



## GRUPO DE ESTUDO DE DESEMPENHO DE SISTEMAS ELÉTRICOS - GDS

### ANÁLISE E MEDIDAS DE MITIGAÇÃO DO ESTUDO DE PEQUENAS CORRENTES INDUTIVAS DOS REATORES DE BARRA DA SE PARNAÍBA III 500 KV DA ARGO

**RAFAEL DE OLIVEIRA FERNANDES\*(1); BEATRIZ DE LIMA TAVARES(1); VICTOR HUGO PARREIRA ROSA(1); MARIA TEREZA CRISTELI SOUZA(2); MATHEUS GARCIA ASSIS(2); RENATO MARQUES DA SILVA RODRIGUES(2)**  
**ARGO ENERGIA(1); TRACTEBEL ENGINEERING LTDA(2)**

#### RESUMO

O objetivo deste trabalho é apresentar a análise do estudo Pequenas Correntes Indutivas (PCI) dos reatores de barra da SE Parnaíba III da Argo e do evento que culminou na avaria do disjuntor de 500 kV. Serão avaliadas as manobras de desenergização de reatores sem dispositivos de chaveamento controlado de abertura ou abertura das fases sãs do reator por atuação de proteção própria, no caso de defeito em uma das fases do sistema, modelado em ferramenta ATP (*Alternative Transient Program*). Por fim, será apresentada a análise de mitigação adotada pelo sistema de proteção e do referido disjuntor de 500kV.

#### PALAVRAS-CHAVE

Pequenas Correntes Indutivas, Reator de Barra, Transitórios Eletromagnéticos, Falha de Disjuntor, Mitigação, ATP/EMTP

#### 1.0 INTRODUÇÃO

Os reatores em derivação têm sido amplamente instalados em linhas de transmissão de alta e extra-alta tensão, com o intuito de realizar a compensação reativa devido ao carregamento capacitivo das linhas. Além disso, esses equipamentos têm sido instalados em barras do sistema elétrico e em terciário de transformadores de potência com o intuito de se realizar o controle de tensão.

O chaveamento de disjuntores na presença de circuitos indutivos pode acarretar o fenômeno de reacendimento de arco quando da presença de tensões de restabelecimento transitórias, as quais são influenciadas pelas oscilações que ocorrem quando o arco é interrompido devido a interação entre a indutância e a capacitância equivalente do circuito [1–4].

Neste trabalho, serão apresentados os resultados de simulação bem como de um caso real de chaveamento de um disjuntor do reator de barra de uma Subestação de 500 kV, de concessão da Argo, cujo evento culminou com a avaria do disjuntor isolado à SF6 devido ao chaveamento com a presença de PCI. A fim de mitigar o problema, foi concebido, como filosofia de proteção de retaguarda, uma condição lógica para a função de proteção de falha de disjuntor no relé de proteção do reator, além de ser proposta uma solução para o referido disjuntor avariado.

#### 2.0 INTERRUPÇÃO DE PEQUENAS CORRENTES INDUTIVAS

O chaveamento de circuitos indutivos pode acarretar sobretensões e/ou sobrecorrentes transitórias. Na Figura 1, tem-se um circuito elétrico representando um indutor  $L_2$  em paralelo com uma capacitância  $C_2$ . Se, por hipótese,  $\omega L \ll 1/\omega C$ , a corrente que circulará pelos polos do disjuntor será, aproximadamente, a corrente que circulará em  $L_2$ .

Dada a Figura 1-a, e considerando-se que a indutância  $L_F$  é menor do que  $L_2$ , e que os contatos do disjuntor irão separar em um instante de tempo  $t$ , antes da sua passagem pelo zero natural da corrente, a corrente que fluirá entre os polos do disjuntor será a corrente através do arco elétrico estabelecido entre os seus contatos [1].

Ao ocorrer a passagem da corrente pelo zero natural, o arco se extinguirá e, dado que o circuito é indutivo, isso ocorrerá quando as tensões  $V_1$  e  $V_2$  estiverem em seus valores máximos.

(\*) Rua Tabapuã, 841, 5º andar – Itaim Bibi, CEP 04538-132, São Paulo SP – Brasil  
Tel.: (+55 11) 3810-8760 – E-mail: rafael.fernandes@argoenergia.com.br

Caso o arco elétrico tenha se extinguido, ocorrerá uma oscilação da tensão  $V_2$  devido a troca de energia entre o capacitor  $C_2$  e o indutor  $L_2$ , cuja frequência de ressonância será dada pelos valores de capacitância e indutância, respectivamente.

Entre os polos do disjuntor haverá uma diferença de tensão, representada pela variável  $\Delta V$ , sendo, neste caso, a tensão de restabelecimento transitória, a qual crescerá rapidamente, como pode ser verificado na Figura 1-b, onde também é possível verificar a condução da corrente pelo arco voltaico. Em [2], destaca-se a não-linearidade do arco elétrico, bem como a sua interação com os fenômenos de chaveamento na presença de PCI, além da estabilidade da interação do arco elétrico com a rede elétrica, uma vez que o fenômeno de corte de corrente, ou interrupção prematura da corrente, ocorre numa região de instabilidade que antecipa a sua passagem por zero. Caso a oscilação seja não amortecida, instável, esta provocará o corte de corrente. Ainda em [2], destaca-se que, normalmente, a região de instabilidade se torna mais crítica com a diminuição da corrente ou com o aumento da resistência de arco.

Na Figura 2-a, dado que a tensão de restabelecimento transitória é aplicada entre os polos do disjuntor, caso o arco elétrico tenha se extinguido, poderá ocorrer o fenômeno de reacendimento do arco, assim, caso ocorra a reignição, a tensão na carga, representada na Figura 1-a pela variável  $V_2$ , tentará “assumir” a tensão na fonte  $V_1$ . Devido a interação entre a capacitância  $C_1$  e a indutância  $L_1$ , do lado da fonte, haverá a circulação de correntes oscilatórias cuja frequência de oscilação será dada pela ressonância entre a capacitância e a indutância.

