



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

BR/GDS/26  
13 a 16 de Outubro de 2013  
Brasília - DF

**GRUPO - X**

**GRUPO DE ESTUDO DE DESEMPENHO DE SISTEMAS ELÉTRICOS – GDS**

**DESEMPENHO E PROJETO DOS FILTROS CC E CA DAS SUBESTAÇÕES CONVERSoras DE 600 kV PORTO VELHO E ARARAQUARA 2 – PRIMEIRO BIPOLO DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO DAS USINAS DO MADEIRA**

**Nigel L. Shore(\*)/C-G. Svensson**

**João Neves T. Filho**

**Geraldo L. C. Nicola/ Patrícia de O. F. Borin/  
Claudio H. Roth**

**ABB**

**ETE**

**ELETROBRAS ELETRONORTE**

**Helcio. L. S. Sampaio  
INTERTROPICOS**

**Marcus Danilo Perfeito  
CONSÓRCIO THEMAG/ARCADIS LOGOS**

**RESUMO**

O projeto dos filtros do Bipolo 1 do sistema de transmissão do Madeira, tanto do lado de corrente alternada (CA) como do lado de corrente contínua (CC), possui muitos aspectos interessantes, os quais certamente auxiliarão novos projetos de corrente contínua em alta tensão (CCAT). Este artigo tem como objetivo discutir os aspectos descritos na especificação técnica do cliente e no projeto resultante, destacando os pontos mais relevantes ou mesmo aqueles que apresentaram desvio da prática usual.

**PALAVRAS-CHAVE**

Harmônicos, Filtro CA, Filtro CC, Coordenação indutiva, Impedância harmônica da rede CA

**1.0 - HARMÔNICOS DO LADO CA E FILTROS**

Os principais fatores de interesse no projeto dos filtros CA são discutidos a seguir bem como a descrição da configuração escolhida dos filtros. O projeto para as duas estações conversores do Bipolo 1 teve que levar em conta o impacto da operação paralela com o Bipolo 2, compartilhamento de barramento e, no caso de Porto Velho, a existência da estação conversora Back-to-back.

**1.1 Impedância harmônica da rede CA**

O conhecimento dos limites de variação da impedância harmônica no âmbito da rede de corrente alternada onde está conectada, é essencial para projetar os filtros CA. Geralmente o cálculo desta impedância é feito antes de emitir a Especificação Técnica. Para este projeto, todavia, o Fabricante foi o responsável para calcular a impedância harmônica da rede. Este foi um longo e controverso processo que atrasou o início do projeto.

Para Araraquara 2, por exemplo, os setores de impedância foram considerados a partir da derivação de 216 diferentes contingências, correspondendo desde a carga leve à pesada, para os anos de 2012 a 2017. Para cada um dos 216 casos, uma frequência de varredura em cerca de 50 pontos de impedância discreta foi calculada para uma frequência nominal que variou de 60 a 3.000 Hz em frequência harmônica correspondente a uma frequência fundamental de 59, 60 e 61 Hz, isto é, foram feitas um total de 32.400 simulações. Isto produziu uma nuvem de pontos do plano-Z, para cada harmônico. Então, para cada harmônico foi criado um envelope poligonal que se juntava aos pontos na nuvem, ver Figura 1. Os limites deste envelope foram então usados nos estudos do projeto dos filtros.

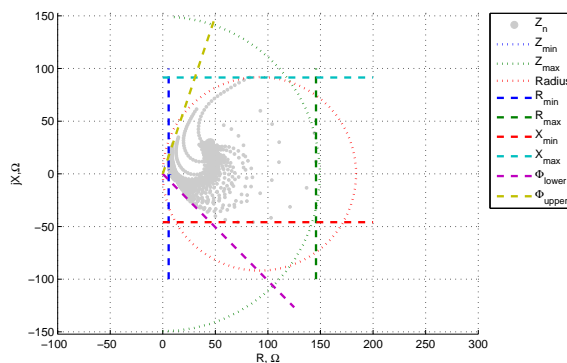


FIGURA 1 – Nuvem de Pontos de Impedância e Envelope Poligonal para um Harmônico

Para Porto Velho, um método similar foi usado, mas com diferentes envelopes para quatro subconjuntos correspondendo a diferentes números de geradores conectados nas usinas de Santo Antônio e Jirau. Isto permitiu que o projeto de filtro viesse corresponder à capacidade de absorção reativa disponível na geração das usinas.

Aspectos da metodologia que se mostraram controversos, foram:

- O Edital exigiu que cargas dentro de um perímetro de 200 km não fossem representadas. Isto foi intencional no sentido de produzir uma impedância de pior caso com amortecimento limitado. Todavia, seu efeito não foi apenas para produzir um ângulo de amortecimento excessivamente pessimista, mas também para ignorar o efeito das cargas em alterar a impedância reativa.
- As impedâncias dependentes de frequência da linha de transmissão CA e outros componentes podem ser modelados com várias características, sobre as quais há diferentes práticas, especialmente com respeito ao efeito de amortecimento da transformação parcial das correntes de harmônicas de sequência positiva em sequência zero ao longo da linha de transmissão.
- A faixa de tolerância a ser permitida em torno de cada frequência harmônica.

