

Análise dos Impactos Provenientes da Instalação de Bancos de Capacitores na Fronteira com a Rede Básica

**Camilla P. Nakanami*. Benedito Donizeti Bonatto. *
Maurício Campos Passaro***

**Institute of Electrical Systems and Energy, Federal University Itajubá, MG,
Brazil (e-mail: d33115@unifei.edu.br, bonatto@unifei.edu.br, mcp@unifei.edu.br).*

Abstract: The continuous verification of performance indicators and the minimum technical requirements required by the regulation of the electricity sector aim to list conditions that may affect the operation of the electric power system and the performance of its equipment. The power factor, although monitored in steady state, provides an increase in electromagnetic transients in that system due to the switching of capacitor banks with the objective of providing adequacy of its value range. In this way, it is proposed to determine a range of capacitive reactive power values that allow not exceeding the reference values assigned to the steady state voltage of the power system, to the energizing transients of the shunt capacitor banks and the transient recovery voltage in the circuit breakers adjacent to the busbar at 138 kV from the secondary of 2 basic network transformers at voltages of 440kV and 500 kV. The analyzes involved 2 load level scenarios. In view of the model used and the conditions simulated in ATPdraw computer program, the capacitor banks of 20 MVar, 40 MVar and 60 MVar allowed to achieve the proposed objectives.

Resumo: A verificação contínua dos indicadores de desempenho e dos requisitos técnicos mínimos exigidos pela regulamentação do setor elétrico vislumbra elencar condições que possam afetar a operação do sistema elétrico de potência e o desempenho dos seus equipamentos. O fator de potência, apesar de ser um indicador monitorado em regime permanente, propicia o aumento de transitórios eletromagnéticos no alusivo sistema devido ao chaveamento de bancos de capacitores para fins de adequabilidade da sua faixa de valores. Neste sentido, o trabalho em título propõe-se a determinar uma faixa de valores de potência reativa capacitiva tradicional que admite a não superação dos valores de referência atribuídos à tensão em regime permanente do sistema de potência, aos transitórios de energização dos bancos de capacitores em derivação e às tensões de restabelecimento transitórias nos disjuntores adjacentes aos barramentos na tensão operativa de 138 kV pertencentes ao secundário de 2 transformadores de fronteira pertencentes a rede básica nas tensões primárias de 440kV e 500 kV. As análises contemplaram dois cenários de patamares de carga. Diante da modelagem empregada e das condições simuladas no programa computacional ATPdraw, os bancos de capacitores de 20 MVar, 40 MVar e 60 MVar atenderam os objetivos propostos.

Keywords: Power Capacitor; Electromagnetic Transients; Circuit Breaker; Transient Recovery Voltage; Power Factor.

Palavras-chaves: Banco de Capacitores; Transitórios Eletromagnéticos; Disjuntor; Tensão de Restabelecimento Transitória; Fator de Potência.

1. INTRODUÇÃO

A quantidade, a localização, a maximização do excedente de geração para fins comerciais, a falta de contribuição no controle da tensão e o consumo de reativos devido à sua carga própria, tornaram a central geradora (CG) a biomassa conectada em um sistema de distribuição de alta tensão (SDAT) em 138kV a principal influência para a redução do fator de potência nos barramentos de fronteira com as instalações de transmissão (TOKUNO et al., 2018) (VASCONCELLOS et al., 2015) (TOKUNO et al., 2019).

Anteriormente à promulgação da Resolução Normativa número 756/2016 (REN nº 756/2016), promulgada pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), a faixa designada no submódulo 2.10 dos Procedimentos de Rede (PROREDE) do Operador Nacional do Sistema (ONS) para o fator de potência apresentava valores mais flexíveis que os vigentes e idênticos aos estabelecidos pelo Módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) e pela REN nº 414/2016 (ANEEL, 2017) (ONS, 2020) (ANEEL, 2021) (ANEEL, 2010). Entretanto, a revisão do submódulo

mencionado removeu com proeminência a admissão disposta para a operação do fator de potência na faixa de 0,92 a 0,95 indutivo ou capacitivo nos barramentos de fronteira com a Rede Básica (RB) em tensão superior ou igual a 69 kV e inferior a 230 kV. Esta faixa de valor era permitida ao agente de distribuição nas versões anteriores do submódulo em destaque e, por conseguinte, na versão vigente desse, ficou sob incumbência do remissivo agente a manutenção do fator de potência em uma faixa mais restrita, de 0,95 a 1,00 indutivo. Estes valores alavancaram diversas análises e verificações por parte do agente de distribuição quanto aos aspectos não gerenciáveis que poderiam influenciar na transgressão do fator de potência nos pontos de conexão supracitados (TOKUNO et al., 2018). Tal preceito corroborou em análises e em instalações decorrentes de compensação reativa capacitiva nos referidos pontos de conexão por meio do emprego de bancos de capacitores (BC) em derivação.

Destaca-se que apesar do fator de potência resultar de uma condição em regime permanente dos sistemas elétricos, as instalações e os equipamentos pertencentes a este devem ser projetados com o objetivo de conservar os indicadores de desempenho regulamentados e suportar as solicitações provenientes da energização dos alusivos BC. Desde a sua primeira versão, o submódulo supracitado reitera que os transitórios de energização de bancos de capacitores em derivação instalados para a correção de fator de potência não devem afetar o desempenho das instalações de transmissão ou de agentes conectados na RB. Adjunto, o submódulo 2.6 do PROREDE destaca que as tensões e as correntes transitórias provenientes da energização de BC não devem proporcionar condições que ultrapassem a suportabilidade dos equipamentos adjacentes na subestação.

Neste contexto, concernente aos transitórios eletromagnéticos enunciados anteriormente, o trabalho em título propõe-se a analisar os impactos provenientes da alocação de BC em 2 barramentos de fronteira distintos e localizados entre os sistemas de distribuição de alta tensão e as instalações de transmissão pertencentes à rede básica nas tensões de 500 kV e 440 kV. Por conseguinte, como decorrência das análises realizadas, o trabalho enunciado apresenta para os 2 barramentos de fronteira submetidos ao estudo qual a faixa de potência reativa capacitiva tradicional que admite a não superação dos valores de referência atribuídos à tensão em regime permanente do sistema de potência, aos transitórios de energização dos BC em derivação e às tensões de restabelecimento transitórias nos disjuntores adjacentes aos referidos barramentos.