Desta forma, a tensão na carga poderá assumir valores maiores do que  $V_1$ . Ainda na Figura 2-a, e considerando-se que a corrente de arco cruza o zero no instante de tempo  $t_1$ , ela poderá, novamente, se extinguir e a tensão de restabelecimento será, mais uma vez, determinada pela interação entre  $L_2$  e  $C_2$ . Este processo pode se repetir por várias vezes, tendo-se várias reignições, resultando em um aumento significativo da tensão  $V_2$  [1].

Na Figura 2-b, tem-se o fenômeno de corte de corrente, o qual poderá levar ao aumento da tensão  $\Delta V$  e, com isso, ao aumento da tensão de restabelecimento transitória do disjuntor, atingindo-se valores elevados. Entre os pontos 1 e 2, tem-se o período entre o corte de corrente e a passagem natural pelo zero de corrente. Neste intervalo, poderá surgir uma tensão em forma de “dente de serra”, que levará a tensão  $V_2$  a aumentar até o seu valor máximo. Já no ponto 3, tem-se a extinção do arco elétrico, contudo, devido às repetidas reignições, a tensão neste instante de tempo ainda permanece alta, e vai diminuindo gradualmente[1].

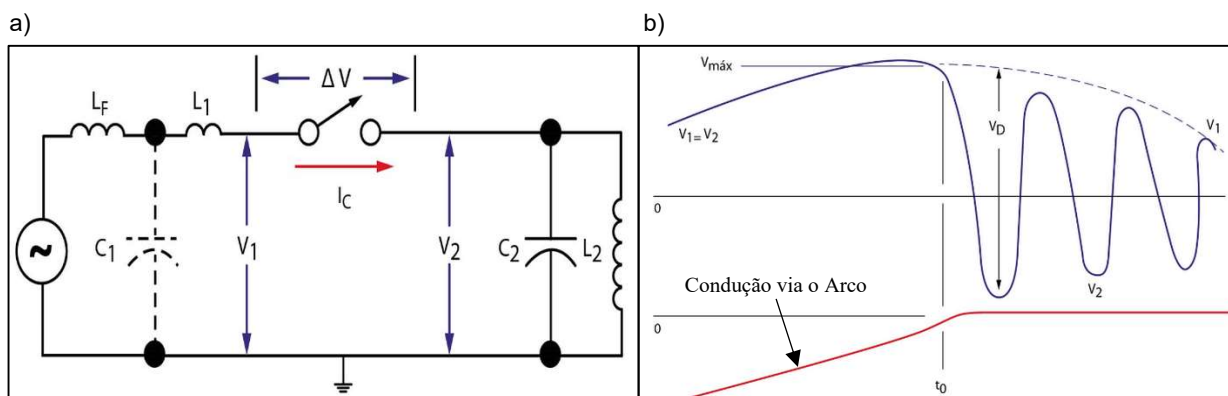


Figura 1 – a) Circuito Elétrico – Caso Exemplo, b) Condução de Corrente via o Arco. Fonte: Adaptado de [1]

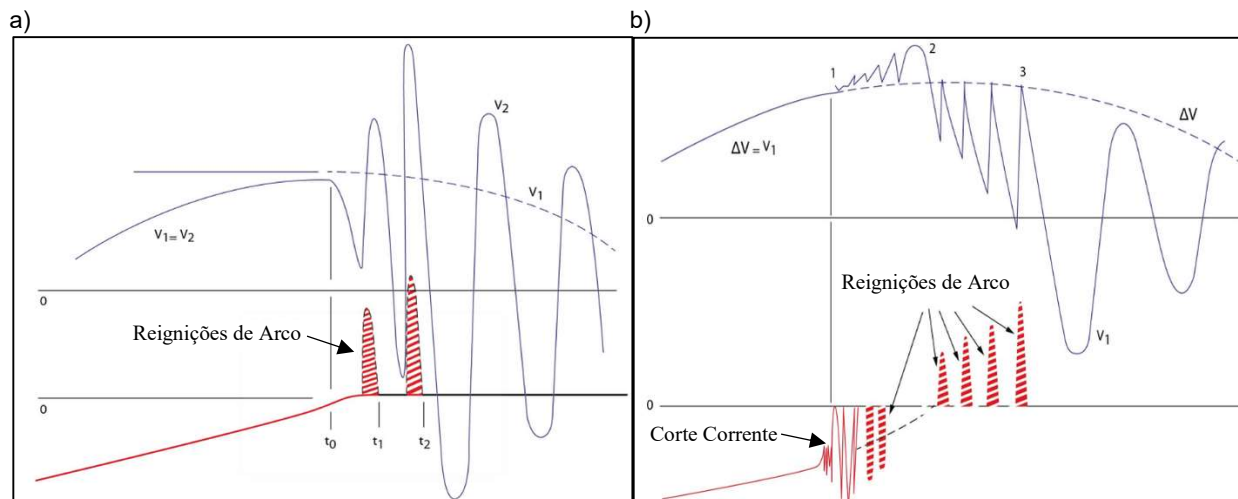


Figura 2 – a) Fenômeno de Reignição de Arco, b) Fenômeno de Corte de Corrente. Fonte: Adaptado de [1]  
3.0 ANÁLISE DO CASO REAL – REIGNIÇÃO DE ARCO E TENSÃO DE RESTABELECIMENTO TRANSITÓRIA

No dia 31/12/2019, às 06:47:11.515h, ocorreu o desligamento automático da LT 500 kV Parnaíba III / Bacabeira C1, ocasionando a abertura dos disjuntores 7DJE-10 e 7DJE-30 da SE Parnaíba III e 7DJA-10 e 7DJA-30 da SE Bacabeira, cujos disjuntores estão identificados na Figura 3. Houve um curto-circuito monofásico na linha, envolvendo a fase V (vermelha), causada pelo fenômeno de *flashover* devido à poluição dos isoladores da seccionadora 7SDE-30.