## 1.2 Limites harmônicos especificados

Os limites de distorção de tensão harmônica especificados foram aqueles indicados no submódulo 2.8 do Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS, ver ref. [1]. As exigências sobre os limites são resumidas por:

- Distorção de tensão harmônica total, DTHT, não deve exceder 1,5 %.
- Distorção de tensão harmônica individual,  $D_n$ , não pode exceder os limites individuais:
 

- Harmônicos pares	0,3%
- Harmônicos ímpares $n \leq 25$	0,6%
- Harmônicos ímpares $n \geq 27$	0,4%

Adicionalmente, o conversor CCAT não pode causar qualquer interferência, acima dos valores estabelecidos pelas principais normas referentes às linhas telefônicas em operação, na data do comissionamento da transmissão CCAT. Consequentemente, os filtros CA foram projetados de acordo com um valor de projeto do TIF, escolhido para ser 50, o qual foi baseado em experiência aplicada mundialmente e deve resultar em um baixo risco de interferência telefônica.

## 1.3 Configuração de filtros CA – Araraquara 2

Os filtros CA e a compensação reativa em derivação contempla quatro bancos divididos em sete sub-bancos, configurados da seguinte forma:

- Quatro sub-bancos de filtro em derivação de 305 Mvar cada, configurados como filtros passa-alta de dupla-sintonia, sintonizados no 12º e 24º harmônicos (HP12/24).
- Três sub-bancos de capacitor em derivação de 305 Mvar cada, sendo dois com resistores de amortecimento.

Este é um projeto simples e robusto, que foi possível em decorrência da elevada potência de curto-circuito da rede CA e da capacidade dessa rede para o intercâmbio de reativos, permitindo assim o uso de filtros do tipo banda larga.

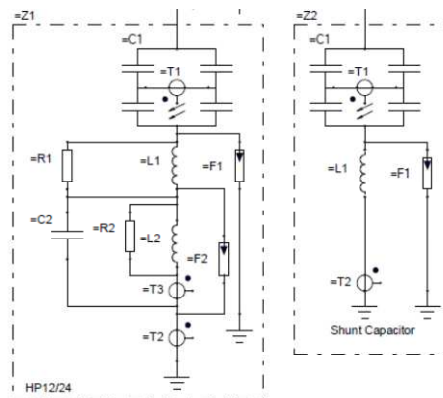


FIGURA 2 – Configuração do Filtro CA e do Capacitor em Derivação, Araraquara 2

#### 1.4 Configuração de filtros CA – Coletora Porto Velho

Os filtros CA e a compensação reativa em derivação estão configurados como dois bancos, divididos em seis sub-bancos, configurados da seguinte forma:

- a. Três sub-bancos de 263 Mvar cada, com as seguintes configurações:
  - Um ramo de filtro passa-alta de dupla sintonia no 2º/3º harmônicos (HP 2/3) e
  - Um ramo de filtro passa-alta de dupla sintonia no 12º/24º harmônicos (HP 12/24).
- b. Dois sub-bancos de 263 Mvar cada, com a seguinte configuração:
  - Um ramo de filtro passa-alta de dupla sintonia no 5º/36º harmônicos (HP 5/36) e
  - Um ramo de filtro passa-alta de sintonizado no 12º harmônico (HP 12).
- c. Um sub-banco de 183 Mvar, configurado como filtro passa-alta sintonizado no 12º harmônico (HP12).

O projeto de filtro para esta estação conversora é mais complexo devido à necessidade de filtragem mais eficiente e, assim, evitar geração excessiva de reativos em relação ao número de unidades geradoras em operação, UHES Santo Antônio e Jirau, que podem estar conectadas a cada nível de carga. O papel dos filtros de baixa ordem é a atenuar qualquer tipo de ressonância com os geradores.

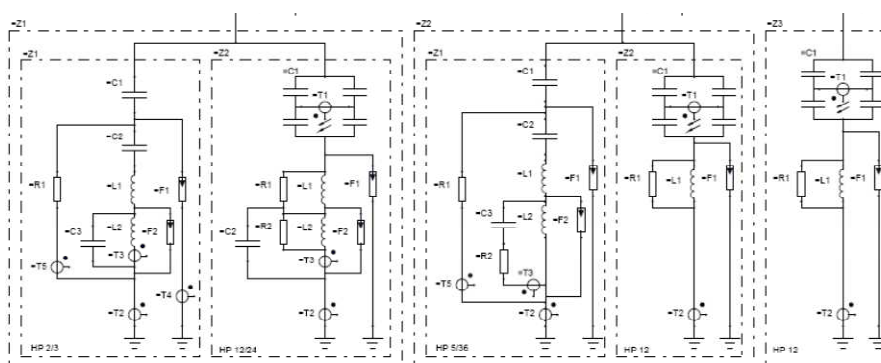


FIGURA 3 – Configuração de Filtro CA, Porto Velho, Indicando os Três Tipos de Sub-bancos.

