



GRUPO V

GRUPO DE ESTUDO DE PROTEÇÃO, MEDIÇÃO E CONTROLE EM SISTEMAS DE POTÊNCIA - GPC

“AMPLIAÇÃO E MODERNIZAÇÃO DE SUBESTAÇÕES E SEU IMPACTO NAS PROTEÇÕES DIGITAIS E ESTÁTICAS: O CASO DAS DUAS NOVAS UNIDADES DE ITAIPU”

Robson Almir de Oliveira *

José Benedito Mota Júnior

Ricardo Krauskopf Neto

ITAIPU BINACIONAL

RESUMO

Na instalação da proteção digital das novas unidades da Itaipu, as quais compartilharão o vão com unidades existentes, verificou-se que a característica de saturação dos transformadores de corrente (TCs) novos era diferente da característica dos TCs existentes. Esta diferença na característica de saturação trouxe preocupação quanto ao comportamento das proteções diferenciais, tanto as estáticas quanto as digitais, já que TCs diferentes estariam alimentando a mesma proteção. Para analisar a viabilidade desta alimentação e suas possíveis consequências desenvolveu-se um estudo utilizando-se o ATP e o Matlab, representando os TCs, equipamentos do sistema de potência e as filosofias e característica de atuação das proteções envolvidas.

PALAVRAS-CHAVE

Subestação, ampliação, transformadores de corrente, saturação, proteção diferencial estática e digital.

1.0 - INTRODUÇÃO

A Usina Hidrelétrica de Itaipu atualmente é responsável pelo atendimento de aproximadamente 25 % da energia elétrica consumida no Brasil e 95% da energia consumida no Paraguai, e está conectada aos principais corredores de transmissão do Sistema Interligado Nacional (SIN): o setor 60 Hz conectado ao sistema de transmissão em 765 kV e o setor 50 Hz conectado ao Elo de Corrente Contínua ± 600 kV. Em ambos os setores a conexão se dá através de linhas de 500 kV originadas nas subestações isoladas a gás, onde é feita a conexão com as máquinas. A usina atualmente encontra-se em fase de ampliação da sua capacidade de geração, com a instalação de mais duas unidades geradoras, uma no setor de 50 Hz e outra no setor de 60 Hz. Após esta ampliação a usina passará a possuir 20 unidades geradoras com potência nominal de 700 MW cada uma, totalizando 14.000 MW.

As duas novas unidades geradoras, em processo de comissionamento, estão instaladas em vãos já existentes da subestação blindada a SF6 (GIS) de 500 kV, sendo que o arranjo utilizado nesta subestação para unidades geradoras é o de disjuntor e meio. Os vãos das unidades atualmente em operação são protegidos por relés diferenciais estáticos, enquanto que os vãos das novas unidades serão protegidos por relés digitais.

Dentro deste processo de ampliação tornou-se necessário a aquisição de novos equipamentos para a subestação, inclusive transformadores de corrente para a instalação das novas proteções, sendo as especificações as mesmas do projeto original. Após a instalação destes transformadores, verificou-se que a característica de saturação dos mesmos era diferente da característica dos existentes, notadamente no joelho da curva. Apesar de ambos atenderem a mesma especificação, os TCs antigos possuem característica superior ao especificado.

Essa diferença na característica de saturação trouxe preocupação quanto ao comportamento das proteções diferenciais, tanto das estáticas quanto das digitais, já que TCs com características diferentes estariam alimentando a mesma proteção (1) (2) (3), conforme mostrado na Figura 1. Além disso, a Itaipu tem por filosofia que todos os equipamentos possuam intercambiabilidade, ou seja, que estes novos TCs possam ser instalados em qualquer vão da subestação, independente de qual proteção estejam alimentando, facilitando os procedimentos de manutenção e otimizando a necessidade de material de reposição.