2. PROCEDIMENTO PARA DETERMINAÇÃO DA FAIXA DE POTÊNCIA CAPACITIVA

Para a definição da faixa de potência reativa capacitiva tradicional foram realizados os procedimentos descritos no fluxograma disponibilizado pela Fig. 1, em ordem cronológica. As análises contemplaram sucintamente a seleção do SDAT, as análises em regime permanente e as análises em regime transitório.

Ressalta-se que as diretrizes, os critérios e a metodologia empregada no desenvolvimento das análises citadas estão aderentes aos documentos promulgados pelo ONS. Os resultados dos transitórios simulados foram apresentados neste trabalho em formato de tabelas, sendo que seus valores foram comparados às referências designadas nas normas técnicas vinculadas ao BC e ao disjuntor.

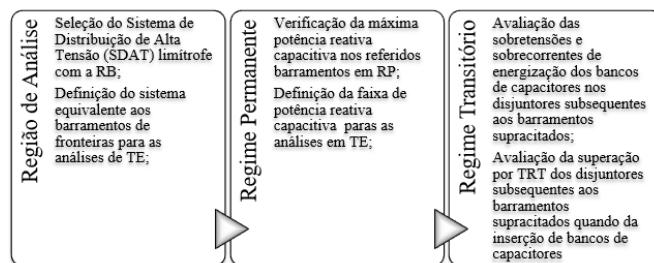


Fig. 1 Fluxograma do procedimento utilizado para determinar a faixa de potência reativa capacitiva tradicional

3. REGIÃO DE ANÁLISE – SDAT

A região escolhida para a realização das análises propostas neste trabalho apresenta uma elevada concentração de CG a biomassa. A região possui 28 centrais geradoras, 37 subestações de distribuição e possui 5 subestações de transmissão na fronteira com a RB nas tensões de 138kV - 345 kV, 138kV - 440 kV e 138kV - 500 kV.

O SDAT equivalente e adjacente as 2 subestações de transmissão escolhidas para análise, 138kV - 440 kV e 138kV - 500 kV, compreende um total de 75 barramentos, sendo que 26 destes são barramentos de geração. A Fig. 2 apresenta um diagrama unifilar do SDAT obtido através dos arquivos Casos de Referência 2020 – 2025, disponibilizados publicamente pelo ONS e viabilizados por meio do programa computacional Análise de Falhas (ANAFAS) (ONS, 2021). Os barramentos de fronteira em análise foram nomeados de Barramento B2 e B62 e estão destacados na Fig. 2 na cor verde. Adicionalmente, na cor vermelha estão destacados os barramentos das demais subestações de transmissão e na cor azul, as referidas CG.

Para os estudos de fluxo de potência foram considerados os 6 cenários de análise, verão (patamar de carga leve, média e pesada) e inverno (patamar de carga leve, média e pesada), obtidos através dos arquivos PAR (Plano de Ampliações) /PEL (Plano da Operação Elétrica de Médio Prazo) 2021 – 2025 disponibilizados publicamente pelo ONS e viabilizados por meio do programa computacional Análise de Redes (ANAREDE) (ONS, 2021). Adicionalmente, para os estudos relacionados a energização dos BC, e os consequentes transitórios decorrentes nos disjuntores adjacentes aos barramentos B2 e B62, foram contemplados neste trabalho somente 2 cenários de análise: inverno patamar de carga leve e pesada referente ao ano de 2025. Por fim, para os estudos relacionados a tensão de restabelecimento transitória nos alusivos disjuntores considerou-se o sistema modelado conforme apresentado na Fig. 2, sem a modelagem das cargas, para uma análise mais conservadora.

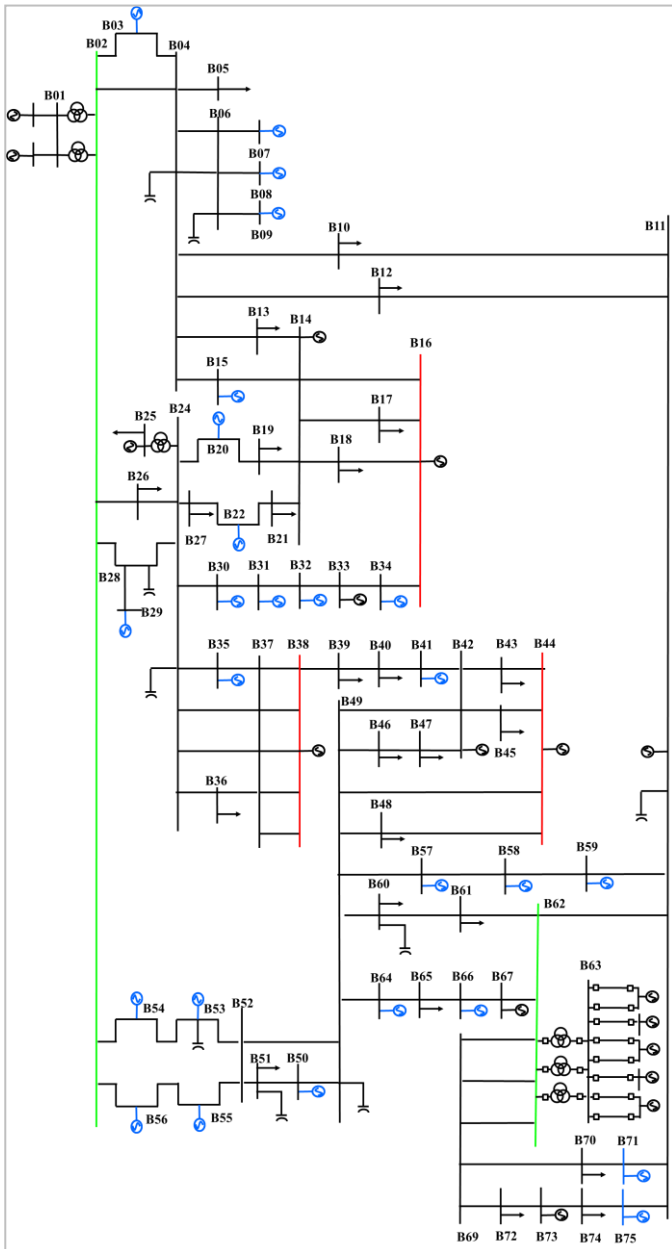


Fig. 2 Diagrama Unifilar representativo do SDAT Equivalente.