A falha foi eliminada em 66,2 ms pelas atuações das proteções principal e alternada de distância (21N) e diferencial de linha (87L), associados ao esquema de transferência de disparo por sobrealcançe (POTT), em ambos terminas da LT 500 kV Parnaíba III / Bacabeira C1.

Após a abertura do disjuntor 7DJE-30 houve novamente a condução de corrente elétrica da fase B (branca) com magnitude aproximada de 180 A rms – conforme pode ser observado na Figura 4. Esta corrente permaneceu por, aproximadamente, 20s até a ocorrência da avaria do referido disjuntor. Não houve atuação da proteção “*end fault*” e falha disjuntor (50/62BF), uma vez que o nível de corrente elétrica não atingiu os níveis mínimos para a sensibilização de *pickup* da função de proteção.

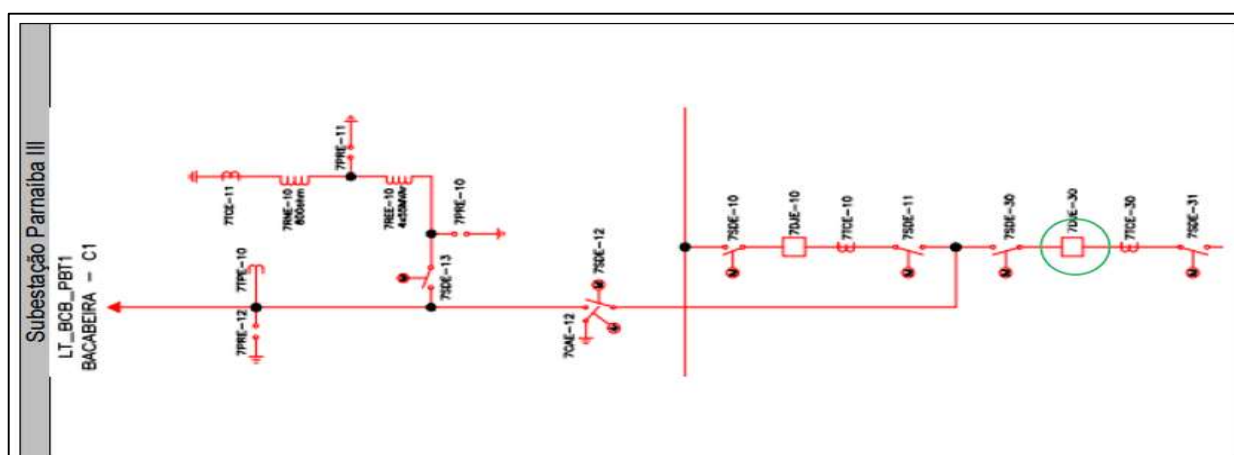


Figura 3 – Desenho Unifilar SE Parnaíba III. Fonte: Argo

### 3.1 OSILOGRAFIAS DE REGISTRO DA PERTURBAÇÃO

Na Figura 4, tem-se a oscilografia do evento real contendo os sinais de corrente e de tensão da LT de Parnaíba III para Bacabeira-C1. É possível observar o reacendimento da corrente, com valor de pico atingindo 2,13 kA. A tensão de restabelecimento atinge o valor de 1012 kV de pico (fase-fase).

Interessante notar que após o reatendimento de arco, há uma corrente, em torno de 180 A rms na fase B (branca), que permanece por, aproximadamente, 20s até ocorrer a avaria do disjuntor desta LT. Já na Figura 5, verifica-se os sucessivos reacendimentos de corrente na fase B e na fase C do disjuntor, bem como é possível verificar o instante do curto-circuito na fase B, o qual levou o disjuntor para um estado de avaria.

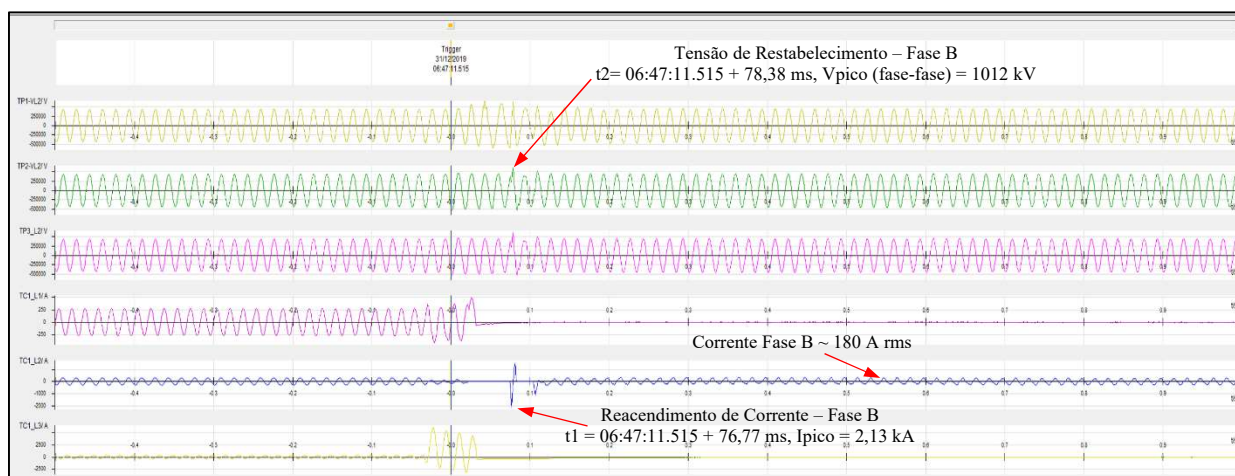


Figura 4 – Oscilografia Sinais de Corrente e Tensão – Primeiro Reacendimento de Corrente

