



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

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

**GRUPO - IV**

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

**SISTEMA DE TRANSMISSÃO DO RIO MADEIRA: MODELAGEM DA RESISTÊNCIA HARMÔNICA DOS COMPONENTES DO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA PARA O PROJETO DE FILTROS**

**Miguel Pires De Carli (\*)**  
**ELETROSUL**

**Luiz Felipe Willcox de Souza**  
**CEPEL**

**Orlando José Rothstein**  
**ELETROSUL**

**Cristiano de Oliveira Costa**  
**CEPEL**

**Ricardo Penido Dutt-Ross**  
**CEPEL**

**RESUMO**

O Informe Técnico propõe uma nova forma de representar a resistência harmônica para o cálculo dos diagramas de impedância da rede utilizados para o projeto de filtros de correntes harmônicas. Esta nova forma de cálculo da impedância harmônica foi implementada no programa HarmZs.

Diferentes formas de se representar a resistência dos componentes da rede são comparadas através de simulações. O informe técnico conclui fazendo uma análise das consequências das diferentes formas de representação da resistência dos componentes da rede elétrica, ressaltando a importância de se considerar a variação da resistência com a frequência no projeto dos filtros.

**PALAVRAS-CHAVE**

Filtros CA, Impedância Harmônica, HarmZs, Efeito pelicular, Sistemas HVDC

**1.0 - INTRODUÇÃO**

Estações conversoras de Sistemas de Transmissão em Corrente Contínua a Alta Tensão (HVDC) tipicamente necessitam de filtros em corrente alternada, que exercem duas funções: fornecer os reativos necessários para operação dos conversores e limitar as distorções harmônicas na rede CA. As características das estações conversoras (ângulo de disparo das válvulas, número de pulsos, modos de operação, condições não ideais, etc.) são essenciais para o projeto dos filtros, bem como estudos específicos para cada uma das funções devem ser realizados. Com relação ao fornecimento de reativos, é necessário considerar qual é o intercâmbio permissível de cada estação conversora com o sistema. Já para as distorções harmônicas, é preciso definir os limites aceitáveis de desempenho do sistema e calcular seus indicadores.

O cálculo da distorção harmônica associada aos conversores HVDC é feito de forma iterativa juntamente com o projeto dos filtros utilizando-se o circuito equivalente da Figura 1. As características de operação dos conversores são utilizadas para definir as fontes de corrente  $I_{cn}$  em cada harmônico de ordem  $h$  ( $h = 2, 3, 4, \dots$ ). Os indicadores de distorção são obtidos a partir da análise da tensão  $V$  e das correntes no filtro ( $I_{filtro}$ ) e na rede ( $I_{rede}$ ). A impedância do filtro é representada por  $Z_{filtro}$  e a impedância da rede é representada por  $Z_{rede}$ . Ambas são função da ordem  $h$  do harmônico.

O filtro deve atender os requisitos de desempenho para quaisquer situações de operação. As fontes de corrente  $I_{cn}$  são calculadas considerando-se as condições mais severas de harmônicos. A impedância da rede deve representar as possíveis configurações de operação e suas contingências. Desta forma, a rede não pode ser representada por uma única impedância. Assim, um diagrama ou envelope de impedâncias representativas da rede é determinado através de simulações para cada frequência ou faixa de harmônicos.

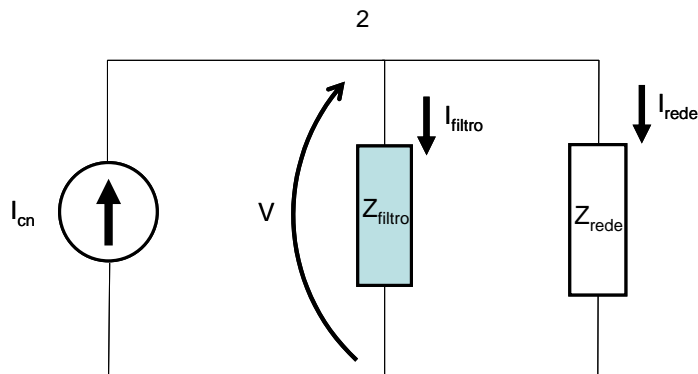


FIGURA 1 – Circuito equivalente utilizado para o projeto de filtros

O relatório dos estudos de transmissão do aproveitamento hidrelétrico do Rio Madeira [8], em sua versão R2, apresentou diagramas de impedância harmônica da rede obtidos a partir de diversas simulações considerando diferentes configurações da rede, contingências, cargas e cenários. Todavia, esses diagramas não consideravam no seu traçado a variação da resistência, com a frequência, dos componentes da rede elétrica - linhas de transmissão, transformadores de potência e geradores. Como a resistência dos componentes aumenta com a frequência devido ao efeito pelicular, a correta representação das impedâncias do sistema CA é de fundamental importância para o projeto de filtros.

