
SOBRETENSÕES NAS BARRAS DE NEUTRO DURANTE MANOBRAS DE PARALELISMO DE PÓLOS NO SISTEMA CCAT DE FURNAS

C. A. AOUN
C. R. ZANI
D. A. DUARTE FILHO

E. A. PIANTINO
E. FERREIRA
F. S. CURITIBA CORREA
F. VALENTIM DIAS

Furnas
Brasil

G. SARCINELLI LUZ*
S. NEGRÃO MENDES
U. V. ORDONES

Resumo – A transmissão da energia de Itaipu-50Hz é feita através de dois bipolos de +/-600 kV. Durante manobras de paralelismo e desparalelismo de polos na linha CC de outro bipolo houve duas ocorrências distintas de formação de arco através do centelhador das torres que sustentam as linhas de eletrodo dentro da subestação. A partir da segunda ocorrência ficou estabelecida uma restrição operativa desta manobra até que o fenômeno ficasse esclarecido e medidas protetivas ou corretivas fossem tomadas de modo a impedir uma nova ocorrência. Este artigo descreve a investigação desenvolvida para a identificação da causa e o procedimento utilizado para evitar nova ocorrência com a eliminação da restrição operativa imposta.

Palavras chave: Operação em paralelo, Barra de Neutro, Linha de Eletrodo, Centelhador

1 INTRODUÇÃO

As linhas CC dos dois bipolos que interconectam as estações conversoras de Foz do Iguaçu e Ibiúna, transmitindo a energia da usina de Itaipu-50Hz no Brasil, foram projetadas para suportar o dobro da corrente nominal. Desta forma, os conversores de um pólo que esteja temporariamente fora de operação por necessidade de manutenção de uma fase de sua linha, podem ser conectados em paralelo ao pólo de mesma polaridade do outro bipolo. A Figura 1 apresenta um esquema desta condição operativa. Isto faz com que haja a retomada da transmissão de potência por estes conversores e a eliminação da condição de operação monopolar do bipolo.

Durante duas destas manobras, houve a formação de um arco através de um dos centelhadores das torres que sustentam a linha de eletrodo dentro da subestação. Na primeira, em manobra de desparalelismo, o arco se manteve e causou um curto circuito que só foi interrompido após o derretimento de materiais envolvidos, inclusive o condutor que compõe um trecho do eletrodo. Na segunda, durante uma manobra de paralelismo, o arco se formou, mas se extinguiu com a eliminação da circulação de corrente monopolar ao final da manobra.

Para evitar nova ocorrência e viabilizar a manobra de paralelismo dos pólos dentro de condições seguras, FURNAS realizou diversas medições e análises digitais, de modo a consolidar um melhor entendimento deste fenômeno e estabelecer alterações que eliminem o risco de danos físicos e pessoais. Enquanto isso, a manobra de paralelismo com o polo 4 foi restringida.

