



## Grupo de Estudo de Desempenho de Sistemas Elétricos-GDS

### Projeto da Melhoria do Compensador Estático de Fortaleza Necessidade da Troca do BC por um Filtro Amortecido Tipo C

LUIZ CARLOS DE ALCANTARA FONSECA (1); DALTON FRANCA GUEDES FILHO (1);  
CHESF (1);

#### RESUMO

O compensador estático de Fortaleza 230 kV, necessita a troca dos seus bancos de capacitores por ter sua vida útil ultrapassada. Na época de sua instalação os estudos de distorção harmônica de tensão não apresentaram a necessidade de filtros de harmônicos, para a operação normal em 12 pulsos, bem como para a operação precária em 6 pulsos.

O estudo da reavaliação da aplicação deste compensador concluiu que para a operação em 12 pulsos, sem que sejam ultrapassados limites de tensão harmônica estabelecida pelo ONS no ponto de acoplamento comum (PAC) que é a barra de Fortaleza, é necessário que os bancos de capacitores shunt, originalmente instalado sejam trocados por filtros amortecidos sintonizados na 11ª harmônica. Na operação em 6 pulsos, para que os limites de tensão harmônica no PAC fossem atendidos seriam necessários dois filtros sintonizados nas harmônicas 5ª e 7ª. Para que esta solução seja eficaz a resistência em paralelo ao reator do filtro amortecido, teve que ser da ordem de 30 Ohm, o que levaria a muitas perdas. Uma alternativa, para evitar estas perdas, foi estudada e é apresentada neste artigo.

#### PALAVRAS-CHAVE

Qualidade da energia, Harmônicos, Compensador Estático, Filtros, Filtros Amortecidos C

#### 1.0 - INTRODUÇÃO

Na condição operativa degradada, diferentemente da operação em 12 pulsos, têm-se correntes harmônicas características de seis pulsos principalmente os harmônicos de 5ª e 7ª ordens, que têm valores elevados.

A qualidade da energia elétrica, sobre o ponto de vista de harmônicos, se mede pelo respeito aos limites de tensões harmônicas estabelecidos pelos ONS, no ponto de acoplamento comum (PAC) para os equipamentos geradores de correntes harmônicas. O compensador estático é um destes equipamentos

Com o crescimento da rede elétrica através de linhas, subestações e compensações reativas, a impedância harmônica vista da barra de Fortaleza 230 kV, (PAC), deve ter se modificado substancialmente levando à necessidade de se rever as tensões harmônicas, por serem elas o produto desta impedância harmônica da rede, pelas correntes injetadas pelo compensador.

Cada condição operativa do sistema elétrico apresenta uma impedância harmônica, ponto no plano R x X, para o determinado harmônico de interesse. Todas as possíveis condições operativas devem ser contempladas para se escolher a maior tensão harmônica ocorrida.

As diversas condições operativas apresentam uma nuvem de pontos, que podem ser envolvidas por um setor ou um polígono, sendo esta área denominada Lugar Geométrico das Impedâncias.

O cálculo da maior distorção harmônica que pode ser causada na operação do compensador estático deve ser avaliado levando em considerações todos estes pontos, ou seja, todas as possíveis condições operativas da rede.

O objetivo desse artigo é analisar a qualidade da energia elétrica, através do cálculo das tensões harmônicas causadas pelo compensador estático de Fortaleza no ponto de acoplamento comum (PAC), e sua comparação com os limites exigidos pelo ONS. Paralelamente apresentar solução para que se alcance estes limites.

O que se concluiu foi que para a operação deste compensador estático em 12 pulsos, sem que sejam ultrapassados limites de tensão harmônica estabelecida pelo ONS no ponto de acoplamento comum (PAC) que é a barra de Fortaleza, é necessário que os bancos de capacitores shunt, originalmente instalado, deste compensador sejam trocados por filtros amortecidos sintonizados na 11ª harmônica.

Para a operação precária de apenas um lado deste compensador estático, operação em 6 pulsos, para que os limites de tensão harmônica no PAC fossem atendidos seriam necessários dois filtros sintonizados nas harmônicas 5ª e 7ª, com potência da ordem de 42,5 MVar cada e um filtro amortecido de 10 MVar, sintonizado na 11ª harmônica, o que faria uma potência total de 95 MVar, que é a potência do banco de capacitores shunt deste compensador para 26 kV, em cada lado do CE.