A escolha de filtros de banda larga amortecidos para os harmônicos característicos, por exemplo HP12 em vez de filtros de 11º e 13º, permite uma configuração mais simples de filtro e reduz a sensibilidade às variações da impedância da rede e dessintonia. Nesses filtros, o amortecimento relativamente elevado é relevante já que a própria rede CA, constituída por linhas CA curtas e geradores, proporciona pouco amortecimento.

O fabricante dos filtros foi também o fornecedor da estação conversora back-to-back, Lote A, conectada ao mesmo barramento de 500 kV. Os filtros harmônicos são fornecidos separadamente para os dois lotes, de tal modo que os

requisitos especificados para potência reativa, desempenho de filtragem, valores nominais e redundância são atendidos independentemente para os dois lotes. Entretanto, os filtros são também projetados considerando a necessidade de compatibilidade de operação no mesmo barramento, e ainda, para todas as condições de operação conjunta. Embora, os filtros para os dois Lotes possuam configurações distintas, suas impedâncias nas frequências harmônicas significativas são aproximadamente proporcionais aos seus próprios harmônicos gerados, assegurando dessa forma uma divisão aproximadamente equivalente à carga harmônica para os dois Lotes.

### 1.5 Filtro CA – estudos e projeto

Os cálculos do desempenho harmônico do filtro foram feitos para os seguintes casos:

- a. Operação Bipolar, na direção normal de potência.
- b. Operação Monopolar, com retorno pela terra, na direção normal de potência.
- c. Operação Bipolar, na direção de potência reversa.
- d. Operação Bipolar, com tensão reduzida, na direção normal de potência.
- e. Operação Bipolar, operação com gama alto.

Os estudos mostraram que o desempenho dos filtros satisfaz os limites especificados de harmônicos para todas as condições de operação e em todos os níveis de carga. Em seguida, os estudos de dimensionamento dos componentes dos filtros foram feitos, considerando as premissas e condições mais adversas.

A contribuição das fontes de harmônicos na rede externa, ambiente, também teve de ser considerada, com base dos limites globais inferiores definidos, ver ref. [1]. A abordagem mais conservadora seria tratar as tensões tabuladas como fontes de Thévenin, sendo a impedância da fonte igual à impedância da rede no pior caso. Para que esta abordagem estivesse correta, seria necessário que as tensões da fonte específica e a impedância da rede, definida para o pior caso, fossem consistentes, ou seja, pudessem realmente ocorrer simultaneamente.

Estudos iniciais demonstraram que a simples utilização do modelo Thévenin produziu correntes extremamente altas nos filtros, com as contribuições dos harmônicos ambientes sendo bem maiores do que as correntes geradas pelo conversor. Os níveis de distorção resultantes no barramento do conversor foram também maiores do que poderiam ser suportados na prática. Isto foi claramente irreal e motivou o exame de algumas abordagens para limitar a contribuição calculada dos harmônicos ambientes a níveis razoáveis.

Por fim, foi então decidido que uma inclusão adequada e segura dos harmônicos ambientes poderia ser calculada, e a Especificação Técnica atendida, aplicando-se os valores de distorção especificados na tabela 5 da ref. [1] como fontes de tensão conectadas diretamente no barramento do filtro. A fim de limitar o DTHT da distorção de harmônicos ambientes aplicada ao valor especificado de 3%, os harmônicos foram limitados individualmente dando ênfase aos harmônicos ímpares de baixa ordem, que são normalmente os mais predominantes.

### 1.6 Modulação cruzada

A interação harmônica através dos conversores, ou modulação cruzada, é um fator importante a considerar, particularmente para os harmônicos de baixa ordem, onde a causa é geralmente a tensão de sequência negativa do lado CA. A magnitude resultante de ambos os lados, 3º harmônico do lado CA e 2º harmônico do lado CC, depende da combinação da impedância do 2º harmônico do lado CC e das impedâncias de frequência fundamental e 3º harmônico do lado CA.

Os cálculos foram realizados no domínio de frequência para avaliar as piores combinações possíveis destas impedâncias, considerando-se toda a faixa dos setores de impedância harmônica em ambos os terminais. Estes cálculos foram verificados no domínio do tempo usando a ferramenta PSCAD/EMTDC. Os resultados confirmam que não havia necessidade de filtros de 3º harmônico em Araraquara 2.

