



**XXIII SNPTTE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

FI/GPC/16
18 a 21 de Outubro de 2015
Foz do Iguaçu - PR

GRUPO – V

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

**IDENTIFICAÇÃO DE ERRO DE PROJETO EM BANCOS DE CAPACITORES
ATRAVÉS DA ANÁLISE DE OSCILOGRAFIA**

Flávio Ferreira Vosgerau (*)
COPEL GERAÇÃO E TRANSMISSÃO S.A.

Luiz Vinicius Sequinel Puppi
COPEL GERAÇÃO E TRANSMISSÃO S.A.

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo de caso de curto-circuitos reais envolvendo bancos de capacitores de 138 kV, 30 Mvar em diferentes instalações da COPEL GERAÇÃO E TRANSMISSÃO. Todas as perturbações foram causadas por pássaros e a atuação da proteção ocorreu dentro do esperado, porém uma característica comum entre as ocorrências chamou a atenção, levando a uma análise mais aprofundada das mesmas.

Através da análise das ocorrências foi possível identificar a posição exata do fechamento do arco elétrico nos bancos de capacitores e identificada uma situação potencialmente danosa aos equipamentos, sujeitos a sobretensões da ordem de 66,7 % na string faltosa.

PALAVRAS-CHAVE

Proteção, Bancos de capacitores, Perturbação sistema elétrico, Análise de oscilografia, Desbalanço correntes

1.0 - INTRODUÇÃO

Os bancos de capacitores referenciados neste trabalho foram objeto de um único fornecimento, sendo instaladas uma unidade de 230 kV, 50 Mvar na subestação Jaguariaíva 230 kV (JGI), duas unidades de 138 kV, 30 Mvar e 15 Mvar na subestação Londrina 230 kV (LNA), três unidades de 138 kV, 30 Mvar (2) e 15 Mvar (1) na subestação Maringá 230 kV (MGA), uma unidade de 138 kV, 15 Mvar na subestação Sarandi 230 kV (SDI) e uma unidade de 138 kV, 30 Mvar na subestação Ponta Grossa Norte 230 kV (PGN), totalizando 8 equipamentos.

A topologia empregada em todos os equipamentos foi do tipo dupla estrela aterrada com proteção de desbalanço de corrente (61) através da medição direta da corrente de desequilíbrio, conforme ilustrado na Figura 1. Para descrever as partes componentes dos bancos de capacitores utilizaremos neste artigo os termos *unidade capacitiva* para descrever cada unidade física do banco (vulgo "lata"), *string* para indicar a ligação série de uma sequência de unidades capacitivas, e *elementos capacitivos* para denominar os capacitores internos às unidades capacitivas.

Cada unidade capacitiva é composta de uma associação série-paralelo de elementos capacitivos de forma a obter-se os valores de potência reativa e tensão de operação definidos em projeto. As unidades capacitivas empregadas são do tipo *fuseless*, de modo que, na ocorrência de falha em elementos capacitivos estes são *bypassados* por um curto-circuito de modo que a queda de tensão que havia no elemento capacitivo curto-circuitado é redistribuída entre os elementos capacitivos restantes da string, o que gera uma corrente de desequilíbrio entre as strings. Dependendo da topologia do banco de capacitores o número de elementos capacitivos falhados pode ser maior ou menor, sendo que a sobretensão máxima admissível nos elementos é de dez por cento acima da tensão nominal. A proteção de desbalanço portanto corresponde à corrente de desequilíbrio equivalente a perda de uma quantidade tal de elementos capacitivos que a sobretensão resultante seja de 5 % para alarme e de 10 % para TRIP. A

(*) Rua José Izidoro Biazetto, n° 158 – sala 221 - Bloco A – CEP 81.200-240 Curitiba, PR, – Brasil
Tel: (+55 41) 3331-2057 – Fax: (+55 41) 3331-3660 – Email: vosgerau@copel.com

temporização de atuação recomendada pelo fabricante é de 2 s para o nível de alarme e de 450 ms para o nível de TRIP (máximo 500 ms).

