



Empresa de Pesquisa Energética

ESTUDOS PARA LICITAÇÃO DA EXPANSÃO DA TRANSMISSÃO

DETALHAMENTO TÉCNICO DA ALTERNATIVA DE REFERÊNCIA: RELATÓRIO R2

*Elo de Corrente Contínua \pm 800 kV Graça Aranha – Silvânia
– Parte I: Representação da Impedância da Rede*

Dezembro de 2022

Ministério de
Minas e Energia



(Esta página foi intencionalmente deixada em branco para o adequado alinhamento de páginas na impressão com sigla opção frente e verso)



GOVERNO FEDERAL
MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA

Ministério de Minas e Energia

Ministro

Adolfo Sachsida

Secretário-Executivo do MME

Hailton Madureira de Almeida

Secretário de Planejamento e Desenvolvimento Energético

José Guilherme de Lara Resende

Secretário de Energia Elétrica

Ricardo Marques Alves Pereira

Secretário de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis

Rafael Bastos da Silva

Secretário de Geologia, Mineração e Transformação Mineral

Líliá Mascarenhas Sant'agostino

ESTUDOS PARA A LICITAÇÃO DA EXPANSÃO DA TRANSMISSÃO

DETALHAMENTO TÉCNICO DA ALTERNATIVA DE REFERÊNCIA: RELATÓRIO R2

*Elo de Corrente Contínua \pm 800 kV
Graça Aranha – Silvânia – Parte I:
Representação da Impedância da Rede*



Empresa de Pesquisa Energética

Empresa pública, vinculada ao Ministério de Minas e Energia, instituída nos termos da Lei nº 10.847, de 15 de março de 2004, a EPE tem por finalidade prestar serviços na área de estudos e pesquisas destinadas a subsidiar o planejamento do setor energético, tais como energia elétrica, petróleo e gás natural e seus derivados, carvão mineral, fontes energéticas renováveis e eficiência energética, dentre outras.

Presidente

Thiago Vasconcellos Barral Ferreira

Diretor de Estudos Econômico-Energéticos e Ambientais

Giovani Vitória Machado

Diretor de Estudos de Energia Elétrica

Thiago Vasconcellos Barral Ferreira (interino)

Diretor de Estudos de Petróleo, Gás e Biocombustíveis

Heloisa Borges Bastos Esteves

Diretor de Gestão Corporativa

Ângela Regina Livino de Carvalho

URL: <http://www.epe.gov.br>

Sede

Esplanada dos Ministérios, Bloco "U", sala 744
70065-900 - Brasília - DF

Escritório Central

Praça Pio X, nº 54
20091-040 - Rio de Janeiro - RJ

Coordenação Geral

Thiago Vasconcellos Barral Ferreira

Coordenação Executiva

Thiago de Faria Rocha Dourado Martins

Coordenação Técnica

Daniel José Tavares de Souza

Equipe Técnica

Bruno Scarpa Alves da Silveira
Dourival de Souza Carvalho Junior

Fabiano Schmidt

Fábio de Almeida Rocha

Paulo Fernando de Matos Araujo

Rodrigo Ribeiro Ferreira

Sérgio Felipe Falcão Lima

Tiago Campos Rizzotto

Nº EPE-DEE-RE-092/2022-rev1

Data: 08/12/2022

(Esta página foi intencionalmente deixada em branco para o adequado alinhamento de páginas na impressão com a opção frente e verso)



Empresa de Pesquisa Energética

Contrato

Data de assinatura

Projeto

ESTUDOS PARA EXPANSÃO DA TRANSMISSÃO

Área de estudo

Estudos do Sistema de Transmissão

Subárea de estudo

Detalhamento Técnico da Alternativa de Referência – Relatório R2

Produto (Nota Técnica ou Relatório)

EPE-DEE-RE-092/2022-rev1

Elo de Corrente Contínua \pm 800 kV Graça Aranha – Silvânia – Parte I: Representação da Impedância da Rede

Revisões

Data

Descrição sucinta

rev0

31/10/2022

Emissão Original

rev1

08/12/2022

Atualização das tabelas de impedâncias considerando desvios de +/- 0,2 Hz em cada ordem harmônica e pequenos ajustes textuais.

(Esta página foi intencionalmente deixada em branco para o adequado alinhamento de páginas na impressão com a opção frente e verso)

APRESENTAÇÃO

Este Relatório apresenta os resultados do levantamento das impedâncias harmônicas “vistas” das barras em Corrente Alternada (CA), em 500 kV, das subestações conversoras Graça Aranha e Silvânia, informações de referência para subsidiar o dimensionamento e a concepção dos filtros CA associados ao bipolo em ± 800 kV Graça Aranha – Silvânia, Nordeste I.

(Esta página foi intencionalmente deixada em branco para o adequado alinhamento de páginas na impressão com a opção frente e verso)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	10
1.1	Contextualização	10
1.2	Objetivo principal	11
2	CONCLUSÕES	12
3	RECOMENDAÇÕES.....	14
4	METODOLOGIA.....	15
4.1	Geral	15
4.2	Critérios para adequação de elementos da rede	15
5	ELEMENTOS PARA REPRESENTAÇÃO DA REDE	17
5.1	Cenários	17
5.1.1	Descrição dos cenários	17
5.2	Cargas.....	21
5.3	Compensadores estáticos de reativos.....	21
5.4	Parques eólicos e solares	21
5.5	Conversoras CCAT	24
6	SELEÇÃO DAS CONFIGURAÇÕES DA REDE E PREMISSAS DE CÁLCULO	25
6.1	Seleção das configurações da rede.....	25
6.2	Premissas de cálculo e agrupamento da nuvem de pontos	28
7	RESULTADOS	29
7.1	Impedância harmônica vista de Graça Aranha 500 kV	30
7.1.1	Análises preliminares	30
7.1.2	Investigações em destaque.....	31
7.1.3	Parâmetros dos lugares geométricos das impedâncias harmônicas	34
7.2	Impedância harmônica vista de Silvânia 500 kV	36
7.2.1	Análises preliminares	36
7.2.2	Investigações em destaque.....	36
7.2.3	Parâmetros dos lugares geométricos das impedâncias harmônicas	38
8	REFERÊNCIAS	40
9	EQUIPE TÉCNICA	41
ANEXO A.	EXEMPLOS DE SETORES DE ADMITÂNCIA - GRAÇA ARANHA	42
ANEXO B.	EXEMPLOS DE SETORES - SILVÂNIA.....	45
ANEXO C.	IMPEDÂNCIAS HARMÔNICAS CALCULADAS.....	46