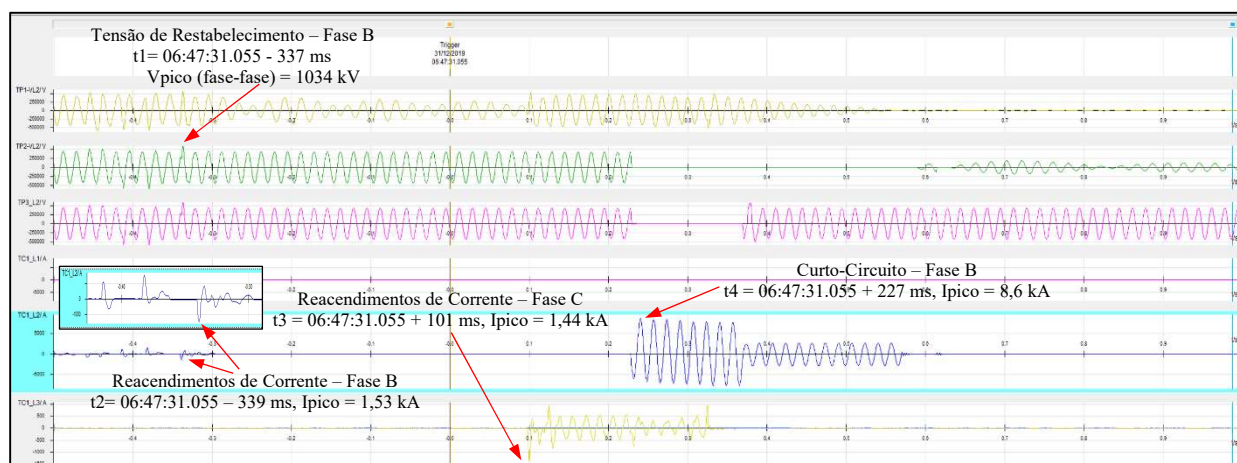


Figura 5 – Oscilografia Sinais de Corrente e Tensão – Reacendimentos de Corrente e Trip Fase B

#### 4.0 SIMULAÇÕES EM AMBIENTE ATP

Para as simulações em ambiente ATP [5], além da modelagem do reator e do disjuntor, objetos da análise de PCI, a rede de transmissão próxima à subestação (SE) de Parnaíba III também foi modelada. Devido à complexidade do fenômeno, a interação dos equipamentos da subestação com a rede também contribui para os resultados encontrados. Dessa forma, uma atenção especial foi dada à modelagem de elementos próximos à subestação que fossem relevantes para o fenômeno, tais como a representação dos reatores de neutro das linhas conectadas à SE.

No ATP foi modelada a rede ao menos até a terceira barra de distância da SE Parnaíba III 500 kV. Os principais componentes e equivalentes foram modelados no ATP, considerando-se:

- Modelo de parâmetros distribuídos das linhas de transmissão, exceto para linhas abaixo de 3 km e algumas das quais se dispunha somente dos parâmetros do modelo de curto-circuito, onde se utilizou o modelo PI;
- Modelo saturável para os transformadores, com respectivas curvas de saturação;
- Modelo de geradores: Fonte de tensão senoidal tipo 14;
- Modelos 51, 52, 53, circuitos RL acoplados, para os equivalentes de curto-circuito.

Foram considerados 61 circuitos de linha de transmissão, 33 transformadores e autotransformadores, 19 equivalentes próprios e 13 de transferência. Os equivalentes foram extraídos da base de dados de curto-circuito mensal do ONS, relativo a junho de 2020. No modelo, também foram representados 39 reatores de linha, sendo 11 deles com seus respectivos reatores de neutro, e 13 reatores de barra. Para os reatores foi considerado  $X/R = 100$ ,

de forma a atribuir ao sistema um amortecimento mais próximo ao comportamento real. Foram modelados 2 bancos capacitores shunt e 8 bancos capacitores série, próximos à região em análise, e as cargas também foram modeladas de acordo com a base de dados de fluxo de potência disponibilizada pelo ONS. Nas simulações, foram representados os para-raios associados ao reator de barra manobrado na análise de PCI, sendo sua curva modelada a partir do ponto de MCOV, em um total de 9 pontos de pares corrente/tensão. Todos os valores empregados na modelagem desses elementos são apresentados em [6]. Para validação da modelagem, foram comparados os níveis de curto-circuito na barra de Parnaíba III 500 kV e nas barras próximas com os níveis da base de curto-circuito do ONS.

Na SE Parnaíba III, os dois vãos dos reatores de barra e dos disjuntores em análise foram modelados de forma trifásica. Foram considerados os trechos de barramentos desde a barra da subestação até o reator de barra, conforme altura, comprimento e cabos instalados na SE. Os equipamentos do vão foram modelados por meio de suas capacitâncias parasitas, de acordo com [7]. Para o disjuntor analisado, foram consideradas capacitâncias parasitas de 25 pF por câmara, sendo o equipamento composto por duas câmaras, e capacitância parasita para a terra de 15 pF, dados obtidos com o fabricante do equipamento. Para o reator analisado, foi considerada capacitância parasita no valor de 3592 pF, monofásico, além da resistência do equipamento a 60 Hz, de acordo com o ensaio FRA dos reatores. Complementarmente, no instante de abertura do disjuntor, foi adicionado ao modelo do equipamento o valor da resistência do reator em sua frequência natural (aproximadamente 1 kHz), de forma a reproduzir o amortecimento registrado em oscilografias de teste. A atenção em relação às capacitâncias parasitas dos diversos equipamentos modelados no ATP, as quais, normalmente, não são representadas nos estudos, foi devida a sua influência significativa nos resultados, associados à componentes de frequências elevadas. A Figura 6 apresenta a representação dos vãos dos reatores de barra da SE Parnaíba III no ATP.

