



**XXIV SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

CB/GDS/27

22 a 25 de outubro de 2017
Curitiba - PR

GRUPO - X

GRUPO DE ESTUDO DE DESEMPENHO DE SISTEMAS ELÉTRICOS - GDS

**DEFINIÇÃO DAS CAPACIDADES NOMINAIS DE BANCOS DE CAPACITORES
CONSIDERANDO DISTORÇÕES DE TENSÃO ELEVADAS NA REDE BÁSICA**

**Miguel P. De Carli (*)
ELETROSUL**

**Rafael E. S. Ristow
ELETROSUL**

**Leonardo O. Grander
ELETROSUL**

**Orlando J. Rothstein
ELETROSUL**

**Ricardo Antunes
ELETROSUL**

RESUMO

O artigo apresenta e discute as dificuldades e incertezas da definição das capacidades nominais de bancos de capacitores em ambientes com alta distorção harmônica de tensão e as possíveis consequências que podem ocorrer com a inserção destes equipamentos em regiões do sistema com distorção elevada. A metodologia e critérios utilizados pela Eletrosul para a definição das capacidades nominais de bancos de capacitores e resultados de campanhas de medição de distorções de tensão são apresentados. A influência destas distorções no projeto, bem como a possibilidade de amplificação destas, devido a conexão dos bancos de capacitores é discutida. Por fim, é apresentado um estudo de caso da especificação de bancos de capacitores em três subestações distintas.

PALAVRAS-CHAVE

Harmônicos, distorções de tensão, dimensionamento, capacitores, capacidade nominal

1.0 - INTRODUÇÃO

O sistema elétrico brasileiro tem observado um grande crescimento da inserção de fontes não lineares nos últimos anos, seja nos novos elos de transmissão em corrente contínua, nas usinas eólicas ou no nível das cargas (comerciais, industriais e residenciais). Uma consequência disto, é o aumento das distorções harmônicas de tensão e corrente verificadas na Rede Básica. Para gerenciar este problema, os Procedimentos de Rede (PR) do ONS, estabelecem que os acessantes aos sistemas de transmissão devem atender determinados limites de distorção e tomar medidas mitigadoras quando necessário; por outro lado, no Brasil não existem exigências análogas para as cargas conectadas nos sistemas de distribuição ou a autorização, de forma sistemática, por parte do poder concedente da instalação de filtros sistêmicos para resolver a questão.

Neste contexto, empresas de transmissão são autorizadas pela ANEEL a instalarem compensações reativas (bancos de capacitores) e são responsáveis pelo seu dimensionamento, incluindo a definição de suas capacidades nominais de tensão e corrente de regime contínuo, as quais devem considerar além da componente fundamental e as componentes harmônicas. Ocorre que a determinação destas capacidades é influenciada diretamente pelo nível de distorção de tensão preexistente no sistema. Não havendo garantias de que as distorções sejam mantidas abaixo dos limites globais inferiores definidos nos PR, os capacitores poderão ficar expostos a sobrecargas ou desligamentos pela atuação da proteção. Soma-se ainda o fenômeno da possível amplificação das distorções preexistentes no ponto de conexão, ou em barras próximas, devido à possíveis ressonâncias entre as impedâncias do banco de capacitores e da rede.

Outra questão importante é que as normas de dimensionamento de capacitores (1) e (2), embora definam parâmetros de projeto como tensão e corrente nominais e estabeleçam suas suportabilidades, não tratam da

(*) Rua Dep. Antônio Edu Vieira, n° 999 - Pantanal – DES – CEP 88040-901 - Florianópolis – SC – Brasil
(+55 48) 3231-7166 – Email: mcarli@eletrosul.gov.br

maneira e condições em que estas grandezas devem ser determinadas. Por isso, a Eletrosul vem desenvolvendo uma metodologia e critérios para a definição das capacidades nominais dos capacitores, as quais compõem especificações técnicas visando garantir propostas que tenham as mesmas bases técnicas em uma disputa entre diferentes concorrentes, bem como uma operação segura durante a vida útil do equipamento.

Logo, o artigo apresenta algumas definições de normas de capacitores, a metodologia e critérios utilizados pela Eletrosul para a definição das capacidades nominais de bancos de capacitores. Resultados de campanhas de medição de distorção de tensão em barras onde bancos de capacitores serão instalados são apresentados, informações que são dados de entrada para a definição das capacidades. Além disto, é demonstrada a influência destas distorções e de possíveis ressonâncias no cálculo das solicitações. Por fim, o artigo também calculará fatores de amplificação das distorções preexistentes devido à inserção do banco de capacitores no sistema.

As informações relatadas acima são apresentadas e discutidas em um estudo de caso de algumas subestações do sistema que tiveram bancos de capacitores autorizados a serem instalados, dando destaque ao dimensionamento de um banco de capacitores de uma subestação que apresentou distorções de tensão acima dos limites globais superiores definidos nos PR do ONS.

2.0 - DEFINIÇÕES DAS NORMAS DE CAPACITORES

A norma IEC 60871-1 (1) define tensão e corrente nominais de um capacitor, respectivamente, U_N e I_N , como os valores *rms* das variáveis para os quais o capacitor foi projetado. Já as máximas tensões e correntes permitidas de um capacitor são definidas como os valores *rms* das variáveis que um capacitor pode suportar por um período de tempo em condições específicas.