4. ESTUDOS DE FLUXO DE POTÊNCIA

Os estudos de fluxo de potência concernente às diretrizes estabelecidas pelos documentos do ONS imputam aos agentes a necessidade de verificações do sistema elétrico tanto em condições normais de operação quanto em condições de emergência. Tais ações vislumbram assegurar concomitantemente a manutenção da tensão nos barramentos dentro dos limites estabelecidos, a admissão do carregamento das linhas de transmissão e a operação adequada dos equipamentos elétricos que compõem o referido sistema. De forma análoga, manobras dependentes de ação humana como o chaveamento de bancos de capacitores em derivação requerem uma análise prévia e subsequente do desempenho do sistema elétrico com o mesmo propósito (PIMENTA; FILHO, 2005) (ONS, 2013). Em condições normais operativas, a compensação de potência reativa capacitiva

proporcionada pelo uso de bancos de capacitores manobráveis vislumbram o controle da tensão em regime permanente dentro dos valores regulamentados e a promoção do fator de potência dentro dos requisitos descritos nos submódulos do PROREDE (IEEE POWER & ENERGY SOCIETY, 2010) (ONS, 2020).

Diante disso, a variação da tensão no barramento posteriormente ao chaveamento do banco de capacitores pode ser estimada através da relação da potência do BC com a potência de curto-circuito do barramento e usualmente estes são dimensionados para resultar em uma variação de tensão inferior a 2% (IEEE POWER & ENERGY SOCIETY, 2010), sendo estabelecido usualmente pelo ONS o valor de 5%. Neste aspecto, a tensão limítrofe adotada para encontrar a inserção de BC nos barramentos B2 e B62 foi de 1,04 pu, com o propósito de evitar a transgressão dos valores regulamentados atribuídos à tensão no barramento de fronteira e ter uma margem de segurança quanto à máxima tensão operativa especificada pelos fabricantes de equipamentos elétricos para a tensão nominal de operação de 138 kV.

4.1 Resultados

As Tabelas 1 e 2 apresentam os valores das tensões resultantes, respectivamente nos barramentos de fronteira B2 e B62 para o ano de 2025 no cenário verão, com patamares de carga leve (VL-2025), média (VM-2025) e pesada (VP-2025) e, no cenário de inverno, com patamares de carga leve (IL-2025), média (IM-2025) e pesada (IP-2025). Adjunto, foram realizadas, também, simulações para o ano de 2021 no cenário verão, com patamares de carga leve (VL-2021), média (VM-2021) e pesada (VP-2021) e, no cenário de inverno, com patamares de carga leve (IL-2021), média (IM-2021) e pesada (IP-2021).

Tabela 1 - Tensão resultante no Barramento B2

BC (MVar)	2025 (pu)						2021 (pu)					
	IL	IM	IP	VL	VM	VP	IL	IM	IP	VL	VM	VP
0	1,025	1,023	1,013	1,018	1,028	1,021	0,994	1,017	1,000	1,038	1,030	1,017
20	1,028	1,027	1,016	1,021	1,032	1,024	0,997	1,020	1,007		1,032	1,021
40	1,032	1,030	1,019	1,024	1,035	1,027	1,000	1,023	1,010		1,034	1,024
60	1,035	1,033	1,023	1,028	1,039	1,030	1,003	1,026	1,013		1,037	1,027
80	1,039	1,037	1,027	1,032		1,034	1,007	1,029	1,020		1,039	1,031
100			1,030	1,036		1,038	1,011	1,033	1,021			1,034
120			1,034				1,015	1,036	1,023			1,038
140			1,038				1,019		1,027			
160							1,023		1,030			
180							1,027		1,033			
200							1,031		1,037			

Tabela 2 - Tensão resultante no Barramento B62

BC (MVar)	2025 (pu)						2021 (pu)					
	IL	IM	IP	VL	VM	VP	IL	IM	IP	VL	VM	VP
0	1,030	1,030	1,016	1,012	1,030	1,021	1,004	1,026	1,016	1,027	1,030	1,022
20	1,033	1,032	1,019	1,015	1,033	1,023	1,006	1,029	1,019	1,030	1,031	1,023
40	1,035	1,035	1,021	1,017	1,036	1,026	1,008	1,032	1,021	1,032	1,035	1,026
60	1,038	1,037	1,024	1,019	1,038	1,028	1,010	1,034	1,024	1,035	1,038	1,028
80			1,026	1,022		1,031	1,013	1,036	1,026	1,038		1,031
100			1,028	1,024		1,033	1,015	1,039	1,029			1,033
120			1,031	1,027		1,036	1,017		1,031			1,036
140			1,033	1,029		1,038	1,020		1,033			1,038
160			1,036	1,032		1,022		1,036				
180			1,038	1,034		1,025		1,039				
200				1,037		1,027						

Para o barramento B2, observa-se que a potência limítrofe para a inserção de potência reativa capacitiva que contempla os cenários provenientes dos anos 2021 e 2025, em consonância aos critérios apresentados anteriormente, é de 60 MVar. De forma semelhante, o barramento B62 também apresenta uma potência limítrofe de 60 MVar. Neste aspecto, para a realização dos estudos transitórios de energização de BC, foram considerados os seguintes valores e premissas para os BC em derivação nos barramentos B2 e B62: 20 MVar, 40 MVar e 60 MVar com único estágio de energização

5. ESTUDOS DE ENERGIZAÇÃO DE BANCOS DE CAPACITORES

Mediante a operação de fechamento de um disjuntor, dentre os fatores que influenciam a amplitude e a duração das sobretensões ulteriores, ressalta-se o instante de fechamento dos contatos na referida operação e os desvios temporais devido à dispersão mecânica existente entre os seus polos (JOSÉ et al., 2001) (FONTES, 2015). Durante a operação de fechamento dos contatos, existe uma discrepância entre os instantes de toque destes nos três polos do disjuntor (SERGIO FRONTIN, 2013).