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 – Inserção do bipolo \pm 800 kV Graça Aranha – Silvânia (Nordeste I) no SIN	10
Figura 6-1 – Grupos de novos empreendimentos de transmissão previstos para implantação na vizinhança norte (Graça Aranha), até a entrada do bipolo Nordeste I	26
Figura 6-2 – Grupos de novos empreendimentos de transmissão previstos para implantação na vizinhança sudeste (Silvânia), até a entrada do bipolo Nordeste I	27
Figura 7-1 – Módulo da impedância em função da frequência, “vista” de Graça Aranha, rede completa, 7 cenários distintos (valores em p.u.)	30
Figura 7-2 – Módulo da impedância em função da frequência, “vista” de Graça Aranha, cenário 1A, com rede completa e 6 retiradas de blocos de obras (valores em p.u.)	31
Figura 7-3 – Setores de Impedâncias “vistos” de Graça Aranha, 11 ^a harmônica - comparação entre rede completa e com alterações topológicas (valores em p.u.)	32
Figura 7-4 – Setores de impedâncias “vistos” de Graça Aranha, 13 ^a harmônica – comparação entre rede completa e com alterações topológicas (valores em p.u.)	32
Figura 7-5 – Setores de impedâncias “vistos” de Graça Aranha, 5 ^a harmônica, rede completa e com alterações topológicas – comparação entre limites de contingências nas 3 ^a e 5 ^a vizinhanças (valores em p.u.)	33
Figura 7-6 – Setores de impedâncias “vistos” de Graça Aranha, 13 ^a harmônica, rede completa e com alterações topológicas – comparação entre limites de contingências nas 3 ^a e 5 ^a vizinhanças (valores em p.u.)	34
Figura 7-7 – Módulo da impedância em função da frequência, “vista” de Silvânia, rede completa, 7 cenários distintos (valores em p.u.)	36
Figura 7-8 – Setores de admitâncias “vistos” de Silvânia, 5 ^a harmônica – comparação entre rede completa e rede com alterações topológicas (valores em p.u.)	37
Figura 7-9 – Setores de admitâncias “vistos” de Silvânia, 13 ^a harmônica – comparação entre rede completa e rede com alterações topológicas (valores em p.u.)	38
Figura A-1 - 5 ^a harm: setores angulares de admitâncias, rede completa vs com alterações topológicas	42
Figura A-2 - 7 ^a harm: setores angulares de admitâncias, rede completa vs com alterações topológicas	42
Figura A-3 - 11 ^a harm: setores angulares de admitâncias, rede completa vs com alterações topológicas – 3 ^a e 5 ^a vizinhança	43
Figura A-4 - 13 ^a harm: setores angulares de admitâncias, rede completa vs com alterações topológicas	43
Figura A-5 - 13 ^a harm: setor angular vs polígono de admitâncias, rede completa vs com alterações topológicas	44
Figura A-6 - 11 ^a harm: setores de admitâncias, com alterações topológicas - 3 ^a e 5 ^a vizinhança.....	44
Figura B-1 - 7 ^a harm: setores angulares de admitâncias, rede completa vs com alterações topológicas	45
Figura B-2 - 13 ^a harm: setores angulares de admitâncias, rede completa vs com alterações topológicas	45

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 4-1 Parâmetros para a correção da resistência com a frequência	15
Tabela 5-1 Cenários de operação selecionados.....	17
Tabela 5-2 Compensadores estáticos representados	21
Tabela 5-3 Sumário dos parques eólicos e solares considerados	22
Tabela 6-1 Grupos de empreendimentos na vizinhança norte (Graça Aranha)	26
Tabela 6-2 Grupos de empreendimentos na vizinhança sudeste (Silvânia)	27
Tabela 7-1 Comparação expedita entre impedâncias a 60 HZ – Cenário 1 A.....	29
Tabela 7-2 Impedância harmônica “vista” da SE Graça Aranha 500 kV – considerando agrupamentos e desvios de frequência.....	34
Tabela 7-3 Impedância harmônica “vista” da SE Silvânia 500 kV – considerando agrupamentos e desvios de frequência	38
Tabela C-1 Dados Primários da Impedância harmônica “vista” da SE Graça Aranha 500 kV	46
Tabela C-2 Dados Primários da Impedância harmônica “vista” da SE Silvânia 500 kV.....	48

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

Os estudos desenvolvidos pela EPE para expansão das interligações regionais, com ênfase na expansão da capacidade de exportação da região Norte/Nordeste do Brasil, decorrente da larga expansão da Geração Variável Renovável (GVR), eólica e solar, dessa região, além da necessidade de reforçar a interligação de transmissão Norte-Sudeste em Corrente Alternada (CA), recomendaram a implantação de um bipolo de corrente contínua em ± 800 kV, potência nominal de 5 GW, entre a nova subestação Graça Aranha (MA) e a subestação Silvânia (GO), distantes cerca de 1450 km, denominado bipolo Nordeste I [1]. A Figura 1-1 ilustra a inserção do bipolo Nordeste I no Sistema Interligado Nacional (SIN).

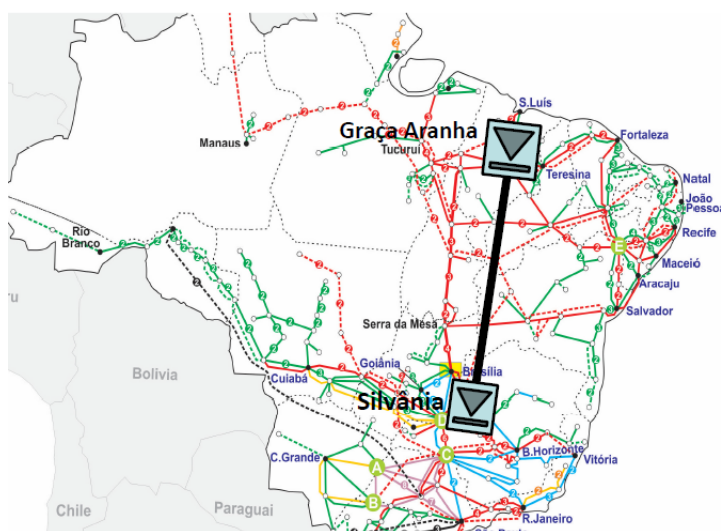


Figura 1-1 – Inserção do bipolo ± 800 kV Graça Aranha – Silvânia (Nordeste I) no SIN

A solução recomendada para essa transmissão em Corrente Contínua em Alta Tensão (CCAT) prevê a utilização da tecnologia *Line Commutated Converter* (LCC), já utilizada nos demais bipolos CCAT em operação no Brasil.

Como parte integrante da transmissão CCAT LCC, os filtros CA a serem projetados pelo fabricante responsável pelo empreendimento para as conversoras de corrente contínua são concebidos em função do comportamento harmônico da rede. Sendo assim, a impedância harmônica da rede CA, “vista” dos pontos de conexão do bipolo, em Graça Aranha e em Silvânia, representa importante referência para o dimensionamento desse sistema.