De acordo com (1) os níveis de tensão permitidos em unidades capacitivas são os apresentados na Tabela 1. Observa-se que não é definido um limite direto para a tensão incluindo harmônicos, apenas define que os limites de corrente não sejam excedidos. A norma diz que as sobretensões podem ser toleradas sem deteriorações significantes do capacitor dependendo de suas durações e ocorrências, bem como da temperatura do capacitor. Além disto, sobretensões superiores a $1,15 U_N$ não devem ocorrer mais do que 200 vezes durante a vida útil do equipamento.

Tabela 1 – Níveis de tensão permitidos em capacitores

Tipo	Tensão $\times U_N$	Máxima duração	Observação
Freq. fundamental	1,00	Contínua	Maior valor médio durante qualquer período de energização do capacitor. Para períodos de energização inferiores a 24 h (exceções ver Cláusula 27.2 de [1]).
Freq. fundamental	1,10	12 h em cada 24 h	Regulação da tensão do sistema e flutuações
Freq. fundamental	1,15	30 min em cada 24 h	Regulação da tensão do sistema e flutuações
Freq. fundamental	1,20	5 min	Aumento da tensão em carga leve
Freq. fundamental	1,30	1 min	-
Freq. fundamental mais harmônicos	Tal que a corrente não exceda o valor dado na Cláusula 20 (ver também 27.6 e 27.7.1)		

Para a corrente, a norma (1) estabelece na Cláusula 20 que as unidades capacitivas devem ser capazes de operar continuamente com uma corrente eficaz $1,3$ ($1,43$ considerando que a capacitância pode ser $1,1 C_N$) vezes a corrente que ocorre à tensão nominal senoidal e frequência nominal, excluindo transitórios. Este fator é destinado a limitar os efeitos combinados dos harmônicos e sobretensões até e incluindo $1,10 U_N$. A seção 27.6 da norma diz ainda que capacitores não devem ser operados com correntes excedendo os valores permitidos, exceto por períodos não maiores que 5 minutos em conjunto com o aumento de tensão em condições de carga leve.

Segundo a norma IEEE Std 18-1992 (2) os capacitores devem ser capazes de operar continuamente desde que as seguintes limitações não sejam excedidas:

- 135 % da potência reativa nominal;
- 110 % da tensão nominal eficaz, incluindo harmônicos, mas excluindo transitórios;
- 180 % da corrente nominal eficaz, incluindo a corrente fundamental e as harmônicas.

Ambas as normas apresentam algumas recomendações como forma de reduzir as tensões e correntes a que os bancos de capacitores podem ser submetidos, tais como: realocar um ou mais bancos para outras partes do sistema, aumentar o valor da capacitância quando o capacitor for conectado perto de retificadores, instalar um reator em série com o banco de capacitores para deslocar a ressonância da harmônica crítica e desligar o banco de capacitores em períodos de carga leve ou tensão elevada. Como pode ser observado, a adoção das recomendações pode estar fora dos limites de atuação do proprietário do banco, portanto a especificação do equipamento deve ser feita de forma conservadora para sua segurança e para evitar o seu desligamento forçado, sobrecargas ou até mesmo perturbações no sistema.

3.0 - METODOLOGIA E CRITÉRIOS PARA A DEFINIÇÃO DAS CAPACIDADES NOMINAIS

Diante da ausência de definições e critérios específicos nas normas de capacitores ou nos PR do ONS de como devem ser determinadas as correntes e tensões harmônicas a que os bancos de capacitores podem ser submetidos, bem como devem ser definidas suas capacidades nominais, a Eletrosul tem utilizado normas de filtros (3) e (4), documentos do Cigré, editais de sistemas HVDC e a troca de experiências com fabricantes para desenvolver uma metodologia e critérios para a especificação de capacitores, os quais serão apresentados a seguir.

3.1 Método de Cálculo

O cálculo das máximas correntes harmônicas a que o banco de capacitores pode ser submetido para posterior definição de suas capacidades nominais é feito considerando um circuito semelhante ao utilizado para o cálculo das capacidades de filtros de harmônicas utilizados em sistemas HVDC (3), contudo, neste caso, desprezando-se a contribuição vinda dos conversores, conforme mostrado na área hachurada da Figura 1-(a). No circuito, a fonte de tensão harmônica V_{bh} representa as tensões harmônicas preexistentes na barra onde o banco será instalado, a impedância harmônica Z_{Ch} representa o capacitor e impedância harmônica da rede externa Z_{Eh} é representada como um Lugar Geométrico (LG) das impedâncias, mostrado na Figura 1-(b).