Em diversas situações, existe uma dificuldade para estimar e controlar com precisão o instante de fechamento dos alusivos contatos, o que corrobora para a caracterização da amplitude das sobretensões em uma grandeza estocástica e não determinística (SANTOS JR et al., 2007). Ressalta-se que, na teoria probabilística, o padrão estocástico corresponde ao comportamento indeterminado em que a origem dos eventos é estatisticamente aleatória. Neste contexto, ratifica-se a necessidade comumente de realização de estudos estatísticos para fins de constatação e reprodução do cenário de máxima criticidade de sobretensão.

Devido a isso, a regulamentação promulgada pelo PROREDE estabelece a necessidade de realização de estudos estatísticos através de simulações no domínio do tempo para a energização de linhas de transmissão, transformadores e principalmente BC em derivação (LIMA; RAMOS; DANTAS, 2017). Em consonância ao submódulo 2.3 do PROREDE, este determina para cada manobra proveniente de uma simulação estatística duas simulações determinísticas ulteriores devem ser realizadas para fins de detalhamento no tempo da máxima tensão e da máxima corrente de energização dos bancos de capacitores (ONS, 2020b).

Além disso, para garantir a representatividade estatística do estudo relacionado, o referido submódulo estabelece que a energização de BC contemple necessariamente a análise probabilística de no mínimo 200 (duzentos) eventos com distribuição gaussiana de probabilidade (ONS, 2020b). Neste aspecto, o *ATPdraw* disponibiliza ferramentas que propiciam a realização de estudos estatísticos aderentes à dinâmica de abertura ou fechamento de um disjuntor. O programa computacional possui um modelo específico de chave, disposto como *Statistic Switch* (chave estatística), a qual dispõe em sua caixa de diálogo a alternativa de seleção da distribuição de probabilidade gaussiana.

As chaves estatísticas qualificam-se como independentes ou mestre-escravo de acordo com o mecanismo de operação almejado para o disjuntor. Para disjuntores que possuem um único acionamento mecânico para as três fases, estas são conformadas em três chaves estatísticas alcunhadas em um arranjo mestre-escravo em que somente uma das chaves assume a função de mestre. A concepção desse arranjo consiste na operação vinculada e dependente das chaves assinaladas como escravas em posterioridade ao instante de tempo definindo na chave mestre. Neste aspecto, para a operação de fechamento, as chaves consideradas como escravas assumem o tempo de operação da chave mestre com o adicional de tempo de atraso. Este tempo corresponde à defasagem temporal associada em relação aos instantes de fechamento dos contatos principais.

Neste trabalho, as chaves estatísticas foram configuradas considerando a chave da fase A como chave mestre e as chaves da fase B e C como chaves dependentes. Ressalta-se que o tempo médio de operação considerado para o fechamento das chaves foi de 100ms para fase A, 102,83ms para fase B e 104,17ms para a fase C, ou seja, o tempo máximo de defasagem entre o primeiro e o último contato a fechar foi de 4,17ms. O desvio padrão considerado em todas as chaves foi de 0,694ms e o tempo máximo de simulação considerado foi de 200ms com intervalo de integração de 1 μ s. Ressalta-se que as simulações de energização dos BC foram realizadas sem considerar a indutância do barramento e a presença de para-raios convencionais.

5.1 Considerações Normativas

Além do instante de fechamento dos contatos dos disjuntores, um dos principais fatores que influenciam a magnitude das sobretensões e das sobrecorrentes transitórias, oriundas da energização de BC, decorrem do tipo de carga adjacente, da configuração e da potência de curto-circuito do SEP (PAMPLONA et al., 2002) (SERGIO FRONTIN, 2013). Teoricamente, na presença de um equivalente de sistema predominante indutivo, a magnitude da tensão pode alcançar um valor máximo de 2 pu na energização de um único BC configurado em estrela aterrada simples. Em circunstâncias reais, considerando as condições de carga residual do capacitor no instante da sua energização e as condições associadas ao SEP, a magnitude do pico das sobretensões podem atingir valores típicos na faixa de 1,2pu a 1,8pu (IEEE POWER & ENERGY SOCIETY, 2010) (WORKING GROUP 3.4.17 OF THE IEEE SURGE PROTECTIVE DEVICES COMMITTEE, 1996).

Em relação às sobrecorrentes transitórias, estas podem promover a superação dos equipamentos elétricos adjacentes. A capacidade de interrupção nominal de disjuntores em relação as correntes capacitivas em regime concernem, conforme definido pela NBR IEC 62271-100, promulgada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), na capacidade do disjuntor de interromper a corrente de um único BC ou na capacidade do disjuntor interromper a corrente de um BC em contraposição (ABNT, 2016). Essa manobra corresponde àquela em que o BC está ligado no lado

fonte do disjuntor acarretando uma corrente de energização transitória aos disjuntores igual à sua.

A norma técnica supracitada estabelece o valor limítrofe para ambas as correntes de 20kA de pico e uma frequência de 4250Hz (ABNT, 2016). Além disso são propostos valores normativos superiores de 6kA e frequência máxima de 2000Hz (IEEE POWER & ENERGY SOCIETY, 2009). A Equação (1) possibilita determinar o valor máximo da corrente de energização de um BC sem amortecimento complementar para circuitos trifásicos. O valor determinado pela referida equação, conforme definido pela norma técnica relacionada, fica em torno de 90% dos valores reais (IEEE POWER & ENERGY SOCIETY, 2010) (BARBOSA, 2019).

$$I_{maxp} = \frac{1000}{V_{FF}} \times \sqrt{\frac{2}{3}} \times \sqrt{S_{CC} \times Q_C} \quad (5)$$

5.2 Resultados

As Tabelas 3 e 4 apresentam respectivamente os resultados estatísticos das sobretensões resultantes da energização dos BC inseridos no Barramento B2 para os cenários de inverno leve e inverno pesado. De forma análoga, as Tabelas 5 e 6 apresentam respectivamente os resultados estatísticos das sobretensões resultantes da energização dos BC inseridos no Barramento B62 para os alusivos cenários. Observa-se pelos resultados dispostos pelas Tabelas 3, 4, 5 e 6, considerando todos os cenários simulados, que os valores médios das sobretensões, de forma abrangente, ficaram abaixo de 1,6pu e os valores máximos abaixo de 1,9pu.