## 2.0 - HARMÔNICOS DO LADO CC E FILTROS

A forma de onda da tensão no lado CC de um conversor CCAT, com comutação convencional de 12 pulsos, contém harmônicos característicos de ordem  $12n$ , assim como harmônicos não característicos de todas as outras ordens, gerados em decorrência de desbalanços inerentes e tolerâncias no conversor e circuitos associados. Essas tensões direcionam as correntes harmônicas no circuito do lado CC as quais devem ser normalmente atenuadas por meio de filtros harmônicos em derivação shunt no lado CC.

Como o lado CC de um projeto CCAT é um sistema fechado, sem nenhuma conexão elétrica condutiva externa,

os requisitos de correntes harmônicas não são regulados pelos padrões do SIN, mas baseados nos dois critérios a seguir:

- a. Evitar ressonâncias harmônicas de baixa ordem as quais poderiam impor solicitações excessivas aos equipamentos ou causar mal funcionamento do controle. Isto é obtido pelo adequado dimensionamento dos reatores de alisamento e filtros CC, em relação às características da linha CC, e pela adoção, se necessária, de filtros CC de 2º harmônico em derivação.
- b. Prevenção de interferências em sistemas de telefonia na vizinhança devido ao acoplamento indutivo de correntes harmônicas provenientes da linha CC em condutores de telefonia nas proximidades.

### 2.1 Requisitos especificados

Em oposição ao usual em projetos CCAT, a Especificação Técnica não definiu um limite numérico para as correntes harmônicas no lado CC, mas optou por estabelecer um critério geral de que nenhuma interferência, acima do previsto nas principais normas aplicáveis, fosse causada nos sistemas de telefonia em operação durante o período de comissionamento. Para alcançar esse objetivo, a Transmissora deveria assumir a responsabilidade em estabelecer limites adequados para os distúrbios equivalentes de corrente ao longo do traçado da linha CC e das linhas do eletrodo.

Para determinar corretamente esses limites, é necessário fazer um estudo detalhado de coordenação indutiva ao longo do traçado da linha e das linhas telefônicas vizinhas. Inicialmente, nenhum dos dados necessários ao estudo estava disponível, considerando a área geográfica abrangida pelos 2.375 km da linha CC, e, portanto não havia qualquer possibilidade de obtê-los num espaço de tempo tão curto. Desta forma, os filtros CC foram projetados de acordo com os valores limites assumidos para o distúrbio de corrente equivalente, ( $I_{eq}$ ), baseados em prévia experiência mundial. Esta premissa estabeleceu um balanço entre o risco e o custo para a Transmissora: se o nível escolhido para a  $I_{eq}$  fosse muito alto, poderiam então ocorrer problemas de interferências telefônicas. Por outro lado, se fosse muito baixo, então o custo e a complexidade dos filtros CC seriam desnecessariamente elevados. Os valores máximos das correntes de distúrbio equivalentes selecionados como critério de projeto foram os seguintes:

- Operação Bipolar: 1.500 mA.
- Operação Monopolar: 2.200 mA (retorno metálico ou pela terra).

### 2.2 Impacto da configuração do circuito principal

Tais como outros projetos recentes de CCAT em UAT, os reatores de alisamento deste projeto são localizados no lado neutro dos conversores ao invés do lado da conexão do polo, em semelhança ao adotado em projetos convencionais no passado. Esta escolha apresenta certas vantagens, em termos de custos e nível de isolamento, e não afeta significativamente o fluxo de harmônicos característicos de 12 pulsos.

Esta configuração, entretanto, cria algumas dificuldades para os filtros CC pelo maior impacto nas correntes harmônicas de ordem  $3n$  (múltiplas de 3) que fluem para terra através da capacitância parasita dos transformadores conversores e retornam através do circuito do lado CC. Estas correntes não usufruem do circuito de retorno de baixa impedância através do barramento de neutro do capacitor, em decorrência da interferência dos reatores de alisamento, e tendem a encontrar outros caminhos através da capacitância da linha do polo CC.

Sem um grande reator de alisamento no lado do polo, há um caminho de retorno de baixa impedância pela linha CC através do lado do polo do conversor. Isto pode resultar numa grande contribuição à  $I_{eq}$  decorrentes desses harmônicos  $3n$ , especialmente os de maior ordem, aproximadamente h40-h60, para os quais o acoplamento capacitivo tem uma impedância relativamente pequena.

### 2.3 Impacto da modulação cruzada

Se a tensão do lado CA aplicada aos conversores CCAT não for de frequência puramente fundamental, mas contiver alguma distorção harmônica, então, o conversor modulará esses harmônicos, por meio de mudança na ordem harmônica, para o lado CC. Por exemplo, é comum observar no lado CC 6º harmônico gerado dessa forma em decorrência de tensões harmônicas ambientes de 5ª e 7ª no sistema CA.