1.2 Objetivo principal

Este relatório tem como objetivo principal apresentar os resultados do levantamento das impedâncias harmônicas da rede externa “vistas” das barras CA, em 500 kV, das subestações conversoras Graça Aranha e Silvânia, informações de referência para subsidiar o dimensionamento e a concepção dos filtros CA associados ao bipolo em ± 800 kV Graça Aranha – Silvânia, Nordeste I.

Embora os resultados ao longo deste trabalho estejam mencionados, de forma geral, como impedâncias, também são apresentados alguns desses resultados sob a forma de admitâncias para fim de melhor compreensão dos fenômenos analisados.

2 CONCLUSÕES

Os resultados do levantamento das impedâncias harmônicas da rede externa, “vistas” das barras CA, em 500 kV, das subestações conversoras Graça Aranha e Silvânia, são informações para subsidiar o dimensionamento e a concepção dos filtros CA associados ao bipolo em ± 800 kV Graça Aranha – Silvânia, Nordeste I.

Os cálculos para obtenção dessas impedâncias foram realizados com o programa HarmZs do CEPEL [2], que possui uma série de métodos, ferramentas e facilidades com essa finalidade, com destaque para a leitura da base de dados dos programas ANAREDE (fluxo de potência) e ANATEM (estabilidade eletromecânica), largamente difundidos no setor elétrico brasileiro.

Para o levantamento dessas impedâncias, partiu-se de um conjunto abrangente de sete cenários de operação do SIN, selecionados com variações no nível de geração das regiões Norte, Nordeste e Sudeste, alternativos níveis de carga, além do sentido da transmissão no bipolo CCAT, seja direta (Graça Aranha para Silvânia) ou reversa. Ressalta-se que, para o cálculo das impedâncias harmônicas, todos os equipamentos associados à rede interna ao bipolo Nordeste I (filtros CA e CC, compensação *shunt*, compensadores síncronos, conversoras e linhas CC) foram considerados desligados.

Cada um desses cenários correspondeu a um caso base de rede completa para levantamento das impedâncias harmônicas em estudo, considerando uma a faixa de harmônicos, desde o 2º até o 50º harmônico.

Dentre os elementos representados na rede, destacam-se a representação dos compensadores estáticos e dos empreendimentos (conjuntos ou parques) de geração variável renovável, eólica e solar, existentes.

A análise inicial de *frequency scan* (impedância em função da frequência) mostrou a relevância de se considerar os sete cenários de fluxo de potência. Para o terminal Graça Aranha foram encontradas distintas respostas da impedância, para uma ampla gama de frequências. Para o terminal de Silvânia, tornou-se ainda mais evidente a relevância dessa consideração.

Uma das facilidades do programa HarmZs é a simulação automática das contingências, em N-1, considerando a indisponibilidade de cada elemento de rede representado no caso de simulação, dentro de uma área da rede delimitada por uma fronteira de barras. Neste estudo foi investigado ampliar a vizinhança da 3ª barra, como usualmente realizado, para a 5ª vizinhança. Ao se acrescentar contingências além da 3ª vizinhança, não foram verificadas alterações significativas nos resultados, para todas as ordens harmônicas investigadas. Desta forma, para elaboração dos lugares

geométricos finais, optou-se por manter o critério padrão, com definição de contingências até a 3ª vizinhança.

Outra condição investigada e adotada, com potencial influência nos resultados do comportamento harmônico da rede e, conseqüentemente, no dimensionamento e concepção dos filtros CA do bipolo, foi o eventual descasamento da entrada em operação de obras em relação a previsão original.

No ano de entrada do bipolo [1] estão previstos outros empreendimentos de transmissão que estão localizados na rede CA próximos às conversoras, e que estarão em implantação. Essa consideração levou à seleção de seis grupos (ou conjunto de obras) de empreendimentos de transmissão, quatro na região ao norte do bipolo e duas ao sul, ou seja, seis condições de rede alterada para cada cenário, resultando em 49 casos para simulação oriundos da combinação dos cenários e configurações de redes estudadas.

Para um determinado cenário, a comparação dos resultados com a rede completa e com os seis outros casos de rede alterada, pela retirada de blocos de obras, acarretou comportamentos distintos da impedância, para uma ampla gama de frequências, para os dois terminais (Graça Aranha e Silvânia), reforçando a importância de serem consideradas as várias topologias deste estudo.

Com esses critérios, entende-se que, mesmo com eventual descasamento das obras previstas para entrada em operação com o bipolo, os projetos dos filtros CA de ambos os terminais conversores, poderão ser desenvolvidos à época da implantação do bipolo. Não obstante, é válido destacar que, mesmo com as considerações conservadoras adotadas, eventuais alterações topológicas não previstas neste estudo poderão ocorrer quando da etapa de projeto básico, dada a quantidade de empreendimentos previstos e às possibilidades de combinações de cronograma possíveis.

Finalmente, são apresentadas neste relatório, para ambos os terminais do bipolo, os parâmetros dos lugares geométricos das impedâncias harmônicas, da 2ª a 50ª ordem, resultantes de todos os casos simulados (49 casos), recomendados para o projeto dos filtros CA das conversoras.

3 RECOMENDAÇÕES

As Tabela 7-2 e Tabela 7-3 deste relatório apresentam, respectivamente, para os terminais conversores de Graça Aranha e Silvânia, os parâmetros dos lugares geométricos das impedâncias harmônicas, da 2ª a 50ª ordem de harmônica, resultantes de todos os casos simulados, recomendados para o projeto dos filtros CA.

A despeito da consideração abrangente dos diferentes cenários e de redes alteradas, totalizando 49 casos, alterações substanciais de topologia poderão ocorrer no SIN, entre a conclusão deste relatório e o início do Projeto Básico, dado que o mesmo tem sido fortemente expandido, sobretudo com entrada de novas e expressivas gerações variáveis renováveis nas vizinhanças elétricas das conversoras do bipolo Nordeste I.

Outra possibilidade de alteração de topologia diz respeito a descasamentos de obras de reforços na rede CA, além das aqui consideradas, a exemplo do que ocorreu durante a implantação dos bipolos CCAT associados à usina hidrelétrica de Belo Monte.

Conseqüentemente, é importante destacar que, durante a etapa de elaboração do Projeto Básico para implantação efetiva do bipolo em estudo, após o leilão de concessão, caso as condições da rede tenham sido substancialmente alteradas, com relação às topologias consideradas nesta análise, as impedâncias harmônicas apresentadas neste relatório poderão sofrer alterações, a critério da EPE/ONS.

4 METODOLOGIA

4.1 Geral

O cálculo das impedâncias harmônicas foi realizado utilizando o programa HarmZs [2] [3], versão 5.0, desenvolvido pelo CEPEL, que possui uma série de métodos, ferramentas e facilidades, com destaque para a leitura da base de dados dos programas ANAREDE (fluxo de potência) e ANATEM (estabilidade eletromecânica), largamente difundidos no setor elétrico brasileiro, ambos desenvolvidos pelo CEPEL.