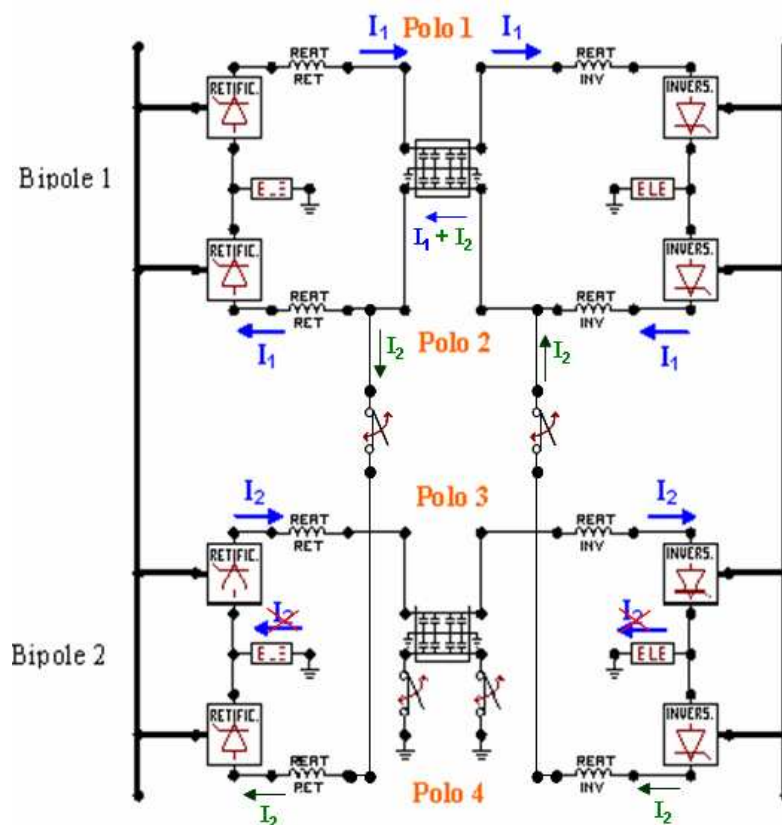


Figura 1 – Manobra de Paralelismo do Polo 4 sobre o Polo 2 com a extinção da corrente monopolar

2 CARACTERIZAÇÃO DA OCORRÊNCIA

Ao ser analisada a causa desta ocorrência, com a ajuda de medições de tensão na barra de neutro e algumas análises digitais, concluiu-se que o fechamento do seccionador de 600 kV (ZF-8) para a execução da manobra de paralelismo do pólo 4 (desenergizado) na linha do pólo 2 (energizada com 600kV) causa o aparecimento de um impulso de tensão que se propaga através dos filtros CC alcançando a barra de neutro do bipolo e a linha do eletrodo. Como o polo 3 está operando na condição monopolar, o potencial da barra de neutro se encontra elevado a um valor proporcional à corrente que circula pela linha do eletrodo. Desse modo, em função do nível de tensão da barra de neutro, o impulso de tensão pode ou não provocar um arco de curta duração em um dos gap's da linha do eletrodo (LE), preferencialmente nas torres internas à subestação (Figura 2) com características metálicas e solidamente conectada à malha de terra. Dependendo das condições de formação do arco, parte da corrente monopolar que circula na LE pode começar a escoar por este novo caminho de conexão com a malha de terra da subestação. Como não existe nenhum dispositivo de proteção que interrompa a circulação desta corrente, se as condições para a qual o gap foi projetado não estiverem sendo atendidas, este arco pode não se extinguir e, conforme descrito acima, acabar provocando a destruição por sobreaquecimento dos componentes envolvidos no defeito.

Na manobra de desparalelismo a corrente que circulava na linha do outro bipolo, passa a circular pela linha do eletrodo. Na manobra de paralelismo ocorre o inverso, ou seja, a corrente que antes circulava pela linha do eletrodo passa a circular pela linha do outro bipolo. Esta diferença explica porque na segunda ocorrência o arco se extinguiu posteriormente, enquanto na primeira não. Os efeitos deste fenômeno, contudo, podem ser muito mais danosos do que o acontecido no passado, especialmente se houver a presença de pessoas nesta área.

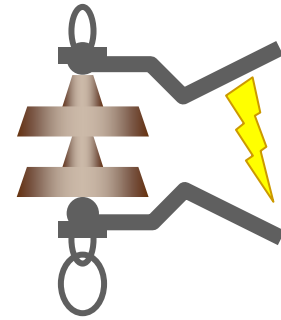


Figura 2 – Foto de um dos centelhadores internos à subestação inversora

3 TESTES EM CAMPO

Quatro campanhas de medição, descritas a seguir, foram realizadas a fim de fornecer subsídios para a análise das duas ocorrências:

3.1 Abril de 2004

Os testes nesta época envolveram apenas algumas medições de tensão em um único ponto do barramento de neutro a fim de avaliar o surgimento de algum valor de tensão que excedesse o nível de atuação dos pararraios conectados a este barramento. À princípio, a presença destes pararraios deveria evitar o surgimento de uma tensão capaz de provocar o centelhamento dos gap's. Conclui-se contudo, que **a taxa de amostragem dos equipamentos disponíveis na época não foi adequada** para a identificação clara do perfil da sobretensão.