Na operação bipolar equilibrada, devido à igualdade nominal entre os polos, a magnitude e o ângulo dos harmônicos transferidos no lado CC são praticamente idênticos para os dois polos, e então, o resíduo resultante ou componente de modo terra é desprezível. No entanto, para a operação monopolar com retorno pela terra, a magnitude de  $I_{eq}$  do lado CC causada por tais níveis de distorção de tensão no lado CA, em todas os harmônicos de baixa ordem, pode ser bem mais significativa.

O efeito desses harmônicos transferidos na tensão harmônica do lado CC foi calculado e considerado no projeto do filtro CC por meio da inclusão da filtragem da 6ª harmônica.

Outro mecanismo importante de modulação cruzada é a interação entre a frequência fundamental de sequência negativa do lado CA e o 3º harmônico, e a 2º harmônico do lado CC, conforme exposto na seção 1.6 acima. Os valores de 2º harmônico usados no projeto do filtro CC consideram os efeitos dessa modulação cruzada.

#### 2.4 Projeto do filtro CC

A solução completa do filtro CC para um polo é mostrada na Figura 4. O projeto do filtro CC consiste em dois ramos de filtros harmônicos chaveados por polo – um ramo de filtro passa-alta de 67/12/50º harmônicos e um ramo de filtro de sintonia simples de 50º harmônico para terra, cuja função é explicada mais adiante. Cada ramo tem um capacitor de alta tensão de 0,7  $\mu\text{F}$ .

A experiência mostra que saídas forçadas de filtro CC são muito raras e quando ocorrem, são de curta duração. Saídas programadas seriam normalmente feitas durante o desligamento para a manutenção do polo. Contudo, em decorrência dos requisitos da Especificação Técnica sobre esse aspecto, o projeto do filtro inclui dois ramos chaveados distintos por polo, que propicia desempenho harmônico satisfatório na ocorrência de desligamento de qualquer um dos ramos. São providas chaves seccionadoras para permitir a retirada de qualquer ramo do filtro de um polo, estando o polo CC em operação, sem que haja impacto significativo.

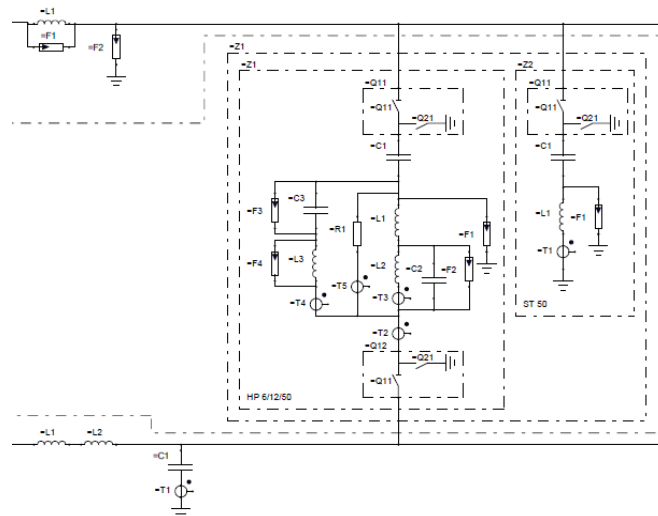


FIGURA 4 – Configuração dos Filtros CC para um Polo.

O projeto de filtros é idêntico para cada polo em ambas as estações conversoras. Isso é vantajoso em termos da minimização de componentes diferentes e peças reservas, e também simplifica a engenharia, a fabricação, o comissionamento, a operação e a manutenção.

As motivações de projeto para a escolha de tipos de ramo de filtro foram:

- HP6/12/50 – Esse é um filtro bem amortecido projetado para mitigar o 12º harmônico e uma faixa ampla de frequências maiores. A sintonia adicional para o 6º harmônico é incluída para restringir a contribuição dessa harmônica para a corrente  $I_{eq}$  nas configurações monopolar. A sintonia no 50º harmônico desempenha o mesmo propósito como descrito abaixo para o ramo de filtro ST50 e é introduzida para melhorar o desempenho no caso de uma saída do ramo de filtro ST50.
- ST50 – Esse filtro é projetado para atuar sobre os problemas decorrentes da configuração do reator de alisamento expostos anteriormente. É projetado para prover um caminho alternativo de baixa impedância para harmônicos de ordem 3n, e para tanto, é conectado diretamente a terra ao invés da barra de neutro. Consiste em um capacitor da linha do polo para a terra, sendo a sintonia em 50º harmônico adicionada como um recurso econômico para reduzir a impedância para harmônicos de alta ordem, que contribuem significativamente com  $I_{eq}$ . (Observa-se que o 50º harmônico não é tão significativa, no entanto, sintonizar nessa frequência é propicia efetivamente uma baixa impedância sobre uma ampla faixa de outros harmônicos de alta ordem).

