



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

Versão 1.0
23 a 26 de Outubro de 2011
Florianópolis - SC

GRUPO - 4

GRUPO DE ESTUDO DE ANÁLISE E TÉCNICAS DE SISTEMAS DE POTÊNCIA - GAT

**SISTEMA DE TRANSMISSÃO CCAT DO MADEIRA – ESTUDOS DE DESEMPENHO HARMÔNICO E RATING
DOS FILTROS CA DO BIPOLO 2**

Fernando Cattan Jusan(*)
Luiza Maria de Sousa Carijó
Guilherme Sarcinelli Luz
Ricardo Andre Gonçalves

Manfredo Correia Lima

Marcos Rodolfo Cavalheiro

Gearóid Oheidhin

ELETROBRAS FURNAS

ELETROBRAS CHESF

CTEEP

ALSTOM GRID

RESUMO

Este trabalho apresenta os principais resultados dos estudos de desempenho harmônico e de determinação das capacidades nominais (*rating*) dos filtros CA das estações conversoras do bipólo 2 do Sistema de Transmissão em CCAT (Corrente Contínua de Alta Tensão) associado ao aproveitamento hidrelétrico do Rio Madeira. São apresentadas as bases de especificação, a filosofia de projeto, a metodologia de cálculo, os principais dados utilizados, os mais relevantes resultados obtidos e o arranjo final dos filtros projetados.

PALAVRAS-CHAVE

Elo CCAT, Filtros CA, Harmônicos, Transmissão do Madeira

1.0 - INTRODUÇÃO

O complexo hidrelétrico do Rio Madeira, localizado no estado de Rondônia, é composto por duas grandes usinas: Santo Antônio (3150 MW) e Jirau (3450 MW). O atendimento local será realizado por meio de dois conversores *Back-to-Back* com tecnologia CCC (Lote A), a serem instalados na subestação Coletora Porto Velho 500 kV. O consórcio Porto Velho Transmissora de Energia S.A. (PVTE) é o responsável pela construção dos *Back-to-Backs*, a serem fornecidos pela ABB. A potência excedente será escoada para a região Sudeste através de um sistema de transmissão composto por dois bipólos de ± 600 kV em CCAT (Corrente Contínua em Alta Tensão) com potência nominal de 3150 MW cada, interligando as subestações Coletora Porto Velho 500 kV (RO) e Araraquara-2 500 kV (SP), através de linhas CC de cerca de 2400 km. A implantação do primeiro bipólo (Lote C) é de responsabilidade do consórcio Estação Transmissora de Energia (ETE), com fornecimento ABB. O consórcio Interligação Elétrica do Madeira (IE Madeira) é o encarregado pela implantação do segundo bipólo (Lote F), que terá fornecimento da Areva/Alstom Grid. O IE Madeira é formado pelas empresas CTEEP (51%), Eletrobrás Furnas (24,5%) e Chesf (24,5%). A Figura 1 mostra um diagrama unifilar simplificado do sistema de transmissão do Madeira, apresentando a divisão por lotes do empreendimento (1).

Este IT descreve os estudos realizados para o projeto dos filtros CA das estações conversoras do Bipólo 2. São apresentadas as bases de especificação, a filosofia de projeto, a metodologia de cálculo, os principais dados utilizados e o arranjo final dos filtros projetados. As premissas para o projeto e verificação do desempenho dos filtros foram estabelecidas de forma a atender plenamente os requisitos da especificação técnica da ANEEL (2) e dos Procedimentos de Rede do ONS (3)(4). O projeto segue ainda recomendações de normas internacionais (5)(6), mantendo margens de segurança adequadas conforme padrões internos do fabricante. As diferenças tecnológicas existentes entre os fabricantes dos dois bipólos representam um desafio adicional ao projeto, particularmente no que se refere ao projeto dos filtros CA.

(*) Rua Real Grandeza, n° 219 – sala 605 - Bloco B – CEP 22.281-900 Rio de Janeiro, RJ – Brasil
Tel.: (+55 21) 2528-5451 – Fax: (+55 21) 2528-5576 – Email: cattan@furnas.com.br

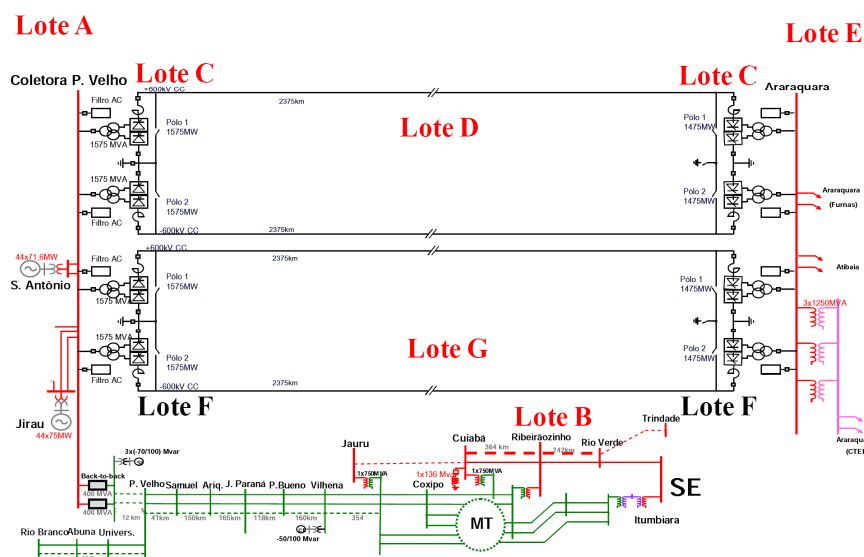


Figura 1 – Diagrama unifilar do sistema de transmissão CCAT do Madeira – Divisão por lotes

2.0 - REQUISITOS DA ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA

A estratégia adotada pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) para o leilão do sistema de transmissão do Madeira teve como base a elaboração de uma especificação técnica funcional, que não apresenta de forma detalhada as características técnicas dos equipamentos a serem fornecidos, além de não definir uma série de dados básicos do sistema CA, requisitos de desempenho e aspectos fundamentais das metodologias de cálculo, ficando a cargo das transmissoras o levantamento dos dados de sistema e definição dos requisitos não estabelecidos.