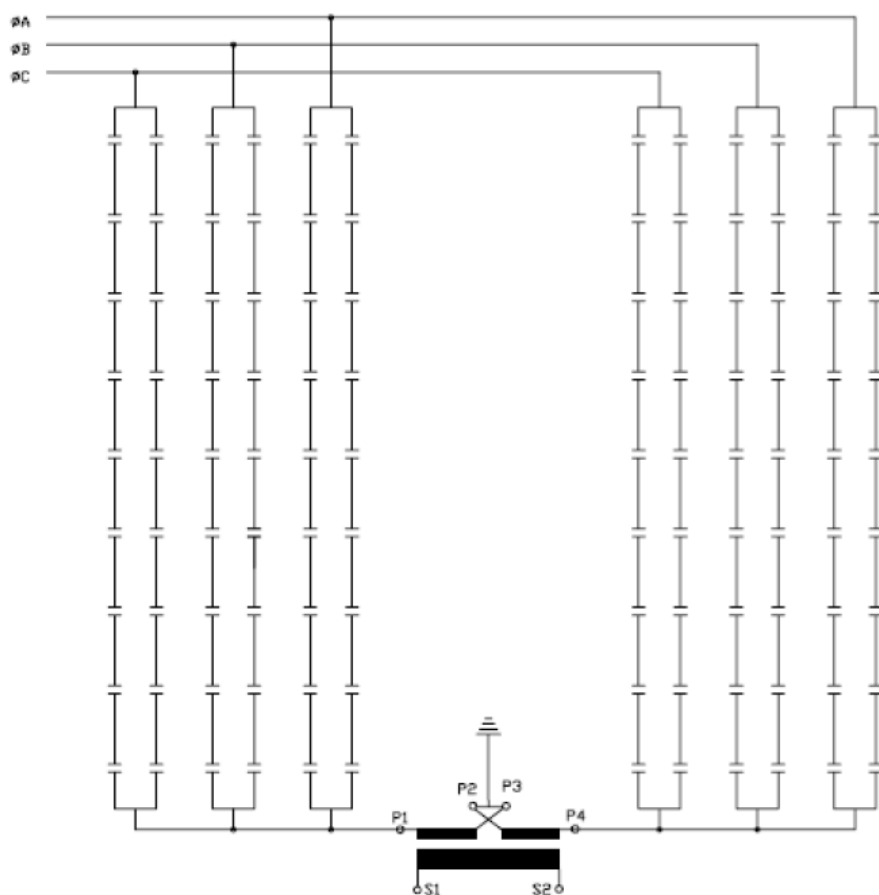


FIGURA 1 – Banco de capacitores com topologia dupla-estrela aterrada e TCs de neutro utilizados pela proteção de desbalanço de correntes (61).

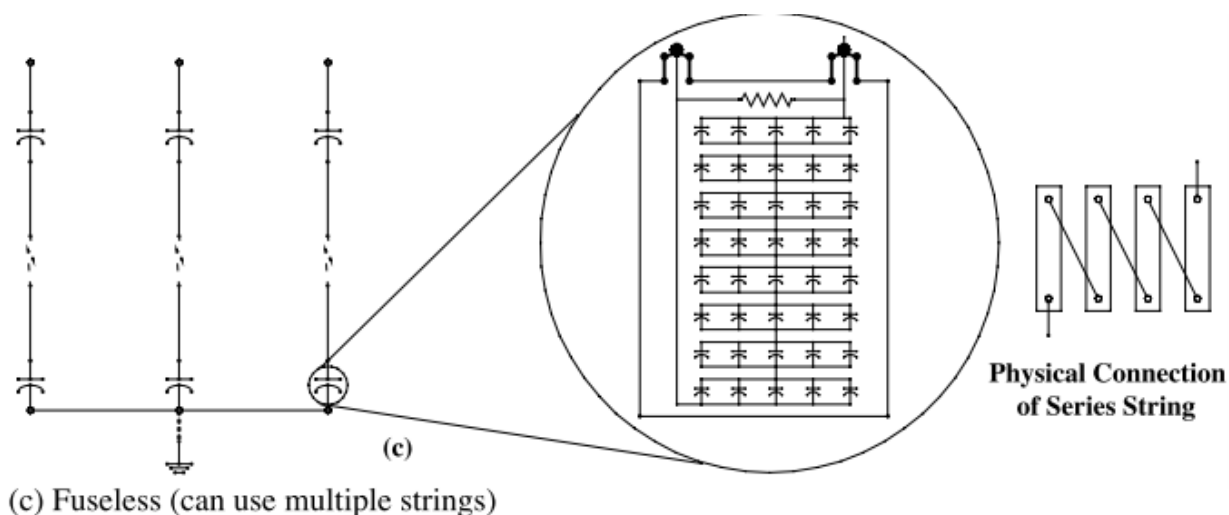


FIGURA 2 – Banco de capacitores conectado em estrela, tipo *fuseless* ⁽¹⁾.

Os bancos de capacitores objeto deste estudo foram instalados entre janeiro e março de 2013, sendo que em 03/04/2013 houve desligamento do banco BC-3 138 kV, 30 Mvar da subestação LNA – Ocorrência n° 1; em 25/06/2013 houve o desligamento do banco BC-5, 30 Mvar da subestação MGA – Ocorrência n° 2; e dia 31/08/2013 houve novamente o desligamento do banco BC-3 138, kV 30 Mvar da subestação LNA – Ocorrência n° 3. Todos os desligamentos foram causados por pássaro e serão descritos na próxima seção.

2.0 - DESCRIÇÃO E ANÁLISE DAS OCORRÊNCIAS

Nesta seção serão apresentadas as características das ocorrências envolvendo os bancos de capacitores das subestações Londrina e Maringá, bem como a análise que levou à conclusão de que os curto-circuitos apenas poderiam ter ocorrido na parte superior dos equipamentos, próximo à conexão do barramento com a primeira unidade capacitiva da string.