Para que esta solução seja eficaz a resistência em paralelo ao reator do filtro amortecido, teve que ser da ordem de 30 Ohm, o que levaria a muitas perdas. Uma alternativa, para evitar estas perdas, foi estudada e apresentada neste artigo é sua troca por um filtro amortecido do tipo C. Daí uma análise econômica envolvendo as perdas e a inclusão de mais um equipamento foi feita para comparar as alternativas.

O objetivo desse informe técnico é analisar a qualidade da energia elétrica, mediante cálculo das tensões harmônicas causadas pelo compensador estático de Fortaleza no ponto de acoplamento comum (PAC), barra FORTASL-CE230 Figura 1, e sua comparação com os limites exigidos pelos Procedimentos de Rede e, paralelamente, apresentar solução para atender esses limites.

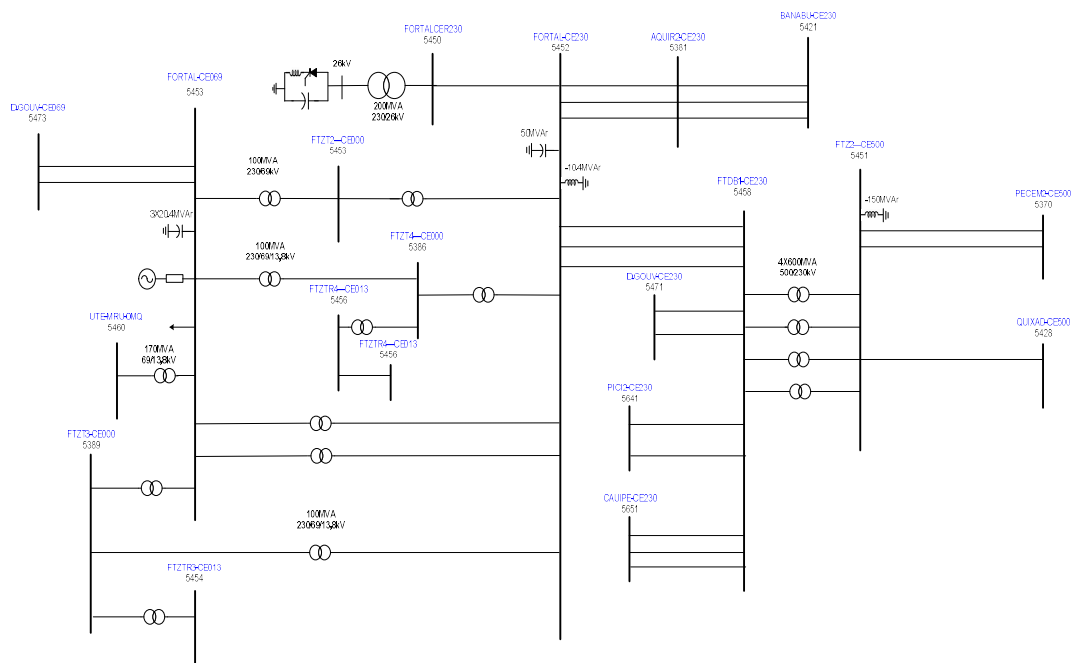


FIGURA 1 – Diagrama Unifilar com a Localização do PAC do Compensador Estático de Fortaleza

## 2.0 - DADOS E CONSIDERAÇÕES

### 2.1 Limites de Harmônicos no PAC

O desempenho da rede básica quanto a harmônicos, em regime permanente é observado por meio de indicadores associados à distorção harmônica de tensão, monitorada em barramentos de responsabilidade de concessionárias de transmissão e nos pontos de observação de tensão.

A distorção de tensão harmônica individual (DTHI) corresponde ao valor obtido da relação percentual entre a tensão harmônica da ordem h,  $V_h$ , e a tensão à frequência fundamental,  $V_1$ , ambas medidas em volts:

$$DTHI_h = 100 \frac{V_h}{V_1} \quad (1)$$

A distorção de tensão harmônica total (DTHT) corresponde ao valor obtido da raiz quadrada do somatório das DTHI de ordens 2 a 50:

$$DTHT = \sqrt{\sum DTHI_h^2} \quad (2)$$

Para avaliação da distorção harmônica de tensão são utilizados os indicadores DTHI e DTHTS95%, considerando o percentil 95 dos dados coletados na campanha. O indicador DTHTS95% é obtido a partir da medição ao longo de 7 dias consecutivos, determinando-se o valor que foi superado em 5% dos registros durante períodos de 24h, considerando valores integralizados em intervalos de 10 minutos. O valor final do indicador é então o maior dentre os 7 obtidos, em base diária.