Os requisitos gerais apresentados na especificação técnica da ANEEL para ambas as estações conversoras foram os seguintes:

- Faixa de frequência do sistema CA (contínua): $60 \pm 0,5$ Hz
- Faixa de frequência do sistema CA (curta duração): 56 a 66 Hz, por 20 segundos
- Faixa de tensão CA: 475 kV a 550 kV
- Componente de sequência negativa na tensão CA: 1% para desempenho e 2% para *rating*

A especificação da ANEEL deixou a cargo das transmissoras o levantamento da faixa de temperatura ambiente para determinação da variação dos componentes dos filtros (capacitores e resistores) devido a variações na temperatura. Os seguintes valores foram utilizados no projeto:

- Porto Velho: $+18^{\circ}\text{C}$ a $+36^{\circ}\text{C}$
- Araraquara: $+5^{\circ}\text{C}$ a $+40^{\circ}\text{C}$

A especificação técnica exigiu que a avaliação do desempenho harmônico fosse realizada para os modos de operação definidos na Tabela 1.

Tabela 1 – Modos de operação do sistema de transmissão CCAT do Madeira

Modos de Operação	Requisito
Normal (Bipolar), Potência Reversa, Operação em Paralelo, Monopolar (com retorno metálico e pela terra)	A
Tensão Reduzida (70%) e Alto Gama (<i>High Mvar</i>)	B
Sobrecarga <i>Low ambient</i> , de curta e de longa duração	C

Onde:

A → Necessidade de atendimento ao desempenho harmônico para as configurações de rede completa e (N-1) da rede CA externa, bem como contingência (N-1) de cada tipo de filtro CA do elo CCAT

B → Idem à condição A, mas com todos os bancos de filtro CA do elo CCAT presentes

C → Os níveis das distorções harmônicas gerados pela conversora nas condições operativas de sobrecarga de curta duração (5 segundos), de longa duração (30 minutos) e *low ambient* (contínua) devem ser informados

A especificação da ANEEL definiu os limites de distorção individual (D_h) e de distorção harmônica total (THD) no ponto de acoplamento comum (PAC) com a rede básica, os quais foram extraídos dos Procedimentos de Rede do ONS (4) e reproduzidos na Tabela 2.

Tabela 2 – Limites individuais de distorção harmônica de tensão e THD

Harmônicos ímpares		Harmônicos pares	
Ordem	Limite (%)	Ordem	Limite (%)
3 a 25	0,6%	Todos	0,3%
≥ 27	0,4%		
THD = 1,5%			

Não foram estabelecidos requisitos de desempenho para a operação conjunta do Bipólo 2 com os demais conversores (Bipólo 1 e *Back to Back*). Desta forma, o projeto foi realizado para atender apenas aos limites individuais, apesar de algumas análises envolvendo os dois bipólos terem sido realizadas.

A especificação técnica da ANEEL deixou a cargo da transmissora o estabelecimento dos limites de TIF (*Telephone Influence Factor*) e do produto IT do lado CA, de forma que as correntes harmônicas nas linhas CA conectadas às subestações conversoras não produzam interferência inaceitável em linhas telefônicas próximas. Foi assumido um limite de 50 para o TIF. Para o produto IT não foi estabelecido um limite, sendo seu valor calculado apenas para fins informativos.

A especificação técnica exigiu que a determinação das capacidades nominais (*rating*) dos filtros levasse em conta os modos de operação descritos na Tabela 1, inclusive nas condições de sobrecarga de curta duração (50% por 50 segundos), de longa duração (33% por 30 minutos) e *low ambient* (contínua).

3.0 - CÁLCULO DA IMPEDÂNCIA HARMÔNICA DA REDE CA

A especificação técnica da ANEEL não estabeleceu os envelopes de impedância harmônica da rede CA nem as diretrizes para sua elaboração. Deste modo, as transmissoras realizaram inicialmente seus cálculos baseadas em hipóteses e critérios distintos, o que poderia levar a resultados discrepantes. Por exemplo, o Bipólo 1 tem previsão de entrada em operação em abril de 2012 e, portanto, considerou as impedâncias relativas a este ano nas suas análises. O Bipólo 2, por sua vez, considerou apenas cenários a partir de 2013.

Os cálculos do IE Madeira (Bipólo 2) consideram ainda:

- Diferentes cenários de carga (leve, média e pesada), geração e intercâmbio entre regiões no horizonte 2013 a 2017;
- Número total de unidades geradoras variando entre 19 e 90 em Porto Velho 500 kV;
- Contingências simples e duplas nas redes de 500 kV e 440 kV associadas às estações conversoras;
- Cargas não foram representadas;
- Variação da frequência operativa da rede CA ($60 \pm 0,5$ Hz para Araraquara e 60 ± 1 Hz para Porto Velho);
- Representação da resistência de transformadores ($Q_t=50$) e de geradores ($R_g = X_d'' / \omega \cdot T_d''$);
- Variação da resistência dos elementos da rede elétrica com a frequência dada pela equação a seguir:

Equação	Elemento	α	β	A	B	C
$R(f) = R_{60\text{Hz}} \left[A \cdot \left(\frac{f}{60} \right)^\alpha + B \cdot \left(\frac{f}{60} \right)^\beta + C \right]$	Linhas	0,7316	0,7158	-1,243	1,549	0,6
	Transformadores	1,909	1,5	0,1431	-0,08121	0,91
	Geradores	0,8802	0,8069	-0,8222	1,37	0,6

Os cálculos foram realizados com o programa Harmz, do CEPEL (7). Os resultados obtidos foram posteriormente confrontados com os cálculos da ETE (Bipólo 1), a fim de verificar se estes últimos poderiam ser utilizados no projeto dos filtros do Bipólo 2. Verificou-se que alguns pontos no plano R-X não estavam englobados pelos envelopes fornecidos pela ETE. No entanto, tais pontos não se mostraram críticos para o projeto e puderam ser desprezados. Desta forma, a partir de discussões técnicas e negociações entre as transmissoras e fabricantes, os mesmos envelopes de impedância foram utilizados nos projetos dos filtros dos dois bipólos.