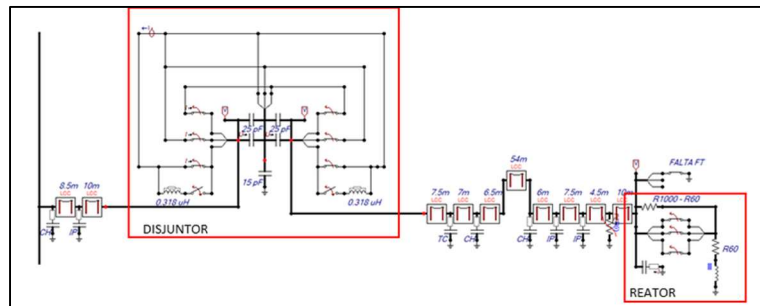


Figura 6 – Modelagem de um dos vãos de reator de barra da SE Parnaíba III 500 kV no software ATP

Nas simulações desenvolvidas, foram avaliadas diferentes condições do disjuntor manobrado. A pressão das câmaras foi variada entre os valores de 0,95 MPa e 0,70 MPa, sendo que para cada condição de pressão o valor da corrente de corte de cada fase foi calculada conforme os dados fornecidos pelo fabricante do equipamento. Para as simulações do disjuntor com pressão de 0,8 MPa e 0,7 MPa, respectivamente, uma capacitância paralela ao disjuntor, no valor total de 800 pF, foi considerada, representando o capacitor de equalização. As envoltórias do disjuntor, que se iniciam a partir do instante da separação dos contatos, adicionado ao tempo de arco de falha térmica, foram obtidas no ensaio tipo Kema 522-06. O Switching Impulse Withstand Level (SIWL) do disjuntor, sem a presença de anéis anti-corona é 1350 kV. Na presença dos anéis, o SIWL é igual a 1500 kV. De acordo com [8], é recomendado que a TRT seja limitada à 80% do SIWL. Desta forma, os valores limites empregados como referências nesse estudo são correspondentes ao limite de 80%.

Na ausência da curva que representasse adequadamente a variação da resistência de arco com o tempo após a abertura dos contatos do disjuntor, frente ao fenômeno de PCI, optou-se por avaliar o cenário mais conservador, com resistência de arco nula. De modo a realizar uma análise de sensibilidade dessa consideração, os piores casos de sobretensão transitória obtidos na avaliação da abertura do disjuntor com resistência de arco nula foram reprocessados considerando resistências de arco nos valores de 1  $\Omega$ , 3 k $\Omega$  e 10 k $\Omega$ .

No estudo de ocorrência de reignição após o corte de PCI, o disjuntor é aberto em um tempo  $t = 11$  ms, considerando a diferença no tempo de abertura entre câmaras de 1 ms e uma corrente de corte calculada conforme a condição de pressão e presença ou não de capacitor de equalização do caso em análise. O arco se inicia a partir da abertura do disjuntor e tem duração de acordo com os valores de tempo de arco mínimo calculados para cada fase. A reignição acontece no tempo em que a tensão da primeira fase aberta pelo disjuntor ultrapassa a envoltória, sendo que a abertura da fase em questão ocorre na próxima passagem da corrente pelo zero. São considerados cenários sem e com a presença de falta monofásica aplicada no reator associado ao disjuntor. A configuração da rede em análise corresponde ao cenário da perda da LT 500 kV Parnaíba III – Bacabeira C1. As análises realizadas contam com a indisponibilidade de um dos bancos de reatores da SE Parnaíba III 500 kV e com ambos em operação. O tempo de simulação e o passo de integração utilizados no ATP foram de 50 ms e 1  $\mu$ s, respectivamente.



Foram monitoradas a TRT máxima entre os terminais do disjuntor, a porcentagem desse valor em relação ao SIWL sem e com a presença de anéis anti-corona (AAC), a razão entre os picos de TRT entre os terminais de cada câmara do disjuntor e a máxima energia dissipada no para-raios do reator manobrado. Os resultados obtidos na análise com resistência de arco nula são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Resultados referentes à reignição após corte de pequenas correntes indutivas – SE Parnaíba III 500 kV – Análise sem resistência de arco

Caso	Local	Manobra	Configuração da Rede	Capacitor de Equalização	Pressão (MPa)	Presença de Falta	Fase	kV <sub>pico</sub>	TRT Máxima		Razão entre picos de TRT*	Energia no Para-raios (kJ)
									% do Valor de Referência			
									80% do SIWL s/ AAC	80% do SIWL c/ AAC		
1	Parnaíba III	1º reator de barra (2º reator desligado)	Sem a LT 500 kV Parnaíba III - Bacabeira C1	Não	0,95	Não	C	1077,1	-0,27%	-10,2%	0,883	0,207
2						Sim	C	1118,2	3,54%	-6,82%	0,839	0,027
3						Não	C	1052,0	-2,59%	-12,3%	0,903	0,109
4						Sim	C	1096,4	1,52%	-8,63%	0,853	0,024
5				Sim	0,80	Não	C	986,54	-8,65%	-17,8%	0,986	0,020
6						Sim	C	1019,2	-5,63%	-15,1%	0,987	0,016
7						Não	C	972,56	-9,95%	-19,0%	0,987	0,019
8						Sim	C	1005,4	-6,91%	-16,2%	0,987	0,015
9		2º reator de barra (1º reator ligado)	Sem a LT 500 kV Parnaíba III - Bacabeira C1	Não	0,95	Não	C	1075,0	-0,46%	-10,4%	0,885	0,195
10						Sim	C	1140,6	5,61%	-4,95%	0,843	0,025
11						Não	C	1052,8	-2,52%	-12,3%	0,903	0,108
12						Sim	C	1118,1	3,53%	-6,83%	0,856	0,023
13				Sim	0,80	Não	C	989,84	-8,35%	-17,5%	0,986	0,020
14						Sim	C	1042,3	-3,49%	-13,1%	0,988	0,016
15						Não	C	979,15	-9,34%	-18,4%	0,987	0,019
16						Sim	C	1029,8	-4,65%	-14,2%	0,988	0,016
* $V_{pico}$ (Câmara 1) / $V_{pico}$ (Câmara 2)												