Observa-se que para o ramo de HP6/12/50 o caminho para harmônicos 3n de alta ordem não é direto, assim como no caso do ramo de ST50, mas através da barra de neutro e do capacitor da barra de neutro, o que não é tão efetivo, mas em contrapartida, é desejável para a coordenação de isolamento dos componentes de baixa tensão do filtro os quais são conectados a barra de neutro ao invés da terra.

Os estudos de desempenho harmônico provaram que a corrente de distúrbio equivalente calculada estava abaixo dos níveis de projeto em todos os modos de operação e os níveis de carga.

## 2.5 Operação em paralelo com o Bipolo 2

Durante a operação normal com os dois bipolos operando em linhas CC separadas em rotas diferentes, não haverá interação entre os dois no lado CC. Entretanto, por razões de redundância operacional, os lados CC dos dois bipolos devem ter capacidade para operar em paralelo, considerando apenas uma linha CC ou duas linhas CC em paralelo.

Para esses modos paralelos, as questões de interação harmônica entre os equipamentos do lado CC dos dois bipolos devem ser consideradas. Na época dos estudos de projeto, não havia informação precisa das características e configuração do filtro CC a serem propostas para o 2º Bipolo. Entretanto, estudos foram feitos assumindo-se que os filtros deveriam ser funcionalmente similares àqueles do 1º Bipolo, e de fato os filtros definitivos para o 2º Bipolo foram escolhidos por seu fornecedor para serem idênticos aos do 1º Bipolo. Os estudos mostraram que a corrente  $I_{eq}$  de projeto foi atendida em todos os cenários de operação paralela e que os valores nominais dos componentes do filtro não foram afetados.

## 3.0 - ESTUDOS DE COORDENAÇÃO INDUTIVA

### 3.1 Metodologia

Em paralelo com e subsequente ao projeto dos filtros CA e CC, um estudo detalhado de coordenação indutiva de todas as possíveis exposições das linhas telefônicas foi feito para verificar se os valores limites selecionados para o fator de interferência telefônica, TIF, do lado CA e a corrente de distúrbio do lado CC não causariam distúrbios inaceitáveis nos sistemas telefônicos. A metodologia descrita a seguir é aplicável as linhas CC e linhas de eletrodo, contudo, o procedimento usado para as linhas CA foi muito similar.

Primeiramente, foi feita pesquisa de todos os municípios vizinhos e seus sistemas de telefonia associados. Em decorrência de um estudo tão amplo, não foi viável determinar a localização e o comprimento de cada linha telefônica existente; como alternativa, foram adotadas premissas dos piores casos com base em análise da ocupação geográfica. Em segundo lugar, foi calculado o distúrbio máximo possível que poderia ser induzido em cada linha telefônica e avaliado o risco correspondente de interferência notada.

### 3.2 Pesquisa de exposição a riscos

Como um primeiro passo, foram coletadas as informações demográficas, socioeconômicas e dos sistemas de telecomunicações de todos os municípios inseridos na área de investigação. Todos os locais dentro de uma faixa de dez quilômetros de cada lado da linha CC foram considerados. Como exemplo, a Figura 5 mostra a área investigada ao redor da estação conversora de Porto Velho. A visão geral da rede de cada município foi baseada nos dados informados pelas operadoras de telefonia à agência reguladora, Anatel, disponíveis ao público no site da Agência.

A segunda fonte de informação para este estudo foi o IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. A partir do site do IBGE foram obtidas as coordenadas geográficas, latitude e longitude, de todos os municípios e informações sócio-econômicas tais como população, IDH e IDE per capita de cada um deles. Esses dados deram uma idéia do uso e da demanda de serviços de telecomunicação e da qualidade esperada pelo usuário, a qual é especialmente refletida nos investimentos e requisitos da rede.

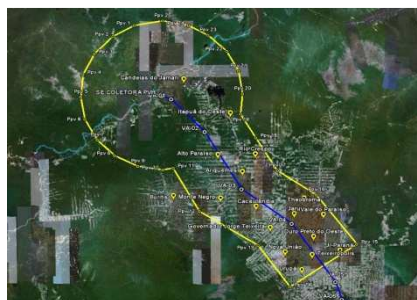


FIGURA 5 – Área Investigada em Torno da Estação Conversora de Porto Velho.

Em seguida, foi calculada a tensão longitudinal, por unidade de comprimento, que poderia ser induzida em uma linha telefônica, sem blindagem, paralela localizada a distâncias variáveis da linha CC, se a corrente de distúrbio equivalente estivesse no seu limite máximo de projeto. Em função do programa de cálculo usar a geometria física da torre da linha HVDC e a representação real da corrente de distúrbio, os diferentes acoplamentos para modos balanceado e residual e as diferentes dependências das referidas linhas na distância de afastamento foram automaticamente consideradas. Como a tensão induzida é altamente dependente da resistividade do solo, os cálculos foram feitos para uma faixa de diferentes valores de resistividade típica do solo da região, entre 250, 500

e 1000  $\Omega$ -m.