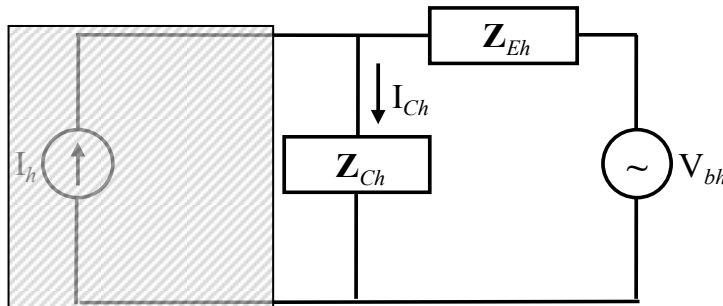


Figura 1-(a). Circuito para cálculo das máximas correntes nos capacitores

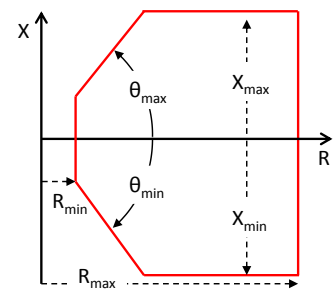


Fig. 1-(b). LG hexagonal

Assim, a corrente harmônica I_{Ch} gerada pela rede é função da tensão harmônica preexistente no sistema V_{bh} e do módulo da soma vetorial das impedâncias Z_{Ch} e Z_{Eh} . A corrente é maximizada quando o módulo do denominador da Equação 1 é minimizado. A Fig. 2-(a) apresenta graficamente a soma vetorial de Z_{Ch} e Z_{Eh} .

$$I_{Ch} = \frac{V_{bh}}{|Z_{Eh} + Z_{Ch}|} \quad (1)$$

Posteriormente ao cálculo do espectro de correntes I_{Ch} , são obtidas: a corrente total, a tensão e a potência no banco de capacitores e no reator de amortecimento com equações que serão apresentadas na Seção 3.4.

3.2 Impedância do Sistema

A representação da impedância harmônica do sistema para o cálculo das capacidades de filtros normalmente é feita de forma mais conservadora que a utilizada para a avaliação do desempenho harmônico em sistemas HVDC (3). Isto é feito de forma a assegurar que as capacidades dos equipamentos serão adequadas durante toda a sua vida útil. No entanto, a Eletrosul entende que como os capacitores não tem a função de filtrar correntes harmônicas e nem apresentam impedância com resposta em frequência com ressonâncias agudas como a dos filtros, a representação da impedância da rede pode ser feita de forma mais realista.

Portanto, a definição dos cenários representativos da impedância harmônicas da rede Z_{Eh} no cálculo das capacidades de bancos de capacitores é realizada de forma semelhante à solicitada pelo ONS para o cálculo de distorções harmônicas provocadas por fontes não lineares, ou seja, são utilizados casos de três anos, nos patamares de carga pesada, média e leve, em condições de rede completa e contingências no sistema de transmissão até a segunda ou terceira vizinhança do ponto de conexão do capacitor. Além disto, o cálculo das impedâncias do sistema é realizado para as harmônicas da frequência fundamental (60 Hz) e considerando a variação de frequência em $60 \pm 0,5$ Hz, conforme previsto no Submódulo 2.8 dos Procedimentos de Rede.

3.2.1 Lugares Geométricos

Tradicionalmente a forma de se representar as impedâncias Z_{Eh} no circuito apresentado na Figura 1-(a) é através de alguma forma de LG no plano R-X que englobe todas as impedâncias calculadas nos diversos cenários previstos no estudo. Para o cálculo das capacidades de capacitores a Eletrosul adotou polígonos hexagonais como o mostrado na Figura 1-(b) em alguns projetos recentes, os quais tiveram seus limites definidos por apenas uma ordem harmônica.

3.2.2 Impedâncias Reais

Após a especificação de alguns bancos de capacitores utilizando LG para representar as impedâncias Z_{Eh} e trocas de experiência com fabricantes, a Eletrosul entendeu que poderia estar sobredimensionando seus equipamentos e decidiu desenvolver uma abordagem alternativa. Nesta metodologia alternativa, em vez de se buscar nas bordas do LG a impedância Z_{Eh} (vetor preto tracejado) que minimiza o módulo da soma vetorial (vetor azul) com Z_{Ch} (vetor preto) e maximiza a corrente I_{Ch} da Equação 1 como mostrado na Figura 2-(a), se busca em todas as n impedância calculadas para todos os n cenários do estudo aquela que, da mesma forma, minimiza a soma vetorial e resulta na maior corrente (ver Figura 2-(b)).