2.1 – Ocorrência n° 1

Houve desligamento do banco de capacitores BC-3 138 kV, 30 Mvar da subestação Londrina devido à curto-circuito monofásico envolvendo a fase A. Após inspeção foi encontrado pássaro (pomba) no local da ocorrência, porém não foi possível a identificação do local exato do curto-circuito. A análise da oscilografia indica atuação correta da proteção de desbalanço em 450 ms. Chamou a atenção o valor da corrente de desbalanço, de 21,32 A_{ef}, bem superior ao limite de atuação definido no projeto que é de 3,20 A_{ef}. Como não havia nenhum indício do ponto exato do fechamento do arco e estava claro que a ocorrência havia sido provocada por um agente externo, não houve um aprofundamento na investigação.

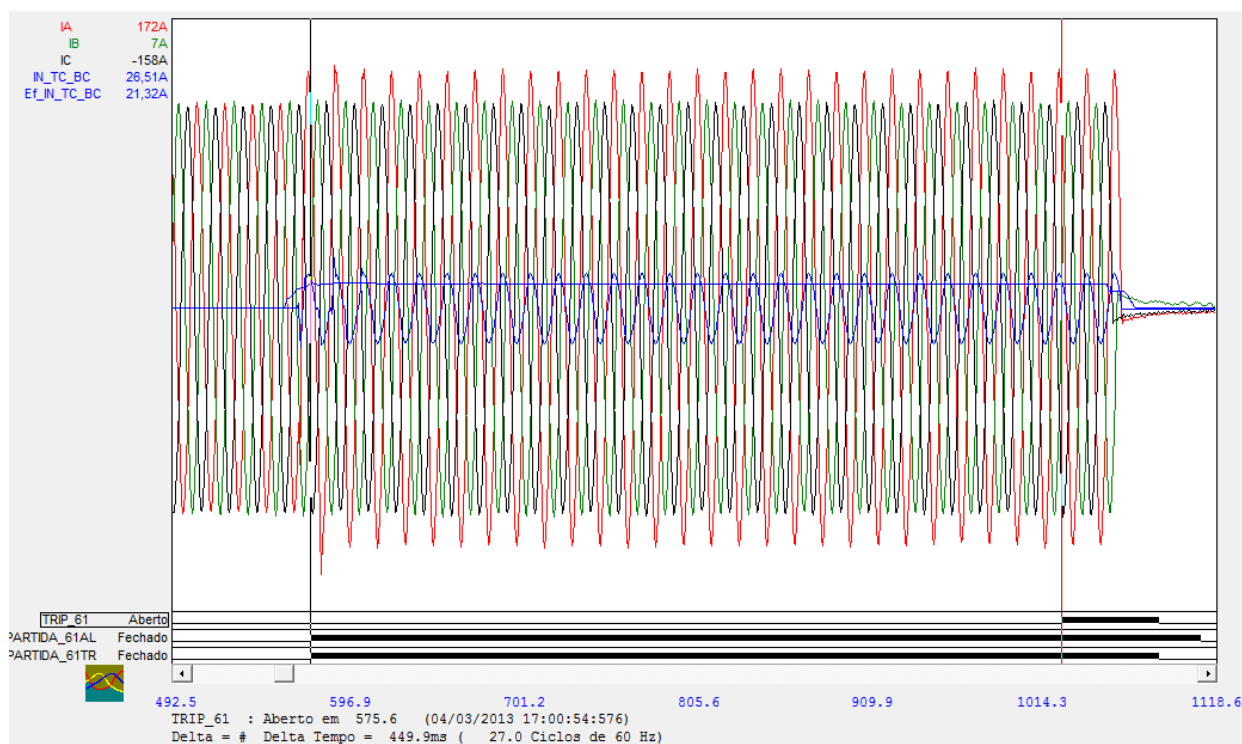


FIGURA 3 – Oscilografia de ocorrência envolvendo pássaro na subestação Londrina. Observar o tempo de atuação (450 ms) e o valor de 21,32 A_{ef} da corrente de desbalanço, em azul. O curto-circuito envolveu a fase A.



FIGURA 4 – Pássaro encontrado na subestação Londrina após inspeção.

2.2 – Ocorrência n° 2

Houve desligamento do banco de capacitores BC-5 138 kV, 30 Mvar da subestação Maringá devido à curto-circuito monofásico envolvendo a fase C. Estava chovendo no momento da ocorrência e após inspeção foi encontrado pássaro no local, porém não foi possível a identificação do ponto exato do curto-circuito. Pela análise da oscilografia foi possível observar a atuação correta da proteção de desbalanço em 450 ms e chamou a atenção novamente o valor da corrente medida, desta vez de 21,74 A_{ef}, indicando que o fechamento do arco foi em um ponto similar ao do banco de capacitores da SE Londrina (ocorrência n° 1).