O desempenho da rede básica quanto à distorção harmônica de tensão é avaliado a partir da comparação dos indicadores DTHI e DTHTS95% com os respectivos limites global e individual. Os limites são definidos em [1], e os individuais na Tabela 1.

Tabela 1– Limites globais inferiores para os indicadores DTHI e DTHTS95%.

13,8KV ≤ V ≤ 69 kV				V ≥ 69 kV			
DTHI ímpar		DTHI par		DTHI ímpar		DTHI par	
Ordem	Valor (%)	Ordem	Valor (%)	Ordem	Valor (%)	Ordem	Valor (%)
3 A 25	1,5%			3 a 25	0,6%		
		todos	2%			todos	0,3%
≥ 27	0,7%			≥ 27	0,4%		
DTHTS95%=3%				DTHTS95%=1,5%			

## 2.2 Metodologia do Estudo

A metodologia adotada pelo ONS para elaboração dos estudos de QEE consiste na determinação do lugar geométrico (LG) de impedância harmônica da rede externa através de setor circular ou polígono convexo de admitâncias, a rede interna do compensador estático onde são simulados o transformador abaixador e os bancos de capacitores e na barra de baixa são injetadas as correntes harmônicas geradas pelo reator controlado do Compensador Estático.

Foram realizadas as atividades de acordo com os requisitos exigidos nos Procedimentos de Rede do ONS [3].

## 2.3 Compensador Estático de Fortaleza

O Compensador Estático de Fortaleza é do tipo capacitor fixo e reator controlado a Tiristores conforme Figura 2.

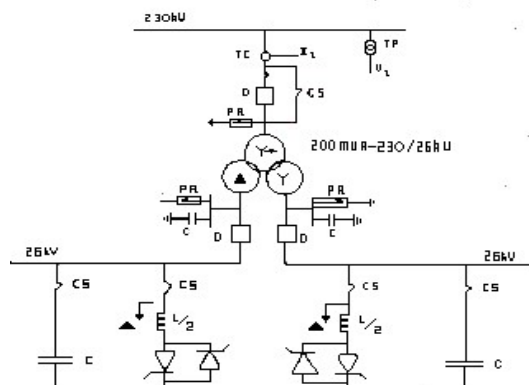


FIGURA 2 Diagrama Unifilar do Compensador Estático de Fortaleza

## 2.4 CORRENTES HARMÔNICAS DO COMPENSADOR

As correntes harmônicas de 6 e 12 pulsos foram calculadas para os ângulos de disparo que as maximiza, foram obtidas de [4] e podem ser vistas na Tabela 2.

As correntes não características de 12 pulsos foram consideradas 20% do valor da corrente da mesma ordem harmônica, injetadas na operação em 6 pulsos.

TABELA 2 - Correntes Harmônicas do CE Fortaleza

Correntes Harmônicas do CE Fortaleza						
Harmônico	Freq.	6 Pulsos	12 Pulsos	6 Pulsos	12 Pulsos	
		(A)		(pu)		12 pulsos /2 (pu)
2	120	9,73	17,03	0,004382	0,007669	0,003834587
3	180	46,68	62,97	0,021022	0,028357	0,014178741
4	240	5,29	4,32	0,002382	0,001945	0,000972720
5	300	273,46	54,69	0,123148	0,024629	0,012314362
6	360	4,05	2,41	0,001824	0,001085	0,000542652
7	420	137,44	27,49	0,061894	0,012380	0,006189830
9	540	14,76	12,96	0,006647	0,005836	0,002918159
11	660	54,71	102,02	0,024638	0,045943	0,022971497
13	780	38,93	72,3	0,017531	0,032559	0,016279546
15	900	8,62	8,88	0,003882	0,003999	0,001999479
17	1020	22,53	4,51	0,010146	0,002031	0,001015501
19	1140	17,94	3,59	0,008079	0,001617	0,000808348
21	1260	6	5,86	0,002702	0,002639	0,001319476
23	1380	12,12	22,3	0,005458	0,010042	0,005021215
25	1500	10,2	18,75	0,004593	0,008444	0,004221874

Obs.: Correntes não características de 12 pulsos foram consideradas 20% do valor da corrente, da mesma ordem harmônica, injetadas na operação em 6 pulsos

### 3.0 - CÁLCULO DO LUGAR GEOMÉTRICO DAS IMPEDÂNCIAS

Para realização desse estudo foi utilizada a base de dados do PAR ciclo 2019/2021 para os anos 2019, 2020 e 2021 nos patamares de carga leve, carga média e carga pesada, inverno e verão, no formato do programa HarmZs (versão 3.0) [2], desenvolvido pelo CEPEL.