*Av Tancredo Neves, 6731 – Caixa Postal 1563 - CEP 85866-900 – Foz do Iguaçu - PR - BRASIL
Tel.: (045) 520-2597 - Fax: (045) 520-2706 - e-mail: ralmir@itaipu.gov.br

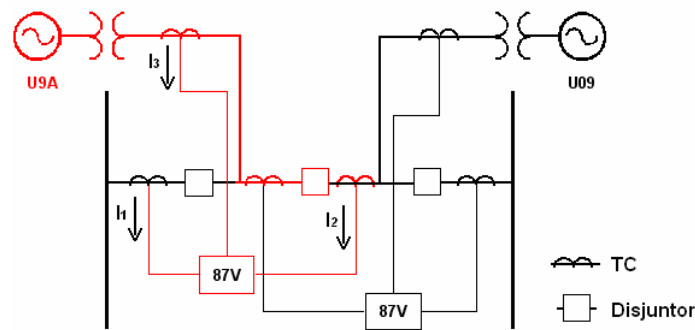


FIGURA 1 – Representação parcial da GIS 50Hz (preto-existente, vermelho-novo)

Desta forma, este trabalho tem por objetivo a realização de simulações, com o auxílio do ATP e Matlab, para prever o comportamento das proteções diferenciais, tanto das recém adquiridas (digital) quanto das existentes (estática), quando submetidas a alimentação por transformadores de corrente com características de saturação bem diferentes.

As demais funções de proteção das unidades não sofreram influência da ampliação, uma vez que possuem alimentações exclusivas, ou seja, não havendo a necessidade de mistura entre equipamentos novos e antigos.

2.0 - MODELAGEM PARA A SIMULAÇÃO

2.1- Conceituação e Modelagem dos Transformadores de Corrente

O transformador de corrente propicia a redução das correntes do componente protegido para níveis compatíveis com instrumento de boa classe de exatidão - os relés - através do acoplamento magnético entre primário (poucas espiras) e secundário (muitas espiras). Estes equipamentos são responsáveis por reproduzir para o relé (analógico ou digital) o que se passa no sistema de potência por ele protegido da maneira mais fidedigna possível.

A modelagem dos transformadores de corrente foi feita de acordo com o modelo de transformador saturável do software ATP (4), conforme mostrado na Figura 2

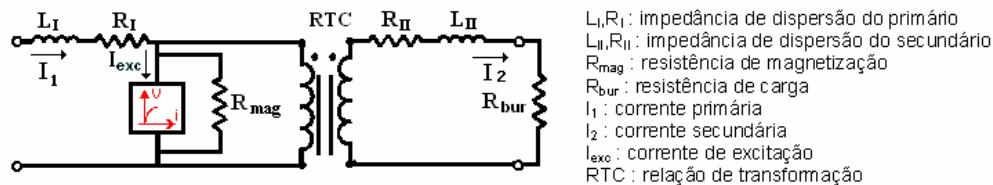


FIGURA 2 – Modelo do transformador de corrente.

Conforme (5), os valores da indutância L_I e da resistência R_{II} foram considerados zero, R_I foi obtido através de ensaios, R_{mag} considerado infinito (zero para o ATP), e L_{II} um valor muito pequeno diferente de zero (no caso 1×10^{-6}). Os dados da curva de saturação $V \times i$ também foram obtidos de ensaios em campo.

Conceitualmente, a característica de excitação ou magnetização de um TC (6) provém do lugar geométrico das extremidades dos "loops" de Histerese - densidade de fluxo *versus* intensidade de campo - sendo habitualmente expressa em função de grandezas elétricas (tensão secundária *versus* corrente de excitação). O conhecimento do valor da corrente de excitação permite determinar o quanto o TC se afasta da condição ideal, visto que a corrente secundária na realidade não é apenas função da relação de espiras, sendo resumida pela Equação [1]:

$$I_2 = \frac{I_1}{RTC} - I_{exc} \quad [1]$$

Segundo (7), quando o núcleo do TC satura, o aumento da densidade do fluxo (B) é muito menor que o respectivo aumento da intensidade do campo (H), resultando no aumento drástico da corrente de magnetização (I_{exc}). As duas formas de saturação que nos interessam são a saturação por corrente alternada (CA) e por corrente contínua (DC). A saturação por CA ocorre quando a corrente primária é senoidal simétrica, mas é de tal magnitude a ponto de ocorrer saturação, do que resulta corrente secundária bem menor que a primária e forma de onda distorcida. A saturação por DC ocorre quando a corrente primária está deslocada e estabelece uma corrente de polarização ou um fluxo de polarização no núcleo, o que aumenta o problema de saturação por CA.