Margens de segurança foram adotadas para a impedância harmônica da rede utilizada no cálculo das capacidades nominais dos filtros. A impedância mínima considerada foi $0,8 \times Z_{\min}$ e a impedância máxima $1,2 \times Z_{\max}$ dos envelopes originais. Os ângulos foram expandidos em $\pm 5^\circ$, limitados em $\pm 85^\circ$ quando os ângulos originais forem inferiores a estes valores.

4.0 - PROJETO DOS FILTROS CA

Conversores CCAT de 12 pulsos produzem no lado CA correntes harmônicas características de ordem $12n \pm 1$ em condições ideais. Outros harmônicos (não-característicos) são também produzidos devido a desequilíbrios nas impedâncias dos transformadores conversores, nos ângulos de disparo e na tensão CA. Filtros passivos são normalmente instalados nas barras CA dos conversores com o objetivo de limitar os efeitos adversos destes harmônicos.

Os objetivos fundamentais do projeto dos filtros CA apresentados neste IT são:

- Manter os níveis de distorção harmônica de tensão dentro dos limites informados na Tabela 2;
- Manter o intercâmbio de potência reativa com o sistema CA dentro de limites pré-definidos;
- Minimizar as perdas dos filtros à frequência fundamental ao mesmo tempo em que fornece amortecimento suficiente aos harmônicos (perdas harmônicas) para atender os limites de desempenho;
- Minimizar a interferência com sistemas de telecomunicação.

4.1 Cálculo das Correntes Harmônicas

Para facilitar a análise e cálculo das correntes harmônicas produzidas pelos conversores CCAT, normalmente algumas hipóteses simplificadoras são assumidas, tais como:

- Corrente CC sem ondulação (*ripple*);
- Tensão CA perfeitamente senoidal (razão de curto-circuito infinita);
- Independência entre harmônicos.

Estas hipóteses são razoavelmente válidas na prática para a maioria dos harmônicos. No entanto, estas simplificações possuem limitações e podem produzir resultados imprecisos em algumas circunstâncias. Na realidade, o conversor não é uma fonte de corrente ideal, e sim uma interface entre os lados CA e CC. Assim sendo, as correntes harmônicas CA podem ser significativamente influenciadas pela impedância e pela corrente no lado CC. Isto é particularmente verdadeiro para harmônicos de baixa ordem, sendo fortemente recomendável que a análise destes harmônicos (principalmente de 3º harmônico) leve em conta os principais efeitos da interação harmônica CA/CC (5).

O programa computacional utilizado pelo fabricante para o cálculo das correntes harmônicas produzidas pelos conversores é denominado JESSICA. O programa representa o comportamento harmônico de um sistema de transmissão CCAT de dois terminais no domínio da frequência através de um modelo composto por equações linearizadas (pequenas perturbações) e que consideram os principais efeitos da interação harmônica CA/CC. Devido à linearização, o princípio da superposição pode ser aplicado às diferentes fontes de distorção harmônica. Esta metodologia é utilizada para todos os harmônicos sem distinção, incluindo os harmônicos característicos, os característicos teoricamente cancelados e os não característicos.

Esta metodologia produz resultados mais precisos que o método clássico, porém introduz uma maior complexidade na análise, uma vez que se torna necessário incluir as impedâncias dos lados CA e CC nos cálculos das correntes harmônicas. A metodologia clássica por sua vez requer apenas dados do conversor CCAT (reatância de comutação, ângulo de disparo, tensão e corrente CC, tensão CA, tipo do transformador conversor).

O cálculo das correntes harmônicas foi realizado em intervalos de 10% da potência nominal para cada um dos modos de operação definidos na Tabela 1. Além dos requisitos descritos no item 2.0, os seguintes fatores foram levados em consideração nos cálculos (para ambas as estações):

- Faixa de ângulos de disparo consistente com os cálculos para definição do circuito principal (incluindo uma tolerância de $\pm 1^\circ$) em toda a faixa de potência transmitida;
- Tolerâncias nas reatâncias dos transformadores conversores:
 - Tolerância absoluta: $\pm 7,5\%$
 - Tolerância entre transformadores (entre pontes de 6 pulsos YD e YY): $2,5\%$
 - Tolerâncias entre fases de um mesmo transformador: $2,5\%$
- Assimetria nos ângulos de disparo: $0,04^\circ$

As piores combinações para os parâmetros acima foram consideradas de forma determinística no cálculo das correntes harmônicas, sem utilizar processos estatísticos para lidar com a aleatoriedade das suas variações.

É importante ressaltar que a impedância da rede CA utilizada no cálculo das correntes harmônicas não necessariamente resulta nos maiores valores possíveis de corrente, mas sim nas maiores distorções harmônicas de tensão, conforme será visto no item 4.2. A Tabela 3 apresenta um exemplo das principais correntes harmônicas calculadas para o terminal inversor de Araraquara 500 kV operando no modo bipolar com tensão CC nominal.

4.2 Metodologia de Projeto dos Filtros CA

A metodologia utilizada para o projeto e verificação do desempenho dos filtros CA pode ser resumida através do fluxograma apresentado na Figura 2. Trata-se de um processo iterativo realizado em diversas etapas, no qual o objetivo é determinar a configuração e os parâmetros dos filtros CA que proporcionem o atendimento aos requisitos de desempenho.