Esforços dispendidos na definição da impedância da rede em diferentes frequências harmônicas podem resultar em economias significativas no custo dos filtros CA [1], uma vez que desconsiderar o aumento da resistência com a frequência pode levar a filtros sobredimensionados. Por outro lado, o uso de resistências da rede maiores do que as reais pode comprometer o desempenho dos filtros.

O informe técnico apresenta uma revisão da modelagem da resistência, variante com a frequência, dos diversos componentes da rede elétrica e propõe uma nova forma de representar a variação da resistência através de uma equação de vários parâmetros, válida para toda a faixa de frequência de interesse no projeto de filtros. Resultados de simulações realizadas para os conversores do sistema de transmissão HVDC do Madeira são apresentados para ilustrar as técnicas propostas.

## 2.0 - MODELAGEM DOS COMPONENTES DO SISTEMA ELÉTRICO

A correta modelagem dos componentes do sistema elétrico é de fundamental importância para o projeto de filtros, já que a impedância da rede é um dos parâmetros mais relevantes para o projeto devido a possíveis fenômenos de ressonância envolvendo os filtros [1]. É necessário, portanto, modelar adequadamente a variação da resistência com a frequência para linhas de transmissão, transformadores de potência e geradores para determinar com precisão o amortecimento da rede, evitando que os filtros causem problemas de desempenho e/ou sejam superdimensionados.

### 2.1 Linhas de Transmissão

A impedância série das linhas de transmissão é composta por dois componentes: a impedância interna  $Z_i$  e a impedância externa  $Z_e$ . Logo a impedância da linha é dada por:

$$Z_l = Z_i + Z_e$$

A impedância interna da linha de transmissão  $Z_i$  aumenta devido ao efeito pelicular no condutor, que é o fenômeno responsável pelo aumento da resistência aparente do condutor em função do aumento da frequência da corrente que o percorre. A impedância interna do condutor pode ser modelada através da função de Bessel, onde o condutor é representado por uma seção transversal cilíndrica de raio externo  $r_e$  e raio interno  $r_i$ , que definem, respectivamente, as dimensões da parte externa do alumínio e do núcleo de aço. A impedância interna do condutor é dada por [6]:

$$Z_i = \sqrt{\frac{j\omega\mu_0}{\sigma}} \cdot \frac{1}{2\pi r_e} \cdot \frac{n(j\omega)}{d(j\omega)}$$

Onde:

$$n(j\omega) = I_0(\rho_1) \cdot K_1(\rho_0) + I_1(\rho_0) \cdot K_0(\rho_1)$$

$$d(j\omega) = I_1(\rho_1) \cdot K_1(\rho_0) + I_1(\rho_0) \cdot K_1(\rho_1)$$

$$\rho_0 = r_i \cdot \sqrt{j\omega \mu \sigma}$$

$$\rho_1 = r_e \cdot \sqrt{j\omega \mu \sigma}$$

$I_0$  e  $I_1$  são funções de Bessel modificadas de primeiro tipo, enquanto  $K_0$  e  $K_1$  são funções de Bessel de segundo tipo. Os índices 0 e 1 representam a ordem das funções. Os parâmetros  $\sigma$  e  $\mu$  são, respectivamente, a condutividade e a permeabilidade magnética do condutor.

A impedância externa  $Z_e$  que leva em consideração a configuração geométrica da torre e o retorno pela terra pode ser calculada pelo modelo de Carson e sua resolução envolve integrais ou séries infinitas, o que para altas frequências requer um alto número de termos para dar resultados precisos. Dubanton propôs uma alternativa ao método de Carson na qual a terra poderia ser substituída por um conjunto de imagens localizadas abaixo das linhas aéreas a uma profundidade complexa.