A tensão longitudinal resultante foi então aplicada através da impedância terminal de 600 ohms, valor padrão, representando o aparelho telefônico residencial, para dar um noção da potência de ruído de distúrbio resultante, em dBrnC, o qual poderia ocorrer se o telefone estivesse conectado a partir do terminal daquela linha à terra. Em seguida, uma redução foi aplicada para considerar a blindagem do cabo telefônico. Então, a tensão longitudinal induzida calculada foi convertida em uma tensão transversal equivalente (ou “tensão metálica”, segundo algumas literaturas), a qual poderia aparecer através dos terminais de um aparelho telefônico conectado ao terminal de um par trançado pela aplicação de um fator que expressa a relação típica da tensão longitudinal induzida para a tensão transversal resultante, devido ao balanço imperfeito do par de fios telefônicos.

A partir desses resultados, foi elaborada uma tabela de referência na qual o usuário pode entrar com o comprimento exposto para um dado afastamento de linha e obter a potência de ruído transversal correspondente que poderia ocorrer em um aparelho telefônico. Esta ferramenta foi então usada para analisar cada exposição da linha telefônica identificada ao longo do traçado. O resultado foi um valor de potência de ruído em dBrnC para aquela linha de telefone. As potências de ruído foram então comparadas com os limites padrões recomendados para avaliar o risco de interferência. Os resultados matemáticos foram interpretados considerando a avaliação do estado dos circuitos investigados anteriormente. Isto é crucial para evitar interpretações equivocadas, assim como decidir sobre qual a melhor solução para mitigar qualquer risco.

### 3.3 Avaliação dos riscos

A conclusão do estudo foi que, para a grande maioria das possíveis exposições da linha telefônica próxima à linha CC do Bipolo 1 e das linhas do eletrodo, e às linhas CA associadas a cada estaca conversora, não existe risco significativo de interferência acima dos padrões aceitáveis. Para algumas poucas localidades pequenas, o estudo mostrou um risco potencial, mas considerando os vários fatores conservadores adotados no estudo, é muito provável que na prática, mesmo para as referidas localidades, não haverá problemas de interferência.

### 3.4 Observações

O estudo de coordenação indutiva executado para esse projeto é provavelmente o mais completo e detalhado já feito até hoje em um projeto CCAT, tendo abrangido sistemas telefônicos nas proximidades de mais de 5000 km de linhas de transmissão CA e CC.

Idealmente, um estudo dessa natureza deveria ser executado antes da publicação oficial de uma Especificação Técnica de qualquer grande projeto de CCAT. A avaliação seria feita por meio de um trabalho “reverso” daquele descrito acima, ou seja, o nível de limites harmônicos a ser aplicado à transmissão CCAT seria especificado de forma que o risco de interferência telefônica para a maioria dos sistemas de telefonia fosse desprezível. Adicionalmente, quaisquer casos extremos remanescentes poderiam ser identificados previamente, para então aplicar as medidas mitigatórias a esses casos particulares dos sistemas de telefonia.

Dessa forma, o custo do sistema de filtros CCAT pode ser otimizado e o risco de interferência telefônica subsequente eliminado. É altamente recomendável que as lições obtidas desse estudo sejam aprendidas e aplicadas à especificação de futuros projetos CCAT no Brasil.

## 4.0 - CONCLUSÃO

Esse trabalho destacou resumidamente os fatores mais relevantes para o projeto de filtros harmônicos CA e CC do 1º Bipolo de transmissão CCAT do Rio Madeira, incluindo um estudo de grande escala para verificar o baixo risco de possível interferência telefônica. Fatores relacionados ao tratamento de estações geradoras isoladas, harmônicos pré-existentes, modulação cruzada e coordenação com outros conversores CCAT nos mesmos locais foram descritos. Baseado na experiência adquirida nesse projeto, recomenda-se para futuros projetos CCAT que os estudos de impedância harmônica da rede e de coordenação indutiva sejam feitas pelo Cliente durante a fase de desenvolvimento do projeto, pois dessa forma, limites e dados adequados podem ser incluídos na Especificação Técnica.

## 5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Submódulo 2.8 - Gerenciamento dos indicadores de desempenho da rede básica e dos barramentos dos transformadores de fronteira, e de seus componentes – Rev. 2 – Procedimentos de Rede – NOS.
- (2) Especificação técnica – Edital de Leilão nº 007/2008-ANEEL – Anexo 6C-CC- Lote C-CC – Integração do Madeira.