As curvas de saturação dos TCs novo e velho, que alimentam os relés diferenciais do vão das unidades U09/U9A e U18/U18A, levantadas em ensaios no campo, são mostradas na Figura 3 a seguir:

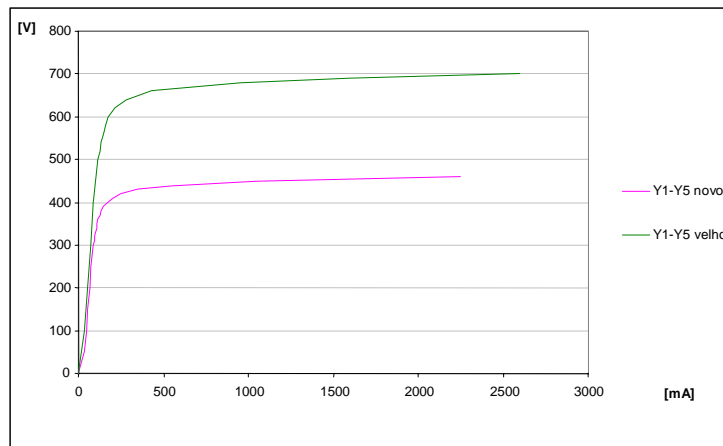


FIGURA 3 – Curvas de saturação V x i dos TC's

2.2- Modelagem das Proteções Diferenciais

2.2.1 - Relé Diferencial Digital

A função diferencial da proteção digital a ser instalada nas unidades novas foi modelada conforme dados do fabricante (8), segundo Figura 4 e equações (2) e (3). Os valores de corrente obtidos dos TC's antes de serem aplicados a função foram previamente filtrados. Tanto a filtragem como a função do relé foram modelados no MATLAB.

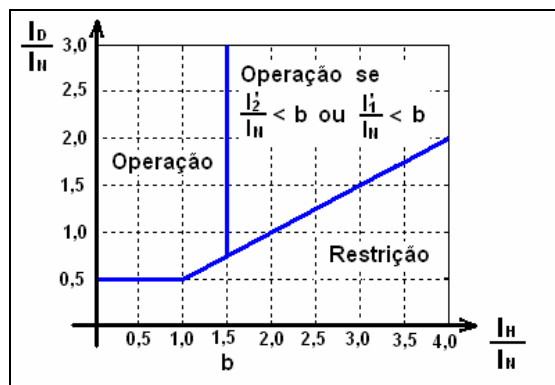


FIGURA 4 – Função da proteção diferencial digital.

$$I_D = |I_1 + I_2 + I_3| \quad \text{Corrente de Operação} \quad (2)$$

$$I_H = \begin{cases} \sqrt{I_1' \cdot I_2'} \cdot \cos \alpha & \text{se } \cos \alpha \geq 0 \\ 0 & \text{se } \cos \alpha < 0 \end{cases} \quad \text{Corrente de Restrição} \quad (3)$$

onde: I_1' = maior das correntes I_1, I_2, I_3

$$I_2' = I_D - I_1'$$

$$\alpha = \angle(I_1'; -I_2')$$

Onde I_1, I_2 e I_3 são as correntes de entrada no relé (vide Figura 1) e I_N a corrente nominal do relé. A região de operação com I_H maior que ' $b \cdot I_N$ ' é uma região onde se tem a operação desde que sejam satisfeitas as condições de I_1' e I_2' . Essa restrição tem a finalidade de assegurar que a função se mantenha estável durante faltas externas, principalmente as que levam a saturação dos TCs.

Afim de validar o modelo apresentado anteriormente, simulou-se um curto-circuito dentro da zona diferencial e o resultado é apresentado nas Figuras 5(a) e 5(b) a seguir. Pode-se verificar que a trajetória da corrente estabiliza no interior da característica de operação da função diferencial.

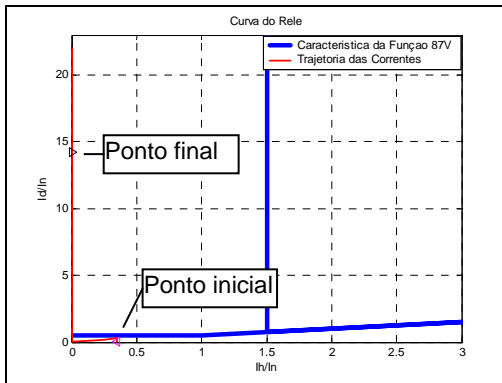


FIGURA 5 - (a) Atuação da proteção digital

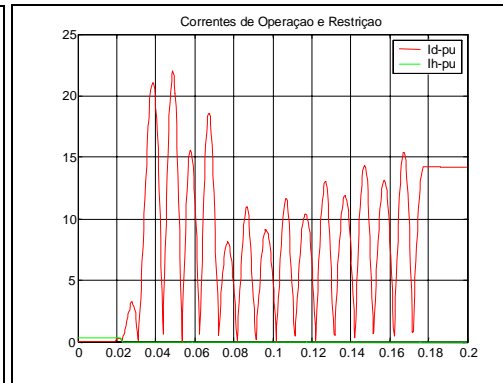


FIGURA 5 – (b) Correntes de operação e restrição.