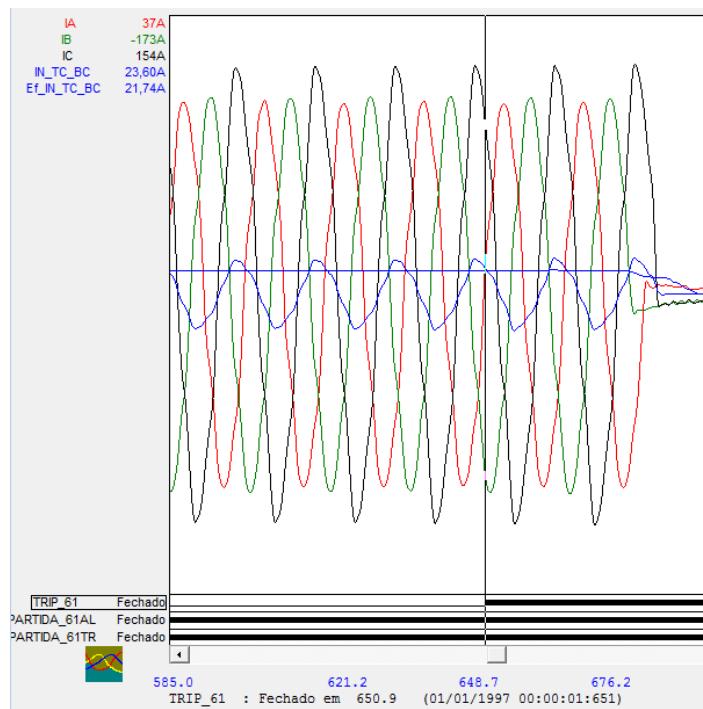


FIGURA 5 – Oscilografia de ocorrência envolvendo pássaro na subestação Maringá. Observar o valor de 21,74 A_{ef} da corrente de desbalanço, em azul. O curto-circuito envolveu a fase C.

2.3 – Ocorrência n° 3

Houve desligamento do banco de capacitores BC-3 138 kV, 30 Mvar da subestação LNA devido à curto-circuito monofásico envolvendo a fase B. Novamente foi encontrado pássaro no local, mas sem nenhum indício do ponto exato do curto. A análise da oscilografia deixou claro que havia uma relação entre as ocorrências 1, 2 e 3, sendo que neste caso a corrente de desbalanço encontrada foi de 21,66 A_{ef}.

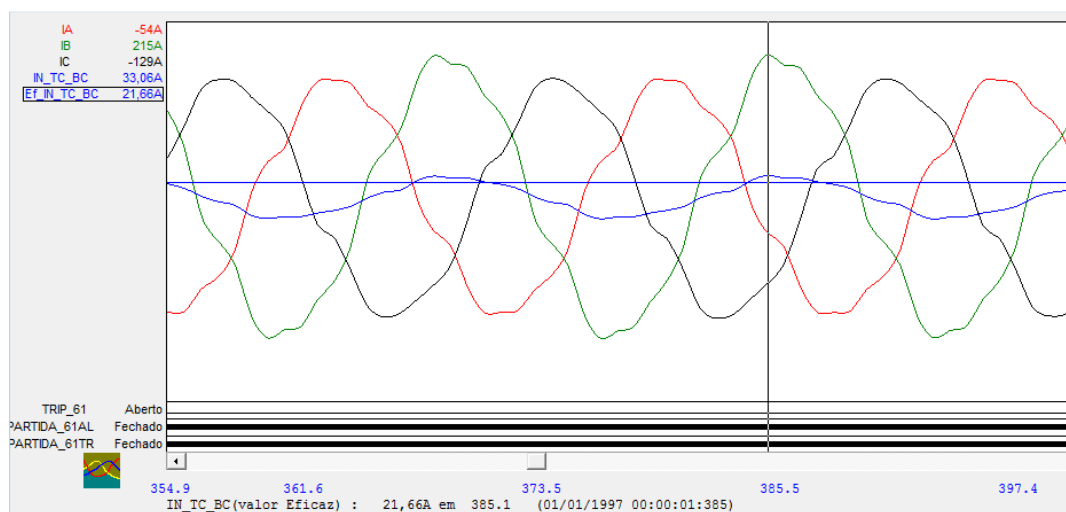


FIGURA 6 – Oscilografia de ocorrência envolvendo pássaro na subestação Londrina. Observar o valor de 21,66 A_{ef} da corrente de desbalanço, em azul. O curto-circuito envolveu a fase B.

2.4 – Análise

As perturbações envolvendo fases diferentes dos bancos de capacitores das subestações Londrina e Maringá deixaram claro que havia um problema comum que necessitava ser resolvido ou pelo menos mitigado. Como os operadores das subestações não puderam identificar o ponto de fechamento de arco por inspeção visual a partir do solo, resolvemos buscar uma pista pelo valor da corrente de desbalanço, comum a todas as ocorrências. A Tabela 1 mostra o valor da corrente de desbalanço pela avaria de elementos capacitivos e a respectiva sobretensão nas unidades restantes, para os bancos de capacitores de 138 kV, 30 Mvar. Esta tabela foi fornecida pelo fabricante e utilizada na definição dos valores de alarme e TRIP da função 61.

Tabela 1 – Corrente de desbalanço para os bancos de capacitores das subestações Londrina e Maringá.