Além dessas facilidades, dispõe de método para seleção automática de contingências, processamento em modo *batch* para o cálculo das impedâncias harmônicas de todos os casos base e suas respectivas contingências e interfaces gráficas para traçados de Lugares Geométricos (LGs), na forma de setores anulares circulares e polígonos de "n" lados.

A partir das citadas bases de dados são feitas adequações em elementos da rede para o cálculo das impedâncias harmônicas com o HarmZs, como destacado a seguir.

4.2 Critérios para adequação de elementos da rede

A partir de casos de fluxo de potência selecionados, foram criados arquivos para o programa HarmZs, correspondentes aos diferentes cenários de operação. Com esses casos, foram criados os casos "raiz" do HarmZs, sobre os quais foram realizadas as seguintes adequações:

- Inclusão da variação da resistência de linhas, transformadores e geradores conforme a equação abaixo e a Tabela 4-1 [4].

$$R(f) = R_{60Hz} (A \cdot f^\alpha + B \cdot f^\beta + C)$$

Tabela 4-1 Parâmetros para a correção da resistência com a frequência

Elemento	α	β	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

- Linhas de transmissão considerando correção hiperbólica para cada frequência avaliada;
- Resistência dos transformadores: 2 % da reatância de dispersão dos transformadores (fator de qualidade 50) para os que não possuíam informação na base de dados de fluxo de potência;

- Resistência dos geradores: conforme informações da base de dados de dinâmica, caso os dados estejam disponíveis, ou calculadas como 1 % das reatâncias subtransitórias de eixo direto (X''_d) das máquinas segundo o número de máquinas despachadas nos casos de fluxo de potência;
- Correção da reatância dos transformadores elevadores das usinas com base no número de máquinas despachadas em cada caso de fluxo de potência utilizando o programa ANAT0, desenvolvido pelo CEPEL;
- Inserção dos dados correspondentes às reatâncias subtransitórias de eixo direto (X''_d) das máquinas segundo o número de máquinas despachadas no caso de fluxo de potência.

5 ELEMENTOS PARA REPRESENTAÇÃO DA REDE

A rede foi representada para simulação com o programa HarmZs, para as condições correspondentes aos diferentes cenários de operação e contingências consideradas.

Em destaque os principais critérios e condições para representação da rede com a qual foram levantadas as impedâncias harmônicas.

5.1 Cenários

A Tabela 5-1 resume os cenários considerados. Exceto quando destacado, a transmissão através do bipolo CCAT é direta, ou seja, no sentido Graça Aranha para Silvânia.

Cumprir destacar que as análises de rede completa são realizadas para o ano de 2028, considerando que todas as obras de rede CA e do bipolo em destaque entrariam este ano. Eventuais descasamentos de obras são tratados em seções a seguir.

Tabela 5-1 Cenários de operação selecionados

Número	Cenário	
	Condição de transmissão	Carga
1A	Máxima exportação do Norte/Nordeste	média
1B	Máxima exportação do Norte/Nordeste	leve
1C	Máxima exportação do Norte/Nordeste	mínima
2A	Máxima exportação do Nordeste	média
2B	Máxima exportação do Nordeste	leve
3	Máxima Importação do Sudeste/Centro-Oeste	média
4	Norte/Nordeste Importador – fluxo reverso no bipolo	leve

5.1.1 Descrição dos cenários

Cenário 1A - Máxima exportação do Norte/Nordeste

O objetivo deste cenário é a avaliação de uma condição de elevada exportação de potência pelo Norte-Nordeste, prioritariamente pela região Norte. Para tal, foram definidas as seguintes metas de despacho:

- geração hidráulica elevada nas usinas da região Norte, na ordem de 90 %;
- geração média nas usinas hidráulicas da região Sudeste, na ordem de 50 %;
- geração térmica reduzida, em função da elevada disponibilidade de recurso hidráulico.

Geração na região Nordeste:

- usinas hidráulicas da bacia do São Francisco com geração média de 5800 MW (aproximadamente 50 % da capacidade instalada);
- usinas solares com fator de capacidade de 90 %;
- usinas eólicas com fator de capacidade de 50 %.

Cenário 1B - Máxima exportação do Norte/Nordeste no patamar de carga leve

O objetivo deste cenário é a avaliação de uma condição de elevada exportação de potência pelo Norte-Nordeste, prioritariamente pela região Norte no patamar de carga leve. Para tal, foram definidas as seguintes metas de despacho:

- geração hidráulica nas usinas da região Norte, na ordem de 60 %;
- geração nas usinas hidráulicas da região Sudeste, na ordem de 20 %;
- geração nas usinas hidráulicas da região Sul, na ordem de 25 %
- geração térmica nacional despachada somente por inflexibilidade.

Geração na região Nordeste:

- usinas hidráulicas da bacia do São Francisco com geração média de 3000 MW (aproximadamente 30 % da capacidade instalada);
- usinas solares não despachadas;
- usinas eólicas com fator de capacidade de 60 %.

Cenário 1C – Cenário de Carga Mínima, despacho mínimo

O objetivo deste cenário é avaliar as condições de operação do bipolo em um cenário de carga mínima e baixo nível de curto-circuito. Para tal, foram definidas as seguintes metas de despacho:

- geração hidráulica nas usinas da região Norte, na ordem de 10 %;
- geração nas usinas hidráulicas da região Sudeste, na ordem de 20 %;
- geração nas usinas hidráulicas da região Sul, na ordem de 50 %
- geração térmica nacional despachada somente por inflexibilidade.

Geração na região Nordeste:

- usinas hidráulicas da bacia do São Francisco com geração média de 1800 MW (aproximadamente 17 % da capacidade instalada);
- usinas eólicas com fator de capacidade de 40 %.

Cenário 2A – Máxima Exportação do Nordeste

O objetivo deste cenário é a avaliação de condições de máxima exportação total pela região Nordeste, geralmente coincidentes com o período seco da região Norte. Para esse fim, foram definidas as seguintes metas de despacho:

- geração hidráulica reduzida nas usinas da região Norte, na ordem de 25 %;
- geração térmica mediana.

Geração na região Nordeste:

- usinas hidráulicas da bacia do São Francisco com geração média de 4120 MW (aproximadamente 39 % da capacidade instalada);
- usinas solares com fator de despacho de 90 %;
- usinas eólicas com fator de despacho de 70 %.

Cenário 2B – Máxima exportação do Nordeste no patamar de carga leve

O objetivo deste cenário é a avaliação de condições de máxima exportação total pela região Nordeste, geralmente coincidentes com o período seco da região Norte no patamar de carga leve. Para esse fim, foram definidas as seguintes metas de despacho:

- geração hidráulica reduzida nas usinas da região Norte, na ordem de 20 %;
- geração térmica inflexível.