O modelo de retorno pela terra a uma profundidade complexa assume que a corrente que passa por um condutor  $i$  retorna pela terra através de um condutor localizado diretamente abaixo do condutor  $i$  a uma profundidade  $(h_i + p)$  abaixo da terra. Pode-se dizer que a terra original é substituída por uma terra imaginária a uma profundidade  $p$  e que cada condutor tem um caminho de retorno pela terra através de um condutor imaginário colocado a uma distância  $2(h_i + p)$  [7]. Assim, as impedâncias externas próprias  $Z_{ii}$  e mútuas  $Z_{ij}$  são calculadas da seguinte forma:

$$Z_{ii} = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \cdot \ln \frac{2(h_i + p)}{r}$$

$$Z_{ij} = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \cdot \ln \sqrt{\frac{(h_i + h_j + 2p)^2 + x_{ij}^2}{(h_i - h_j)^2 + x_{ij}^2}}$$

$$p = 1/\sqrt{j\omega\mu/\rho}$$

Onde  $h_i$  e  $h_j$  são a altura dos condutores acima da terra,  $r$  é o raio do condutor,  $x_{ij}$  é a distância horizontal entre dois condutores,  $p$  é a profundidade complexa e  $\rho$  é a resistividade da terra.

Após o cálculo das impedâncias  $Z_{ii}$  e  $Z_{ij}$  pode-se obter  $Z_e$  de sequência positiva, que somada com  $Z_i$  resulta na impedância série da linha de transmissão, da qual a parte real representa a resistência de sequência positiva da linha.

## 2.2 Transformadores de Potência

Os transformadores são representados por uma impedância  $Z_h$  composta de uma resistência  $R_s$  em série com um arranjo de uma reatância  $X_h$  em paralelo com uma resistência  $R_p$ . A reatância  $X_h$  corresponde à reatância de dispersão do transformador à frequência fundamental [4].

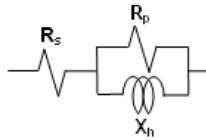


FIGURA 2 – Representação da impedância  $Z_h$

Onde:

$$X_h = h \cdot X_1$$

$$R_s = X_1 / \tan \varphi_1$$

$$R_p = 10 \cdot X_1 \cdot \tan \varphi_1$$

$$\tan \varphi_1 = e^{[0,693 + 0,796 \cdot \ln S_n - 0,0421 \cdot (\ln S_n)^2]}$$

$S_n$  é potência nominal do transformador.

Verifica-se que, apesar das resistências  $R_s$  e  $R_p$  serem constantes, a resistência equivalente dada pelo modelo varia com a frequência.

A modelagem da variação da resistência de transformadores proposta por [5] conduz a resultados semelhantes a [4] e os seus os parâmetros também são definidos em função da potência do transformador.

Uma modelagem mais simples para a variação da resistência dos transformadores é apresentada em [3] conforme equação abaixo, mas ela subestima a resistência a altas frequências quando comparada às modelagens anteriores:

$$Y_{Th} = 1 / (R \cdot \sqrt{h} + jX_1 \cdot h)$$

### 2.3 Geradores

A dependência da resistência com a frequência de máquinas síncronas e de indução pode ser significativa devido ao efeito skin e perdas por correntes de Foucault. A resistência normalmente aumenta com a frequência na forma de  $h^a$  onde  $h$  é a ordem harmônica e  $a$  varia de 0,5-1,5 [2].

A impedância dos geradores pode ser modelada como uma combinação série de resistência e reatância indutiva [3, 4 e 5], onde  $R$  é obtido das perdas da máquina e  $X''_d$  é a reatância subtransitória do gerador.

$$Y_{Gh} = 1 / (R \cdot \sqrt{h} + jX''_d \cdot h)$$

## 3.0 - APROXIMAÇÃO DAS CURVAS DE RESISTÊNCIA

Algumas equações utilizadas para modelar os efeitos da frequência na resistência não são lineares e sua implementação em programas de análise harmônica não é trivial. Portanto, é necessário realizar aproximações destas curvas, como mostrado nas seções seguintes.

### 3.1 Aproximação exponencial: Fator *alfa*

A forma de se modelar os efeitos da variação de frequência na resistência usualmente adotada nos programas de análise harmônica é através de equações do tipo  $R_h = R_0 h^{alfa}$ , onde  $R_0$  é a resistência à frequência fundamental,  $h$  é a ordem do harmônico e *alfa* é uma constante. Cada tipo de componente pode ser representado por uma faixa diferente de valores de *alfa*, dependentes de fatores como o nível de tensão da linha de transmissão ou a potência do transformador. Assim, é comum determinar um "fator *alfa*" para cada tipo de componente da rede elétrica quando de sua representação para estudos harmônicos.