FUSELESS CAPACITOR BANK
SINGLE STAR EARTHED NEUTRAL PROTECTION

19/6/2012

Customer:	COPEL	Reference:	BC - 138kV - 30MVA_r
Bank MVAR	33.1 *	Unit kVAR	552.00
Bank kV	145.0	Unit kV	16.74
Frequency	60	Unit kV (fund.)	15.93
Unit series	5	Elements series	9
Units parallel - star 1	2	Elements parallel / String	3
Units parallel - star 2	2	No. parallel strings / unit	1
No. parallel strings	2	Unit uF (healthy)	5.22
Total number of Units	60		
Alarm setting	1.6 A	(primary current)	
Trip setting	3.2 A	(primary current) maximum delay 0.5 sec	

Elements Short-Circuited	Unbalance Current (A)	Unit Cap. (uF)	Over-voltage Units in Series	Over-voltage In Failed Unit
0	0.00	5.22	1.00	1.00
1	0.71	5.88	1.02	1.02
2	1.46	6.72	1.05	1.05
3	2.24	7.83	1.07	1.07
4	3.06	9.40	1.10	1.10
5	3.92	11.75	1.13	1.13
6	4.83	15.67	1.15	1.15
7	5.78	23.50	1.18	1.18
8	6.78	47.01	1.22	1.22

Durante os estudos de para definição dos ajustes da proteção tivemos a preocupação em calcular os valores de corrente de desbalanço e respectiva sobretensão para validar a tabela fornecida pelo fabricante. Resolvemos então extrapolar o cálculo para uma segunda unidade capacitiva. Os resultados são apresentados na Tabela 2 abaixo.

Tabela 2 – Corrente de desbalanço para os bancos de capacitores das subestações Londrina e Maringá, considerando-se a perda de duas unidades capacitivas inteiras.

Unidades capacitivas fora	Número de elementos falhados	Corrente de desbalanço Ampères	Diferença de tensão nos elementos restantes ΔV	Acréscimo de tensão nos elementos remanescentes $V + \Delta V$	Percentual de Sobretensão %	
0	0	0	0	1770,54	0,00	
1	1	0,71	40,24	1810,78	2,27	
	2	1,46	82,35	1852,89	4,65	ALARME 61
	3	2,24	126,47	1897,01	7,14	
	4	3,06	172,74	1943,28	9,76	
	5	3,92	221,32	1991,86	12,50	TRIP 61
	6	4,83	272,39	2042,93	15,38	
	7	5,78	326,15	2096,69	18,42	
	8	6,78	382,82	2153,36	21,62	
	9	7,84	442,64	2213,18	25,00	
2	10	8,97	505,87	2276,41	28,57	
	11	10,15	572,82	2343,36	32,35	
	12	11,41	643,83	2414,37	36,36	
	13	12,75	719,28	2489,82	40,63	
	14	14,17	799,60	2570,14	45,16	
	15	15,69	885,27	2655,81	50,00	
	16	17,31	976,85	2747,39	55,17	
	17	19,05	1074,97	2845,51	60,71	
	18	20,92	1180,36	2950,90	66,67	PÁSSARO

O resultado encontrado foi um valor de corrente muito próximo àquele obtido nas oscilografias e preocupantes 66,67 % de sobretensão nas unidades capacitivas restantes. Sabendo-se então que o arco *bypassava* duas unidades capacitivas o próximo passo foi analisar o projeto físico dos bancos para identificar em que posição isto seria possível. O resultado é apresentado na Figura 7. Observar que o ponto de equipotencialização da estrutura superior (número 4, destacado em vermelho) está em desacordo com a norma NBR 5282, segundo a qual quando há duas unidades série em uma plataforma a estrutura deve ser conectada no ponto intermediário. O destaque em azul indica o ponto em que a fase passa mais próxima da estrutura. Da maneira como os bancos estavam montados a diferença de potencial entre a conexão da fase e a estrutura superior era de 31,87 kV. Se a equipotencialização estivesse realizada na ligação intermediária entre as unidades capacitivas a diferença de potencial fase-estrutura seria de 15,93 kV. Observar que os isoladores intermediários estão dimensionados para uma diferença de potencial maior enquanto o isolador superior está subdimensionado, indicando claramente erro de projeto na equipotencialização da estrutura superior.