Geração na região Nordeste:

- usinas hidráulicas da bacia do São Francisco com geração média de 7900 MW (aproximadamente 75 % da capacidade instalada);
- usinas solares não despachadas;
- usinas eólicas com fator de despacho de 70 %.

Cenário 3 – Máxima importação Sudeste

O objetivo deste cenário é a avaliação de uma condição de elevada importação da região Sudeste tanto pelas regiões Norte-Nordeste quanto pela região Sul. Para tal, foram definidas as seguintes metas de despacho:

- geração hidráulica elevada nas usinas da região Norte, na ordem de 90 %.
- geração média nas usinas hidráulicas da região Sudeste, na ordem de 35 %;
- geração médias nas usinas hidráulicas da região Sul maximizada (95 %);
- geração térmica reduzida, em função da elevada disponibilidade de recurso hidráulico.

Geração na região Nordeste:

- usinas hidráulicas da bacia do São Francisco com geração média de 5800 MW (aproximadamente 50 % da capacidade instalada);
- usinas solares com fator de capacidade de 90 %;
- usinas eólicas com fator de capacidade de 50 %.

Cenário 4 – Norte/Nordeste importador – fluxo reverso no bipolo

O objetivo deste cenário é a avaliação da importação da região Nordeste. Neste cenário, o bipolo Graça Aranha – Silvânia encontra-se com fluxo reverso. Para esse fim, foram definidas as seguintes metas de despacho:

- geração hidráulica reduzida nas usinas da região Norte, na ordem de 14 %;
- geração nas usinas hidráulicas da região Sudeste, na ordem de 50 %;
- geração nas usinas hidráulicas da região Sul, na ordem de 60 %;
- geração térmica nacional despachada somente por inflexibilidade;
- geração térmica por ordem de mérito.

Geração na região Nordeste:

- usinas hidráulicas da bacia do São Francisco com geração média de 3000 MW (aproximadamente 28 % da capacidade instalada);
- usinas solares não despachadas;
- usinas eólicas com fator de despacho de 10 %.

5.2 Cargas

Tendo em conta a extensão da rede representada, o impacto da consideração das cargas nesse tipo de avaliação e as incertezas no próprio comportamento das cargas, atualmente com a presença crescente de geração distribuída, adotou-se como premissa a não representação de cargas.

5.3 Compensadores estáticos de reativos

Como a geração de harmônicos através dos Compensadores Estáticos de Reativos (CER) não faz parte do objetivo deste estudo, os compensadores estáticos presentes nas proximidades das conversoras foram representados como elementos passivos, “vistos” dos seus pontos de conexão com a Rede Básica [6]. Para a configuração típica dos compensadores instalados no SIN foi feita uma representação aproximada, considerando a condição frequente de operação, com um elemento de TSC (*Thyristor Switched Capacitor*) ligado, além do transformador elevador e dos filtros do CER. A Tabela 5-2 apresenta um sumário dos CER representados dentro da área de interesse do estudo.

Tabela 5-2 Compensadores estáticos representados

CER	Potência [Mvar]
FERNÃO DIAS	-150/+300
ITATIBA	-300/+300
LUZIÂNIA	-150/+300
PARNAÍBA	-150/+300
SOBRAL	-150/+250

5.4 Parques eólicos e solares

Dentro da área de interesse do estudo foram considerados 35 empreendimentos (conjuntos ou parques) de geração variável renovável, sendo 27 de geração eólica e 8 de geração solar fotovoltaica, como sumarizado na Tabela 5-3.

Nessa tabela estão indicados, por empreendimento, o ponto de conexão na rede (PCR), o tipo de fonte, a potência nominal instalada e o montante de compensação reativa instalada. Cada empreendimento foi representado através dos seus filtros (em caráter fixo) e das compensações reativas (a depender do ponto de operação).

Tabela 5-3 Sumário dos parques eólicos e solares considerados

Conjunto	PCR	Tipo de Fonte	Potência Instalada [MW]	Compensação além dos filtros	
				Capacitiva [Mvar]	Indutiva [Mvar]
Acaraú II	SE Acaraú II 230 kV	Eólica	70,80	0,00	0,00
Araripe III	SE CNP II 230 kV	Eólica	357,90	38,00	0,00
Cacimbas	SE Ibiapina 230 kV	Eólica	86,10	15,00	0,00
SE Chapada I - Sta. Joana II, VI, VIII e XIV e Sto. Onofre I, II e III)	SE CNP II 500 kV SE CNP II 230 kV	Eólica	240,00	58,20	0,00
SE Chapada II - Sta. Joana IX, X, XI, XII, XIII, XV E XVI	SE Picos 230kV	Eólica	234,50	35,00	0,00
SE Chapada III - Sta. Joana I, III, IV, V, VII e Sto Augusto III, IV, V	SE CNP II 230 kV	Eólica	202,00	20,00	0,00
São Vicente (Chapadinha I) = Ventos do Piauí I	SE CNP II 500 kV SE CNP II 230 kV	Eólica	176,40	36,00	0,00
Icaraí	SE Sobral III 230kV	Eólica	140,70	0,00	0,00
Itarema - Fases I, II (Itarema V)	SE Acaraú 2 230kV	Eólica	207,00	0,00	6,04
Lagoa do Barro (Aura Queimada Nova)	SE São do Piauí 230kV	Eólica	195,00	68,44	4,00
Lagoa dos Ventos	SE São do Piauí 500kV	Eólica	716,00	114,00	25,20
Nova Olinda	SE São do Piauí 500kV	Solar	210,00	0,00	20,20
Papagaios	Acaraú II 69 kV	Eólica	87,00	20,00	0,00
Paulino Neves	SE Miranda II 500 kV	Eólica	426,00	0,00	0,00