2.1.1 - Relé Diferencial Estático

O relé diferencial estático das unidades existentes (9) é um relé de três enrolamentos que cumpre a função de proteção diferencial do vão. O relé apresenta a curva de atuação conforme mostrado na Figura 6. Porém, vale destacar que a curva implementada no modelo foi obtida por extrapolação da curva disponível, por falta de dados de catálogo para valores de I_a/I_n e I_s/I_n superiores a 10.

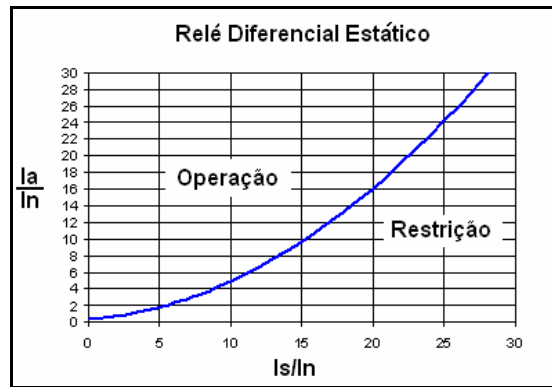


FIGURA 6 – Característica de operação do relé estático.

Onde $I_a = |I_1 + I_2 + I_3|$

$I_s = |I_1| + |I_2| + |I_3|$

I_1, I_2 e I_3 são as correntes dos enrolamentos secundários dos TC's, conforme a Figura 1.

Este relé também foi implementado no Matlab, sendo considerado apenas um filtro para eliminar componentes de alta frequência. Da mesma forma que a função digital, simulou-se um curto-circuito dentro da zona diferencial para validar o modelo, conforme as Figuras 7(a) e 7(b). Observa-se que há a estabilização dentro da zona de operação, conforme esperado.

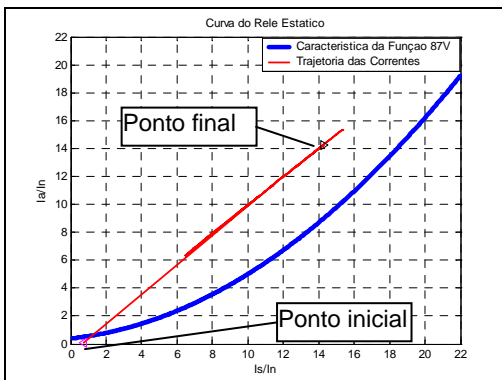


FIGURA 7 - (a) Atuação da proteção estática.

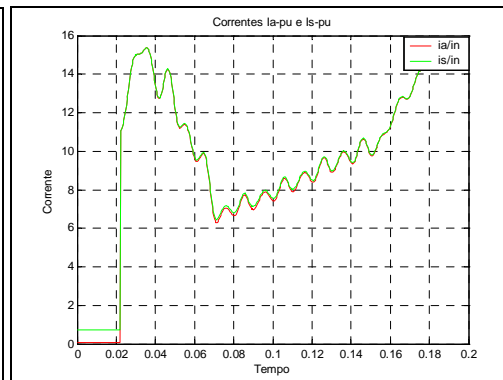


FIGURA 7 – (b) Correntes de operação e restrição.

2.3- Modelagem do Sistema de Potência

O sistema de potência foi modelado por elementos presentes no ATP (1), sendo que os geradores de Itaipu foram modelados por elementos do tipo 59 e as linhas de transmissão por circuitos PI equivalentes ou por parâmetros distribuídos, conforme o caso. O sistema de 50Hz foi modelado integralmente, inclusive o sistema da Ande (Paraguai) e o Elo CC, que foi modelado por uma carga constante. Para o Setor de 60 Hz modelou-se todo o sistema de transmissão de 765 kV, sendo colocado um equivalente em Tijuco Preto 765 kV representando a região Sudeste e um equivalente em Ivaiporã 500 kV representando o sistema Sul. Ambos os equivalentes foram obtidos com o auxílio do software Anafas a partir de casos bases fornecidos pelo ONS.