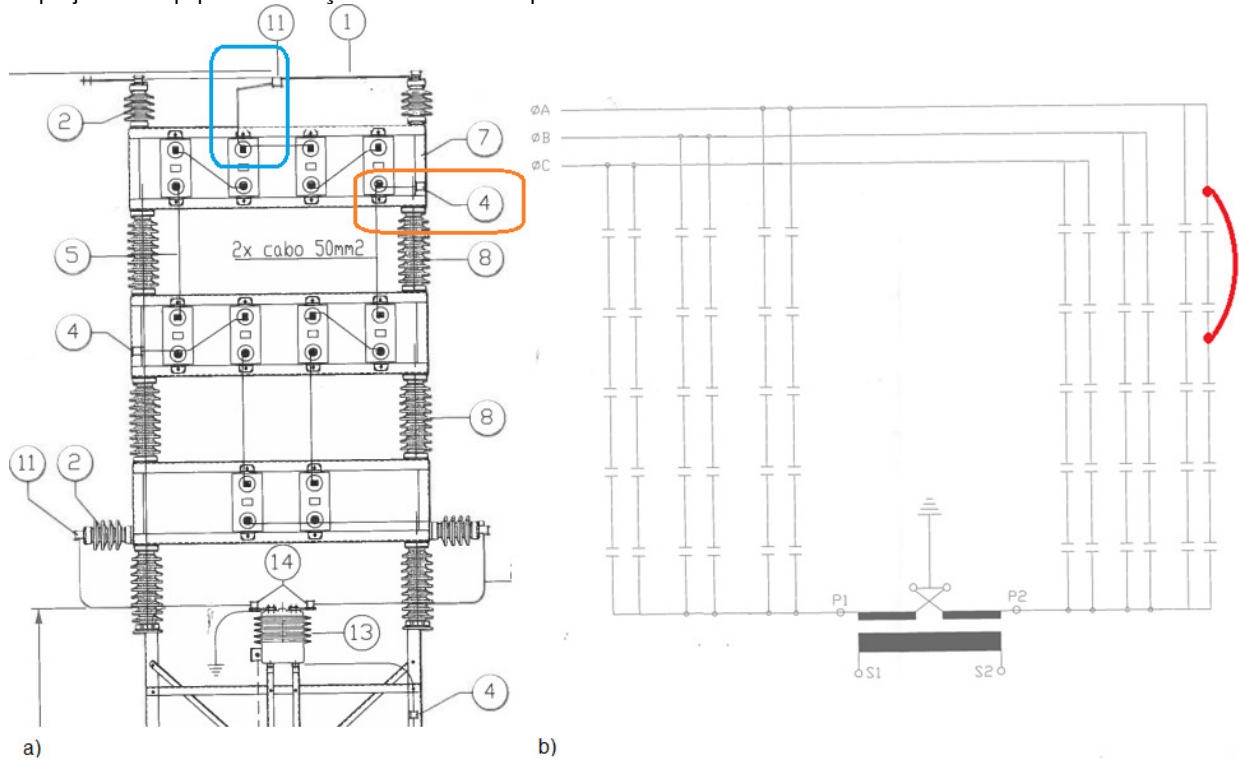


FIGURA 7 – Banco de Capacitores de 138 kV, 30 Mvar. a) Representação de uma fase composta por duas strings em paralelo, cada uma com cinco unidades capacitivas. b) Local elétrico do curto-circuito está destacado em vermelho. Os demais elementos da string ficam submetidos a sobretensão de 66,67 %.

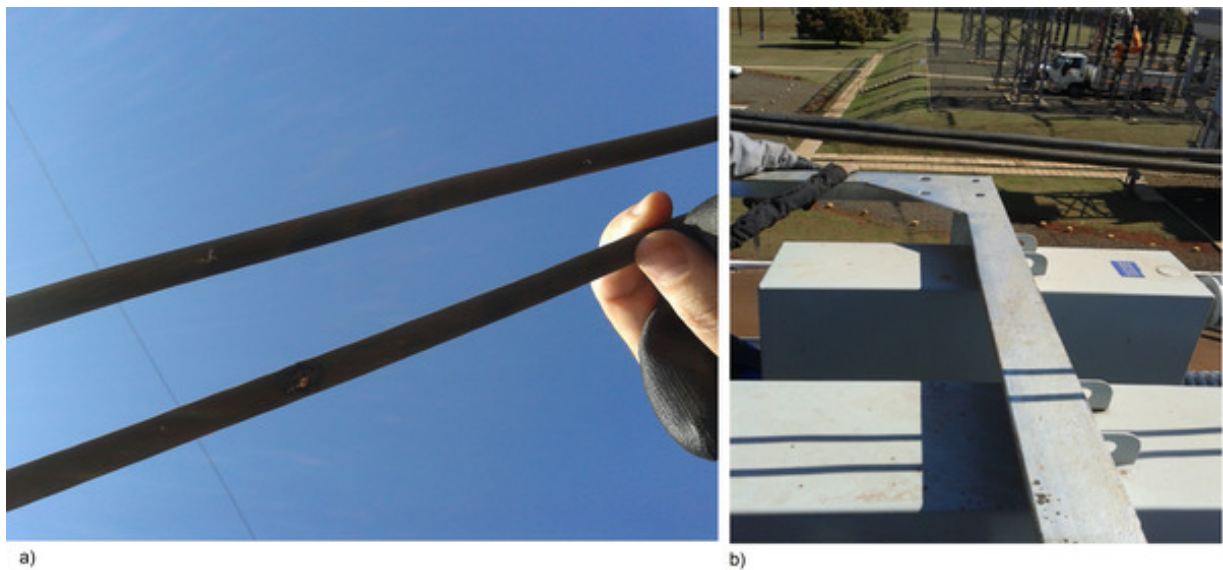


FIGURA 8 – Inspeção no banco de capacitores BC-3 da subestação Londrina. a) Proteção dos cabos rompida. b) Distância entre a fase e a estrutura, a circulação de pássaro neste ponto causou o curto-circuito.

Foi solicitado então um desligamento dos bancos de capacitores BC-3 da subestação Londrina e BC-5 da subestação Maringá para inspeção do ponto destacado em azul na Figura 7a. Como previsto foram encontrados vestígios de arco elétrico na estrutura embaixo do cabo da fase bem como a proteção do cabo da fase estava rompida, como ilustrado na Figura 8a.