Conjunto	PCR	Tipo de Fonte	Potência Instalada [MW]	Compensação além dos filtros	
				Capacitiva [Mvar]	Indutiva [Mvar]
Pedra Cheirosa	SE Sobral III 230 kV	Eólica	48,30	8,00	0,00
Santa Rosália	Ibiapina 69 kV	Eólica	130,10	0,00	0,00
São Basílio	SE CNP II 500 kV	Eólica	207,90	57,60	0,00
São Gonçalo	SE Gilbués II 500 kV	Solar	704,30	226,00	71,00
São João do Piauí	SE São João do Piauí 500 kV	Solar	185,80	0,00	0,00
Empreendimentos sem conjunto					
Cataventos Acaraú I	SE Acaraú II 230 kV	Eólica	28,00	7,20	0,00
Malhadinha I	SE Ibiapina II 69 kV	Eólica	23,10	0,00	0,00
Porto Salgado	SE Parnaíba III 138 kV	Eólica	20,00	0,00	0,00
Icaraí	SE Sobral 69 kV	Eólica	16,80	0,00	0,00
Pedra do Sal	SE Parnaíba III 138 kV	Eólica	18,00	0,00	0,00
Porto do Delta	SE Parnaíba III 138 kV	Eólica	30,80	0,00	0,00
Delta do Parnaíba	SE Parnaíba III 138 kV	Eólica	30,00	0,00	0,00
Testa Branca III	SE Parnaíba III 138 kV	Eólica	24,00	0,00	0,00
Porto das Barcas	SE Parnaíba III	Eólica	20,00	0,00	0,00
Testa Branca I	SE Parnaíba III 138kV	Eólica	23,00	0,00	0,00
Praia Formosa e Icarazinho	SE Sobral III	Eólica	159,60	51,00	34,00
Sol Maior 2	SE Miracema 138kV	Solar	5,00	0,00	0,00

Conjunto	PCR	Tipo de Fonte	Potência Instalada [MW]	Compensação além dos filtros	
				Capacitiva [Mvar]	Indutiva [Mvar]
Sobral 1	SE São João do Piauí 69kV	Solar	30,00	0,00	0,00
Sobrado 1	SE Juazeiro II 69kV	Solar	30,00	0,00	0,00
Sertão 1	SE São João do Piauí 69kV	Solar	30,00	0,00	0,00
Tauá	SE Tauá 2 69kV	Solar	5,00	0,00	0,00

5.5 Conversoras CCAT

Em função de suas proximidades aos terminais de Graça Aranha e Silvânia, conversoras dos bipolos CCAT do SIN tiveram seus filtros CA representados, tendo em conta a experiência decorrente dos estudos dos bipolos CCAT associados a Belo Monte, com os seguintes critérios:

- foram desligados nos casos os capacitores das barras CA do bipolo Nordeste I, uma vez que estes representam os filtros que serão projetados;
- os filtros de harmônicos das estações conversoras Araraquara 2 e Estreito 500 kV foram representados detalhadamente por seus parâmetros RLC no programa HarmZs. A definição do número e dos tipos de filtros conectados para cada caso foi feita com base na potência reativa do caso de fluxo de potência e na sequência normal de chaveamento.

6 SELEÇÃO DAS CONFIGURAÇÕES DA REDE E PREMISSAS DE CÁLCULO

6.1 Seleção das configurações da rede

Uma das facilidades do programa HarmZs é a simulação automática das contingências, em N-1, considerando a indisponibilidade de cada elemento de rede representado no caso de simulação. Essa simulação automática abrange uma área delimitada por uma fronteira de barras, que pode ser selecionada em “n” vizinhanças com relação à barra em análise para a qual se deseja obter a impedância harmônica equivalente.

Para o estudo em questão, foram utilizados como partida os sete casos base de rede completa, correspondentes aos sete cenários indicados no item 5.1. Entretanto, como no ano de entrada do bipolo estão previstos outros empreendimentos de transmissão que estão localizados na rede CA próxima às conversoras [1,7], foi adotada a premissa de se considerar a hipótese de algum descasamento na entrada em operação desses empreendimentos. Essa premissa está apoiada na experiência pregressa da operação do SIN, com situações concretas de descasamento de obras da rede CA previstas para estarem presentes quando da data de entrada em operação dos bipolos planejados, como exemplo, o atraso da entrada do eixo em 500 kV Xingu – Serra Pelada - Miracema associado aos bipolos Xingu – Estreito e Xingu – Terminal Rio.

Dessa forma, foram realizados agrupamentos com base no grau de dependência das obras, tanto sob uma ótica elétrica quanto locacional, buscando inserir em um mesmo grupo aqueles empreendimentos que, em tese, poderiam compor um único lote de leilão de transmissão. Dessa forma, torna-se possível avaliar eventuais descasamentos de obras de transmissão aos quais o SIN estará eventualmente sujeito devido, principalmente, à complexa dinâmica de implantação de obras de transmissão, que envolve a ação de diferentes agentes como transmissoras, fundações, parques florestais, órgãos licenciadores etc.

Diante dessa premissa, no que diz respeito à vizinhança da rede CA próxima da conversora de Graça Aranha (área norte), foram identificados quatro grupos (ou conjunto de obras) de empreendimentos de transmissão recomendados para a mesma data do bipolo, como indicado na Figura 6-1 que ilustra a rede dessa região e relacionados na Tabela 6-1.

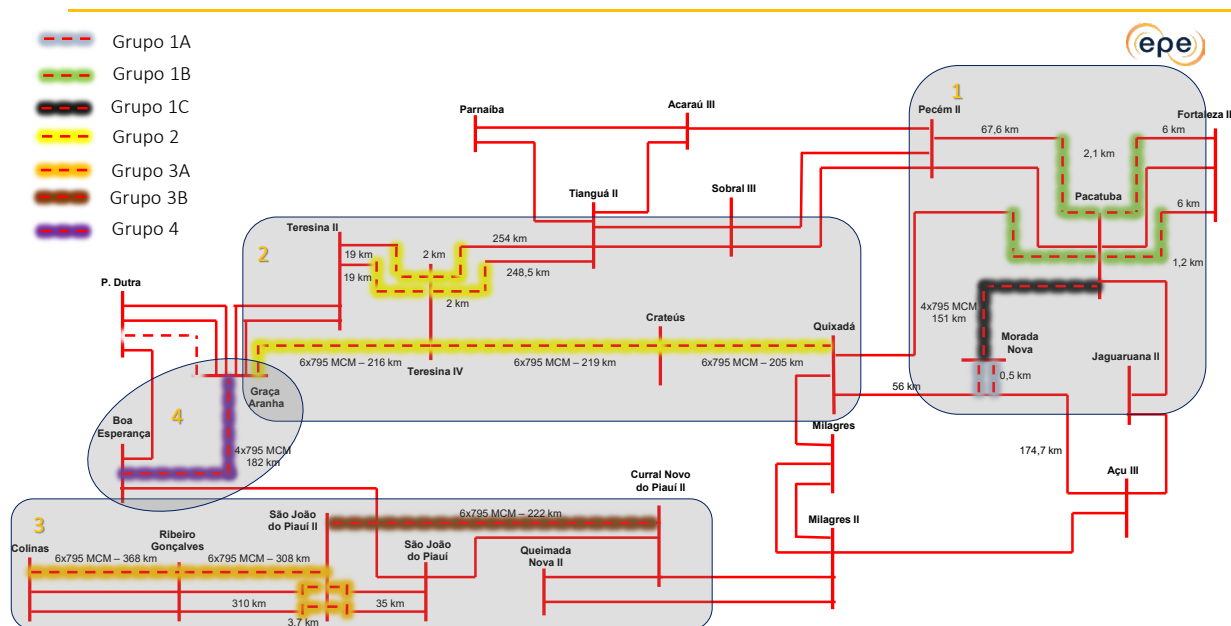


Figura 6-1 – Grupos de novos empreendimentos de transmissão previstos para implantação na vizinhança norte (Graça Aranha), até a entrada do bipolo Nordeste I