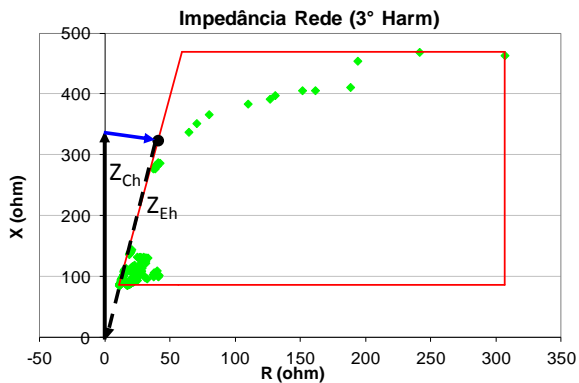


Figura 2-(a). Cálculo de I_{Ch} com LG

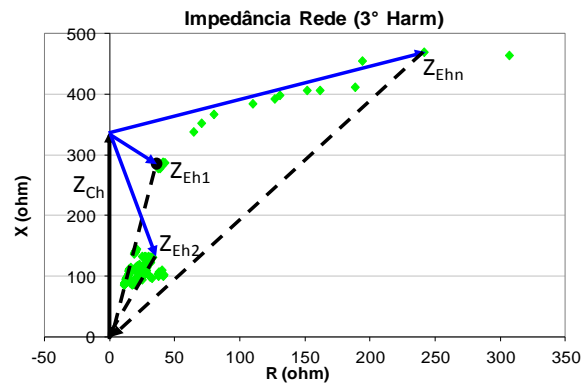


Figura 2-(b). Cálculo de I_{Ch} com impedâncias calculadas

As Figuras 2-(a) e 2-(b), juntamente com a Equação 1, evidenciam a necessidade de se considerar a impedância da rede na definição das capacidades dos bancos de capacitores, uma vez que podem ocorrer ressonâncias entre o banco e a rede que gerarão correntes muito superiores àquelas que seriam esperadas se as tensões harmônicas fossem aplicadas diretamente sobre os capacitores, desconsiderando-se Z_{Eh} .

3.3 Critérios Conservadores

Para o cálculo das capacidades nominais dos equipamentos deve ser considerada a faixa de variação de tensão em regime permanente, tipicamente entre 0,95 e 1,05 pu. Segundo (3), para valores que excedam esta faixa, o tempo de duração das sobretensões deve ser especificado.

O efeito das distorções de tensão preexistentes no sistema deve ser considerado no cálculo das capacidades nominais dos bancos de capacitores e para isso utiliza-se uma fonte de tensão de Thévenin atrás da impedância do sistema como mostrado na Figura 1-(a). A magnitude das tensões harmônicas pode ser baseada em medição ou nos limites de desempenho, mas sempre limitada por um valor total de distorção (3).

Por exemplo, o Edital do leilão do sistema de transmissão das usinas do Rio Madeira estabelecia que as correntes provenientes da rede externa deveriam ser definidas com base nos limites globais inferiores de tensão harmônica estabelecidos no Submódulo 2.8 dos PR. Baseado nisto, e no fato de o mesmo Submódulo estabelecer que as distorções do sistema devam ser mantidas abaixo dos limites globais inferiores, caso contrário, filtros devem ser instalados, a Eletrosul entende que os capacitores deveriam ser especificados para operar em sistemas com, no máximo, este nível de distorção.

Para assegurar que os bancos de capacitores não terão suas capacidades nominais excedidas, os seguintes fatores podem ser considerados no cálculo dos parâmetros dos capacitores e reator de amortecimento: as tolerâncias de variação garantidas dos equipamentos, a variação de frequência do sistema, a variação de temperatura (máxima e mínima absolutas) e falha de unidades capacitivas.

3.4 Capacidades dos Equipamentos

As normas de bancos de capacitores não definem equações para o cálculo das máximas tensões e correntes que devem ser suportadas, incluindo a fundamental e os harmônicos, por isso são utilizadas equações definidas em normas de filtros (3) e (4), as quais são apresentadas a seguir.

Para os capacitores a corrente total eficaz é calculada com a Equação 2. O máximo valor eficaz de tensão fase-terra no capacitor pode ser calculado como a soma aritmética dos valores das tensões harmônicas individuais e da fundamental, contudo esta forma de somatório considera que todas as tensões harmônicas e a fundamental estariam em fase, o que é excessivamente pessimista e resultaria em projetos mais caros que o necessário (3). Desta forma, a Eletrosul utiliza a Equação 3 para a definição da máxima tensão no banco de capacitores. A potência no capacitor é calculada com a Equação 4. Onde, X_{Ch} é a reatância harmônica de ordem h do capacitor e I_{Ch} é a corrente harmônica de ordem h .

$$I_{rms} = \sqrt{\sum_{h=1}^{50} I_{Ch}^2} \quad (2)$$

$$V_C = V_1 + \sqrt{\sum_{h=2}^{50} (I_{Ch} X_{Ch})^2} \quad (3)$$

$$Q_C = \sum_{h=1}^{50} I_{Ch}^2 X_{Ch} \quad (4)$$

Para os reatores a corrente total eficaz é calculada com a mesma Equação 2 utilizada para os capacitores. A tensão do reator é especificada com a Equação 5 e a potência com a Equação 6.

$$V_L = \sum_{h=1}^{50} I_{Lh} X_{Lh} \quad (5)$$

$$Q_L = \sum_{h=1}^{50} I_h^2 X_{Lh} \quad (6)$$

4.0 - ESTUDO DE CASO

Neste estudo de caso são apresentados resultados de estudos realizados para a definição das capacidades nominais de regime contínuo de banco de capacitores autorizados à Eletrosul. Os bancos de capacitores estudados são os seguintes: 1x50 Mvar na SE Tapera 2 (TPR2), 2x50 Mvar na SE Dourados (DOU) e 1x100 Mvar na SE Biguaçu (BIG), todos na tensão de 230 kV.