Contudo, essa equação não representa adequadamente a resistência em toda a faixa de frequência. Isto pode trazer duas consequências:

- Para baixas frequências, a equação superestima o amortecimento da rede, o que pode resultar em problemas de desempenho da estação conversora para harmônicos de baixa ordem, como o terceiro e o quinto.
- Para altas frequências, o amortecimento da rede é subestimado, podendo resultar em filtros desnecessariamente superdimensionados, tornando o projeto mais caro.

### 3.2 Aproximação com múltiplos parâmetros

Para evitar os problemas encontrados quando se considera a resistência dos componentes da rede constante ou mesmo quando se utiliza equações do tipo  $R_0 h^{alfa}$  para o cálculo da impedância harmônica, o Informe Técnico propõe representar a variação da resistência através da seguinte equação:

$$R_h = R_0 (A h^{alfa} + B h^{beta} + C)$$

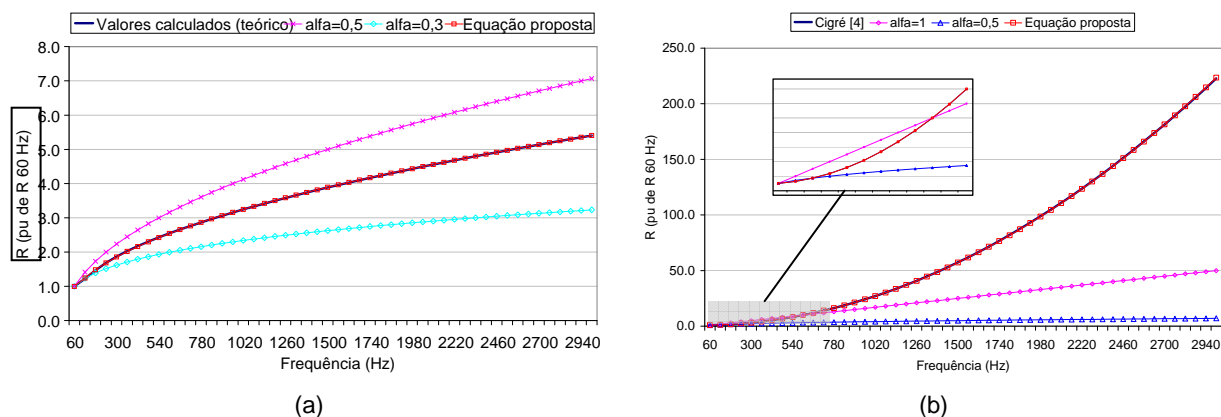
Onde  $A$ ,  $B$ ,  $C$ , *alfa* e *beta* são constantes e diferentes para cada um dos componentes do sistema.

A partir dos modelos usualmente adotados para a representação dos componentes, apresentados na seção 2.0, foram obtidos parâmetros para correção da resistência através da equação acima. Para isso, foram utilizadas rotinas de ajuste de curvas do *Matlab* para se determinar as constantes da equação. A Tabela 1 mostra exemplos de parâmetros válidos para a faixa de 0 a 3 kHz.

Tabela 1: Parâmetros para a correção da resistência

Equipamento	$\alpha$	$\beta$	$A$	$B$	$C$
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

A Figura 3 mostra exemplos comparando diferentes ajustes para uma linha de transmissão de 500 kV e 300 km e um transformador de 100 MVA. Observa-se nas figuras que as curvas obtidas através da equação proposta e dos parâmetros da Tabela 1 se superpõem às curvas traçadas de acordo com o equacionamento proposto na seção 2.1 para linhas e a equação proposta em [4] para os transformadores. A correção da resistência através do fator  $\alpha$  pode superdimensionar o valor da resistência, conforme apresentado no detalhe da Figura 3 (b).



(a) (b)  
FIGURA 3 – Comparação entre diferentes ajustes de curvas de resistência para linhas de transmissão (a) e transformadores (b)

### 3.3 Implementação no HarmZs

A partir da versão 1.9 do programa HarmZs, a possibilidade de correção da resistência de linhas de transmissão, geradores e transformadores com a frequência foi implementada. Como o programa HarmZs é capaz de ler tanto arquivos no seu formato próprio (\*.hzs) quanto arquivos no formato do programa Anarede (\*.sav), esta opção de escolha da correção com a frequência pode ser realizada a partir destes dois formatos.