Tabela 6-1 Grupos de empreendimentos na vizinhança norte (Graça Aranha)

Grupo	Linha de Transmissão	Tensão	Configuração	Extensão
1	Seccionamento da LT Açú III – Quixadá na nova SE Morada Nova	500 kV	CS - 4x954 MCM	2 x 0,5 km
	Seccionamento da LT Quixadá – Fortaleza II na SE Pacatuba		CS - 4x954 MCM	2 x 1,2 km
	Seccionamento da LT Pecém II – Fortaleza II (C2) na SE Pacatuba		CS - 4x954 MCM	2 x 2,1 km
	Morada Nova – Pacatuba		CS – 4x795 MCM	151 km
2	Quixadá - Crateús	500 kV	CS - 6x795 MCM	205 km
	Crateús – Teresina IV		CS - 6x795 MCM	219 km
	Teresina IV – Graça Aranha		CS - 6x795 MCM	216 km
	Seccionamento da LT Tianguá – Teresina II C1 e C2 na nova SE Teresina IV		CS - 4x954 MCM	4 x 2,0 km
3	Curral Novo do Piauí II – São João do Piauí II	500 kV	CS - 6x795 MCM	222 km
	São João do Piauí II – Ribeirão Gonçalves		CS - 6x795 MCM	308 km
	Ribeirão Gonçalves - Colinas		CS - 6x795 MCM	368 km
	Seccionamento da LT São João do Piauí – Ribeirão Gonçalves C1 e C2 na nova SE São João do Piauí II		CS - 4x954 MCM	4 x 3,7 km
4	LT 500 kV Boa Esperança – Graça Aranha	500 kV	CS - 4x795 MCM	182 km

Já para a vizinhança da rede CA da conversora de Silvânia (área sudeste, foram identificados dois grupos (ou conjunto de obras) de empreendimentos de transmissão previstos para implantação, como indicado na Figura 6-2 que ilustra a rede dessa região e relacionados na Tabela 6-2.

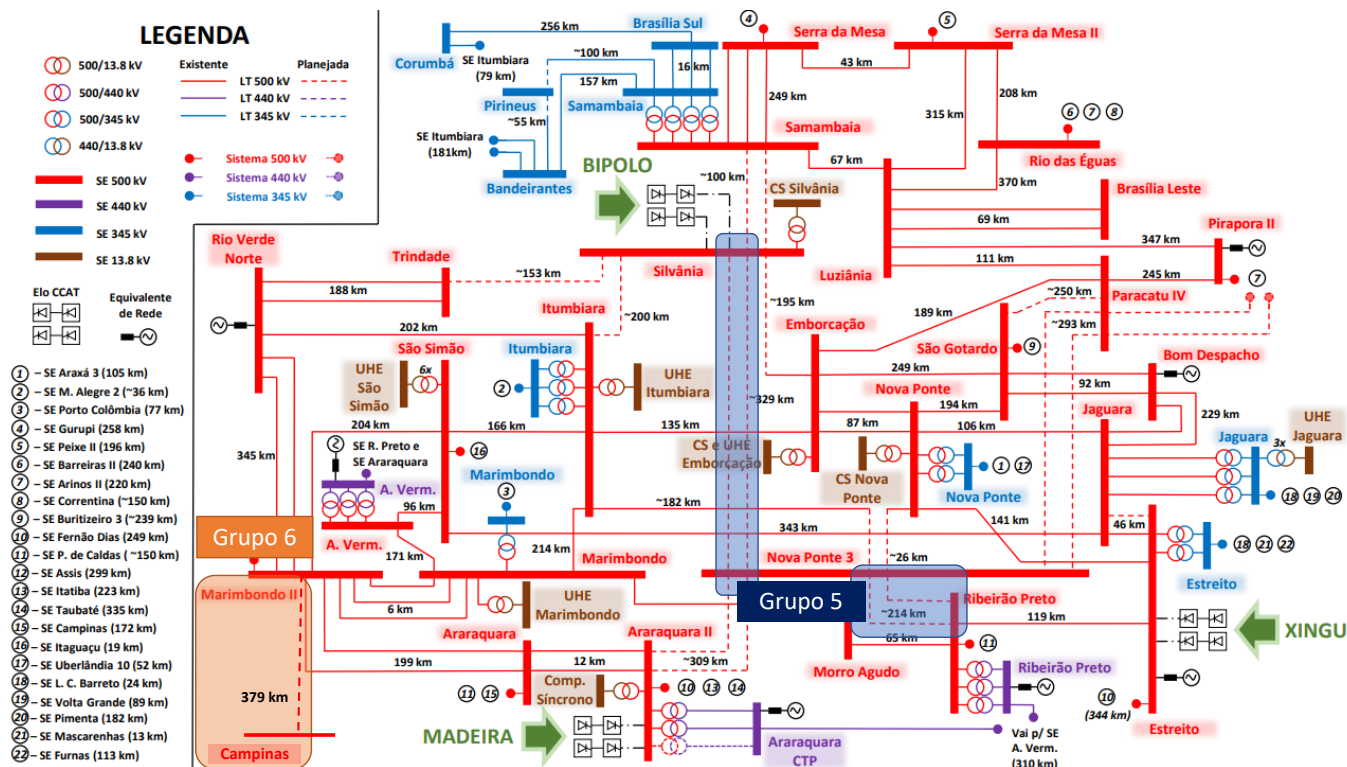


Figura 6-2 – Grupos de novos empreendimentos de transmissão previstos para implantação na vizinhança sudeste (Silvânia), até a entrada do bipolo Nordeste I

Tabela 6-2 Grupos de empreendimentos na vizinhança sudeste (Silvânia)

Grupo	Linha de Transmissão	Tensão	Configuração	Extensão
1	Silvânia – Nova Ponte 3, C1 e C2 (CD)	500 kV	CD, 4 x 954 MCM	329 km
	Nova Ponte 3 – Ribeirão Preto, C1 E C2 (CD)		CD, 4 x 954 MCM	214 km
2	Marimbondo 2 - Campinas, C1 (Nova)	500 kV	CS, 4 x 954 MCM	379 km

Assim, partindo dos sete casos base, foi considerada a indisponibilidade de cada um dos seis grupos de empreendimentos futuros, formando 42 novos casos, denominados de configurações intermediárias, que somados aos sete casos da configuração completa totalizam 49 casos para simulação com o programa HarmZs.