Tabela 3 – Principais correntes harmônicas para operação bipolar com tensão CC nominal – Araraquara inversor

Harm	Potência transmitida (MW)														
	315	630	945	1260	1575	1890	2205	2520	2835	3150	3465	3780	4095	4410	4725
3	12,2	12,1	11,8	10,6	10,1	9,3	8,6	8,7	7,8	6,4	5,5	4,8	4,4	4,3	4,7
5	0,3	0,8	1,3	2,3	3,1	4,3	5,4	6,8	8,0	9,5	11,0	12,6	14,2	15,9	17,7
7	0,3	0,7	1,3	1,9	2,7	3,5	4,5	5,5	6,6	7,7	8,9	10,1	11,3	12,4	13,4
11	56,0	87,4	114,0	135,3	151,3	162,8	169,3	171,2	169,4	163,9	148,5	128,5	105,3	81,4	63,0
13	13,1	38,6	62,5	83,2	99,3	111,4	118,7	121,7	120,9	116,4	104,0	87,4	68,6	51,7	45,0
23	21,2	30,4	33,5	30,8	23,7	14,8	9,4	15,8	25,2	33,1	38,2	37,8	31,5	21,2	13,6
25	10,4	21,8	28,0	28,8	24,5	17,3	9,9	11,1	19,2	27,0	32,3	32,1	26,3	16,8	12,3
35	11,2	12,8	8,9	2,9	8,1	13,9	16,2	15,0	10,4	5,7	9,1	15,0	16,0	11,1	6,0
37	7,8	12,0	10,3	4,6	5,1	11,2	14,4	14,0	10,2	5,4	8,0	13,5	14,2	9,1	5,8
47	6,7	4,8	1,6	6,8	8,5	6,0	2,3	5,9	9,0	8,9	4,6	4,8	8,7	7,1	3,4
49	5,7	5,8	1,5	5,1	7,9	6,4	2,5	4,8	8,1	8,3	4,3	4,5	8,1	6,1	3,5

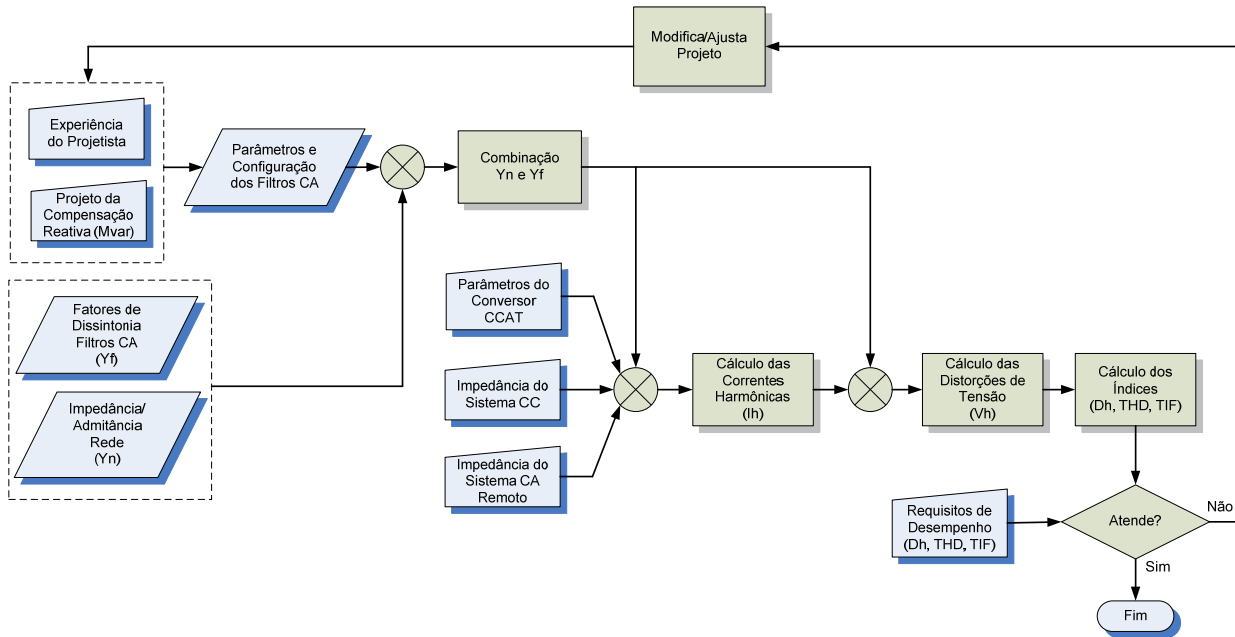


Figura 2 – Fluxograma da metodologia utilizada no projeto dos filtros CA do Bipólo 2

O cálculo da impedância harmônica foi discutido no item 3.0 deste IT. O projeto da compensação de potência reativa não é discutido neste artigo e foi considerado como um dado de entrada para o projeto dos filtros CA.

Como a metodologia utilizada pelo fabricante para o cálculo das correntes harmônicas utiliza um modelo que considera a interação harmônica CA/CC, o fluxograma da Figura 2 é um pouco diferente do processo usual (clássico), uma vez que as correntes harmônicas calculadas passam a depender também das impedâncias do sistema CC e de ambos os sistemas CA, incluindo os próprios filtros que estão sendo projetados.

As correntes harmônicas calculadas são injetadas na rede CA, conforme ilustrado no circuito da Figura 3. Na figura, I_h é a h -ésima corrente harmônica produzida pelo conversor, I_{fh} é a corrente nos filtros CA e I_{nh} é a corrente na rede elétrica. As admitâncias dos filtros e da rede elétrica são representadas por Y_{fh} e Y_{nh} , respectivamente.