Para que fosse possível implementar no HarmZs a correção da resistência com a frequência, foi criado um novo código de execução denominado DFCF. Através deste código os valores das variáveis  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $\alpha$  e  $\beta$ , dados pela equação proposta na seção 3.2, podem ser fornecidos para o programa. Os códigos de execução de linhas de transmissão (DLIN), transformadores (DTR2) e de geradores (DMAQ) foram modificados para incluírem a correção da resistência com a frequência. Nestes códigos é possível referenciar um identificador que é alocado no código DFCF. Com isto, o programa automaticamente identifica quais equipamentos terão suas resistências corrigidas com a frequência e quais os fatores de correção em questão serão utilizados.

É importante salientar que um mesmo grupo de variáveis  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $\alpha$  e  $\beta$  pode ser utilizado para todas as linhas, transformadores ou geradores, mas a implementação foi realizada de modo que o usuário possa escolher fatores de correção diferentes para vários equipamentos. Assim, pode-se utilizar valores de correção diferentes para linhas de diferentes níveis de tensão, além de transformadores e geradores de diferentes potências. Esses fatores de correção podem ser escolhidos através da interface gráfica do programa ou diretamente nos arquivos de dados de entrada próprios do HarmZs.

## 4.0 - ESTUDO DE CASO

### 4.1 Sistema Estudado

Os sistemas estudados para comparação da influência da dependência da resistência com a frequência nos diagramas de impedância foram as barras de 500 kV das Subestações Porto Velho Coletora e Araraquara 2, as quais correspondem aos pontos de acoplamento comum (PAC) dos Bipolos I e II do sistema HVDC para

transmissão da energia produzida nas UHE Jirau e Santo Antônio, localizadas no Rio Madeira, em Rondônia. Este sistema está representado na Figura 4.

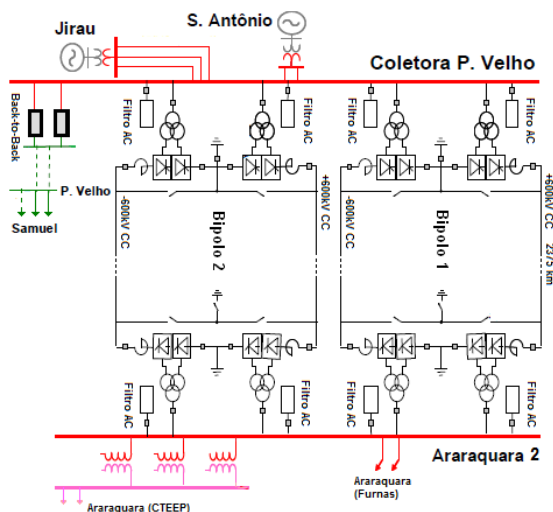


FIGURA 4 – Sistema de transmissão das usinas do Madeira

#### 4.2 Diagrama de Impedâncias para o Projeto de Filtros

Como a impedância da rede muda ao longo do tempo devido às diferentes configurações operacionais, condições de carga e indisponibilidades de componentes, é essencial que a representação utilizada nos estudos abranja todos os valores possíveis de impedância, uma vez que o filtro deve ter desempenho satisfatório para qualquer condição da rede.

Para uma rede interligada, é impraticável simular todas as condições e contingências possíveis. Assim, o projetista simula uma série de casos, obtendo uma “nuvem” de pontos no plano R-X para diversas frequências ou faixas de frequências harmônicas. Para permitir alguma folga no projeto e facilitar o cálculo sistemático do desempenho dos filtros, os pontos são representados por uma figura geométrica na qual eles estão inscritos. Normalmente isso é feito através da definição de alguma forma de envelope de impedâncias que cubra todos os valores simulados [1].

Os envelopes apresentados na seção 4.3 foram definidos por pontos (impedâncias) notáveis. O diagrama de setor, cujo centro é a origem e o raio é a maior impedância simulada, é limitado pelo maior e o menor ângulo de impedância e pela menor resistência dentre todos os casos simulados. Já o polígono é limitado pela maior e menor resistência, maior e menor reatância; e maior e menor ângulo de impedância. Estes envelopes também poderiam ser definidos por outros critérios (e.g., envelope circular, polígono com outros números de lados, etc.).