Além dessas condições de carga, correspondendo aos casos base (Caso 01), as seguintes contingências foram levadas em consideração para a obtenção do lugar geométrico (LG).

- Caso 02 – Desligamento de uma das LT 230 kV Fortaleza - Banabuiú.
- Caso 03 – Desligamento de uma das LT 230 kV Fortaleza – Fortaleza II.
- Caso 04 – Desligamento de uma das LT 230 kV Fortaleza – Aquiraz.
- Caso 05 – Desligamento de uma das LT 230 kV Fortaleza – D. Gouveia.
- Caso 06 – Desligamento de uma das LT 230 kV Fortaleza II – Pici.
- Caso 07 – Desligamento de uma das LT 230 kV Fortaleza II – Cauipe.
- Caso 08 – Desligamento de uma das LT 230 kV Fortaleza II – Quixadá.
- Caso 09 – Desligamento de uma das LT 500 kV Fortaleza II – Pecém.
- Caso 10 – Desligamento de um transformador 230/69kV da SE Fortaleza
- Caso 11 – Desligamento de um transformador 500/230 kV da SE Fortaleza II

### 4.0 - FILTROS AMORTECIDOS E SINTONIZADOS

Foram considerados neste relatório dois tipos de filtros: os sintonizados e os amortecidos caracterizados por [5]:

- O filtro sintonizado (filtro de alto Q, neste estudo foi considerado  $Q=40$ ), o qual é sintonizado em faixa bastante estreita para uma ou duas das frequências harmônicas mais baixas como a 5ª e 7ª, por exemplo.
- O filtro amortecido (filtro de baixo Q), o qual, se conectado “shunt”, oferece uma baixa impedância sobre uma larga faixa de frequências, por exemplo, a 17ª e harmônicos superiores. Este segundo tipo é também chamado filtro passa-alta.

Os filtros amortecidos têm vantagens em relação aos filtros sintonizados quais sejam: desempenho menos sensível a variações de frequência e potência de curto-circuito do sistema e tolerâncias de seus componentes; espectro significativamente maior de frequências a serem filtradas; efeito reduzido das ressonâncias paralelas entre os filtros e a impedância do sistema. Como desvantagens, apresentam nível menor de filtragem na frequência de sintonia, custo maior devido à necessidade de resistores de amortecimento e perdas ôhmicas maiores. Os filtros amortecidos, quando utilizados para a absorção de diversas ordens harmônicas, são conhecidos usualmente como filtros “passa-altas”. Neste estudo foi considerada, a princípio, uma resistência no valor de 100  $\Omega$ .

Para enfrentar o problema das perdas ôhmicas é usado um arranjo no qual se coloca um capacitor em série com o indutor deste filtro, com uma capacitância tal que o ramo fica sintonizado à frequência fundamental.

## 5.0 - ANÁLISE DAS SIMULAÇÕES

Estas análises foram feitas para as condições operativas de 6 e 12 pulsos, o que correspondem respectivamente à operação precária de só um lado do CE ou da operação dos dois lados.

Na definição da envoltória do Lugar Geométrico se adotou o polígono por representar melhor o comportamento real das possíveis impedâncias da rede.

### 5.1 Operação do CE FTZ em 6 Pulsos

Nesta condição operativa, degradada, as tensões harmônicas na barra de Fortaleza 230 kV, barra de acoplamento comum (PAC), ultrapassam os valores limites as ordens harmônicas: 5ª, 7ª, 9ª, 11ª e 13ª, como pode ser visto na Tabela 3.

TABELA 3 Tensões Harmônicas na barra de Fortaleza 230kV devido à operação em 6 pulsos com capacitor derivação do CE

Freq(Hz)	Harm.	DHI Máx Setor(%)	DHI Máx Polig(%)
300	5	80,350	2,794
420	7	12,119	2,802
540	9	2,683	1,317
660	11	1,526	1,301
780	13	7,276	1,943

Foi feita uma primeira tentativa para solucionar as distorções utilizando um filtro amortecido, sintonizado na primeira frequência que ultrapassou os critérios, ou seja, na 5ª. Foi utilizada a potência total do banco de capacitores original. Os resultados estão apresentados na Tabela 4.