4.1 Dados e Critérios Utilizados

A metodologia utilizada para o cálculo das máximas solicitações de tensão e corrente nos bancos de capacitores foi a descrita na Seção 3. As principais características dos bancos de capacitores são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Características dos bancos de capacitores

Característica	Tapera 2	Dourados	Biguaçu
Cap. nominal (μF)	2,507 (-0/+5%)	2,507 (-0/+5%)	5,014 (-0/+5%)
Indut. Nominal (Ω)	0,302 (-0/+10%)	0,302 (-0/+10%)	0,528 (-0/+10%)
Resistência Indutor (Ω)	0,0177	0,0177	0,0311
Corrente nominal (A)	125,54	125,54	263,67

As impedâncias harmônicas da rede Z_{Eh} , vistas a partir do ponto de conexão dos bancos de capacitores, foram calculadas a partir dos casos do ONS/PAR, para os anos 2018 e 2019, nos patamares de carga pesada, média e leve. Para a obtenção das impedâncias harmônicas do sistema foram considerados cenários e critérios definidos na Seção 3.2.

Na fonte de tensão a componente fundamental foi ajustada no valor máximo operativo (1,05 pu) e as tensões harmônicas foram representadas em um caso de partida (V_{bh1}) pelo percentil 95 dos valores medidos em cada uma das SE durante uma semana, os quais estão apresentados, para as ordens relevantes, na Tabela 3.

Tabela 3 - Tensões harmônicas preexistentes – V_{bh}

h	Limites	Tapera 2				Dourados	Biguaçu
		Medido	Maximizado				
		V_{bh1}	V_{bh2}	V_{bh3}	V_{bh4}		
2	1%	0,34%	0,00%	0,04%	0,12%	0,38%	0,67%
3	2%	2,07%	2,07%	2,07%	1,39%	0,46%	0,97%
4	1%	0,12%	1,00%	1,00%	1,00%	0,14%	0,73%
5	2%	2,44%	2,43%	2,43%	2,01%	1,26%	1,43%
6	1%	0,17%	0,99%	1,00%	1,00%	0,13%	0,69%
7	2%	2,35%	0,00%	0,95%	1,98%	1,02%	0,84%
DTHT	3%	4,027%	4,030%	4,030%	4,030%	1,77%	2,31%

4.2 Cálculo das Capacidades Utilizando LG

Esta análise de avaliação das maiores solicitações de tensão, corrente e potência reativa dos bancos de capacitores e reatores de amortecimento foi realizada apenas para TPR2 e DOU e considerou diversas condições na busca pelas situações mais críticas para os equipamentos, conforme mostra a Tabela 4, do estudo de TPR2. Para isso, inicialmente foram calculados 9 espectros de correntes harmônicas e as solicitações I_N , U_N e Q_N considerando as distorções preexistentes medidas V_{bh1} , apresentadas na Tabela 4 (9 primeiras linhas). A partir do caso 9, que considerou a impedância do capacitor calculada para 60,5 Hz e os equipamentos em suas máximas tolerâncias e havia gerado as maiores solicitações de I_N , U_N e Q_N , foram gerados outros 3 casos onde se buscou maximizar, através de algoritmos de otimização, a corrente no capacitor (Caso 10), a tensão no capacitor (Caso 11), e a tensão sobre o reator (Caso 12), respectivamente, variando-se os índices de distorção harmônica individuais e obtendo V_{bh2} , V_{bh3} e V_{bh4} da Tabela 4.

Nesse processo de maximização das variáveis são colocadas restrições de forma que os limites globais inferiores das harmônicas individuais e DTHT definidas no Submódulo 2.8 dos PR sejam respeitados. Especificamente para o caso de TPR2, onde as tensões de 3ª, 5ª e 7ª superam os limites inferiores e o DTHT supera o limite global superior ¹, o processo de maximização restringiu as variações das tensões aos valores medidos para as ordens que superavam os limites e para as demais ordens adotou-se os limites inferiores como restrição.

Tabela 4 - Máximas solicitações no banco de capacitores de Tapera 2

Caso	LG	CAP	Tolerâncias (%)		Vbh	Capacitor							
			C	L		Corrente - I_N		Tensão - U_N		Potência - Q_N			
						A	pu	kV(f-t)	pu	Mvar(3f)	pu		
1	60±0,5	59,5	0	0	1	166,96	1,33	166,50	1,192	62,63	1,253		
2			+ 5	0		168,30	1,34	167,43	1,198	63,07	1,261		
3			+ 5	+ 10		168,31	1,34	167,44	1,198	63,08	1,262		
4		60	0	0		168,11	1,34	166,46	1,191	63,11	1,262		
5			+ 5	0		169,39	1,35	167,36	1,198	63,54	1,271		
6			+ 5	+ 10		169,40	1,35	167,36	1,198	63,54	1,271		
7		60,5	60	0		0	169,12	1,35	166,34	1,191	63,55	1,271	
8				+ 5		0	170,42	1,36	167,24	1,197	63,99	1,280	
9							170,44	1,36	167,25	1,197	63,99	1,280	
10			60,5	+ 5		+ 10	2	187,48	1,49	169,26	1,211	66,02	1,320
11							3	185,13	1,47	169,37	1,212	66,06	1,321
12							4	181,70	1,45	163,37	1,169	63,35	1,267

Base de tensão = 242 kV e Base potências reativas = 50 Mvar

Os resultados da Tabela 4 demonstram a influência das distorções de tensão preexistentes na definição das capacidades nominais dos bancos de capacitores. Ressalta-se que esta influência é fortemente dependente da forma utilizada para se somar as componentes individuais de corrente e tensão, as quais são diretamente proporcionais as tensões preexistentes.