#### 4.3 Resultados

Nos resultados apresentados nas seções 4.3.1 e 4.3.2 para as subestações Porto Velho Coletora e Araraquara foram comparadas três situações distintas: resistência da rede constante para qualquer frequência, correção da resistência através do fator *alfa* (com  $\alpha_L=0,5$ ,  $\alpha_T=1,0$  e  $\alpha_G=0,9$ , respectivamente, para linhas, transformadores e geradores) e correção da resistência pela equação proposta na seção 3.2 e valores da Tabela 1.

##### 4.3.1 Porto Velho

Nas análises realizadas para Porto Velho 500 kV foram utilizados casos com dados dos geradores, transformadores e linhas das usinas Santo Antônio e Jirau obtidos junto aos proprietários dos equipamentos. Os cenários analisados compreenderam a condição normal de operação com três linhas da UHE Jirau para a subestação Porto Velho Coletora, variando o número de máquinas de 25 a 90 nas UHE Santo Antônio e Jirau, com correspondente variação do número de transformadores. Como condição de rede degradada foram simulados casos com uma e duas linha da UHE Jirau para a subestação Porto Velho Coletora.

Os diagramas da Figura 5 apresentam uma comparação da influência da modelagem da resistência nos lugares geométricos das impedâncias (setores) para a barra de Porto Velho. Observa-se nas Figuras 5 (a) e (b) uma

significativa diferença na magnitude das impedâncias máximas que definem o raio dos setores e, por exemplo, para os envelopes do vigésimo terceiro harmônico as diferentes modelagens geram ângulos máximos diferentes: 88,55 graus, 82,22 graus e 84,75 graus, respectivamente, quando se considera a resistência constante, corrigida pelo fator *alfa* e pela equação proposta.

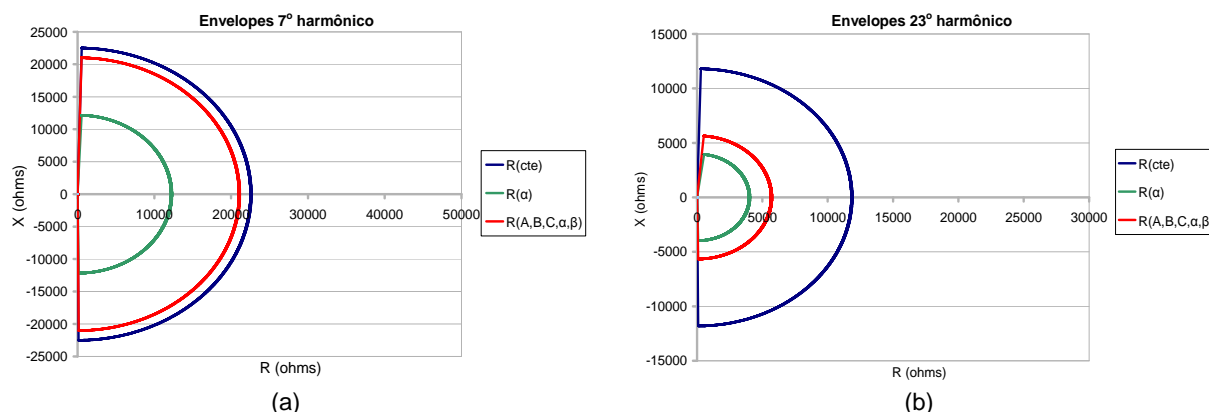


FIGURA 5 – Impedância da rede de Porto Velho para o 7º (a) e o 23º (b) harmônicos.

#### 4.3.2 Araraquara

Nas análises realizadas para Araraquara, foram utilizados casos do ONS para os anos de 2013/2014, para os patamares de carga leve, média e pesada. As cargas foram representadas por circuitos abertos. Foram incluídas resistências nos transformadores e geradores, que não possuíam este dado, já que os cálculos de impedâncias harmônicas se baseiam na resistência fundamental dos elementos de rede. O valor incluído equivale a 1% dos valores das reatâncias  $X_T$  e  $X''_d$ , respectivamente.