As Tabelas 7 e 8 apresentam os valores das sobrecorrentes calculadas e obtidas através das simulações respectivamente para os Barramentos B2 e B62 para os cenários mencionados anteriormente. Nota-se pela Tabela 7 que os valores calculados e estimados pela normalização técnica associada estão em média 108,4% e 86,3% aproximados dos valores obtidos via simulação para os cenários de inverno leve e pesado. Do mesmo modo, através da Tabela 8 observa-se que os valores calculados e estimados pela normalização técnica associada estão em média 95% e 99,9% aproximados dos valores obtidos via simulação para os cenários de inverno leve e pesado. Por fim, em ambas as tabelas, ressalta-se que os valores das sobrecorrentes obtidas ficaram abaixo dos valores normalizados.

Tabela 3 - Tensão resultante da energização do BC – ILB2

B2	Inverno Leve				
	Potência Reativa (MVar)				
	20	40	60	60 (5h)	60 (7h)
Tensão	(pu)				
Mínimo	1,09	1,09	1,09	1,05	1,05
Máximo	1,64	1,71	1,72	1,29	1,47
Média	1,45	1,53	1,54	1,23	1,32
Variância	0,02	0,03	0,02	0,001	0,01
Desvio	0,11	0,13	0,10	0,03	0,08

Tabela 4 - Tensão resultante da energização do BC – IPB2

B2	Inverno Pesado				
	Potência Reativa (MVar)				
	20	40	60	60 (5h)	60 (7h)
Tensão	(pu)				
Mínimo	1,17	1,15	1,18	1,11	1,03
Máximo	1,71	1,87	1,87	1,25	1,35
Média	1,52	1,56	1,54	1,20	1,27
Variância	0,01	0,01	0,01	0,001	0,004
Desvio	0,13	0,14	0,12	0,03	0,07

Tabela 5 - Tensão resultante da energização do BC – ILB62

B62	Inverno Leve				
	Potência Reativa (MVar)				
	20	40	60	60 (5h)	60 (7h)
Tensão	(pu)				
Mínimo	1,07	1,08	1,07	1,08	1,09
Máximo	1,57	1,70	1,78	1,22	1,32
Média	1,41	1,60	1,59	1,17	1,22
Variância	0,02	0,01	0,02	0,001	0,005
Desvio	0,13	0,07	0,13	0,02	0,06

Tabela 6 - Tensão resultante da energização do BC – IPB62

B62	Inverno Pesado				
	Potência Reativa (MVar)				
	20	40	60	60 (5h)	60 (7h)
Tensão	(pu)				
Mínimo	1,05	1,04	1,04	1,07	1,05
Máximo	1,51	1,62	1,69	1,18	1,28
Média	1,34	1,41	1,47	1,15	1,20
Variância	0,03	0,04	0,04	0,001	0,005
Desvio	0,14	0,17	0,18	0,02	0,06

Tabela 7 - Corrente resultante da energização de BC – B2.

Barramento B2	Tensão (V)	Corrente (kA)		P (%)	
		Calculada	Obtida		
IL	20 MVar	141450	1,788	1,639	109,1
	40 MVar	141450	2,528	2,179	116,0
	60 MVar	141450	3,096	3,092	100,1
IP	20 MVar	139794	1,809	2,033	89,0
	40 MVar	139794	2,558	2,952	86,7
	60 MVar	139794	3,133	3,756	83,4

Tabela 8 - Corrente resultante da energização de BC – B62.

Barramento B62	Tensão (V)	Corrente (kA)		P (%)	
		Calculada	Obtida		
IL	20 MVar	142140	1,867	1,932	96,7
	40 MVar	142140	2,640	2,657	99,4
	60 MVar	142140	3,234	3,637	88,9
IP	20 MVar	140208	1,893	1,766	107,2
	40 MVar	140208	2,677	2,879	93,0
	60 MVar	140208	3,278	3,298	99,4

6. ESTUDOS DE TENSÃO DE RESTABELECIMENTO TRANSITÓRIA

A tensão de restabelecimento é a tensão resultante entre os terminais do polo do disjuntor após a interrupção da corrente de curto-circuito e pode ser obtida por meio da diferença das tensões fase-terra de cada terminal do disjuntor. Comumente,

a interrupção da corrente de falta ocorre com a passagem desta pelo zero. Em SEP predominantemente indutivo a referida interrupção coincide com o tempo máximo da onda senoidal da tensão (SAIED, 2005) (DAS, 2018).

Considerando os contatos do disjuntor já afastados, o resultado de interesse consiste no valor máximo da TRT que o referido equipamento elétrico é capaz de manter sem superar a capacidade dielétrica do meio isolante e promover um reacendimento do arco. Destaca-se que a componente transitória da TRT pode ser calculada de forma manual ou através de programas computacionais. Em cálculos manuais, mesmo com as simplificações adotadas, os resultados apresentam relativa precisão para a compreensão dos transitórios envolvidos (ZANETTA JUNIOR, 2020). Entretanto, os cálculos realizados por meio de programa computacional, além disponibilizarem as verificações relacionadas aos valores máximos de tensão obtidos e as Taxas de Crescimento da Tensão de Restabelecimento (TCTR), proporcionam uma representação detalhada do SEP.

Ressalta-se que os estudos que envolvem a determinação da TRT sob diversas condições de manobra de abertura de disjuntor vislumbram quantificar as solicitações impostas notadamente ao próprio disjuntor mediante a essa operação. Neste aspecto, diversos trabalhos já se propuseram a desenvolver e inclusive a validar técnicas alternativas de análise de TRT em diversos programas computacionais de transitórios eletromecânicos. A utilização da ferramenta *MODELS* disponível na interface do programa computacional *ATPDraw* proporcionou resultados satisfatórios e aderentes aos estudos de TRT (PIMENTA; FILHO, 2005) (FILHO; PIMENTA, 2003). Devido a isso, este trabalho desenvolveu uma modelagem na ferramenta *MODELS* similar ao proposto por Pimenta et al. (2005), utilizando como prerrogativa a linguagem adotada por este.