3.2 Março de 2007

Dispondo de recursos mais modernos para a aquisição dos dados de medição e tendo sido feita uma análise digital prévia, as medições em campo foram reiniciadas com uma taxa de amostragem de 100 kHz. Na análise digital ficou evidenciado que, ao energizar-se o polo que está sendo paralelo, o surto decorrente da energização encontra dois caminhos: o reator de alisamento com as válvulas e os filtros CC. O filtro de menor indutância fornece o caminho de menor impedância na direção da linha do eletrodo. Considerando os valores de indutância de cada filtro, o HP fornece o menor caminho e o 2º/6º o maior. Deste modo, nesta etapa, algumas medições foram propostas considerando diferentes configurações dos filtros CC, conforme estão descritas a seguir:

- Teste 1 - Paralelismo do Polo 3 no Polo 1 com a presença dos Filtros CC
- Teste 2 - Paralelismo do Polo 3 no Polo 1 sem a presença dos Filtros CC
- Teste 3 - Paralelismo do Polo 4 no Polo 2 com a presença dos Filtros CC
- Teste 4 - Paralelismo do Polo 4 no Polo 2 sem a presença dos Filtros CC
- Teste 5 - Paralelismo do Polo 4 no Polo 2 com a presença dos Filtros CC exceto o HP
- Teste 6 - Paralelismo do Polo 4 no Polo 2 com a presença dos Filtros CC

Como a restrição de corrente foi imposta apenas no paralelismo do polo 4 no polo 2, os testes 1 e 2 foram feitos com uma corrente monopolar maior (2000 A), enquanto que nos testes de 3 a 6 esta corrente foi de apenas 290 A. Este fator mostrou-se determinante no aparecimento do surto como será visto mais adiante.

Nesta oportunidade, além das medições de tensão nos dois pontos do barramento de neutro, foram feitas medições de correntes nos pararraios e nos capacitores de surto do barramento de neutro conforme mostrado na Figura 3.