Os diagramas da Figura 6 apresentam uma comparação da influência da modelagem da resistência nos lugares geométricos das impedâncias (polígonos hexagonais) para a barra de Araraquara. Observa-se que a representação da resistência constante com frequência produz um envelope pouco amortecido, o que poderia levar à necessidade de mais filtros. Já a representação com *alfa* constante produz o maior amortecimento; em contrapartida, corre-se o risco de superdimensionar a resistência e criar problemas de desempenho do filtro.

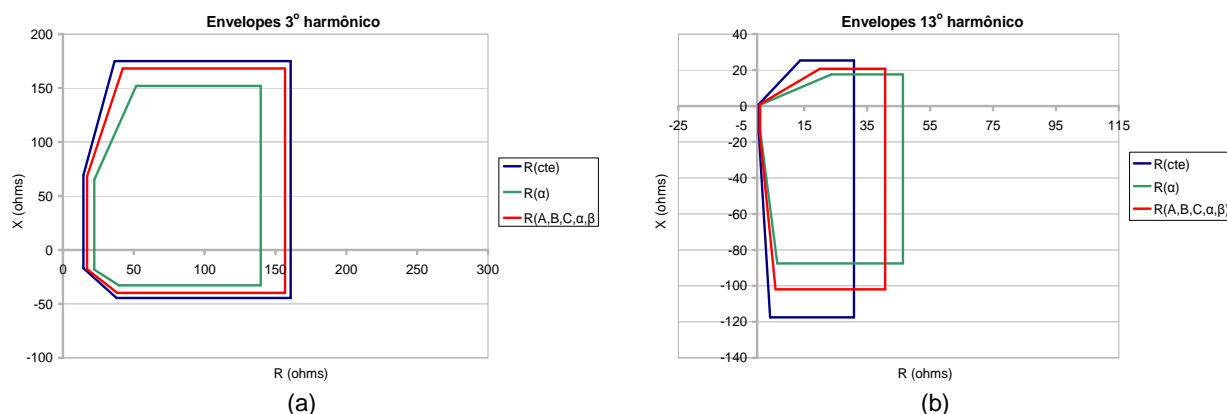


FIGURA 6 – Impedância da rede de Araraquara para o 3º (a) e o 13º (b) harmônicos

## 5.0 - CONCLUSÃO

A modelagem proposta pelo IT para representar a variação da resistência dos componentes da rede CA (linhas de transmissão, transformadores e geradores) com o aumento da frequência através de uma equação com cinco parâmetros apresenta melhor aderência às equações usualmente adotadas, encontradas na bibliografia. Verificou-se que esta equação, quando comparada à representação através de um único parâmetro, aproxima as equações mais precisamente em toda a faixa de frequência utilizada no projeto de filtros. Assim os cálculos de

impedância harmônica, além de considerarem o aumento da resistência com a frequência, também evitam que a resistência do sistema seja sub ou sobrestimada para algumas faixas de frequência.

Eventuais erros no cálculo da impedância harmônica da rede, causados pela má representação da resistência, irão gerar envelopes com maior ou menor amortecimento que a rede realmente apresenta. Como consequência, podem ocorrer erros no projeto de filtros, tornando-os mais caros e complexos que o necessário, sendo sobredimensionados, permitindo distorções maiores que as especificadas no projeto ou necessitando de mais módulos para não causarem grandes variações de tensão quando chaveados. Portanto, a correta representação da rede é essencial para o projeto dos filtros.

A Figura 1 mostra o circuito usado para cálculo do desempenho de filtros CA. Trata-se de um divisor de corrente, em que a fonte de corrente representa a injeção de corrente do conversor,  $Z_{filtro}$  é a impedância do filtro e  $Z_{rede}$  é a impedância da rede. O projeto consiste em obter os parâmetros do filtro para um envelope de impedância e uma injeção de corrente, de forma a manter a distorção harmônica de tensão dentro dos limites especificados. A equação a seguir resume isso:

$$V_h = I_h / (Y_{filtro} + Y_{rede})$$

Uma das regiões mais críticas do envelope de impedâncias para o projeto do filtro é aquela de baixas resistências e reatância indutiva, pois, em geral, os filtros têm característica capacitiva próximo a suas frequências de sintonia, o que poderia causar ressonância com a rede e elevação da distorção harmônica.