\*  $V_{pico} (Câmara 1) / V_{pico} (Câmara 2)$

A ocorrência de reignição após a abertura com corte de PCI, considerando a indisponibilidade de um dos reatores de barra, indicou um valor máximo de 1118,2 kV de sobretensão entre os terminais do disjuntor. Na manobra do reator de barra considerando os dois reatores em operação a maior TRT encontrada foi de 1140,6 kV, estando esse valor 5,61% acima do limite da envoltória do equipamento sem a presença de anéis anti-corona. A Figura 7-a apresenta as tensões entre os polos do disjuntor do reator de barra de Parnaíba III 500 kV para o caso 2. A Figura 7-b apresenta o resultado para o caso 10.

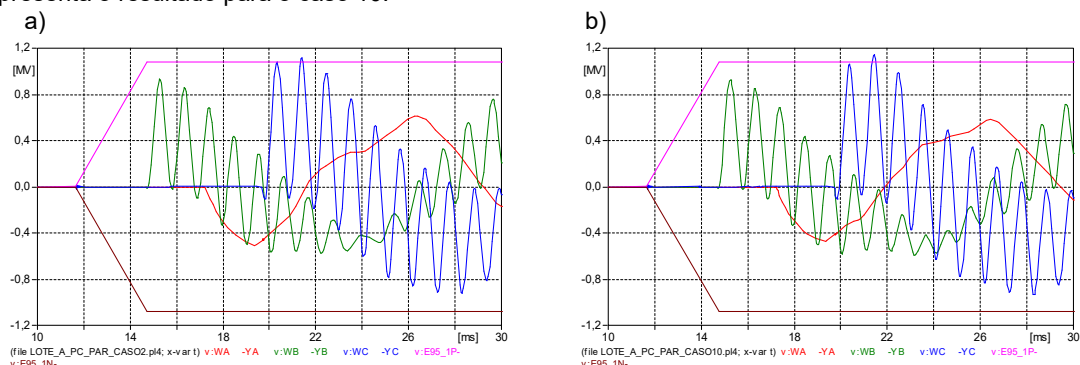


Figura 7 – Tensões entre polos do disjuntor do reator de barra de Parnaíba III 500 kV – Envoltória do disjuntor sem anéis anti-corona. (a) Resultado do caso 2. (b) Resultado do caso 10

A análise de sensibilidade da resistência de arco é apresentada na Tabela 2. Foram reavaliados os casos 2 e 10 da Tabela 01, correspondentes às maiores TRTs encontradas com um e com dois reatores de barra na SE Parnaíba III, respectivamente. Como é possível observar, com o aumento da resistência de arco há uma tendência de redução da máxima TRT encontrada.

Tabela 2 – Resultados referentes à reignição após corte de pequenas correntes indutivas – SE Parnaíba III 500 kV – Análise com resistência de arco

Caso*	Local	Manobra	Configuração da Rede	Capacitor de Equalização	Pressão (MPa)	Presença de Falta	Resistência de arco ( $\Omega$ )	TRT Máxima		Energia no Para-raios (kJ)
								Fase	kV <sub>pico</sub>	
2	Parnaíba III	1º reator de barra (2º reator desligado)	Sem a LT 500 kV Parnaíba III - Bacabeira C1	Não	0,95	Sim	1	C	945,73	0,016
							3000	C	932,84	0,012
							10000	C	929,25	0,012
10		2º reator de barra (1º reator ligado)	Sem a LT 500 kV Parnaíba III - Bacabeira C1	Não	0,95	Sim	1	C	967,53	0,016
							3000	C	921,09	0,012
							10000	C	928,84	0,012
*Referente aos resultados de reignição após corte de PCI da SE Parnaíba III sem a presença da resistência de arco										

As análises indicam que a utilização de capacitor de equalização nos disjuntores, bem como a redução da pressão das câmaras é benéfica para o equipamento no ponto de vista da TRT. Nessas configurações, os valores obtidos para a máxima TRT são reduzidos e, mais especificamente para os casos em que capacitores de equalização foram empregados, observou-se melhor distribuição de tensão entre as câmaras do equipamento. Além disso, os máximos valores de TRT obtidos violam o limite da suportabilidade do equipamento na ausência de anéis anti-corona. Considerando a presença dos anéis, obtém-se uma margem em relação à suportabilidade do equipamento de 4,95%. Portanto, os resultados indicam que essas medidas podem ser adotadas na mitigação das sobretensões impostas ao disjuntor frente à PCI.

## 5.0 MEDIDAS DE MITIGAÇÃO ADOTADAS

Como forma de solução de mitigação do problema adotou-se duas estratégias, a primeira como sendo a implementação de uma lógica de proteção de retaguarda de falha de disjuntor e a segunda como sendo a instalação de anéis anti-corona dos disjuntores dos reatores, bem como foi realizada a troca também dos anéis anti-corona dos disjuntores das LT, como ação de *retrofit*.

### 5.1 Troca dos Anéis Anti-Corona

Na Figura 8, tem-se a indicação das bicamaras dos disjuntores de 500 kV e os respectivos anéis anti-corona. Desta forma, espera-se que, com a instalação dos respectivos anéis, o fenômeno de restabelecimento da tensão transitória seja minimizado, quando da presença de chaveamento de PCI.