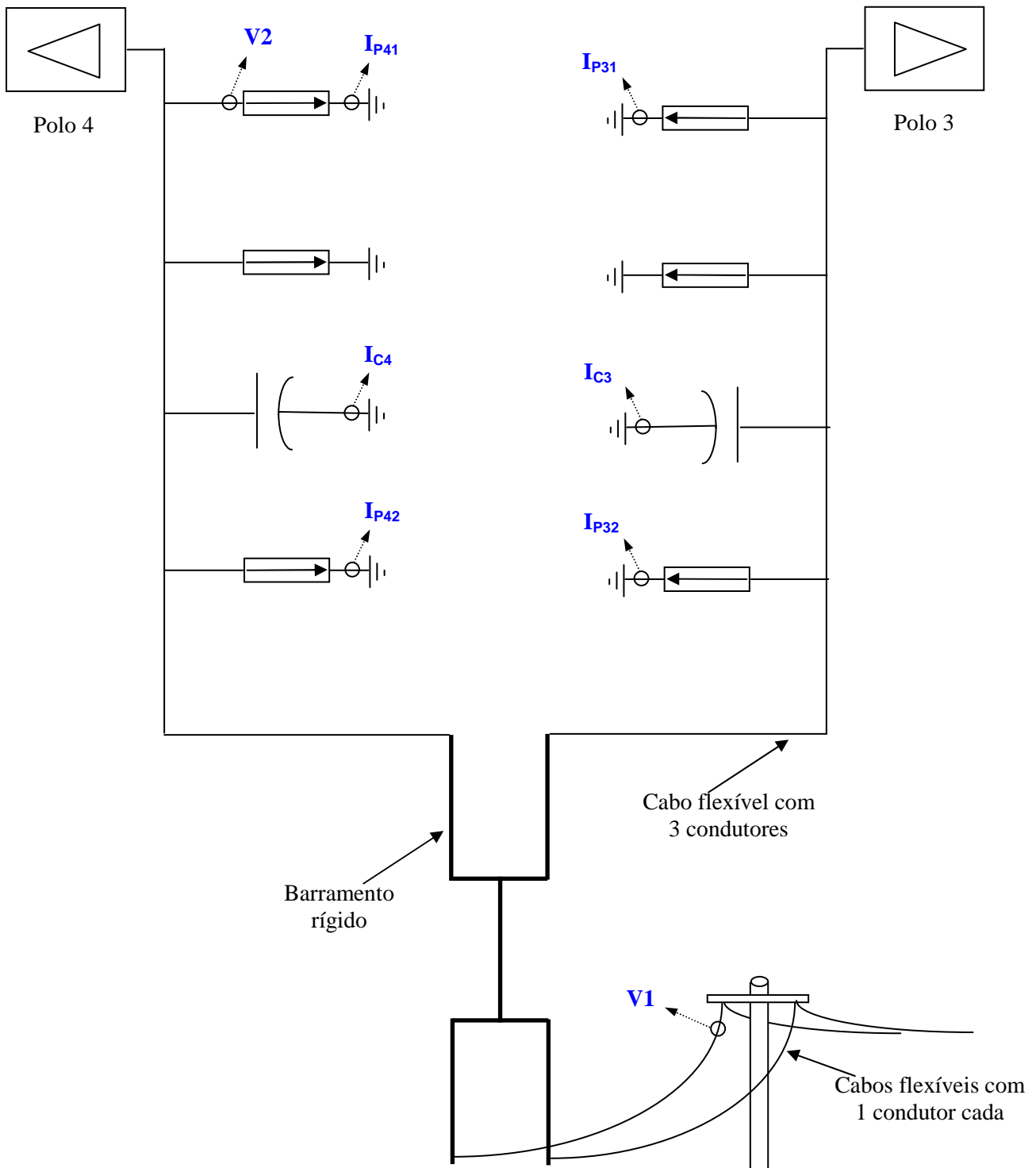


Figura 3 – Diagrama esquemático dos pontos de medição no barramento de neutro dos pólos 3 e 4.

Uma vez que o capacitor de neutro é bastante sensível à sobretensões, ele foi inicialmente utilizado para o disparo das medições e atuou adequadamente no teste 1. Entretanto, no teste 2, não foi possível obterem-se as medições desejadas por não haver tido corrente suficiente neste capacitor. Apesar disso, este resultado confirmou a conclusão da análise digital que apontou os filtros como o caminho do surto. A referência para o disparo das medições foi então modificada.

No teste 1, com a corrente monopolar maior, o paralelismo do pólo 3 no pólo 1 indicou a presença de uma sobretensão com frequência muito rápida no ponto V1, mostrado na Figura 4. Nos testes seguintes, onde a corrente monopolar era mínima (290 A), as tensões se mantiveram abaixo do nível admitido como possível para o disparo do gap e apresentaram a mesma resposta geral, não havendo a presença de corrente nos pararraios e no capacitor de surto. A Figura 5 mostra a tensão no ponto V1 para os testes de 3 a 6.

Desse modo, concluiu-se que a principal diferença com relação ao teste 1 está no **valor da corrente monopolar, responsável pela elevação do potencial da barra de neutro e pelas condições de centelhamento do gap**. Isso foi confirmado posteriormente.

