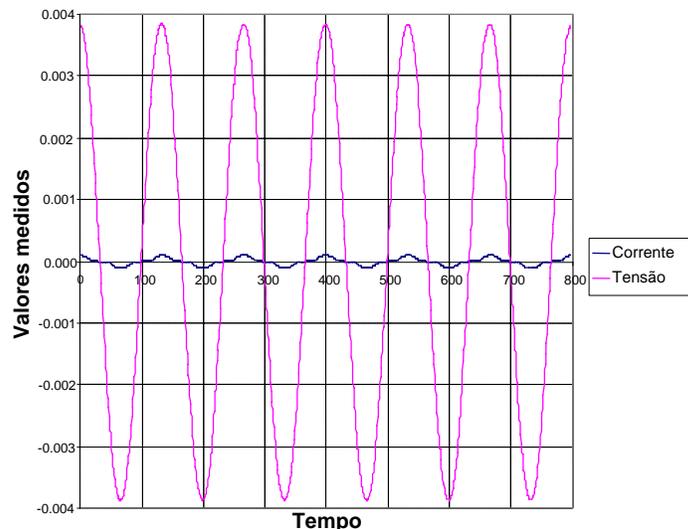


Figura 7. Redução da corrente ao se sustentar a tensão

D. Medições com Areia Molhada

Para avaliar o efeito do conteúdo de umidade do solo nos resultados foram realizadas novas medições nas mesmas condições precedentes após a adição de 80 l de água ao tanque com areia, visando reduzir de forma significativa a sua resistividade elétrica.

Os valores obtidos estão mostrados na figura 8.

Como as figuras 5 e 8 apresentam gráficos plotados na mesma escala, conclui-se, pelas inclinações das respectivas curvas que, com areia molhada, houve redução das impedâncias medidas.

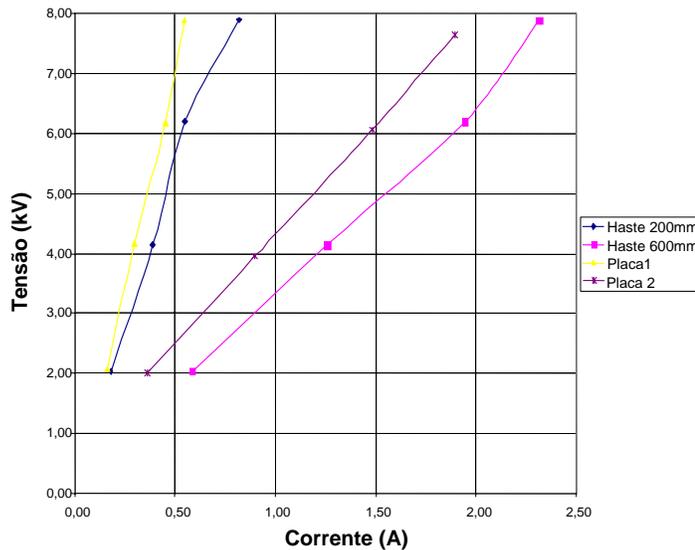


Figura 8. Comportamento tensão-corrente com areia molhada.

E. Discussão e Conclusões das Medições Laboratoriais

Os valores de resistividade da areia calculados a partir das medições efetuadas, em todos os casos, são muito elevados em relação aos valores da literatura (200 a 300 $\Omega \cdot m$, conforme [6]).

Aparentemente, com todos os eletrodos empregados, o que se mede depende da contribuição do solo e do contato, isto é, $R_{medida} = R_{solo} + R_{contato}$.

Com os eletrodos do tipo haste a influência do contato é menor, como indicado pelos valores mais baixos de resistências (mesmo com menor área de contato). Para separar as contribuições do solo e do contato seria necessário conhecer a resistividade por um outro método alternativo ou por variação da resistência elétrica com a área de contato.

O arranjo experimental se mostrou sensível a alterações na área de contato e resistividade do meio, como pode ser visto pelas variações de resultados na condição original e molhada.

Em relação à análise das formas de onda, pode-se afirmar que:

- As tensões e correntes são substancialmente senoidais, o que foi verificado pela relação entre as tensões eficazes e de pico que, com poucas exceções, estavam entre 1,4 e 1,5;
- Pode-se usar o termo “resistência de contato”, uma vez que tensão e corrente estão em fase;
- Obteve-se uma certa assimetria nas formas de onda onde se verificou maior incidência de picos negativos superiores aos positivos, ao contrário do que registra a literatura;
- Observou-se uma distorção nos ciclos iniciais de aplicação da tensão e corrente e uma taxa decrescente de variação.

Em relação ao fato observado do aquecimento da areia quando se mantém o circuito ligado por alguns minutos se deve a formação de arco elétrico, uma vez que a corrente é decrescente.

Os valores de resistência medidos nos instantes iniciais da simulação das faltas, em geral, são muito elevados, não implicando em ocorrência de sobrecorrente. Além disso, com o passar do tempo, a corrente torna-se quase desprezível.

Em função de todos estes aspectos observados, confirma-se a impossibilidade e/ou inconveniência de se buscar algum tipo de ajuste para dispositivos de sobrecorrente, visando a detecção da queda de condutores no solo em ocorrências de curto circuito.