Para a realização das simulações relacionadas à TRT associada à capacidade de interrupção dos 6 disjuntores de 145 kV e 50kA simétrico adjacentes ao Barramento B2 (SE 500/138 kV) e ao Barramento B62 (SE 440/138 kV) em análise, o sistema apresentado na Fig. 2 foi modelado conforme as premissas e os critérios aplicáveis as simulações de transitórios eletromagnéticos. As referidas simulações foram realizadas em um intervalo de integração de 1 μ s e tempo máximo de 100 ms. Ressalta-se que os casos de análises contemplaram a inserção de uma capacitância adicional equivalente (CEQ) nos barramentos associados aos alusivos equipamentos, ou seja, no lado fonte do disjuntor em análise. Para faltas trifásicas não aterradas em sistemas com neutro solidamente aterrado a CEQ corresponde a $2/3C1$, em que $C1$ é a soma das capacitâncias de sequência positiva de todos os equipamentos elétricos adjacentes.

A Fig. 3 apresenta a configuração prospectada para os referidos equipamentos e seus valores de $C1$, conforme a normativa técnica associada (IEEE POWER AND ENERGY SOCIETY, 2019). Em relação as simulações de TRT para os citados disjuntores, especificamente para as faltas terminais, considerou-se os casos apresentados na Tabela 9. Ressalta-se

que a condição de ligado e desligado do BC no lado linha do disjuntor refere-se à existência desse no (s) barramento (s) imediatamente após ao barramento em análise.

Tabela 9 – Falta Terminal Trifásica – Casos Simulados

Casos		Falta Terminal Trifásica - Condições simuladas
C1	Caso 1	TRT e TCTR sem CEQ e com BC desligado no lado linha
C2	Caso 2	TRT e TCTR sem CEQ e com BC ligado no lado linha
C3	Caso 3	TRT e TCTR com CEQ e com BC desligado no lado linha
C4	Caso 4	TRT e TCTR com CEQ e com BC ligado no lado linha

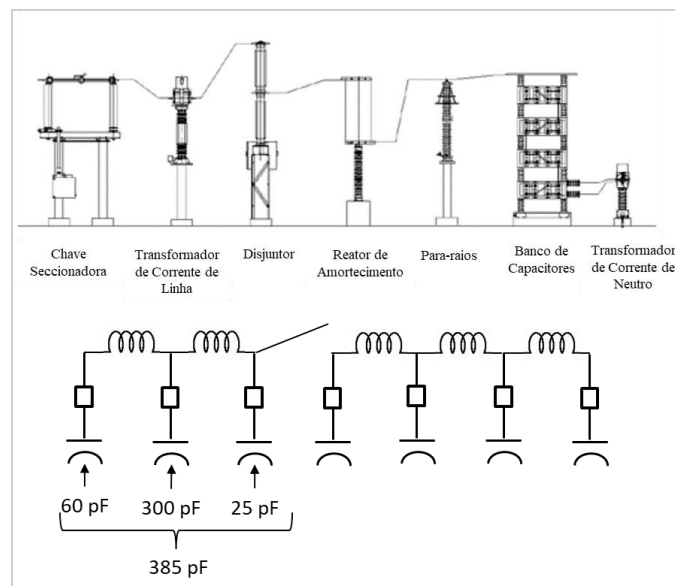


Fig. 3 Capacitâncias efetivas dos equipamentos elétricos pertencentes ao arranjo físico do BC.

No que concerne as simulações de TRT para a condição de falta terminal quilométrica considerou-se a aplicação de uma falta monofásica aterrada na fase A após 1 km de comprimento da linha contígua aos alusivos disjuntores. Adjunto, considerou-se os casos enunciados na Tabela 10, em que a capacitância para falta quilométrica (CFQ) corresponde a inserção de uma capacitância típica de 30 nF no lado fonte do disjuntor para verificação do seu efeito na TCTR:

Tabela 10 – Faltas Quilométricas – Casos Simulados

Casos		Falta Quilométrica - Condições simuladas
C1	Caso 1	TRT e TCTR sem CFQ e com BC desligado no lado linha
C2	Caso 2	TRT e TCTR sem CFQ e com BC ligado no lado linha
C3	Caso 3	TRT e TCTR com CFQ e com BC desligado no lado linha

6.1 Considerações Normativas

A forma da onda da TRT apresenta formatos específicos de acordo com os componentes elétricos adjacentes ao disjuntor em análise. Em sistemas com tensão igual ou maior que 100 kV, com correntes de curto-circuito significativas, a TRT comporta-se de duas formas distintas: inicialmente apresenta uma Taxa de Crescimento da Tensão de Restabelecimento (TCTR) elevada e posteriormente uma TCTR mais reduzida (IEEE POWER AND ENERGY SOCIETY, 2019). Desse modo, uma das formas de onda da TRT descreve-se como uma envoltória constituída de dois segmentos de reta definidos por quatro parâmetros.

Neste aspecto, a Norma Técnica IEC 62271-100 apresenta os parâmetros normalizados para a TRT e para a TCTR para as faltas terminais e para as faltas quilométricas anteriormente descritas. As Tabelas 11 e 12 indicam os valores normalizados e presumidos aplicáveis para disjuntores destinados aos sistemas trifásicos de distribuição e de transmissão em âmbito geral para uma frequência nominal de 60 Hz, com tensão nominal de 145 kV e com neutro solidamente aterrado.

Tabela 11 - Valores Normalizados de TRT para Falta Terminal

Tensão Nominal Ur (kV)	Tipo de Interrupção	Fator de primeio polo Kpp (pu)	Fator de amplitude Kaf (pu)	Primeira tensão de referência u1 (kV)	Tempo t1 (µs)	Valor de pico da TRT uc (kV)	Tempo t2 (µs)	TCTR u1/t1 (kV/µs)
145	T100	1,3	1,4	115	58	215	232	2
145	T60	1,3	1,5	115	38	231	228	3
145	T30	1,3	1,54	*	*	237	47	5
145	T10	1,3	0,9x1,7	*	*	235	34	7

Tabela 12 - Valores Normalizados de TRT para Falta Quilométrica

Tensão Nominal Ur (kV)	Tipo de Interrupção	Fator de primeio polo Kpp (pu)	Primeira tensão de referência u1 (kV)	Tempo t1 (µs)	Valor de pico da TRT uc (kV)	Tempo t2 (µs)	TCTR u1/t1 (kV/µs)
145	L60	1,0	146,8	75,0	170,0	300	2
145	L75	1,0	153,9	75,0	162,5	300	2
145	L90	1,0	155,0	75,0	161,0	300	2

Ressalta-se que a Tabela 13 corresponde aos valores presumidos para a Tensão de Restabelecimento Transitória Inicial (TRTI) na condição de falta quilométrica. Esta corresponde a primeira crista da tensão que ocorre nos primeiros microssegundos após a passagem da corrente pelo zero [30]. Desse modo, a modelagem do tipo de arranjo do barramento, dos equipamentos e das linhas adjacentes influem diretamente nos valores de TRTI.