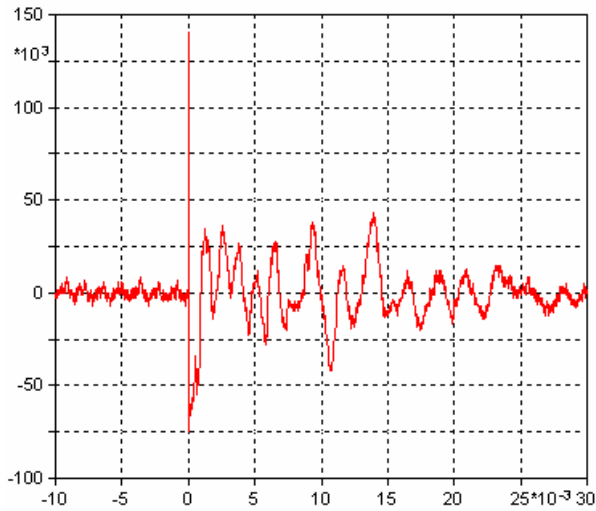


Figura 4 – Tensão no ponto V1 para o teste 1

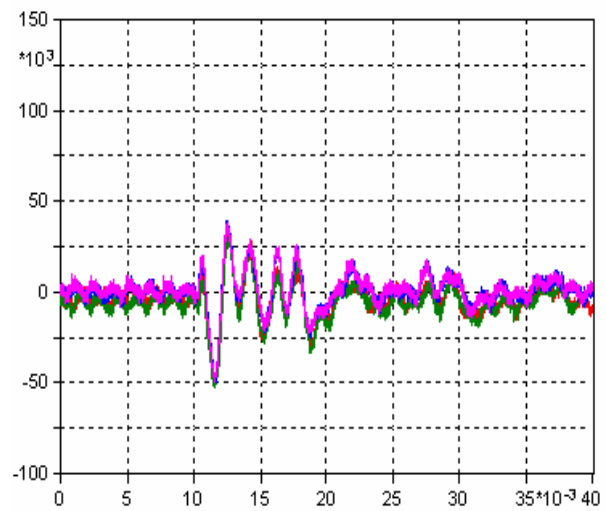


Figura 5 – Tensão no ponto V1 para os testes 3 a 6

3.3 Junho de 2007

Partindo dos resultados obtidos nos últimos testes, optou-se por realizar novos testes com corrente monopolar maior, avaliando-se a influência de um capacitor adicional no barramento de neutro de modo a evitar a presença de picos de tensão capazes de acionar o centelhador. Para isso os testes foram feitos apenas paralelando o polo 3 no polo 1 e considerando a presença de todos os filtros CC. Os seguintes valores de capacitância foram adicionadas ao valor original do capacitor de surto (50 nF): 3,0 μF , 0,831 μF e 0,261 μF . A Figura 6 mostra as unidades capacitivas utilizadas para compor as três alternativas.



Figura 6 – Unidades capacitivas conectadas ao barramento de neutro

Os mesmos pontos de medição dos testes anteriores foram considerados para estes testes, exceto a medição de corrente no capacitor de surto que foi transferida para o capacitor adicional. A Tabela 1 apresenta os resultados dos testes. A Figura 7 mostra a tensão no ponto V1 para os testes 1, 5 e 7, onde é possível observar a presença dos picos de alta frequência. A Figura 8 apresenta o resultado dos testes 2 a 4 com o capacitor de 3,0 μF onde os picos não ocorrem. Esses picos estão associados à ocorrência de centelhamento conforme ficou evidenciado na análise digital. A Figura 9 apresenta a simulação digital considerando a presença ou não de um centelhamento (modelado por um curto de 2,5 μs de duração) comparada com o resultado do teste 1.

Tabela 1 – Resultados dos testes de Junho de 2007

Teste	I _{cc} (A)	Capac (μF)	I _{cap} (A)	I _{P31} (A)	V1 (kV)	V2 (kV)
1	2480	0	-	1024	435,4	446,4
2	2560	3,0	189	0	41,04	38,16
3	2560	3,0	210	0	38,88	38,16
4	2560	3,0	219	0	40,32	38,16
5	2560	0,262	>2300	>2300	401,04	568,08
6	2560	0,262	>2300	>2300	383,76	496,08
7	2560	0,831	>2300	>2300	334,08	328,32
8	2560	0,831	>2300	>2300	256,32	223,92