TABELA 4 Tensões Harmônicas na barra de Fortaleza 230kV devido à operação em 6 pulsos com filtro amortecido sintonizado no 5º harmônico.

Freq(Hz)	Harm.	DHI Máx Setor(%)	DHI Máx Polig(%)
300	5	0,713111	0,558278
420	7	1,59682	0,71919
780	13	0,830317	0,452495

Observa-se que o sétimo harmônico ultrapassou os limites. Outras tentativas mudando a frequência de ressonância, deste filtro amortecido, para a 3ª, 4ª 6ª ou 7ª harmônica, sempre alguma tensão harmônica teve seus valores limites na barra do PAC, ultrapassados. A utilização deste filtro amortecido seria uma alternativa possível uma vez que a ultrapassagem foi de apenas 16%.

Utilizando uma solução mais abrangente foi feita uma simulação com filtros de 5ª e 7ª ordens sintonizados, com potência individual sendo a metade da potência do banco de capacitores shunt do CE. A simulação pode ser vista na Tabela 5.

TABELA 5 Tensões Harmônicas na barra de Fortaleza 230kV devido à operação em 6 pulsos com filtro sintonizado no 5º e 7º harmônico.

Freq(Hz)	Harm.	DHI Máx Setor(%)	DHI Máx Polig(%)
540	9	4,778491243	0,256661648
780	13	2,105078565	0,656267049

Nesta condição o 13º harmônico foi ultrapassado e, portanto, foi feita a simulação utilizando também um filtro amortecido sintonizado no 11º harmônico, R=100 Ω, sendo de 10MVAR enquanto os sintonizados seriam de 42,5 MVAR cada perfazendo um total de 95 MVAR, potência total do banco shunt do CE para os 26 kV. Ver Tabela 6.

TABELA 6 Harmônicas na barra de Fortaleza 230kV devido à operação em 6 pulsos com filtro sintonizado no 5º e 7º harmônico e amortecido sintonizado no 11º harmônico R=100Ω.

Freq(Hz)	Harm.	DHI Máx Setor(%)	DHI Máx Polig(%)
540	9	2,158593609	0,271360948
780	13	2,919985719	0,453940282

Este caso foi feito diminuindo a resistência do filtro amortecido para 30 Ω, e o resultado está apresentado na Tabela 7. Os valores se encontram dentro dos limites.

TABELA 7 Harmônicas na barra de Fortaleza 230kV devido à operação em 6 pulsos com filtro sintonizado no 5º e 7º harmônico e amortecido sintonizado no 11º harmônico, R= 30Ω.

Freq(Hz)	Harm.	DHI Máx Setor(%)	DHI Máx Polig(%)
540	9	0,279006143	0,13947618
660	11	0,240192864	0,24324055
780	13	2,830656466	0,51666736

A escolha desta sintonia se deve à superação que ocorrerá na operação em 12 pulsos.

## 5.2 Operação do CE FTZ em 12 Pulsos

Nesta condição operativa em 12 pulsos, condição normal de operação, os harmônicos característicos de 6 pulsos praticamente desaparecem restando apenas uma pequena fração devida a desequilíbrios.

A Tabela 8 mostra a simulação com apenas o banco de capacitores shunt do CE, observa-se que as ordens harmônicas 9ª, 11ª e 13ª foram ultrapassadas.

TABELA 8 Tensões Harmônicas na barra de Fortaleza 230kV devido à operação em 12 pulsos com banco de capacitores shunt do CE.

Freq(Hz)	Harm.	DHI Máx Setor(%)	DHI Máx Polig(%)
540	9	0,966441105	0,777223996
660	11	1,005852681	0,639551892
780	13	4,777601513	2,627140563

Caso se coloque um filtro amortecido passa-alta sintonizado no 11º harmônico a resposta pode ser vista na Tabela 9, as tensões harmônicas no PAC ficariam dentro dos limites. Qualquer outra frequência de sintonia deste filtro haveria a superação de limite por alguma ordem harmônica.