Figura 8 – Instalação em Campo dos Anéis Anti-Corona nos Disjuntores Bicamaras de 500 kV

## 5.2 Implementação de Lógica de Proteção de Retaguarda

Com o intuito de se garantir confiabilidade para a atuação da proteção de falha de disjuntor e “*end-fault*”, quando da presença de correntes de baixas magnitudes, implementou-se uma lógica de proteção de retaguarda no relé de proteção, de fase segregada, utilizando-se um componente de medição de corrente com a sensibilidade mínima de medição de corrente primária de até 100 A. A temporização utilizada foi de 600 ms. O intertravamento para a liberação da condição lógica levou-se em conta a informação do contato auxiliar do disjuntor e da posição das chaves seccionadoras isoladoras do disjuntor, a fim de evitar-se qualquer atuação indevida no caso do vão estar isolado. Os resultados dos ensaios realizados em bancada, utilizando-se o arquivo comtrade da perturbação real, de acordo com o que foi exposto nas Figuras 4 e 5, foram satisfatórios [9]. Na Figura 9, tem-se uma parte da implementação do bloco de medição de alta sensibilidade, bem como da lógica e intertravamento para a função de falha de disjuntor.

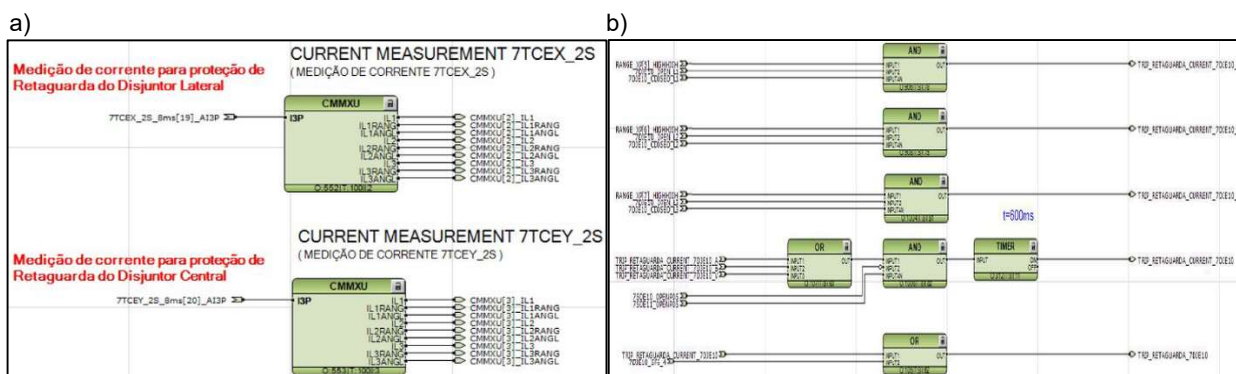


Figura 9 - a) Blocos de Medição de Corrente, b) Condição Lógica da Proteção de Retaguarda Implementada

## 6.0 ANÁLISE DOS REQUISITOS TÉCNICOS MÍNIMOS – EDITAIS DE LEILÃO

A ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), por meio da Audiência Pública nº 020/2015 [10], iniciou o processo de obtenção de subsídios para aprimoramento dos Procedimentos de Rede do ONS vigentes à época (rev.2.0). Após



o cumprimento de todo o rito regulatório, que incluiu a publicação da Resolução Normativa nº 756/2016 [11], os documentos revisados, em suas versões 2016.12, foram publicados pelo Operador.

Destaca-se como ponto importante na alteração desse regulamento, o fato de que, no Submódulo 2.3 – Requisitos Mínimos para Subestações e seus Equipamentos [12], [13], tenha sido inserida a adoção de critério de padronização, como estabelecimento de capacidades mínimas para os equipamentos em função da sua classe de tensão.

É fato que tal padronização trouxe benefícios para os fabricantes e para as concessionárias, principalmente face aos ganhos em escala, otimização de estoques e sobressalentes, além do ganho para o consumidor final, haja visto o consequente impacto na tarifa que preserva o princípio da modicidade tarifária. Contudo, principalmente no que se refere à especificação do transformador de corrente, percebe-se que em diversos casos os equipamentos colocados em operação encontram-se sobredimensionados.

Isso ocorre devido à necessidade de atender todos os requisitos necessários na citada revisão dos Procedimentos de Rede, como o sistema de proteção, de medição para faturamento e de supervisão e controle para a operação, além da necessidade da não limitação por capacidade do empreendimento que se encontra em implantação, considerando um horizonte de longo prazo dentro do contrato de concessão. Não obstante as vantagens citadas, há a necessidade de ressaltar que tal sobredimensionamento pode comprometer os ajustes do sistema de proteção.

Ao analisar situações como a exposta neste trabalho, constata-se que o baixo carregamento do sistema associado a um sobredimensionamento do TC (Transformador de Corrente) – pelo menos para as condições de operação em curto prazo, e consequente limitação dos ajustes mínimos dos IEDs (*Intelligent Electronic Device*), impedem que correntes que variem em menos de 5% em relação à corrente nominal do TC sensibilizem a proteção.

Em termos práticos, a corrente circulante na ocasião do sinistro do disjuntor da SE Parnaíba III (180 A) não foi suficiente ocasionar o pick-up das funções de proteção. Assim, entende-se que embora haja vantagens na padronização de equipamentos por níveis de tensão, há de se considerar que algumas situações possam ter a necessidade de especificação de equipamentos com valores inferiores ao mínimo colocado nos Procedimentos de Rede e, consequentemente, nos editais de transmissão. Pondera-se que a adoção de padrões mais flexíveis na especificação de equipamentos, quando necessário, não impede que se tenha uma solução longa, mas possibilita que a solução possa preservar também aspectos igualmente importantes, como as condições de operação com maior segurança para pessoas, transmissoras e para o SIN.

## 7.0 CONCLUSÕES

Por meio da análise dos resultados obtidos nas simulações no ATP, constatou-se que as medidas mitigadoras tais como a redução da pressão das câmaras, a utilização de capacitor de equalização nos disjuntores e a adoção de anéis anti-corona no equipamento, são benéficas para a adequada operação dos disjuntores frente ao fenômeno de PCI. Em especial, a adoção de anéis anti-corona eleva a suportabilidade do equipamento de forma a garantir maior margem em relação aos valores de TRT obtidos.