O ângulo de impedância indutiva máximo do filtro se aproxima de 90 graus quando a resistência da rede é subestimada. Neste caso, o baixo amortecimento levaria à elevação da distorção harmônica de tensão e à necessidade de mais potência reativa de filtros, além de eventualmente mudança do tipo de filtro para aumentar o amortecimento. No outro extremo, um ângulo de impedância indutiva muito pequeno superestima a resistência da rede e pode resultar em um filtro subdimensionado, que tenha um desempenho insatisfatório no campo, e.g., violando algum limite de distorção harmônica.

Através da bibliografia pesquisada verificou-se que alguns componentes da rede têm poucas definições a respeito de suas modelagens para estudos de harmônicos. Logo, um desenvolvimento importante a ser feito é o levantamento sistemático e preciso do comportamento real da impedância dos elementos de rede em função da frequência. Tal trabalho envolve medições e ensaios de linhas de transmissão, transformadores e geradores.

## 6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) CIGRE, Working Group 14.30, "Guide to the Specification and Evaluation of AC Filters for HVDC Systems", Abril de 1999.
- (2) Task force on Harmonics Modeling and Simulation, "The modeling and simulation of the propagation of harmonics in electric power networks Part I : Concepts, models and simulation techniques," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.11, No.1, Janeiro de 1996.
- (3) J. Arrillaga, N.R. Watson. Power System Harmonics, Second Edition, John Wiley & Sons, Ltd, 2003.
- (4) A. Robert, T Deflandre. "Guide for Assessing the Network Impedance", ÉLECTRA, no. 167, Agosto de 1996.
- (5) CIGRE JTF 36.05.02/14.03.03, "AC System modelling for AC filter design – An overview of impedance modelling". ELECTRA No. 164, Fevereiro de 1996.
- (6) S. Gomes, Jr., C. Portela, and N. Martins, "Detailed model of long transmission lines for modal analysis of ac networks," in Proc. IPST'01—Int. Conf. Power System Transients, Rio de Janeiro, Brasil, Junho de 2001.
- (7) Y. J. Wang and S. J. Liu. "A Review of Methods for Calculation of Frequency-dependent Impedance of Overhead Power Transmission Lines". IEEE vol. 25, No. 6, 2001.
- (8) EPE, "Estudos para Definição das Características Básicas do Sistema de Transmissão de Integração das Usinas do Madeira – Alternativa CC". Maio de 2008.



## 7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

**Miguel Pires De Carli** nasceu em Porto Alegre, RS, Brasil, em 22 de Novembro de 1978. Recebeu o grau de Engenheiro Eletricista da Universidade Federal do Rio Grande do Sul em 2007. Ingressou na Eletrobras Eletrosul em 2001 e trabalhou no Departamento de Operação do Sistema até 2007. Atualmente trabalha no Departamento de Planejamento do Sistema.



**Luiz Felipe Willcox de Souza**, nascido em Niterói-RJ, 1972, é engenheiro eletricista formado em 1994 pela Universidade Federal Fluminense. Obteve seu mestrado em 1998 e seu doutorado em 2007, ambos em engenharia elétrica, com ênfase em eletrônica de potência, na Universidade Federal do Rio de Janeiro. Trabalha no CEPEL desde 1996, onde atualmente é gerente de projetos. Suas principais áreas de interesse são qualidade de energia, aplicações de eletrônica de potência e dinâmica de sistemas elétricos de potência.



**Orlando José Rothstein** nascido em Florianópolis - SC no ano de 1979. Graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) em 2002. Especialista em Sistemas de Energia Elétrica pela UFSC em 2005. Engenheiro no Setor de Estudos, Análise e Controle do Sistema na divisão de Proteção e Estudos do Sistema desde 2002.

**Cristiano de Oliveira Costa**, nascido em Ponte Nova - MG em 1979. Recebeu o grau de Engenheiro Eletricista pela Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF) em 2002. Trabalha no CEPEL desde 2002 no desenvolvimento de ferramentas computacionais aplicadas a análise da qualidade de energia elétrica.



**Ricardo Penido D. Ross**, formado em Engenharia Elétrica pela PUC-RJ em 1977, mestrado pela mesma instituição em 1982 é pesquisador do CEPEL desde 1985 tendo atuando nas áreas de estudos de sistemas elétricos, qualidade de energia elétrica e transitórios eletromagnéticos, atualmente ocupa o cargo de chefe de departamento de redes elétricas. É membro do IEEE, do Cigré e da Sociedade Brasileira de Qualidade de Energia.