TABELA 9 Tensões Harmônicas na barra de Fortaleza 230kV devido à operação em 12 pulsos com filtro amortecido sintonizado no 11º harmônico

Freq(Hz)	Harm.	DHI Máx Setor(%)	DHI Máx Polig(%)
540	9	0,539686163	0,243867165
660	11	0,147852565	0,111123207
780	13	1,731256057	0,59794247

A introdução de dois filtros sintonizados nas 5ª e 7ª ordens harmônicas não introduziriam nenhuma ressonância e as tensões no PAC continuariam dentro dos limites conforme pode ser visto na Tabela 10.

TABELA 10 - Tensões Harmônicas na barra de Fortaleza 230kV devido à operação em 12 pulsos com filtro amortecido sintonizado no 11º harmônico e filtros sintonizados no 5º e 7º harmônicos.

Freq(Hz)	Harm.	DHI Máx Setor(%)	DHI Máx Polig(%)
540	9	0,777411475	0,178434314
660	11	0,159563896	0,11305926
780	13	1,917298076	0,532327375

Como foi visto no item 4.2 a soma das correntes na barra de alta do transformador do CE sofre uma redução devido à expressão do IEC (1). Caso não se considerasse este fator corretivo foi feita a simulação apresentada na Tabela 11.

TABELA 11 - Tensões Harmônicas na barra de Fortaleza 230kV devido à operação em 12 pulsos com filtro amortecido sintonizado no 11º harmônico,  $r=100\Omega$  e filtros sintonizados no 5º e 7º harmônicos. Sem fator do somatório das correntes na alta.

Freq(Hz)	Harm.	DHI Máx Setor(%)	DHI Máx Polig(%)
540	9	0,947675203	0,217513865
660	11	0,225657425	0,159889939
780	13	2,711468858	0,75282457

Observa-se que o 13º harmônico foi ultrapassado. Este caso foi refeito diminuindo a resistência do filtro amortecido para 30  $\Omega$ , e o resultado está apresentado na Tabela 12.

TABELA 12 - Tensões Harmônicas na barra de Fortaleza 230kV devido à operação em 12 pulsos com filtro amortecido sintonizado no 11º harmônico,  $R=30\Omega$ , e filtros sintonizados no 5º e 7º harmônicos. Sem fator do somatório das correntes na alta.

Freq(Hz)	Harm.	DHI Máx Setor(%)	DHI Máx Polig(%)
120	2	0,458814884	0,152012482
180	3	1,853882669	0,525333694
240	4	0,056853243	0,055426169
300	5	0,0075804	0,007289609
360	6	0,081291866	0,030796759
420	7	0,010560412	0,004496364
540	9	0,465554789	0,173904925
660	11	0,442334477	0,290875928
780	13	1,203440797	0,576879277
900	15	0,107439904	0,078284525
1020	17	0,088856564	0,041592175
1140	19	0,141446985	0,039645475
1260	21	0,027192753	0,028397716
1380	23	0,328828309	0,188041122
1500	25	0,515046178	0,332092071

Nota-se que todas tensões harmônicas estão dentro dos limites com esta solução.

### 5.3 Alternativa com o Filtro Amortecido Tipo C

Os estudos mostraram a necessidade de se diminuir a resistência em paralelo do filtro amortecido de 100  $\Omega$  para 30  $\Omega$  para que as tensões harmônicas ficassem dentro dos critérios, isso leva a um aumento da dissipação de energia neste resistor.

Neste item é apresentada a análise da alternativa onde se usa os dois filtros sintonizados e troca-se o filtro amortecido tradicional por um do Tipo C, com a mesma sintonia e a mesma resistência de 30  $\Omega$ , visando a diminuição da potência dissipada pelo filtro.

#### 5.3.1 Análise do Desempenho da Filtragem

Foi feita uma nova simulação tocando o filtro amortecido tradicional pelo Tipo C para a condição de seis pulsos. As tensões harmônicas observadas nesta condição são apresentadas na Tabela 13.

TABELA 13 - Tensões Harmônicas na barra de Fortaleza 230kV devido à operação em 6 pulsos com filtro amortecido do tipo C, sintonizado no 11º harmônico,  $R=30\Omega$ , e filtros sintonizados no 5º e 7º harmônicos.