Tabela 13 - Valores Normalizados de TRTI para Falta Quilométrica

Envelope TRTI		L60
Valor da tensão no instante da ocorrência do primeiro pico da tensão	u1 (kV)	86,5
Tempo do primeiro pico da tensão	t (µs)	10,9
Taxa de Crescimento total inicial (até a ocorrência do primeiro pico da tensão)	u1/t1 (kV/µs)	7,9

6.2 Resultados

As Tabelas 14 e 15 apresentam respectivamente os valores resultantes das simulações relacionadas à TRT na condição de faltas terminais trifásicas nos 6 disjuntores adjacentes aos barramentos B2 e B62. Na Tabela 14 é possível observar que nos casos C2 e C4, a condição do BC ligado no lado fonte da linha proporcionou um aumento na TRT. Adicionalmente, observa-se que a inserção da CEQ nos casos C3 e C4 proporcionou a transgressão da TCTR para todos os disjuntores exceto o D2-5. Em relação a Tabela 15 observa-se que não ocorreu transgressão nos valores de TRT e TCTR para os disjuntores adjacentes ao Barramento B62. As Tabelas 16 e 17 apresentam respectivamente os valores resultantes das simulações relacionadas à TRT na condição

de faltas quilométricas para os 6 disjuntores adjacentes aos barramentos B2 e B62. Em ambas as tabelas é possível observar que não ocorreu transgressão dos valores de TRT e TCTR.

Tabela 14 - TRT Falta Terminal Trifásica D-B2

Disjuntor	Envolória	Falta Terminal - Trifásica									
		TRT (kV)					TCTR (kV/µs)				
		Ref	C01	C02	C03	C04	Ref	C01	C02	C03	C04
D2-1	T70	226,782	177,430	183,580	177,460	183,740	3,0	0,495	0,613	3,752	3,686
D2-2	T70	226,782	177,370	183,630	177,410	183,670	3,0	0,494	0,432	3,665	3,242
D2-3	T70	226,782	191,700	191,760	191,710	191,780	3,0	0,660	0,197	2,276	3,221
D2-4	T69	227,159	184,210	189,130	184,270	189,140	3,0	0,399	0,513	3,564	1,780
D2-5	T70	226,782	170,990	174,660	170,950	174,560	3,0	0,727	0,772	2,512	1,803
D2-6	T67	227,913	188,300	183,880	188,340	183,900	3,0	0,683	0,687	3,068	2,856

Tabela 15 - TRT Falta Terminal Trifásica D-B62 (*indica ausência de BC no lado linha do disjuntor)

Disjuntor	Envolória	Falta Terminal - Trifásica									
		TRT (kV)					TCTR (kV/µs)				
		Ref	C01	C02	C03	C04	Ref	C01	C02	C03	C04
D62-1	T88	219,995	163,020	162,580	162,990	162,560	2,0	0,443	0,449	1,837	1,340
D62-2	T88	219,995	144,190	*	114,250	*	2,0	0,588	*	2,833	*
D62-3	T88	219,995	91,723	*	91,749	*	2,0	0,555	*	1,436	*
D62-4	T88	219,995	91,723	*	91,749	*	2,0	0,555	*	1,436	*
D62-5	T89	219,995	107,890	*	107,850	*	2,0	0,533	*	1,312	*
D62-6	T90	219,241	153,100	153,070	152,030	152,070	2,0	0,455	0,510	3,304	3,427

Tabela 16 - TRT Falta Terminal Quilométrica D-B2

Disjuntor	Envolória	Falta Quilométrica - Monofásica								
		TRT (kV)					TCTR (kV/µs)			
		Ref	C01	C02	C03	Ref	C01	C02	C03	
D2-1	L60	170,000	133,400	137,940	133,920	7,9	4,559	4,097	3,877	
D2-2	L60	170,000	136,250	136,280	136,640	7,9	3,781	4,094	3,598	
D2-3	L60	170,000	137,490	133,450	137,820	7,9	3,165	3,790	3,150	
D2-4	L60	170,000	133,850	136,330	134,280	7,9	4,226	4,099	4,199	
D2-5	L60	170,000	130,010	133,260	133,920	7,9	4,568	4,802	4,227	
D2-6	L60	170,000	136,780	137,050	137,120	7,9	3,588	3,849	3,620	

Tabela 17 - TRT Falta Terminal Quilométrica D-B62

Disjuntor	Envolória	Falta Quilométrica - Monofásica							
		TRT (kV)				TCTR (kV/µs)			
		Ref	C01	C02	C03	Ref	C01	C02	C03
D62-1	L60	170,000	125,050	130,630	125,090	7,9	5,373	4,903	5,370
D62-2	L60	170,000	123,220	*	123,980	7,9	6,186	*	5,249
D62-3	L60	170,000	95,238	*	95,578	7,9	5,890	*	5,540
D62-4	L60	170,000	95,238	*	95,578	7,9	5,890	*	5,540
D62-5	L60	170,000	100,930	*	100,170	7,9	5,682	*	5,237
D62-6	L60	170,000	125,590	127,940	125,700	7,9	5,593	4,910	5,236

7. CONCLUSÕES

Nas simulações estatísticas, realizadas para definição dos valores mais críticos das sobretensões e das sobrecorrentes proporcionadas pela energização dos referidos BC, foi possível observar que os valores ficaram aderentes aos valores estimados conforme as normativas técnicas associadas e apresentaram-se inferiores aos valores normalizados para a superação dos disjuntores em análise. Em relação a TRT, para as faltas terminais trifásicas nos disjuntores avaliados e adjacentes aos Barramentos B2 e B62, as análises evidenciaram o comportamento das sobretensões conforme descrito e prospectado. A variação decorrente na TRT devido à condição de funcionamento dos BC conectados no terminal de linha de alguns dos disjuntores em análise, conferiu a estes a sua importância nos estudos de verificação de capacidade. Apesar dos BC conectados no terminal linha

do disjuntor proporcionarem um incremento na amplitude da TRT, os valores resultantes das simulações proporcionaram a manutenção destes dentro dos valores normalizados e presumidos pelas envoltórias empregadas. Em relação a TCTR a maioria dos disjuntores superaram os valores normalizados e presumidos.