3.0 - SIMULAÇÕES EFETUADAS

Com as considerações e implementações anteriores, simulou-se vários eventos, de forma a testar o comportamento das proteções diferenciais envolvidas quando submetidas a alimentação por TCs com características diferentes. Como os relés diferenciais estão protegendo o vão das unidades, para facilitar a análise, foram consideradas três regiões possíveis para a simulação de eventos externos a zona diferencial, conforme Figura 8, sendo eles: curto-circuito na barra adjacente a proteção (ponto A), curto-circuito no vão (ponto B) e curto-circuito no vão da máquina – lado de alta tensão do transformador elevador (ponto C). A região em azul da Figura 8 compreende a região protegida pela função diferencial.

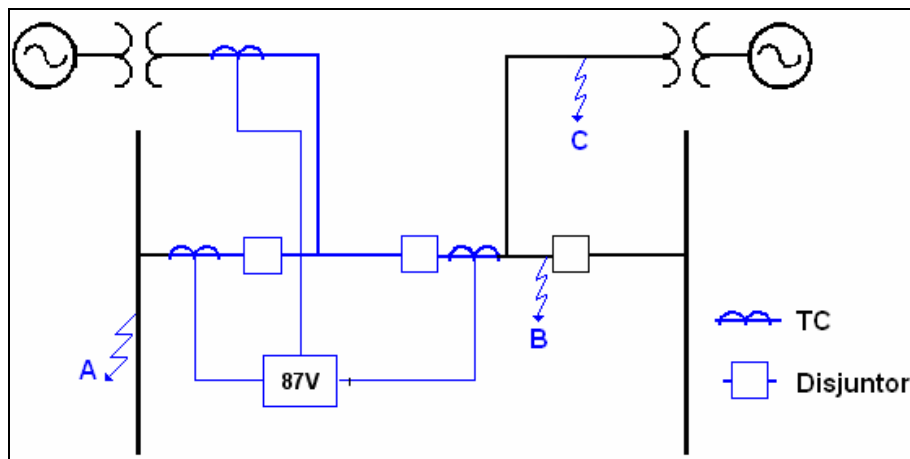


FIGURA 8 – Pontos de curtos-circuitos estudados.

Para se estudar o fenômeno da saturação é necessário que a corrente pelos TCs apresentem componente DC, de forma a levar a saturação dos mesmos. Sabe-se que para um curto-circuito monofásico, a máxima componente DC aparece quando o curto ocorre no ponto de zero da forma de onda, e a ausência de DC ocorre para o curto no ponto de máximo da onda. Nas simulações considerou-se o curto-circuito ocorrendo no ponto intermediário entre o máximo e zero da forma de onda.

Assim sendo, executou-se as simulações para ambos os setores de Itaipu, setor de 50 Hz e 60 Hz, cujos resultados são apresentados a seguir.

3.1 – Resultados para o Setor de 50 Hz

3.1.1 – Curto-circuito externo no vão da unidade adjacente

Aplicando-se um curto-circuito monofásico no vão (ponto B da Figura 8), as correntes que alimentam as proteções são mostradas nas Figuras 9(a) e 9(b), onde pode-se observar que os dois transformadores de corrente saturam, porém em instantes diferentes. Nessas figuras, a corrente pelo TC do vão (vermelha) apresenta saturação pelo menos um ciclo antes da corrente pelo TC da barra (azul), pois aquele (novo) tem característica de saturação menor e ainda passa por ele a corrente do TC da barra (antigo) mais a corrente de contribuição de uma unidade para o curto-circuito.

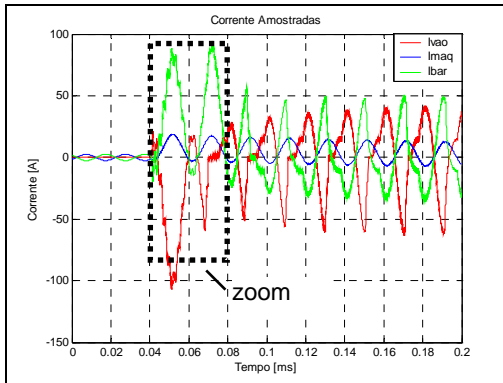


FIGURA 9 – (a) Correntes nos secundários dos TCs.