Na avaliação realizada para os bancos de capacitores da SE Dourados foram consideradas análises com 1 ou 2 bancos em operação, nas mesmas condições da Tabela 4. A máxima corrente foi obtida com 1 capacitor e as máximas tensão e potência, com dois capacitores.

A Tabela 5 apresenta um resumo das máximas solicitações de tensão e corrente a que os equipamentos podem ser submetidos quando se utiliza LG para representar as impedâncias harmônicas do sistema. Neste caso, as capacidades I_N , U_N e Q_N especificadas seriam os próprios valores apresentados na tabela.

Tabela 5 - Resumo das máximas solicitações nos Equipamentos

Equipamento	Tapera 2			Dourados		
	Corrente	Tensão	Potência	Corrente	Tensão	Potência
	A (rms)	kV (rms f-t)/(pu)	Mvar (3f)	A (rms)	kV (rms f-t)/(pu)	Mvar (3f)
Capacitores	187,5	169,4/1,21	66	167,62	158,57/1,14	59,65
Reator	187,5	3,05	0,136	167,62	4,16	0,179

De posse dos valores apresentados na Tabela 5 a Eletrosul consultou fabricantes de equipamentos sobre a possibilidade de compatibilizar os projetos de Tapera 2 e Dourados e quais seriam as principais implicações técnicas desta decisão. Como resposta verificou-se, dentre outras questões, que os fabricantes não utilizam as equações citadas neste trabalho para a definição da potência do banco de capacitores e assumem, para este cálculo, que a máxima tensão que deve ser suportada pelo equipamento é composta apenas pela frequência fundamental. Com isso, a potência nominal dos bancos de capacitores de Tapera 2 e Dourados seriam, respectivamente, de 81,36 Mvar e 71,30 Mvar e não os 66 Mvar e 59,65 Mvar definidos com a Equação 4. A Eletrosul avaliou que, segundo os critérios de projeto dos fabricantes, os bancos de capacitores poderiam ser sobredimensionados devido à metodologia utilizada na versão original do estudo.

Os principais fatos que tornam conservadora a utilização de LG para a representação da impedância da rede é que as ressonâncias entre a impedância do capacitor e o LG podem ocorrer em regiões do plano R-X onde não existem impedâncias calculadas, como mostrado na Figura 2-(a). Outro problema é que as ressonâncias que ocorrem para cada ordem, maximizando as correntes harmônicas, podem acontecer em áreas dos LG que representam cenários distintos, ou seja, a máxima corrente da 2ª ordem pode acontecer no ano 1 em carga leve com rede íntegra e a máxima corrente da 3ª ordem ocorre no ano 3 em carga pesada em uma determinada contingência no sistema. A combinação destas considerações pode elevar significativamente as correntes e tensões requeridas para os equipamentos.

¹ Os limites globais superiores são obtidos multiplicando-se os limites globais inferiores (na Tabela 3) por 4/3.

4.3 Cálculo das Capacidades Utilizando as Impedâncias Calculadas

Em função das elevadas capacidades requeridas para os bancos de capacitores no estudo utilizando LG, a Eletrosul reavaliou as máximas solicitações nos equipamentos, nas mesmas condições avaliadas na análise anterior, mas neste caso definindo as correntes harmônicas de cada ordem em todas as impedâncias calculadas, conforme mostrado na Figura 2-(b). Neste caso, como se desconsideram as margens de segurança proporcionadas pelo LG, foram avaliadas as solicitações no banco de capacitores considerando duas condições como critério de projeto, quais sejam:

(1) a primeira consiste em buscar, por meio de um algoritmo de otimização, qual o espectro de tensão que aplicado a todos os cenários avaliados resulta na maior corrente total, e para este cenário calcula-se a tensão total no banco de capacitores (COND-1);

(2) a segunda consiste em buscar, por meio de um algoritmo de otimização, qual o espectro de tensão que aplicado a todos os cenários avaliados resulta na maior tensão total no capacitor, resultado da aplicação das máximas correntes harmônicas de cada ordem, mesmo que não sejam em cenários coincidentes (COND-2).

A Tabela 6 apresenta um resumo das máximas solicitações a que os equipamentos podem ser submetidos quando se utilizam as impedâncias calculadas para representar as impedâncias harmônicas do sistema. Na tabela, as potências foram calculadas conforme entendimento dos fabricantes, ou seja, $Q_n = 2\pi f C V_n^2$.