2.5 – Providências

2.5.1 Correção de erro de projeto

Foi verificado que todos os bancos de capacitores do fornecimento apresentavam os mesmos problemas, sendo enviado relatório ao fabricante que prontamente reconheceu o erro de projeto e providenciou a alteração do ponto de equipotencialização (destacado em azul na Figura 9). Além disso o mesmo achou prudente aumentar o espaço entre a fase e a estrutura, adaptando um suporte embaixo do isolador superior (destacado em vermelho na Figura 9) e consequentemente afastando o cabo da estrutura.

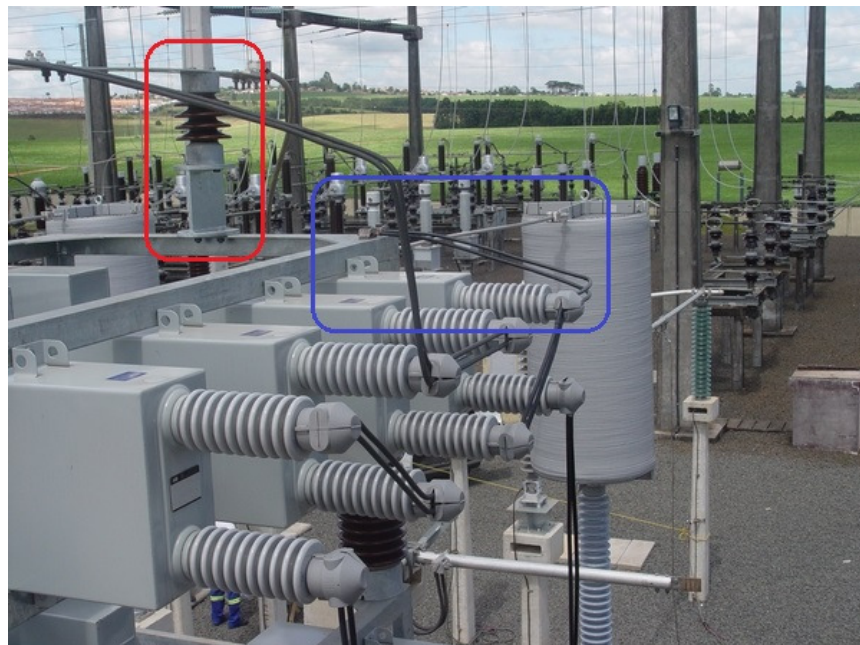


FIGURA 9 – Banco de capacitores 138 kV 30 Mvar da subestação Ponta Grossa Norte após intervenção do fabricante.

2.5.2 Implementação de novo elemento de proteção de sobrecorrente de neutro

A análise das perturbações descritas deixou claro que a proteção de desbalanço (61) não é a proteção ideal para eliminar arco elétrico entre as unidades capacitivas e a estrutura devido ao alto tempo para eliminação do defeito (450 ms), considerando-se que o nível de sobretensão pode chegar a 66,67 % mesmo após a correção do ponto de equipotencialização.

De acordo com o **IEEE Std 1036-2010** (*IEEE Guide for Application of Shunt Power Capacitors*) sobretensões à frequência nominal devem ser inferiores aos limites de tempo estabelecidos na Figura 10 para que não haja dano à unidade capacitiva. Observa-se porém que o dano causado por vários eventos de tempo inferior ao limite da curva é similar ao dano que seria causado por um único evento de tempo total equivalente. No caso do BC-3 da SE Londrina se os dois eventos, de 03/04/2013 (fase A) e 31/08/2013 (fase B), estivessem ocorrido na mesma fase o limiar da curva de danificação da unidade capacitiva teria sido atingido.

Tendo em vista eliminar mais rapidamente qualquer ocorrência que fique caracterizada como arco elétrico em um tempo inferior ao do elemento 61, foi implementado um novo elemento de sobrecorrente de neutro, denominado 61CC, ajustado de acordo com os critérios abaixo:

- Pickup: 90 % da corrente de desbalanço gerada pelo *bypass* de uma unidade capacitiva. Para o caso dos bancos de capacitores de 138 kV, 30 Mvar este ajuste ficou em 7,06 A.
- Tempo: elemento de tempo definido ajustado em 50 ms para garantir que não vai atuar de maneira indevida durante a energização.

Vale observar que o tempo de atuação adotado de 50 ms é conservador, visto que os transitórios de energização não circulam pelo elemento de desbalanço devido à configuração em oposição dos TCs de neutro.