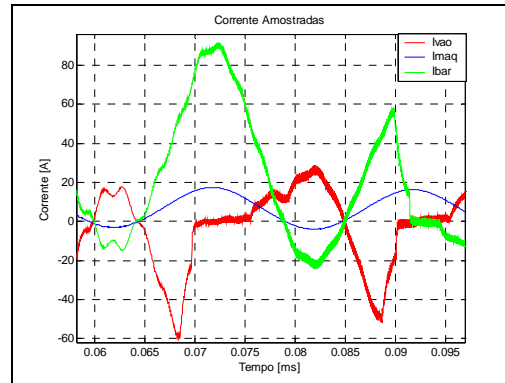
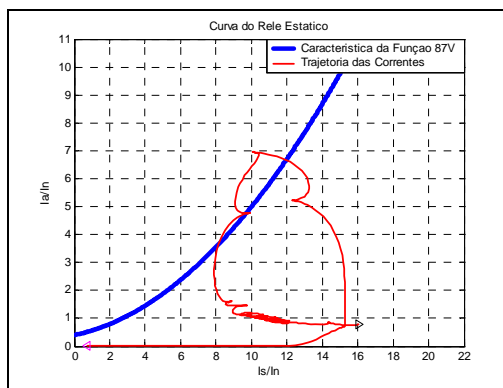
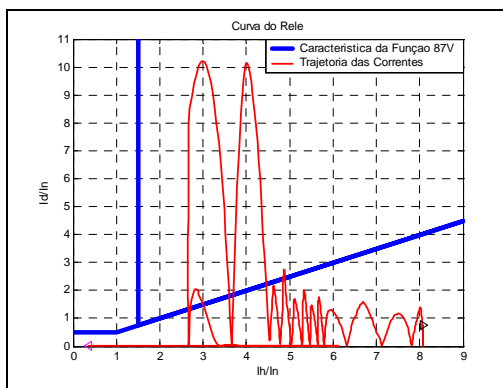


FIGURA 9 - (b) Zoom nas correntes.

As figuras a seguir apresentam as características de atuação da função digital e do relé estático para a fase sob falta.



(a) Proteção estática



(b) Proteção digital

FIGURA 10 – Característica de operação das proteções para um curto-circuito externo.

Nas Figuras 10 (a) e (b), pode-se observar que tanto o relé estático quanto o digital atingiram a região de operação. Porém na proteção digital há uma função para evitar problemas de saturação, condicionadas a $I_1' I_2'$, que torna a região I_H/I_N maior que “b” como região de não-operação, desta forma sem risco de atuação indevida. Desta forma, somente o relé estático apresenta este risco para o evento externo simulado, sendo que o mesmo levou 9 ms para atingir a região de operação e permaneceu no seu interior por 18 ms.

3.1.2 – Curto-circuito externo na barra adjacente

Para um curto-circuito externo na barra adjacente a unidade (ponto A da Figura 7), o TC da barra, que tem saturação superior, é que está com a maior corrente, desta forma não ocorrendo o problema da diferença de saturação.

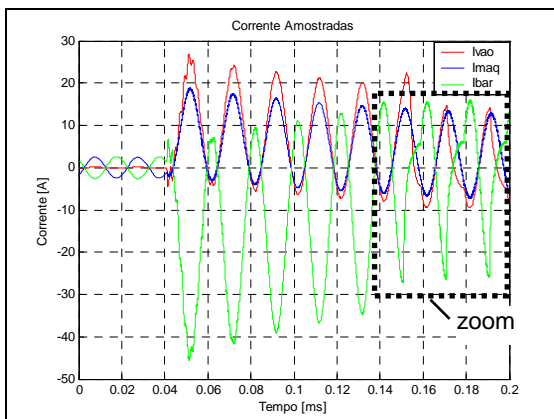
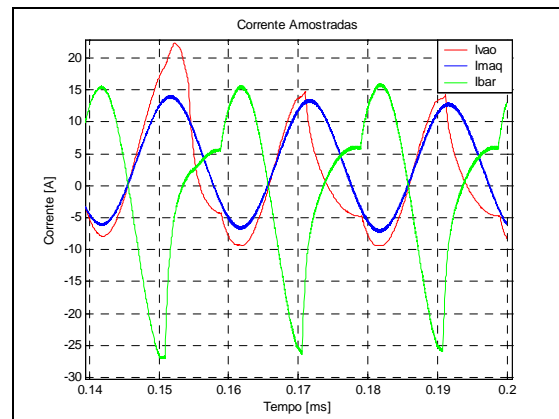
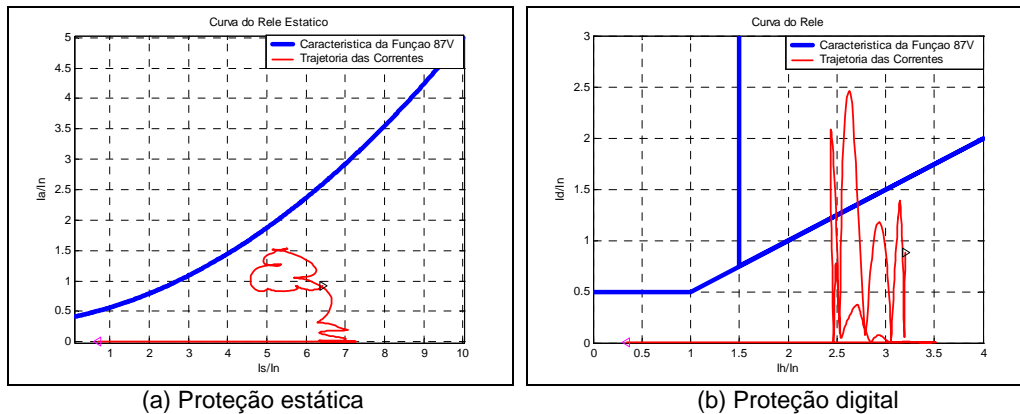