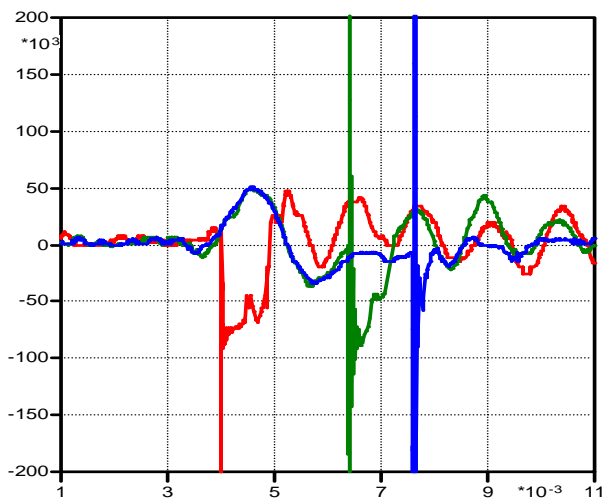


Figura 7 – Tensão no ponto V1 - Testes 1, 5 e 7

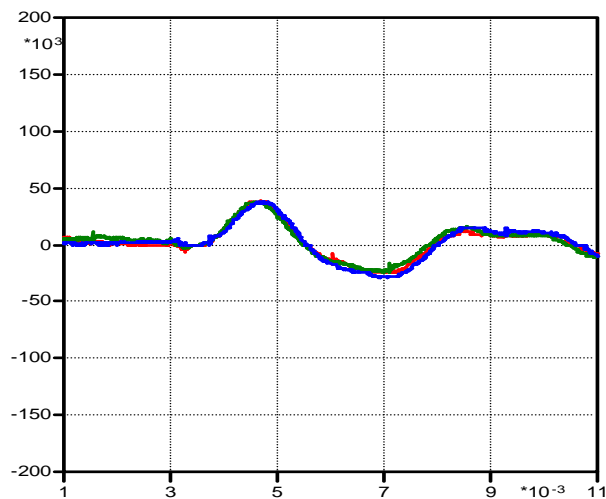


Figura 8 – Tensão no ponto V1 - Testes 2, 3 e 4

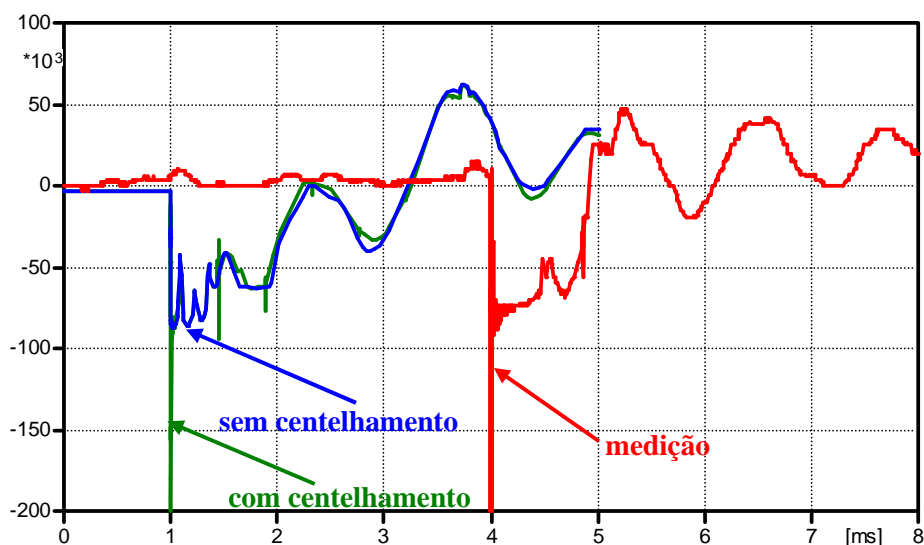


Figure 9 – Tensão no ponto V1 para o teste 1 e simulação com e sem centelhamento

A conclusão inicial destes testes foi que o capacitor adicional de 3,0 μF conectado ao barramento de neutro poderia evitar a formação do arco no centelhador para esta manobra. Contudo, a análise da corrente de regime permanente no capacitor apresentou um conteúdo de 3º harmônico e o impacto deste novo componente no sistema precisaria ser analisado.

3.4 Setembro de 2007

Partindo das conclusões obtidas com os testes anteriores, decidiu-se focar na restrição operativa de paralelismo do polo 4 sobre o 2 e avaliar a sensibilidade desta manobra à formação do arco para diferentes valores de corrente monopolar. Foram consideradas diferentes configurações dos filtros CC e a influencia do capacitor de 3,0 μF . Para melhor aferir a ocorrência de arco, todos os testes foram realizados à noite e a iluminação da área onde se localiza o barramento de neutro foi apagada durante cada manobra, de modo a permitir uma observação visual do centelhamento. A Tabela 2 apresenta a sequência dos testes realizados.

Tabela 2 – Resultados dos testes de Setembro de 2007

M	Descrição da Manobra	Configuração dos filtros CC	Capacitor (3,0 μF)	Inom (A)	Observação visual
1	Paralelismo	2/6th / 12th / HP	sim	1500	arco
1a	Desparalelismo	2/6th / 12th / HP	sim	1320	-
2	Paralelismo	2/6th / 12th / HP	sim	1320	arco
3	Paralelismo	-	sim	1320	-
4	Paralelismo	-	sim	2050	-
5	Paralelismo	2/6th	sim	2050	-
6	Paralelismo	-	não	2050	-
7	Paralelismo	-	não	2050	-
8	Inclusão do ramo de 2º/6º	-	não	2050	-
9	Inclusão do ramo de 12º	2/6th	não	2050	-
10	Inclusão do ramo HP	2/6th / 12th	não	2050	-
11	Paralelismo	HP	não	1300	-
12	Paralelismo	12th	não	1300	-

As manobras de paralelismo (todas do polo 4 sobre o 2) foram iniciadas considerando todos os filtros CC presentes, o capacitor conectado e a corrente monopolar em um valor médio. Neste teste foi possível visualizar o arco no centelhador, o qual se extinguiu por si mesmo. Isso confirmou que o polo 4 é mais sensível a esta manobra que o polo 3 porque o capacitor de 3,0 μF não foi suficiente para evitar o arco. A manobra de desparalelismo foi efetuada em seguida e nenhum arco foi observado. Uma nova manobra foi então realizada nas mesmas condições e o arco ocorreu novamente confirmando o resultado do primeiro teste. Uma nova manobra sem os filtros CC confirmou a hipótese do caminho do surto, pois esta não produziu arco. Nova manobra sem filtros CC considerando um maior valor de corrente monopolar também não produziu arco.