Similarmente, na condição de faltas quilométricas, os valores de TRT resultantes para os disjuntores supracitados ficaram dentro dos valores normalizados e presumidos. No que concerne à inserção de capacitância equivalente, esta proporcionou a minimização dos valores de TRT e TCTR. Adjunto, para a condição mencionada, independentemente da inserção de capacitância adicional no lado fonte ou no lado linha dos disjuntores supracitados, os valores de TRT e TCTR não foram superados.

Finalmente, devido às justificativas postas em relação à inserção dos BC de 20 MVar, 40 MVar e 60 MVar, a faixa de potência reativa capacitiva definida de 20 MVar a 60 MVar em consonância as condições simuladas neste trabalho, não corroboram para a superação dos disjuntores adjacentes aos Barramentos B2 e B62 quanto às correntes de energização dos referidos bancos e às TRT para os cenários de análise considerados, inverno patamar de carga leve e pesada.

REFERÊNCIAS

- Agência Nacional De Energia Elétrica. (2010). *Resolução Normativa número 414/2010*. Disponível em: <www.aneel.gov.br>. Acesso em: 14 dez. 2021.
- Agência Nacional De Energia Elétrica. (2017). *Módulo 3 Acesso ao Sistema de Distribuição*.
- Agência Nacional De Energia Elétrica. (2021). *Módulo 8 Qualidade da Energia Elétrica*.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. (2016). *NBR IEC 62271-100: Disjuntores de alta tensão de corrente alternada*.
- Barbosa, M. A. (2019). Conversão de Bancos de Capacitores em Filtros de Harmônicas. *XXV Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, 2019*.
- Das, J. C. (2018) TRV Transient Recovery Voltage in High Voltage Current Interruption. *IEEE Transactions on Industry Applications*.
- Filho, J. A.; Pimenta, D. G. (2003). Aplicação da Rotina Models e da Interface ATPDraw do Programa ATP/EMTP para o Cálculo dos Valores de Pico, dos Instantes de Tempo Correspondentes e da Taxa de Crescimento da Tensão de Restabelecimento Transitória (TRT) em Disjuntores, bem como para a Impressão de Envoltórias de Referência Normalizadas. *XVII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*.
- Fontes, A. V. (2015). Aprimoramento do Processo de Recomposição de um Sistema de Distribuição de 69 kV. *IEEE Power & Energy Society. (2009). IEEE Std C37.06 - 2009, IEEE Standard for AC High - Voltage Circuit Breakers Rated on a Symmetrical Current Basis - Preferred Ratings and Related Required Capabilities for Voltages Above 1000 V*.
- IEEE Power & Energy Society. (2010). *IEEE Std 1036 - 2010, IEEE Guide for Application of Shunt Power Capacitors*.
- IEEE Power and Energy Society. (2019). *IEEE Std C37.011 - 2019 IEEE Guide for the Application Transient Recovery Voltage for AC High-Voltage Circuit Breakers with Rated Maximum Voltage above 1000 V*.
- José, C. et al. (2001). An ATP Simulation of Shunt Capacitor Switching in an Electrical Distribution System. *International Conference on Power Systems Transients*.
- Lima, A. F. A.; Ramos, Á. J. P.; Dantas, Y. S. (2017) Análise Crítica da Abordagem Estatística de Transitórios Eletromagnéticos Associados a Manobras de Equipamentos e Linhas de Transmissão. *XIX Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*.
- Operador Nacional Do Sistema. (2021). <https://sintegre.ons.org.br>.
- Operador Nacional Do Sistema Elétrico. (2013). *Sumário Referenciado Diretrizes para a Elaboração de Projetos Básicos para Empreendimentos de Transmissão*.
- Operador Nacional Do Sistema Elétrico. (2020a). *Submódulo 2.10 Requisitos Mínimos Conexão*.
- Operador Nacional Do Sistema Elétrico. (2020b). *Submódulo 2.3 Premissas, Critérios e Metodologia para Estudos Elétricos*.
- Pamplona, F. M. P. et al. (2002). Sobretensões Transitórias Decorrentes de Manobras de Bancos de Capacitores. *Congresso Brasileiro de Automática*.
- Pimenta, D. G.; Filho, J. A. (2005). Configuration of Subroutine MODELS of ATPDraw in Transient Recovery Voltage (TRV) Studies for Circuit Breakers. *International Conference on Power Systems Transients*.
- Saied, M. M. (2005). The kilometric faults: Modeling and normalized relations for line transients and the breaker-recovery voltage. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 20, n. 2 I, p. 1025–1030.
- Santos Jr, G. et al. (2007). Ferramenta Gráfica e Interativa para Automação do Ajuste de Casos-Base Associados a Estudos de Transitórios Eletromagnéticos Devidos a Manobras em ATP. *XIX Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*.
- Sergio frontin, O. O. (2013). *Equipamentos de Alta Tensão – Prospecção e Hierarquização de Inovações Tecnológicas*. 1a edição ed. Brasília.
- Tokuno, S. E. et al. (2018). Análise do fator de potência nos pontos de fronteira em função da alteração dos limites definidos nos Procedimentos de Rede. *XXV Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*.
- Tokuno, S. T. et al. (2019). Influência da Geração Distribuída no Planejamento da Expansão do Sistema de Distribuição e Impactos no MUST. *XXV Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*.
- Vasconcellos, V. et al. (2015). Impacto da Cogeração a Biomassa no Planejamento Energético das Distribuidoras o Caso da CPFL Paulista Regiões Nordeste e Noroeste. *XXIII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*.
- Working Group 3.4.17 of the IEEE Surge Protective Devices Committee. (1996). Impact of Shunt Capacitor Banks on Substation Surge Environment and Surge Arrester Applications. *IEEE Transactions on Power Delivery*.
- Zanetta Junior, L. C. (2020). Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência. São Paulo.