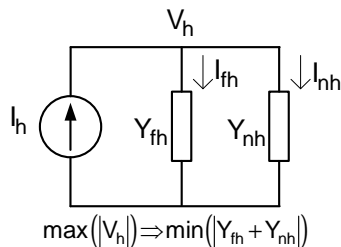


Figura 3 – Método da ressonância

$$V_h = \left(\frac{Z_{nh} \cdot Z_{fh}}{Z_{nh} + Z_{fh}} \right) \cdot I_h = \left(\frac{1}{Y_{nh} + Y_{fh}} \right) \cdot I_h \quad \text{Eq. (1)}$$

A tensão harmônica (V_h) é calculada pela equação (1). Os filtros CA devem ser capazes de manter as distorções harmônicas de tensão dentro dos limites estabelecidos, mesmo para as piores condições de dessintonia dos filtros. Como a impedância da rede elétrica é representada por envelopes de impedância, é necessário determinar o pior caso possível dentro dos mesmos, ou seja, o valor de impedância que resulte na maior distorção harmônica. Se o desempenho harmônico for satisfatório para este caso, então todas as demais situações estarão cobertas. Pela equação (1), é evidente que V_h será máxima quando o módulo de $Y_{nh} + Y_{fh}$ for mínimo. Este método é denominado "método da ressonância". Pode-se demonstrar que é necessário considerar apenas a envoltória dos envelopes e não o seu interior, tarefa esta normalmente realizada através de algoritmos computacionais de varredura.

Para cada harmônico, a impedância/admitância equivalente obtida com o método da ressonância é utilizada para calcular as correntes harmônicas e as respectivas tensões harmônicas. Este processo é repetido para todas as condições de operação avaliadas para níveis de potência transmitida de 10 a 150% (incluindo as sobrecargas) em intervalos de 10%. Com as tensões harmônicas calculadas, é possível determinar os indicadores de desempenho e compará-los com os requisitos exigidos. Se algum dos requisitos não for atendido, modificações são feitas nos parâmetros dos filtros com base nos resultados obtidos e na experiência do projetista.

Os indicadores de desempenho considerados no projeto são os seguintes:

$$D_h = \frac{V_h}{V_1} \cdot 100\% \quad \text{Eq. (2)}$$

$$\text{THD} = \sqrt{\sum_{h=2}^{49} D_h^2} \quad \text{Eq. (3)}$$

$$\text{TIF} = \frac{\sqrt{\sum_{h=1}^{49} (V_h \cdot W_h)}}{V_1} \quad \text{Eq. (4)}$$

onde D_h é a distorção harmônica individual de tensão, em %; V_h é a tensão harmônica fase-neutro de ordem h , em Volts; V_1 é a tensão nominal fase-neutro fundamental, em Volts; THD é a distorção harmônica total; TIF é o fator de influência telefônica; W_h é o peso do h -ésimo harmônico no cálculo do TIF, dado por $W_h = C_h \cdot 5 \cdot h \cdot f_0$; C_h é o fator *C-message*; h é a ordem do harmônico e f_0 é a frequência fundamental, em Hz.

Uma vez escolhida a configuração e os parâmetros dos filtros que atendam a todos os requisitos de desempenho, são determinadas as solicitações de tensão e corrente para definição das capacidades nominais de cada componente dos filtros.

4.3 Configuração dos Filtros CA

As configurações dos bancos de filtros e de capacitores propostas para as estações conversoras de Porto Velho 500 kV e Araraquara 500 kV são apresentadas na Figura 4.

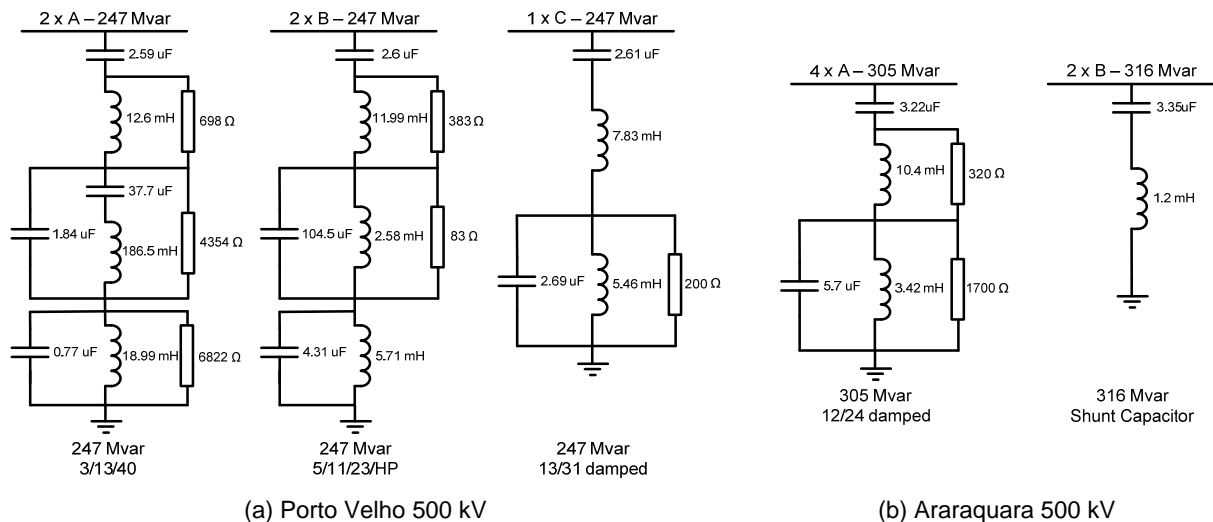


Figura 4 – Arranjo dos filtros propostos

Os filtros de Araraquara são compostos por filtros do tipo HP12/24 em conjunto com capacitores shunt para compensação reativa. Em Porto Velho, os filtros são mais complexos, compostos por bancos de tripla sintonia 3/13/40 e 5/11/23 e de dupla sintonia 13/31. Em ambas as estações conversoras, filtros com baixo fator de qualidade (amortecidos) foram utilizados para prover o necessário amortecimento e torná-los menos sensíveis às dessintonias.

Soluções diferentes para as duas estações foram necessárias pelos seguintes motivos:

- Em Porto Velho, a estação conversora fica muito próxima das usinas de Jirau e Santo Antonio, além de não existirem cargas locais. Isto resulta em um baixo amortecimento na impedância harmônica do sistema CA (baixa resistência e ângulos de impedância muito elevados). Além disso, durante o período seco na região, o número de unidades geradoras em operação é muito baixo, levando a potência de curto-circuito a níveis muito reduzidos. Por isso, ramos de 3º e 5º harmônicos foram necessários para o amortecimento de ressonâncias de baixa ordem.
- Em Araraquara, a rede CA é forte e bem amortecida e, desta forma, não foi necessária a utilização de filtros de baixa ordem.