Freq(Hz)	Harm.	DHI Máx Setor(%)	DHI Máx Polig(%)	Freq(Hz)	Harm.	DHI Máx Setor(%)	DHI Máx Polig(%)
120	2	0.13	0.09	780	13	2.72	0.44
180	3	0.55	0.35	900	15	0.25	0.11

240	4	0.14	0.07	1020	17	0.29	0.25
300	5	0.08	0.06	1140	19	0.59	0.22
360	6	0.28	0.06	1260	21	0.02	0.03
420	7	0.11	0.03	1380	23	0.12	0.11
540	9	2.48	0.27	1500	25	0.14	0.22
660	11	0.20	0.13				

Todas elas estão dentro dos limites nesta alternativa, tendo o mesmo desempenho de quando foi utilizado o filtro amortecido tradicional, conjuntamente com os sintonizados.

Para a condição normal de operação, ou seja, 12 pulsos, desconsiderando o fator corretivo do somatório da corrente na alta, foi refeita a simulação agora com o filtro amortecido Tipo C, ao invés do amortecido tradicional, com a resistência em paralelo de  $30 \Omega$ , além dos dois filtros sintonizados. Os resultados da simulação estão apresentados na Tabela 14.

TABELA 14 - Tensões Harmônicas na barra de Fortaleza 230kV devido à operação em 12 pulsos com filtro amortecido do tipo C, sintonizado no 11º harmônico,  $R=30\Omega$ , e filtros sintonizados no 5º e 7º harmônicos. Sem fator do somatório das correntes na alta.

Freq(Hz)	Harm.	DHI Máx Setor(%)	DHI Máx Polig(%)	Freq(Hz)	Harm.	DHI Máx Setor(%)	DHI Máx Polig(%)
120	2	0.46	0.15	780	13	1.13	0.56
180	3	1.86	0.53	900	15	0.11	0.08
240	4	0.06	0.06	1020	17	0.09	0.04
300	5	0.01	0.01	1140	19	0.14	0.04
360	6	0.08	0.03	1260	21	0.03	0.03
420	7	0.01	0.00	1380	23	0.33	0.19
540	9	0.54	0.18	1500	25	0.52	0.33
660	11	0.43	0.29				

Os valores das tensões harmônicas estão dentro dos critérios e, portanto, o desempenho é similar ao caso onde foi usado o filtro amortecido tradicional além dos filtros sintonizados.

### 5.3.2 Análise das Perdas

Para comparação das perdas entre as alternativas de filtro amortecido com  $100 \Omega$ ,  $30 \Omega$  e o Tipo C de  $30 \Omega$ , utilizou-se a modelagem em ATPDRAW, mostrada na Figura 3.

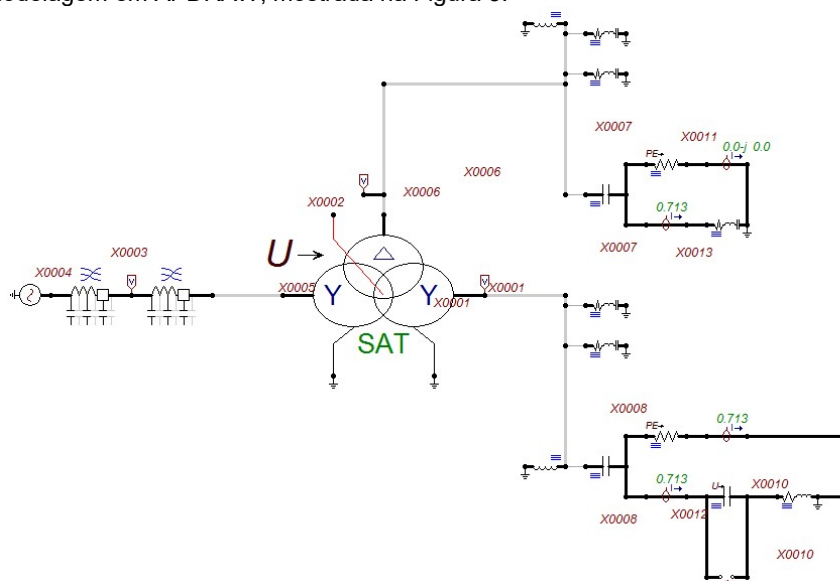


FIGURA 3 Modelagem do CE Fortaleza no ATPDRAW para o cálculo das perdas no resistor do filtro amortecido.



A Tabela 15 mostra as potências dissipadas em cada uma das alternativas. Observa-se que a utilização do filtro amortecido Tipo C diminui sensivelmente essas perdas.