Tabela 6 - Resumo das máximas solicitações nos Equipamentos

Equipamento	Condição	Tapera 2			Dourados		
		Corrente	Tensão	Potência	Corrente	Tensão	Potência
		A (rms)	kV (rms f-t)/(pu)	Mvar (3f)	A (rms)	kV (rms f-t)/(pu)	Mvar (3f)
Capacitores	(1)	154,5	152,51/1,092	65,95	166,91	148,50/1,06	60,13
Reator		154,5	0,745	0,047	166,91	1,42	0,14
Capacitores	(2)	175,09	161,44/1,155	73,91	181,0	155,06/1,11	61,22
Reator		175,09	0,934	0,095	181,0	2,85	0,23

Nesta metodologia, adotou-se um critério diferente para a definição da tensão nominal do banco de capacitores e considera que este pode suportar, segundo (2), a tensão de 1,10 pu por períodos de 12/24h, e que a ocorrência das máximas correntes verificadas para todos os harmônicos de forma simultânea é remota. Assim, o critério para definição da tensão nominal do equipamento foi considerado o seguinte:

$$\text{se } V_{COND-1} \times 1,10 \geq V_{COND-2}, \text{ então } U_N = V_{COND-1};$$

$$\text{senão, } U_N = V_{COND-2}/1,10$$

Com esta nova metodologia proposta pela Eletrosul, de cálculo das correntes utilizando as impedâncias calculadas, e o critério descrito acima para a definição de U_N , foi possível reduzir significativamente as capacidades de tensão, corrente e potência dos bancos de Tapera 2 e Dourados (exceto a corrente para o banco de Dourados devido a uma melhoria no algoritmo de otimização). Além disto, em todos os casos foi possível definir U_N com base em cenários reais (COND-1), o que garante ainda alguma margem de segurança em relação aos valores obtidos na COND-2.

Apesar de esta metodologia não proporcionar as mesmas margens de segurança obtidas com os LG, ela evita o sobredimensionamento dos equipamentos e deve garantir que as tensões e correntes que serão verificadas na realidade serão inferiores as previstas no estudo pelos seguintes motivos: (1) é pouco provável que o banco de capacitores e o reator tenham os mesmos desvios de seus valores nominais considerados no estudo; (2) as harmônicas preexistentes normalmente não atingem os valores considerados no estudo (percentil 95) de forma coincidente, e na média podem ser significativamente inferiores aos valores considerados e (3) a grande maioria dos cenários avaliados resulta em tensões e correntes inferiores às obtidas no cenário mais crítico.

4.4 Fatores de Amplificação das Distorções

O objetivo desta análise é verificar possíveis amplificações das distorções de tensão preexistentes na rede causadas pela instalação do banco de capacitores, conforme alertado em (5). Esta análise baseia-se na experiência do Reino Unido quando da conexão de alguma fonte não linear ao sistema. No caso, é solicitado que seja avaliado não só o impacto nas distorções provocadas pela injeção de correntes harmônicas do conversor, mas também as possíveis amplificações ou atenuações das distorções provocadas pela inclusão da impedância da rede interna do empreendimento, representadas por um fator de modificação K_{PCC} (6).

Assim, para avaliar este efeito nos casos em análise foi calculada a relação entre as máximas distorções harmônicas previstas considerando a impedância do banco de capacitores no cálculo (pós-instalação) e sem considerá-la (pré-instalação), assumindo correntes harmônicas de 1 A no ponto de conexão do banco de capacitores. As distorções foram calculadas com as seguintes equações em cada caso e com os mesmos LG utilizados no estudo para a definição das capacidades nominais:

$$Vh_{pré} = \frac{I}{Y_{Eh}} \quad (7)$$

$$Vh_{pós} = \frac{I}{Y_{Ch} + Y_{Eh}} \quad (8)$$

A razão entre as distorções previstas após a instalação do banco de capacitores e antes de sua instalação representa o fator de amplificação das distorções e pode ser avaliada na Figura 3. Como pode ser observado na figura, a conexão dos bancos de capacitores no sistema indicam a amplificação das distorções de tensão preexistentes em fatores que podem chegar a mais de 4 vezes para as barras avaliadas. Já para o caso da SE Tapera 2, de acordo com a análise, a conexão do banco de capacitores deve atenuar as distorções existentes.

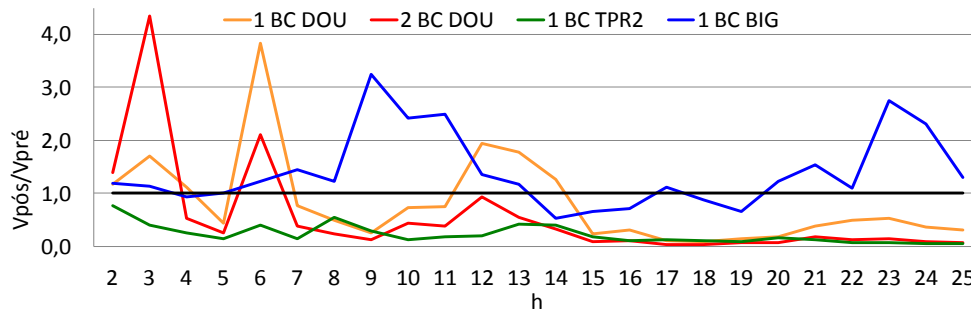


Figura 3 - Fatores de amplificação das distorções

5.0 - CONCLUSÃO

O artigo apresentou a metodologia e os critérios utilizados pela Eletrosul para a definição das capacidades nominais de bancos de capacitores, os quais visam suprir algumas indefinições de normas de capacitores. No artigo foram avaliadas duas formas de representação da impedância da rede, com lugares geométricos ou diretamente nas impedâncias calculadas.