Em relação ao projeto do Bipólo 1, intensas discussões técnicas entre os fabricantes e transmissoras culminaram na utilização de projetos similares para o terminal de Araraquara. Em Porto Velho, diferentes soluções foram adotadas para os filtros CA.

4.4 Cálculo do Desempenho Harmônico

O cálculo do desempenho harmônico dos filtros CA foi realizado utilizando o programa computacional HARP, desenvolvido pelo fabricante. As distorções individuais de tensão foram computadas em intervalos de 10% da potência nominal para cada um dos modos de operação definidos na Tabela 1, utilizando as correntes calculadas conforme descrito no item 4.2. Além dos requisitos informados no item 2.0, os seguintes fatores foram levados em consideração nos cálculos:

- Coeficiente de temperatura dos capacitores: -0,04%/°C;
- Coeficiente de temperatura dos resistores: -0,053%/°C;
- Tolerâncias de fabricação de $\pm 1\%$ para capacitores e reatores e $\pm 5\%$ para resistores;
- Envelhecimento e perdas de elementos capacitivos até o nível mínimo de trip: 0,1%

A modelagem das dessintonias dos filtros CA foi realizada utilizando o método do “desvio de frequência equivalente”. Neste método, todos os componentes dos filtros são modelados com valores constantes e as suas variações são levadas em consideração resolvendo o circuito em uma frequência equivalente, que considera não somente as variações da frequência operativa do sistema, mas também as dessintonias devido às variações nos valores dos componentes.

Para Porto Velho, os desvios de frequência equivalente são dados a seguir:

$$f_{\min} = 60 + \left(f_s - \frac{60}{\sqrt{(1 + \Delta L_M) \cdot (1 + \Delta C_M + \Delta C_T)}} \right) = 60 + \left(59,5 - \frac{60}{\sqrt{(1 - 0,01) \cdot [1 - 0,01 - 0,04 \cdot (40 - 20)]}} \right) = 58,7 \text{ Hz}$$

$$f_{\max} = 60 + \left(f_s - \frac{60}{\sqrt{(1 + \Delta L_M) \cdot (1 + \Delta C_M + \Delta C_T)}} \right) = 60 + \left(60,5 - \frac{60}{\sqrt{(1 + 0,01) \cdot [1 + 0,01 - 0,04 \cdot (18 - 20)]}} \right) = 61,1 \text{ Hz}$$

De forma similar, para Araraquara têm-se $f_{\min} = 58,65 \text{ Hz}$ e $f_{\max} = 61,27 \text{ Hz}$.

Os indicadores D_h , THD e TIF são calculados na frequência nominal e nas frequências equivalentes (f_{\min} e f_{\max}), sendo selecionado o maior dos três valores. Tanto o THD quanto o TIF foram calculados considerando todos os harmônicos em ressonância simultaneamente, uma hipótese bastante conservativa.

Para cada nível de potência transmitida, supõe-se que um determinado conjunto de filtros está conectado. O conjunto de filtros selecionados depende dos filtros disponíveis e do modo de operação de elo CCAT (bipolar, monopolar, tensão reduzida, etc.). Os pontos de chaveamento foram selecionados para atender simultaneamente aos requisitos de desempenho harmônico e de intercâmbio de potência reativa.

O desempenho também foi calculado considerando a indisponibilidade de um banco de filtros de cada tipo. Os efeitos são relativamente pequenos, uma vez que os piores casos em geral foram verificados em condições de baixa potência transmitida. A Tabela 4 e a Tabela 5 mostram um resumo dos piores resultados dentre todas as condições operativas avaliadas em função dos filtros disponíveis e dos requisitos descritos na Tabela 1.

Tabela 4 – Resumo dos piores casos de desempenho harmônico – Porto Velho

Filtros	Harmônico / Limite													THD	TIF ^(*)	IT ^(*)
	3	5	7	11	13	17	19	23	25	35	37	47	49			
	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,4	0,4	0,4	0,4	1,5	50	-
ABBC	0,33	0,58	0,14	0,36	0,56	0,32	0,30	0,33	0,34	0,27	0,21	0,20	0,20	0,82	81,7	75030
ABAC	0,33	0,51	0,28	0,53	0,34	0,26	0,42	0,36	0,44	0,27	0,19	0,20	0,19	0,90	81,7	72518
ABAB	0,33	0,72	0,20	0,50	0,50	0,25	0,56	0,36	0,44	0,27	0,18	0,20	0,19	1,10	81,7	86183
ABABC	0,33	0,60	0,12	0,50	0,47	0,22	0,51	0,46	0,44	0,33	0,21	0,28	0,25	1,03	81,7	97987

(*) Os valores de IT e TIF apresentados referem-se aos piores casos considerando operação com dois bipólos.

Tabela 5 – Resumo dos piores casos de desempenho harmônico – Araraquara

Filtros	Harmônico / Limite													THD	TIF ^(*)	IT ^(*)
	3	5	7	11	13	17	19	23	25	35	37	47	49			
	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,4	0,4	0,4	0,4	1,5	50	-
3A+0B	0,55	0,43	0,12	0,49	0,37	0,11	0,19	0,26	0,17	0,23	0,24	0,17	0,16	0,85	82,1	36571
3A+1B	0,62	0,36	0,10	0,49	0,42	0,24	0,14	0,26	0,17	0,23	0,24	0,17	0,15	0,86	82,1	37867
3A+2B	0,68	0,31	0,08	0,49	0,48	0,20	0,14	0,26	0,17	0,23	0,24	0,17	0,15	0,89	82,1	38369
4A+0B	0,62	0,35	0,09	0,49	0,34	0,09	0,17	0,26	0,17	0,23	0,24	0,17	0,15	0,80	82,1	33062
4A+1B	0,68	0,30	0,08	0,49	0,34	0,21	0,15	0,26	0,17	0,23	0,24	0,17	0,15	0,82	82,1	33062
4A+2B	0,68	0,30	0,07	0,57	0,34	0,21	0,15	0,29	0,19	0,31	0,31	0,21	0,19	0,82	82,1	35179

(*) Os valores de IT e TIF apresentados referem-se aos piores casos considerando operação com dois bipólos.