TABELA15 – Potência dissipada no resistor do filtro amortecido

Alternativa	P(W) rms	pu da Alternativa Tipo C
Amortecido 100 Ω	212,13	482.11
Amortecido 30 Ω	707,10	1607.05
Amortecido Tipo C, 30 Ω	0,44	1.00

## 6.0 - CONCLUSÕES

Para a operação do compensador estático de Fortaleza em 12 pulsos, sem que sejam ultrapassados limites de tensão harmônica estabelecidos pelo ONS no ponto de acoplamento comum (PAC) é necessário que o banco de capacitores shunt deste compensador seja transformado em um filtro amortecido Tipo C, com uma resistência shunt de 30 Ω, sintonizado na 11ª harmônica.

Na condição de operação degradada, com apenas um lado deste compensador estático, operação em 6 pulsos, para que os limites de tensão harmônica no PAC sejam atendidos são necessários dois filtros sintonizados nas harmônicas 5ª e 7ª, com potência da ordem de 42,5 MVar cada e um filtro amortecido, Tipo C, de 10 MVar, sintonizado na 11ª harmônica, o que resultará em uma potência total de 95 MVar, que é a potência do banco de capacitores shunt deste compensador, para 26 kV, localizado em cada lado do CE.

O capacitor ressonante a 60H com o reator do filtro amortecido deverá ter as seguintes características (capacitor C2 da Figura 4):

- C2=4.747,9 μF
- V= 15 V (tensão entre os terminais do capacitor)
- I=30 A

O nível de isolamento, deste capacitor, deverá ser compatível com o do filtro como um todo e é responsabilidade do fabricante sua adequação e deve ser da ordem de 31,5 kV, que é a tensão nominal do banco de capacitores original.

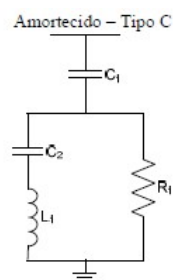


FIGURA 4 Filtro Amortecido Tipo C

As outras características dos filtros são apresentadas na Tabela 1.

TABELA 1 Características dos Filtros

Filtro Vnom=26 kV	R(Ω)	L(mH)	C(μF)	Q (MVar)
5ª	-	1,6876	166,76	42,5
7ª	-	0,8610	166,76	42,5
Amortecido C	30	1,4819	39,23	10,0

## 7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) ONS, Submódulo 2.8 – “Gerenciamento dos indicadores de qualidade da energia elétrica da Rede Básica”. Ver, 2016/12 de 16/12/2016.
- (2) Minuta do Manual de Utilização do Programa – HarmZs - Versão 3.0 - CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
- (3) Procedimentos de Rede - Submódulo 23.3 - Diretrizes e critérios para estudos elétricos- 2016.12 - 16/12/16 Resolução Normativa nº 756/16
- (4) RT-08-08-11/96 – Estudo da Influência dos Harmônicos do Compensador Estático de Fortaleza no Banco de Capacitores Shunt 230 kV
- (5) Análise De Filtros Passivos De Harmônicos De Conversor CA/CC De Seis Pulsos - Marina Mariana Davi da Silva. Dissertação de mestrado 2007
- (6) HarmZs – Programa para Cálculo do Comportamento Harmônico de Sistemas Elétricos, versão 3.1 - CEPEL 2017

## 8.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Luiz Carlos de Alcântara Fonseca nasceu em 20 de julho de 1953, em Recife, Pernambuco, é engenheiro eletricitista formado em 1977 pela UFPE, e especializou-se em Sistema de Potência pelo PTI em 1979.

Mestre em Sistema de Potência pela UFPE, em 2003.

De 1977 a 2019, trabalha no Departamento de Planejamento da Expansão – DEPE da CHESF, se especializou em estudos de Qualidade da Energia, atualmente está desenvolvendo Estudos de Transitórios Eletromagnéticos. Suas áreas de interesse são: Compatibilidade Eletromagnética, Transitórios Eletromagnéticos e Qualidade da Energia.



Dalton França Guedes Filho, é brasileiro natural de Corrente-PI, possui graduação e metrado em Engenharia Elétrica pela UFCG, tendo realizado a graduação em cooperação com o INPG-France. Iniciou atividades profissionais na CHESF, na área de Estudos de Sistemas de Potência com foco no planejamento de ampliação de redes elétricas e posteriormente passou a desenvolver também atividades relacionadas a projetos eletromecânicos de subestações e especificação, testes e validação de protótipos de equipamentos de alta tensão, com especial atenção aos Transformadores para Instrumentos.