Como a análise digital indicou o filtro CC de 2º/6º como o de maior impedância para o surto, a manobra foi repetida com apenas este ramo presente e nenhum arco foi observado. Em novo teste sem os filtros CC, mantendo o valor mais alto de corrente monopolar e sem a presença do capacitor de 3,0 μF não houve arco. Este último teste foi repetido com o mesmo resultado. A inserção do ramo de 2º/6º foi testada, seguida do ramo de 12º e, posteriormente, o HP não tendo sido observado nenhum arco. A manobra de paralelismo com cada um dos ramos HP e 12º, com corrente monopolar média, também não apresentou arco.

Estes testes indicaram que o capacitor de 3,0 μF não solucionou o problema, além de não evitar uma possível formação de arco a partir de um surto chegando à subestação pela linha do eletrodo. Desse modo a opção do capacitor adicional foi descartada.

A opção de realizar o paralelismo deste polo sem a presença dos filtros para incluí-los depois aumentaria o número de manobras para efetuar uma operação e não necessariamente resolveria o problema já que a energização do HP poderia produzir um efeito semelhante. Entretanto, um outro ponto foi levantado durante as discussões. Os estudos de projeto destes centelhadores, realizados na época pelo CESI [2], indicaram a necessidade de uma resistência mínima de 50 Ω no aterramento da torre para garantir a extinção do arco. Isto abriu uma nova linha de pesquisa e foi decidido medir a impedância de aterramento das torres da linha do eletrodo.

4 MEDIÇÃO DO ATERRAMENTO DAS TORRES

Foi medida a resistência de aterramento de todas as torres internas e algumas externas à subestação. Estas medições foram feitas no inversor onde o problema foi originalmente identificado. A Tabela 3 apresenta os resultados das medições de cada torre.

Tabela 3 – Valores de resistência de aterramento das torres

Linha do Eletrodo	Torre	Resistência (Ω)	Condição da torre
1	1	0,0014	Interna a subestação (metálica)
	2	20	Interna a subestação
	3	160	Externa a subestação
2	1	0,068	Interna a subestação (metálica)
	2	33,33	Interna a subestação
	3	48,38	Interna a subestação
	4	28	Interna a subestação
	5	31	Interna a subestação
	6	225	Externa a subestação
	7	310	Externa a subestação

Estes resultados confirmaram que os centelhadores de todas as torres internas à subestação não estavam instalados de forma adequada ao projetado, uma vez que alguns apresentaram valores muito abaixo de 50 Ω especialmente as torres metálicas. Portanto, duas opções foram consideradas:

- Especificar, elétrica e mecanicamente, um resistor para ser instalado na torre, em série com o condutor que faz o aterramento do centelhador.
- Eliminar os centelhadores das torres internas à subestação uma vez que esta área já se encontra protegida pela blindagem da subestação. Surtos atmosféricos incidentes na linha de eletrodo na parte externa à subestação encontrarão os centelhadores com aterramento adequado.

A segunda opção foi considerada técnica e praticamente mais razoável e, então, implementada.

5 CONCLUSÕES

Um simples arco causou danos materiais cujas consequências poderiam ter sido maiores e isso não foi previsto ao se fazer a instalação dos centelhadores nas torres internas à subestação. A identificação da causa não foi imediata e exigiu desenvolvimento tecnológico, análises digitais e quatro campanhas de testes. Entretanto, a solução foi facilmente implementada e a restrição operativa eliminada.

6 BIBLIOGRAFIA

- [1] Madzarevic, V. et al, “General Description and Principal Characteristics of the Itaipu HVDC Transmission System”, International Symposium on HVDC Technology, 1983
- [2] CESI Study Report – Study of the behavior of the free-air gaps placed on the DC Electrode Line during Self-Extinguishing Tests – 14800 – C551/79 – 19/12/1979