4.5 Cálculo das Capacidades Nominais (*Rating*)

Os estudos para determinação das capacidades nominais dos filtros foram realizados para determinar as máximas solicitações contínuas e de curta duração dos seus componentes (capacitores, indutores e resistores). Os filtros foram dimensionados para garantir que não haja sobrecarga harmônica ou necessidade de redução de potência para todas as condições de operação e potência transmitida (inclusive em sobrecarga), mesmo considerando a indisponibilidade de filtros.

As correntes harmônicas provenientes dos conversores foram calculadas da forma apresentada no item 4.1, considerando ainda:

- Aumento de 10% nas correntes harmônicas calculadas como margem para outras fontes harmônicas presentes na estação conversora;
- Tensão CA de sequência negativa de 2%, conforme informado no item 2.0;

Para cada harmônico, a impedância da rede CA foi selecionada de forma a maximizar a corrente harmônica nos filtros. As piores condições de dessintonia dos filtros (contínua e de curta duração) foram consideradas nos cálculos.

O dimensionamento considerou ainda a existência de harmônicos pré-existentes na rede elétrica. Estes harmônicos foram modelados como fontes de tensão harmônica aplicadas diretamente sobre os filtros, conforme ilustrado na Figura 5. Foram considerados três conjuntos diferentes de fontes harmônicas nas análises e o pior foi selecionado para cada caso. Em todos os conjuntos, o THD foi limitado a 3%, conforme mostrado na Tabela 6 (Porto Velho) e na Tabela 7 (Araraquara). Este valor corresponde ao limite global de THD definido nos Procedimentos de Rede do ONS (4).

Como não há uma relação vetorial fixa entre as correntes provenientes dos conversores (I_{fnc}) e dos harmônicos pré-existentes (I_{fhb}), as contribuições individuais foram combinadas usando a raiz quadrada das somas dos quadrados (RSS) para cada harmônico, conforme mostrado na equação (5).

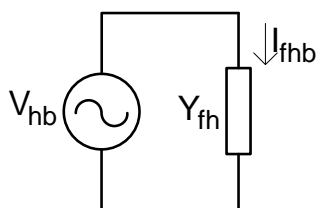


Figura 5 – Harmônicos pré-existentes na rede elétrica

$$I_{fh} = \sqrt{I_{fnc}^2 + I_{fhb}^2} \quad \text{Eq. (5)}$$

Tabela 6 – Harmônicos pré-existentes (%) – Porto Velho

Harm	B1	B2	B3
2	0.6	1	1
3	1	1.4	1
4	0.3	0.5	0.5
5	1	1.5	1
6	0.3	0.3	0.3
7	1.5	1	1
8	0.3	0.3	0.3
9	1.5	0.5	1
10	0.3	0.3	0.3
11	0.6	0.6	0.7
12	0.05	0.05	0.05
13	0.6	0.6	0.7
15	0.6	0.6	0.6
17	0.5	0.5	0.6
19	0.4	0.4	0.6
23	0.3	0.3	0.5
25	0.3	0.3	0.5
35	0.05	0.3	0.5
37	0.05	0.3	0.5
47	0.15	0.2	0.5
49	0.15	0.2	0.5
THD	3	3	3

Tabela 7 – Harmônicos pré-existentes (%) – Araraquara

Harm	B1	B2	B3
2	0.15	0.15	0.5
3	1.5	2	1.5
4	0.15	0.15	0.15
5	2	1.5	1.5
6	0.1	0.1	0.1
7	1.5	1.3	1.5
8	0.05	0.05	0.05
9	0.5	0.5	0.5
10	0.05	0.05	0.05
11	0.5	0.5	0.7
12	0.05	0.05	0.05
13	0.5	0.5	0.6
15	0.3	0.3	0.3
17	0.05	0.05	0.3
19	0.05	0.05	0.3
23	0.1	0.2	0.3
25	0.1	0.2	0.3
35	0.05	0.1	0.3
37	0.05	0.1	0.3
47	0.05	0.1	0.3
49	0.05	0.1	0.3
THD	3	3	3

A partir das correntes nos filtros (I_{fh}) foram calculadas as correntes harmônicas em cada componente dos filtros. Uma vez calculadas as solicitações de tensão e corrente para cada harmônico individualmente, os fatores decisivos para o dimensionamento de cada componente foram determinados usando as equações apresentadas a seguir.

- Capacitores

$$V_{\max} = V_1 + \sqrt{\sum_{h=2}^{49} V_h^2} \quad \rightarrow \text{Tensão de fase máxima do banco de capacitor principal incluindo harmônicos} \quad \text{Eq. (6)}$$

$$V_{\max} = \sqrt{\sum_{h=1}^{49} V_h^2} \quad \rightarrow \text{Tensão de fase máxima do banco de capacitor auxiliar incluindo harmônicos} \quad \text{Eq. (7)}$$

$$I_t = \sqrt{\sum_{h=1}^{49} I_h^2} \quad \rightarrow \text{Corrente térmica do capacitor} \quad \text{Eq. (8)}$$

$$V_{cr} = \sqrt{\sum_{h=1}^{49} V_h^2} \quad \rightarrow \text{Tensão máxima para determinação da distância de escoamento} \quad \text{Eq. (9)}$$

- Reatores

$$I_t = \sqrt{\sum_{h=1}^{49} I_h^2} \rightarrow \text{Corrente térmica do reator} \quad \text{Eq. (10)}$$

$$V_{cr} = \sqrt{\sum_{h=1}^{49} V_h^2} \rightarrow \text{Tensão máxima para determinação da distância de escoamento} \quad \text{Eq. (11)}$$