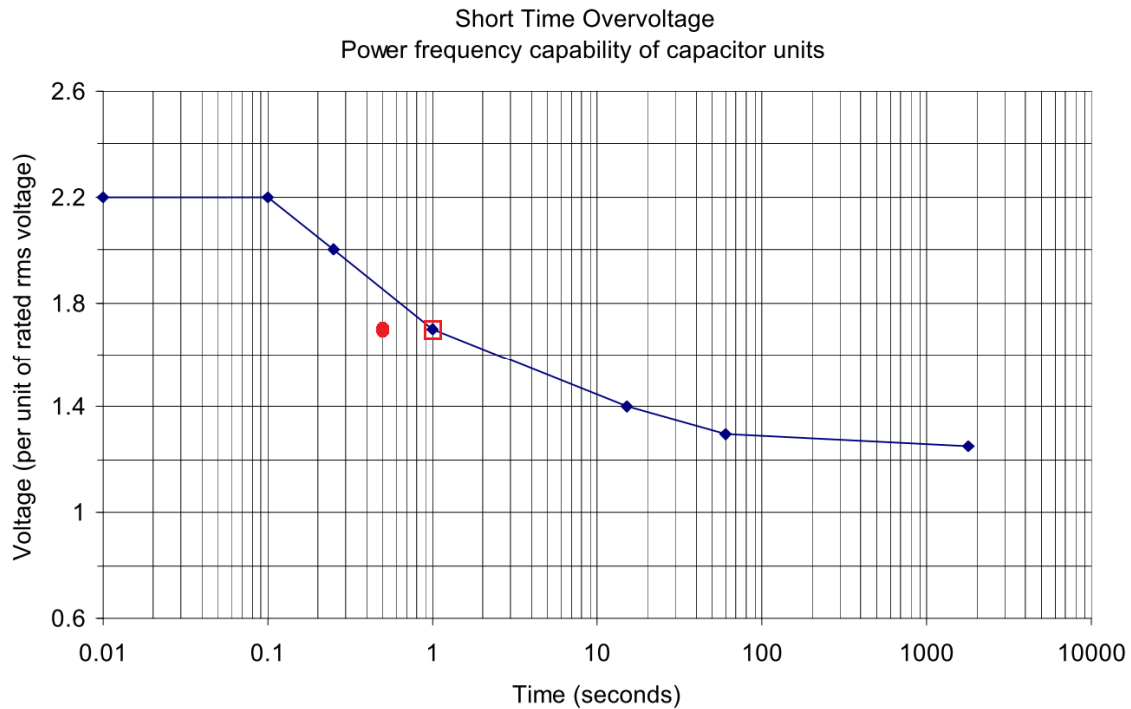


FIGURA 10 – Curva de suportabilidade das unidades capacitivas para sobretensão. O ponto vermelho indica que não houve danos às unidades capacitivas submetidas à sobretensão em decorrência dos desligamentos nos BCs das subestações Londrina e Maringá. Caso as duas ocorrências do BC-3 da SE Londrina envolvessem a mesma fase, o limiar de dano das unidades capacitivas teria sido atingido, indicado pelo quadrado vermelho.

3.0 - CONCLUSÃO

Este trabalho demonstra a importância da análise de ocorrências no sistema elétrico de potência, mesmo para os casos em que a atuação da proteção ocorreu dentro do esperado.

Como consequência direta da análise das ocorrências envolvendo passáros nos bancos de capacitores da COPEL GERAÇÃO E TRANSMISSÃO, tivemos os seguintes desdobramentos:

- 1) Acionamento do fabricante dos equipamentos para correção da equipotencialização das estruturas e aumento das distâncias de segurança entre cabos e estrutura, realizado sem custos, uma vez que ficou demonstrado erro de projeto.
- 2) Bloqueio de novas ocorrências que poderiam causar danos permanentes aos equipamentos.
- 3) Implantação de um terceiro estágio de sobrecorrente de neutro, mais rápido, ajustado para corrente de curto resultante do by-pass de uma unidade capacitiva. Este elemento, denominado 61CC, minimiza a exposição das unidades capacitivas à sobretensões ocasionadas por curto-circuitos entre as unidades capacitivas e a estrutura de sustentação do equipamento.

4.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) IEEE Std 1036-2010. *IEEE Guide for Application of Shunt Power Capacitors*. IEEE-SA Standards Board – USA.
- (2) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Capacitores de potência em derivação para sistema de tensão nominal acima de 1000 V – NBR 5282*. Brasil;
- (3) VOSGERAU, F. F., PUPPI, L. V. S. *Relatório de análise de ocorrências envolvendo bancos de capacitores das subestações LNA e MGA*. Relatório interno - COPEL GERAÇÃO E TRANSMISSÃO S.A. Brasil.

5.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Flávio Ferreira Vosgerau



Natural de Ponta Grossa, PR. Nascido em 26/05/1978.

Formado em 2002 em Engenharia Industrial Elétrica, ênfase Eletrotécnica, pela UTFPR - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, possui Mestrado em Engenharia Elétrica, ênfase Sistemas de Energia Elétrica, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFSC (PPGEEL / UFSC - 2011).

Ingressou em 2002 na COPEL GERAÇÃO E TRANSMISSÃO S.A., sendo que desde 2010 atua na área de proteção do Sistema Elétrico de Geração e Transmissão.

As principais áreas de interesse são proteção do sistema elétrico de potência e modelagem e simulação computacional de sistemas elétricos de potência.

Luiz Vinicius Sequinel Puppi



Natural de Campo Largo, PR. Nascido em 19/10/1964.

Formado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Paraná, turma 1986. Possui especialização em Sistemas Elétricos de Potência pela Universidade Federal de Itajubá.

Atua na área de proteção do Sistema Elétrico de Geração e Transmissão da COPEL GERAÇÃO e TRANSMISSÃO S.A. desde 1987.