FIGURA 11 – (a) Correntes nos secundários dos TCs para um curto-circuito externo na barra da unidade; (b) Zoom.



As figuras a seguir apresentam as características de atuação da função digital e do relé estático para a fase sob falta.



(a) Proteção estática (b) Proteção digital
FIGURA 12 – Característica de operação das proteções para um curto-circuito externo.

Pode observar nas figuras anteriores, que não há o risco de atuação indevida das proteções. No caso da proteção digital, a curva de atuação atinge a região da característica, porém neste caso a região se torna de não atuação, pois I_1' e I_2' são maiores que $b \cdot I_N$.

Os demais pontos possíveis curtos-circuitos externos não apresentaram risco de atuação indevida, tanto para os relés estáticos quanto para os relés digitais, conforme a Tabela 1 a seguir.

TABELA 1 – Tempos de atuação e de entrada das proteções para o setor de 50 Hz

Eventos Simulados	Proteção Digital		Proteção Estática	
	Tempo de entrada na característica (ms)	Máxima permanência (ms)	Tempo de entrada na característica (ms)	Máxima permanência (ms)
CC na Barra – Ponto A	-	0	-	0
CC no Vão – Ponto B	-	0	9	18
CC na Máquina – Ponto C	-	0	-	0

3.2 – Resultados para o Setor de 60 Hz

Os mesmos casos de curtos-circuitos simulados para o setor de 50 Hz foram repetidos para o setor de 60 Hz, sendo os resultados apresentado na Tabela 2.

TABELA 2 – Tempos de atuação e de entrada das proteções para o setor de 60 Hz

Eventos Simulados	Proteção Digital		Proteção Estática	
	Tempo de entrada na característica (ms)	Máxima permanência (ms)	Tempo de entrada na característica (ms)	Máxima permanência (ms)
CC na Barra – Ponto A	73	6	65	2
CC no Vão – Ponto B	-	0	9	13
CC na Máquina – Ponto C	-	0	-	0

Pelos resultados da tabela acima, pode-se observar que o relé estático apresenta risco de atuação indevida se submetido a alimentação por TCs com características de saturação diferentes. Neste setor da Itaipu, o relé digital também apresenta este tipo de risco, porém com um tempo para entrada na característica de operação elevado (superior a 4 ciclos), tempo este suficiente para a proteção diferencial de barra eliminar o defeito, o qual se encontra no interior da zona diferencial deste relé.

3.3 – Simulações com TCs idênticos

Todos os casos anteriores de curto-circuito externo a zona protegida foram simulados com TCs com mesma característica de saturação, tanto para a proteção digital quanto para a proteção estática, não ocorrendo em nenhum caso atuação indevida. Esta atuação poderia ocorrer devido a diferença de corrente entre o TC conectado a barra e o do meio do vão, pois sempre haverá por um deles a corrente da própria máquina como diferença.