- Resistores

$$I_t = \sqrt{\sum_{h=1}^{49} I_h^2} \rightarrow \text{Corrente térmica do resistor} \quad \text{Eq. (12)}$$

$$V_{cr} = \sqrt{\sum_{h=1}^{49} V_h^2} \rightarrow \text{Tensão máxima para determinação da distância de escoamento} \quad \text{Eq. (13)}$$

5.0 - CONCLUSÕES

Este IT apresenta a metodologia utilizada e os principais resultados dos estudos de desempenho harmônico e *rating* realizados para o projeto dos filtros CA do bipólo 2 do sistema de transmissão CCAT associado ao aproveitamento hidrelétrico do Rio Madeira. Os filtros projetados atendem plenamente aos requisitos da especificação técnica da ANEEL e dos Procedimentos de Rede do ONS. Os resultados obtidos serão utilizados em várias etapas subsequentes do projeto, destacando-se a definição do sistema de controle de chaveamento dos filtros, a especificação dos seus componentes individuais e o ajuste dos seus sistemas de proteção.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Esmeraldo, Paulo C. V., Araujo, E.M.A. Carvalho, D.S. et al, "HVDC Madeira Transmission System – Planning Development and Final Design", CIGRE Session 2010, paper B4-306, 2010.
- (2) Edital de Leilão nº007/2008 – ANEEL Anexo 6F- CC - Lote LF – CC – Integração do Madeira.
- (3) Procedimentos de Rede do ONS, Módulo 2, Submódulo 2.5.
- (4) Procedimentos de Rede do ONS, Módulo 2, Submódulo 2.8.
- (5) IEC/TR Std. 62001, "Guide to the Specification and Design Evaluation of AC Filters for HVDC Systems", 2004.
- (6) IEEE Std. 519, "Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems", 1992.
- (7) CEPEL, "Manual do Programa Harmz v1.9.1 Beta", 2009.

7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Fernando Cattan Jusan graduou-se em engenharia elétrica em 2003 pelo Centro Federal de Educação Tecnológica do Rio de Janeiro (CFET-RJ). Obteve o grau de Mestre em Engenharia Elétrica na COPPE/UFRJ em 2007 na área de oscilações subsíncronas e interação torcional com sistemas de controle de turbogeradores, FACTS e HVDC. Ingressou em Furnas em 2004, onde trabalha no Departamento de Estudos e Planejamento Elétrico da Operação. Em 2008 participou da equipe responsável pela elaboração do relatório R2 da ANEEL, referente aos Estudos de Planejamento do Sistema de Transmissão HVDC do Madeira. Desde 2009 vem trabalhando no acompanhamento do projeto das estações conversoras do bipólo 2, atuando principalmente no projeto e verificação de desempenho de filtros CA e CC, desempenho dinâmico, interação com o sistema CA e especificação do circuito principal.

Luiza Maria de Sousa Carijó graduou-se em engenharia elétrica, em 1981, pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) e em 1986 concluiu o curso de pós graduação, ênfase sistemas elétricos de potência. De 1982 a 1991 trabalhou na Monasa Consultoria e Projetos Ltda na área de estudos de sistemas elétricos. Desde 1991 trabalha na Eletrobrás Furnas no Departamento de Planejamento de Transmissão. Participou dos estudos relativos ao sistema de transmissão associado às usinas do Rio Madeira desde os estudos de viabilidade das usinas. Atualmente integra a equipe técnica de estudos do Consórcio IE Madeira, relativos à implantação do bipolo 2, + 600 kV, 3150 MW.

Guilherme Sarcinelli Luz graduou-se em engenharia elétrica pela UFRJ em 1980 e concluiu o curso de Pós-Graduação da COPPE em 1981. De 1982 a 1993 trabalhou em três empresas de consultoria. Na PROMON Engenharia participou do Projeto de CCAT de Itaipu para FURNAS; na THEMAG participou de estudos de transitório eletromagnéticos e estabilidade para a Eletronorte e na PARELC, Assunção, Paraguai, de estudos de transitórios eletromagnéticos para Itaipu. Em 1993, entrou para FURNAS onde trabalha com ferramentas digitais e com o simulador em tempo real, tendo acompanhado tanto a operação da transmissão CCAT, como os estudos e o comissionamento do TCSC de Serra da Mesa. Atualmente, vem acompanhando os estudos do projeto Madeira com simulações em PSCAD.

Ricardo Andre de Andrade Gonçalves graduou-se em engenharia elétrica em 1982, pela Universidade Federal Fluminense (UFF), e em 1988 concluiu a pós-graduação em Análise e Controle de Sistemas de Potência pela COPPE/UFRJ. Possui MBA em Competências Básicas para Gerência pela FGV e MBA em Gestão de Projetos e Tecnologia da Informação. Trabalhou na PROMON de 1982 a 1987 e atualmente trabalha no Departamento de Planejamento da Transmissão da Eletrobrás Furnas.

Manfredo Correia Lima nasceu em Recife, Brasil, em 1957. Graduiu-se em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) em 1979, recebeu o grau de Mestre em Engenharia Elétrica pela UFPE em 1997 e o de Doutor em Engenharia Mecânica, com ênfase em automação de sistemas pela Universidade Federal da Paraíba (UFPB) em 2005. Dr. Correia Lima ingressou na Chesf em 1978, onde desenvolve atividades nas áreas de eletrônica de potência, equipamentos FACTS, qualidade de energia, sistemas de controle, transitórios eletromagnéticos e transmissão em CCAT. Em 1992, ingressou na Universidade de Pernambuco (UPE), onde é responsável pelas disciplinas Eletrônica de Potência e Controle de Processos e desenvolve atividades de pesquisa. É representante da Chesf no CE-B4 (FACTS e Elos CCAT) da Cigré Brasil.

Marcos Rodolfo Cavaleiro

Gearóid Oheidhin