## 6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



**Dr. Nigel Shore** recebeu sua formação pela University of Edinburgh e pelo Imperial College. Em seguida, trabalhou para os consultores Kennedy e Donkin antes de ingressar no Consórcio ASEA Promon, em 1980, para o projeto de transmissão CCAT de Itaipu. Em 1986 começou a atuar na equipe de projetos de sistemas CCAT da ABB, na Suécia, e posteriormente na Inglaterra, com ênfase em harmônicos e filtros. Desde então, tem sido responsável pelo projeto de filtros CA e CC de números projetos de CCAT executados pela ABB. Atuou como coordenador dos grupos de trabalho WG 14.30 e WG B4/47 do Cigrè e foi editor de duas brochuras técnicas do Cigrè sobre Filtragem CA em sistemas CCAT.



**Carl-Gustaf Svensson** nasceu em 1962, em Markaryd, Suécia. Graduiu-se em 1990 pela Mälardalens Högskola. Possui 15 anos de experiência em estudos de circuito principal de CCAT e de sistemas de filtros CA/CC.



**João Neves Teixeira Filho** nasceu em 1959, em Floriano, Piauí (Brasil). Graduiu-se em 1984, em Engenharia Elétrica, modalidade Eletrônica, pelo Instituto de Tecnologia de Governador Valadares, Minas Gerais, e concluiu Mestrado em Economia da Regulação e Defesa da Concorrência pela Universidade de Brasília em 2002. Tem especialização em Matemática (UnICEUB, Brasília 1987), Redes (computação) (PUC, Brasília 1998) e Análise Econômica do Setor Elétrico – Integração Energética da América Latina (UFRJ, Rio de Janeiro 2010). Atuou na área de inspeção em fábrica para equipamentos de subestações; planejamento energético e por sete anos esteve à frente da superintendência de planejamento da expansão, todos na Eletronorte, onde trabalha desde 1986. Atualmente é Diretor Técnico da Estação Transmissora de Energia, empresa estatal do Grupo Eletrobras Eletronorte.



**Geraldo Luiz Costa Nicola** nasceu em 1951, São Paulo-SP (Brasil). Graduiu-se em 1977 em Engenharia Elétrica, pela Universidade de Brasília, UnB, e atua na Eletrobras Eletronorte desde 1977, na área de expansão da transmissão, projeto de subestações, equipamentos, compensação de reativos e avaliação de implantação de novos empreendimentos em corrente alternada e HVDC 600 e 800 kV.



**Patrícia de Oliveira Freitas Borin**, nasceu em 1983, Brasília-DF (Brasil). Formada em Engenharia Elétrica pela Universidade de Brasília em julho de 2005. Atuou na empresa Engevix Engenharia de 2005 a 2007, com projetos de usinas hidrelétricas e na empresa Themag Engenharia de 2007 a 2008, com projetos de subestações de transmissão. Desde 2008 trabalha na Eletrobras Eletronorte na área de expansão da transmissão, onde está envolvida com equipamentos de alta tensão para transmissão de energia, FACTS e transmissão em corrente contínua.



**Helcio Luiz Silveira Sampaio** graduado em Engenharia Eletrônica e mestre em Engenharia de Sistemas – Sistemas Operacionais – ambos pelo Instituto Militar de Engenharia (IME) em 1979 e 1982, respectivamente. Doutor em Engenharia de Produção – Avaliação de Projetos Industriais e Tecnológicos – pela COPPE/UFRJ em 2007. Possui 32 anos de experiência na área de tecnologia da informação e telecomunicações, tendo atuado na empresa T-Systems do Brasil (Deutsche Telekom), entre dez/03 e set/04, e na AES Communications Rio de Janeiro, entre dez/04 e dez/08, na qual exerceu o cargo de Diretor Comercial e de Planejamento de Rede no período de jan/07 a dez/08. Desde de jun/09 atua como sócio-diretor da empresa Intertrópicos TI e Telecomunicações.



**Marcus Danilo Perfeito** nasceu em 1962 em Morrinhos, Goiás (Brasil). Graduiu-se em 1984 em Engenharia Elétrica, modalidade Eletricista, pela Universidade de Brasília, Brasília, e concluiu pós-graduação em Engenharia de Sistemas Elétricos pela Universidade de Itajubá, Minas Gerais, em 1993. Atuou na área de estudos e projeto de sistemas de proteção e controle de subestações. Atualmente Coordenador da Engenharia de Proprietário da Estação Transmissora de Energia, empresa do Grupo Eletrobras Eletronorte



Claudio Henrique Roth, paulista, graduou-se em engenharia elétrica na Escola de Engenharia Mauá, em 1971. Desde 2007 é Engenheiro de Planejamento da Eletronorte. Trabalhou anteriormente na Esin, Main, Cegelec, Alstom, Vatech nas áreas de estudo, projeto, inspeção e comissionamento de equipamentos elétricos.