4.0 - ABORDAGEM DO PROBLEMA NA ITAIPU

A partir da detecção do problema com os TCs, que poderia levar a atuação indevida das proteções diferenciais, ocorreram varias reuniões entre as áreas da Itaipu (Operação, Manutenção e Engenharia) e entre Itaipu e o fabricante, surgindo as seguintes alternativas de solução :

1. Manter a configuração da GIS, como na Figura 1, e correr o risco da atuação indevida, podendo ocorrer o desligamento de uma unidade a mais quando de um curto-circuito;
2. Aumentar o burden do circuito do TC antigo, tornando a sua curva de saturação semelhante a dos TCs novos;
3. Trocar os TCs recém adquiridos por outros com características semelhante aos TCs antigos;
4. Realocar os TCs de forma que a proteção nova fique com os TCs novos e a proteção antiga com os TCs antigos.

A primeira opção foi rejeitada em função da segurança do sistema e de eventuais penalizações. A segunda acarretaria em instalação de equipamentos em série com a proteção e em lugar físico não apropriado, sendo também descartada. A opção seguinte também não é possível devido a não existência no mercado de TCs com as mesmas características do antigo. Então, a única opção aceitável seria a troca dos TCs de forma que cada proteção tenha TCs com a mesma característica. Esta solução resulta na perda da intercambiabilidade dos equipamentos da subestação.

5.0 - CONCLUSÕES

Com o crescimento da demanda do sistema elétrico, a ampliação e modernização das instalações existentes se tornou uma nova tendência e uma necessidade de sobrevivência num sistema regulado, onde eventuais problemas nas instalações podem acabar gerando penalidades às empresas envolvidas.

Dentro deste contexto, a Itaipu está ampliando a sua capacidade com a instalação de duas novas unidades, sendo necessário a instalação de novos equipamentos na subestação blindada a SF6 de 500 kV, tanto no setor de 50Hz quanto no de 60Hz. Com estas modificações, ocorreu a interação entre equipamentos recém adquiridos e existentes. Na comparação entre eles observou-se que os novos TCs apresentavam características de saturação bem diferentes dos atuais e, devido a configuração da subestação, TCs diferentes estariam alimentando a mesma proteção diferencial (estática da unidade antiga e digital da nova).

A análise do comportamento destas proteções submetidas a TCs diferentes permitiu concluir que a proteção estática está mais sujeita a atuação indevida, ou seja, que pode haver a atuação da proteção para um evento externo a sua zona diferencial. A proteção digital, apesar de sofrer influencia dos TCs, tem um risco menor de atuar indevidamente, haja vista que a sua filosofia permite distinguir problemas de saturação dos TCs.

Tendo em vista a possibilidade de atuação indevida das proteções diferenciais envolvidas na ampliação da subestação, a Itaipu Binacional em acordo com o Fabricante responsável, acharam por bem alterar a configuração dos transformadores de corrente de forma que a proteção nova tenha somente TCs novos, e que a antiga seja alimentada somente pelos TCs antigos. Desta forma, estaria se abrindo mão da intercambiabilidade de equipamentos, além de incorrer em trabalhos na subestação blindada, onde os compartimentos novos se encontram comissionados e em garantia.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Tavares, M. C., Coury, D. V., Campos, P. E. G. e Lima, M. C. - Análise de Desempenho da Proteção Diferencial dos Transformadores de Potência com o Emprego do Atp-Emtp – XV SNPTEE, GPC.
- (2) IEEE Tutorial on the Protection of Synchronous Generators – IEEE Power Engineering Society.
- (3) Pascal, H. O., Dampi, J. L. e Rapallins, J. A. – Behavior of Current Transformers (CT's) under Severe Saturation Conditions – International Conference on Power Systems Transients (IPST), New Orleans, EUA, 2003.
- (4) Alternative Transient Program – Rule Book, Bonneville Power Administration, Review July 1987.
- (5) Folkers, R. - Determine Current Transformer Suitability Using Emtp Models Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. - Pullman, WA USA.
- (6) Mello, F. P. - Proteção de Sistemas elétricos de Potência – Santa Maria, RS, 1979.
- (7) Winders Jr., J. J. – Power Transformers - Principles and Applications – PPL Electric Utilities, Allentown, Pennsylvania, Marcel Dekker, 2002.
- (8) Sistema de Protección del Generador. Manual de Instalación, Puesta em Servicio y Mantenimiento. Relé Digital de Protección (REG216) - N° 6223 – 80 – B3005- E R0.
- (9) Catálogo Siemens Relé 7TD33 – E14401-F6401-U212-7600.