As ações adotadas no sistema de proteção, a fim de sensibilizar a função de proteção de falha de disjuntor exigiu uma etapa minuciosa de análise pelas equipes de operação e de manutenção da empresa e, posteriormente, de testes em bancada para a validação da solução proposta. A utilização do arquivo comtrade da falta, na fase de testes, validou a proposta apresentada, sendo então implementada em campo. No entanto, a padronização de equipamentos, apesar de ter trazido benefícios e ganhos de escala aos agentes de transmissão, tende, em alguns casos, sobredimensionar o seu uso em campo.

Por fim, este trabalho também demonstrou a necessidade de se adequar o instrumento de medição em campo com os limiares de ajustes mínimos de sensibilização das funções de proteção elétrica, sendo de extrema importância essa investigação na fase de concepção inicial do projeto.

## 8.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] A. D'Ajuz, C.Fonseca, F.Carvalho, J.Filho, L.Dias, M.Pereira, P.Esmeraldo, R.Vaisman, S.Frontin "Transitórios Elétricos e Coordenação de Isolamento – Aplicação em Sistemas de Potência de Alta Tensão". Furnas, 1987.

[2] L.Zanetta "Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência". Edusp, 2003.

[3] S.Young, X.Tianxi, L.Yang, Z.Zhicheng, T.Fengbo “Analysis and Characterization of the Shunt Reactor Switching Over-voltages Interrupted by SF6 Circuit Breakers with Chopping Current”, International Conference on Power System Technology (POWERCON), 2014.

[4] D.Peelo, E. Ruoss “A new IEEE Application Guide for Shunt Reactor Switching. IEEE Transaction on Power Delivery, 1996, 11(2): 881-887.

[5] Eletromagnetic Transient Program (EMTP), Theory Book, July, 1994.

[6] Relatório Técnico Argo – Documento ARGO-1-PC-LTA-ES-G001, Edital de Leilão Nº 013/2015 – 1ª Etapa – Lote A – SEs 500 kV Bacabeira, Parnaíba III, Acaraú III e Tianguá II – Estudo de Pequenas Correntes, 2020.

[7] Modeling Guidelines for Fast Front Transients; IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, Janeiro de 1996.

[8] IEEE Std C37.015-2017 – IEEE Guide for the Application of Shunt Reactor Switching.

[9] Relatório Técnico Argo – Documento ARG1-7-PC-GER-RE-P001, Implementação de Lógica de Proteção de Retaguarda, 2020.

[10] ANEEL. Audiência Pública nº 20/2015.

[11] ANEEL. Resolução Normativa nº 756, de 16 de dezembro de 2016.

[12] ONS. Submódulo 2.3 dos Procedimentos de Rede Rev.2.0, de 09 nov. de 2011. Requisitos mínimos para transformadores e para subestações e seus equipamentos. [S. l.], 11 nov. 2011. Disponível em: [http://www.ons.org.br/%2FProcedimentosDeRede%2FM%C3%B3dulo%202%2FSubm%C3%B3dulo%202.3%2FSu%202.3\\_Rev\\_2.0.pdf](http://www.ons.org.br/%2FProcedimentosDeRede%2FM%C3%B3dulo%202%2FSubm%C3%B3dulo%202.3%2FSu%202.3_Rev_2.0.pdf). Acesso em: 1 out. 2021.

[13] ONS. Submódulo 2.3 dos Procedimentos de Rede Rev.2016.12, de 16 dez. de 2011. Requisitos mínimos para transformadores e para subestações e seus equipamentos. [S. l.], 01 jan. 2017. Disponível em: <http://www.ons.org.br/%2FProcedimentosDeRede%2FM%C3%B3dulo%202%2FSubm%C3%B3dulo%202.3%2FSu%202.3.pdf>. Acesso em: 1 out. 2021.

## DADOS BIOGRÁFICOS



Rafael de Oliveira Fernandes, graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) no ano de 2001, com mestrado na área de Estabilidade Transitória com PMU pela Unicamp no ano de 2019. Atualmente é doutorando na Unicamp na área de Transitórios Eletromagnéticos. É Engenheiro de Proteção e Controle na Argo Energia. Membro Individual do Cigré-B5 e Membro Correspondente do WGB5.62, WGC2.18 e WGC4.62 do Cigre. É Coordenador no Brasil do Cobei junto à IEC – CE03.TC95-MT04 (Funções de Proteção e Guias de Aplicação).

(2) Beatriz de Lima Tavares, graduada em Engenharia Elétrica pela PUC Minas, possui Especialização em Engenharia de Segurança do Trabalho pela PUC Minas, Mestre em Sistemas de Potência pela UNICAMP e Doutoranda na mesma área pela USP São Carlos. Atua há 13 anos no setor de energia, com experiência em planejamento da expansão, regulação, operação e manutenção. Ocupa atualmente o cargo de Gerente de Expansão na ARGO Transmissão de Energia.

(3) Victor Hugo Parreira Rosa, graduado em Engenharia Elétrica – ênfase em Eletrotécnica, pela Universidade de Uberaba. Atualmente é Coordenador de O&M na Argo Energia.

(4) Maria Tereza Cristeli Souza, graduada em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG no ano de 2017. Atualmente, é mestranda na UFMG e trabalha na Tractebel Engineering desde o ano de 2017.

(5) Matheus Garcia Assis, graduando em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG. Atualmente trabalha na Tractebel Engineering, desde o ano de 2020.

(6) Renato Marques da Silva Rodrigues, graduado em Engenharia Elétrica pela Pontifícia Universidade de Minas Gerais no ano de 2013. Possui Especialização em Sistemas Elétricos de Potência no ano de 2015 Mestrado no ano

de 2021, ambos concluídos pela Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG. Atualmente trabalha na Tractebel Engineering desde o ano de 2011.