VII. PROPOSIÇÃO DE AJUSTES

A proposição de ajustes consiste nos seguintes aspectos:

- Para tratamento da corrente de inrush: Adoção dos fatores multiplicativos com base na metodologia proposta no item II a partir de valores determinados por um intervalo decorrente do tratamento estatístico especificado (distribuição normal de valores, caracterizada por um valor médio e desvio padrão). Recomenda-se adotar o valor de contorno do intervalo superior (dada pela média e um número pré-definido de desvios padrão) e correspondente associação destes valores às faixas das correntes nominais do conjunto de transformadores atendidos pelo alimentador;
- Para tratamento de curtos circuitos que envolvam contato entre condutor e solo: Aos níveis estudados e descritos no item VI, verificou-se a possibilidade das impedâncias de defeito atingirem valores efetivamente muito elevados. Em decorrência deste aspecto, considerando-se os relés convencionais, observou-se a inconveniência e/ou ineficácia de se tratar as faltas de alta impedância por meio de análises de sobrecorrente.

Desta forma, recomenda-se intensificar o estudo e utilização de relés com funções específicas para análise destes eventos. As tendências mais modernas de estudo deste parâmetro indicam esta avaliação norteada por aspectos mais qualitativos da resistência de falta (características do sinal), o que se traduz na utilização de relés com funções específicas para tanto. Contudo, em se utilizando os relés convencionais o ajuste correspondente pode ser aprimorado pelo melhor conhecimento da impedância de contato entre condutor e solo e pela utilização do modelo de cálculo elétrico exposto no item IV, que permite identificar, tanto em simulações de fluxo de potência quanto de curto circuito, as parcelas da corrente de circulação de neutro e de retorno pela terra;

- Em relação aos desequilíbrios de corrente: Para efeito do ajuste do relé de sobrecorrente de neutro, que não deve operar na ocorrência de desequilíbrios elevados como os verificados no sistema de distribuição da AES ELETROPAULO, propõe-se a avaliação da maior corrente elétrica de circulação de neutro obtida ou por fluxo de potência (conforme modelo exposto no item IV) ou pela aplicação do grau de desequilíbrio de seqüência zero conforme descrito no item III.

VIII. CONCLUSÃO E COMENTÁRIOS FINAIS

Este artigo técnico apresentou uma série de concepções metodológicas e proposições embasadas em avaliações efetuadas a partir de ensaios em laboratório, análises de medições verificadas em circuitos da Empresa, e formulações conceituais relacionadas a 3 aspectos básicos que influenciam o ajuste dos dispositivos de proteção, a saber: análise das correntes transitórias de inrush; análise dos desequilíbrios de corrente; e análise das impedâncias de falta em eventos de curto circuitos que envolvam contato entre condutor e solo.

O modelo de cálculo elétrico especificado permite simular a operação efetiva do sistema de distribuição da AES ELETROPAULO, que pode apresentar um grau de desequilíbrio significativo da carga, além da característica de multi-aterramento do condutor de neutro. Este modelo propicia a separação das correntes de circulação de neutro e de retorno pela terra, tanto em simulações de fluxo de carga quanto de curto circuito.

Tais análises permitiram extrair uma série de conclusões e sistematizar um conjunto de procedimentos que deve propiciar um ganho significativo quanto ao ajuste dos dispositivos de proteção, viabilizando uma melhoria da continuidade do serviço, bem como da segurança de pessoas e equipamentos.

Particularmente, a avaliação da impedância de falta em eventos de curto circuito que envolvam contato entre condutor e solo mostrou-se bastante complexa, não obstante

a importante conclusão da impossibilidade de um ajuste preciso do sistema de proteção embasado em análises de sobrecorrente, remetendo a uma diretriz calcada num estudo efetivo dos relés com algoritmos específicos para detecção de faltas de alta impedância (fundamentados nas características qualitativas do fenômeno, e não na amplitude do sinal).

Mais conveniente seria efetuar um teste real de um curto circuito a partir da simulação da queda de um condutor de fase ao solo, de modo a avaliar a atuação dos relés de alta impedância, bem como a impedância de falta. A AES ELETROPAULO pretende realizar estes testes nos próximos meses.

IX. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a AES Eletropaulo pela permissão para publicar este artigo, bem como a contribuição dos seus profissionais J. Nacas e R. Carneiro na realização dos experimentos laboratoriais.

X. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Antunes, A. U., Arango, T. P. L. – “Análise de Eventos e Ajustes nos Modelos de Cálculos”. Documento Técnico Daimon Engenharia e Sistemas / AES ELETROPAULO / ENERQ-USP, São Paulo, 2006.
- [2] Sedighi, A. R., Haghifam, M. R. “Detection of inrush current in distribution transformer using wavelet transform”. *Electrical Power and Energy Systems*, pages 361-370, 25/11/2004.
- [3] Rico, J., Acha, E., Madrigal, M. “The study of inrush phenomenon using operational matrices”. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 16, april 2001.
- [4] Petit, M., Bastard, P. “Simulation of a zero-sequence for a distribution network with EMTP-RV. Discrimination between fault current and magnetizing inrush current”. *International Conference on Power Systems Transients (IPST'05)*, Montreal, Canada on June 19-23, 2005, Paper No IPST05 – 148.
- [5] A. E. Emanuel et al., “High impedance fault arcing on sandy soil in 15 kV distribution feeders: contributions to the evaluation of the low frequency spectrum”, *IEEE Trans. on Power Delivery*, Abr. 1990.
- [6] A. E. Emanuel et al., “High impedance fault arcing on sandy soil in 15 kV distribution feeders: contributions to the evaluation of the low frequency spectrum”, *IEEE Trans. on Power Delivery*, Abr. 1990.
- [7] Montenegro, Eduardo J. S. – *Estatística programada passo à passo – volume 5*. Centrais Impressoras Brasileiras Ltda, 1980.