Através dos resultados, verifica-se que a segunda abordagem proporciona resultados menos pessimistas e evita o sobredimensionamento dos equipamentos. De qualquer forma, independente da maneira utilizada para a representação da impedância da rede, o artigo demonstra a influência das distorções de tensão preexistentes e de possíveis ressonâncias na definição das capacidades nominais dos capacitores. Outro efeito verificado é a possibilidade de amplificação das distorções preexistentes no sistema devido à conexão do banco de capacitores. Este efeito deve exigir maior atenção na definição da alocação de capacitores no sistema, pois pode agravar problemas já existentes.

Outra questão importante que deve ser discutida, devido a forte influência das distorções de tensão no dimensionamento dos bancos de capacitores, são os limites de responsabilidade dos empreendedores em dimensionar um equipamento que cumpra a sua função sem ser onerado por um problema sistêmico, como foi o caso do banco de capacitores da Subestação Tapera 2. Nestes casos, torna-se necessário o mapeamento e a fiscalização por parte do ONS, principalmente em subestações da rede básica próximas à grandes centros de carga, a fim de se adequar os níveis de distorção. Como sugestão, aliada ao mapeamento citado, possíveis evoluções no planejamento do sistema e no Plano de Ampliações e Reforços poderiam permitir a autorização da instalação de filtros sistêmicos como alternativa aos bancos de capacitores, de forma a contribuir também para redução das distorções harmônicas de tensão.

Por fim, a Eletrosul deverá proceder medições das tensões e correntes harmônicas na oportunidade da entrada em operação dos bancos estudados neste artigo à título de validação da metodologia proposta e, adicionalmente, permitir a avaliação do efeito da operação dos bancos nas distorções de tensão.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) IEC. "IECTR 60871-1: Shunt capacitors for a.c. power systems having a rated voltage above 1 000 V – Part 1: General". Genebra, 2005.
- (2) IEE. IEEE Std 18-1992: IEEE Standard for Shunt Power Capacitors. New York, 1992.
- (3) IEC. IEC/TR 62001: Guide to the specification and design evaluation of AC filters for high-voltage direct current (HVDC) systems. Frankfurt, 2009.
- (4) IEEE. IEEE Std 1531: IEEE Guide for Application and Specification of Harmonic Filters. New York, 2009.
- (5) IEEE. IEEE Std 1036-1992: IEEE Guide for Application of Shunt Power Capacitors. New York, 1992.
- (6) K. L. Koo, Z. Emin, "Challenges in Harmonic Assessments of Non-linear Load Connections", in Cigré Session, Paris, Agosto, 2016.

7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Miguel Pires De Carli nasceu em Porto Alegre, RS, em 22 de Novembro de 1978. Recebeu o grau de Engenheiro Eletricista da Universidade Federal do Rio Grande do Sul em 2007. Ingressou na Eletrosul em 2001 e já trabalhou nos Departamentos de Operação do Sistema e de Planejamento do Sistema. Especialista em Sistemas de Energia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina em 2012. Atualmente trabalha no Departamento de Engenharia do Sistema. É membro do Cigré com atuação no CE B4 de Elos de Corrente Contínua e Eletrônica de Potência e no C4 de Desempenho de Sistemas Elétricos. Suas principais áreas de atuação são qualidade de energia elétrica e estudos de transitórios eletromagnéticos.

Ricardo Antunes graduou-se em 1999 em Engenharia Elétrica na especialidade de Sistemas de Potência, com Mestrado concluído em 2002 na área de Modelagem Eletromagnética, ambos pela Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC. Trabalha desde 2002 na Eletrobrás Eletrosul, onde iniciou sua carreira no Departamento de Operação, no setor de estudos elétricos de sistemas de potência. Desde 2013 está vinculado ao Departamento de Engenharia do Sistema, onde coordena Estudos de Engenharia voltados à Especificação de Equipamentos de HVAC/DC, Estudos de Projeto Básico ANEEL, Alternativas de Referências (R2) e Estudos Especiais. Atualmente é membro do CE-C4 – Desempenho de Sistemas Elétricos.



Orlando José Rothstein, graduado em 2002 em Engenharia Elétrica e Especialista em Sistemas de Energia Elétrica em 2004 pela Universidade Federal de Santa Catarina- UFSC. Iniciou sua carreira em 2002 na Eletrobrás Eletrosul, atuando no Setor de Estudos Elétricos de Sistemas de Potência do Departamento de Operação do Sistema. A partir de 2015 passou a atuar junto ao Departamento de Engenharia do Sistema, na execução de Estudos de Engenharia para Especificação de Equipamentos de HVAC/DC, Estudos de Projeto Básico ANEEL, Alternativas de Referências (R2) e Estudos Especiais. Atualmente é membro do CE-B4 – Elos de Corrente Contínua e Eletrônica de Potência.