Além disso, como usualmente recomendado na prática de análise de impedâncias harmônicas, foram consideradas as contingências, em N-1, até a terceira vizinhança elétrica das barras conversoras para cada caso de simulação. De modo a avaliar os possíveis impactos nos resultados, foi feita uma análise de sensibilidade para contingências até a quinta vizinhança, cujos resultados são apresentados no item 7.1.2.

6.2 Premissas de cálculo e agrupamento da nuvem de pontos

No cálculo das impedâncias harmônicas foram adotadas as seguintes premissas e simplificações:

- $Z(\omega)$ calculado do 2º até o 50º harmônico (120-3000 Hz) para as frequências múltiplas da fundamental. Além disso, para cada ordem harmônica, também foram calculadas as impedâncias considerando um desvio de +/- 0,2 Hz na frequência [8];
- analisadas as configurações de rede completa, configurações intermediárias e a indisponibilidade de um elemento de rede nas regiões de interesse (critério N-1);
- agrupamento das nuvens de pontos para a definição dos lugares geométricos das impedâncias em setores anulares circulares: $h \pm 1$ [9]. Por exemplo, o envelope para o 11º harmônico inclui os pontos calculados para o 10º, 11º e 12º harmônicos – incluindo os desvios de +/- 0,2 Hz - conforme metodologia estabelecida pelos Procedimentos de Rede e pelos Anexos Técnicos de Leilões de Transmissão;
- elaboradas tabelas resumo e traçados de lugares geométricos das impedâncias/admitâncias utilizados para o agrupamento das nuvens de impedância.

7 RESULTADOS

Este capítulo apresenta um resumo dos principais resultados obtidos para as impedâncias harmônicas “vistas” das barras conversoras CA de Graça Aranha e Silvânia. De forma geral, os resultados do presente estudo são mencionados e apresentados sob forma de impedâncias, não obstante a apresentação de alguns desses resultados também sob forma de admitâncias, para fim de melhor compreensão sobre o fenômeno analisado.

Tendo em conta que o processamento dos casos estudados é realizado com arquivos de dados elaborados a partir de arquivos de diferentes programas, com ajustes e complementações de dados e modelos, conforme indicado nos capítulos 4 e 5, entendeu-se como importante e necessária a realização de testes de consistência com os resultados.

Dentre outros testes, realizou-se uma comparação entre a resposta em frequência a 60 Hz, simulada com o programa HarmZs *versus* o equivalente de Thevénin visto de cada barra CA terminal do bipolo (Graça Aranha e Silvânia 500 kV) com o programa de análise de curto-circuito (ANAFAS). A topologia de rede para ambas as simulações é similar, ou seja, parte de um ponto de operação e de uma rede semelhante, embora não necessariamente igual – devido a diferenças de modelagem entre os programas. Os resultados, conforme indicados na Tabela 7-1, mostram valores compatíveis, em ordem de grandeza, sobretudo tendo em conta as diferentes bases de dados/modelos empregados nos distintos programas.

Tabela 7-1 Comparação expedita entre impedâncias a 60 HZ – Cenário 1 A

Programa utilizado	SE Graça Aranha 500 kV [Ω]	SE Silvânia 500 kV [Ω]
HarmZs	19,4	15,8
ANAFAS	14,7	11,2

Cumprir destacar que os valores de tensão fase-fase e potência base para cálculo dos valores apresentados em p.u. neste relatório são, respectivamente, 500 kV e 100 MVA. Consequentemente, obtém-se **2.500 ohms** para impedância base e de **400 μ S** para a admitância base.

7.1 Impedância harmônica vista de Graça Aranha 500 kV

7.1.1 Análises preliminares

Como parte das análises preliminares dos resultados das simulações, foram comparadas as respostas em frequência (para a faixa da 2ª a 50ª ordem) do módulo da impedância “vista” do terminal 500 kV de Graça Aranha, para diferentes casos simulados. A Figura 7-1 apresenta esses resultados para os casos de rede completa com os sete cenários distintos.

É possível notar nessa figura, não de forma expressiva para todas as frequências, que a composição dos diferentes cenários implica em respostas da rede distintas, para uma ampla gama de frequências, para o terminal Graça Aranha.

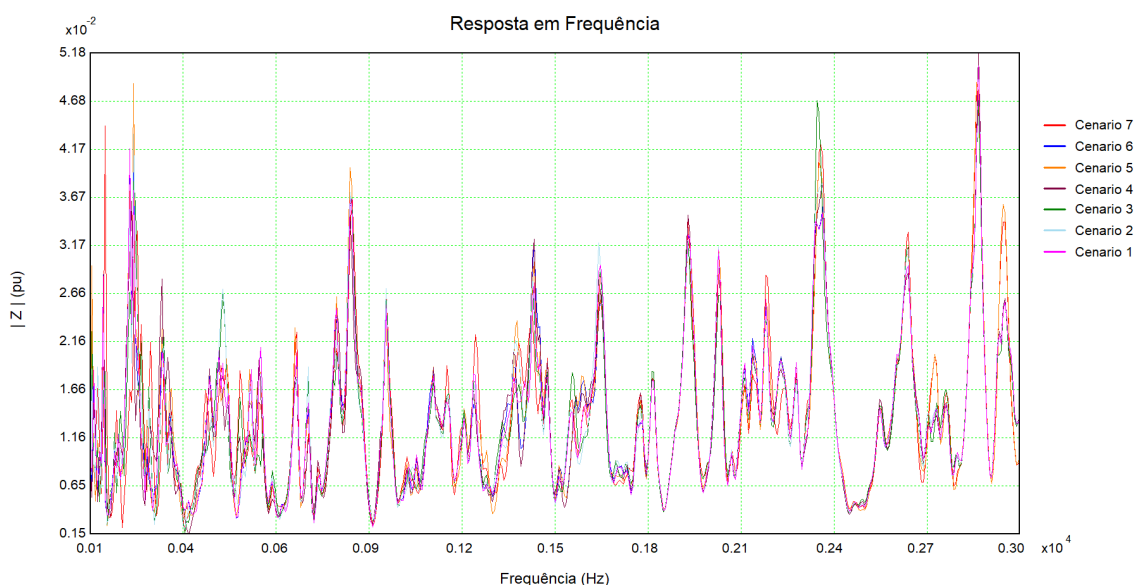


Figura 7-1 – Módulo da impedância em função da frequência, “vista” de Graça Aranha, rede completa, 7 cenários distintos (valores em p.u.)

Considerando agora um dos cenários (1A), para comparação da rede completa com 6 outros casos de rede alterada, pela retirada de blocos de obras, como mostrado na Figura 7-2. Fica evidenciado nos resultados que a consideração dessas diferentes configurações acarreta comportamentos distintos da impedância, para uma ampla gama de frequências, para o terminal Graça Aranha, reforçando a importância de serem consideradas as várias topologias deste estudo.

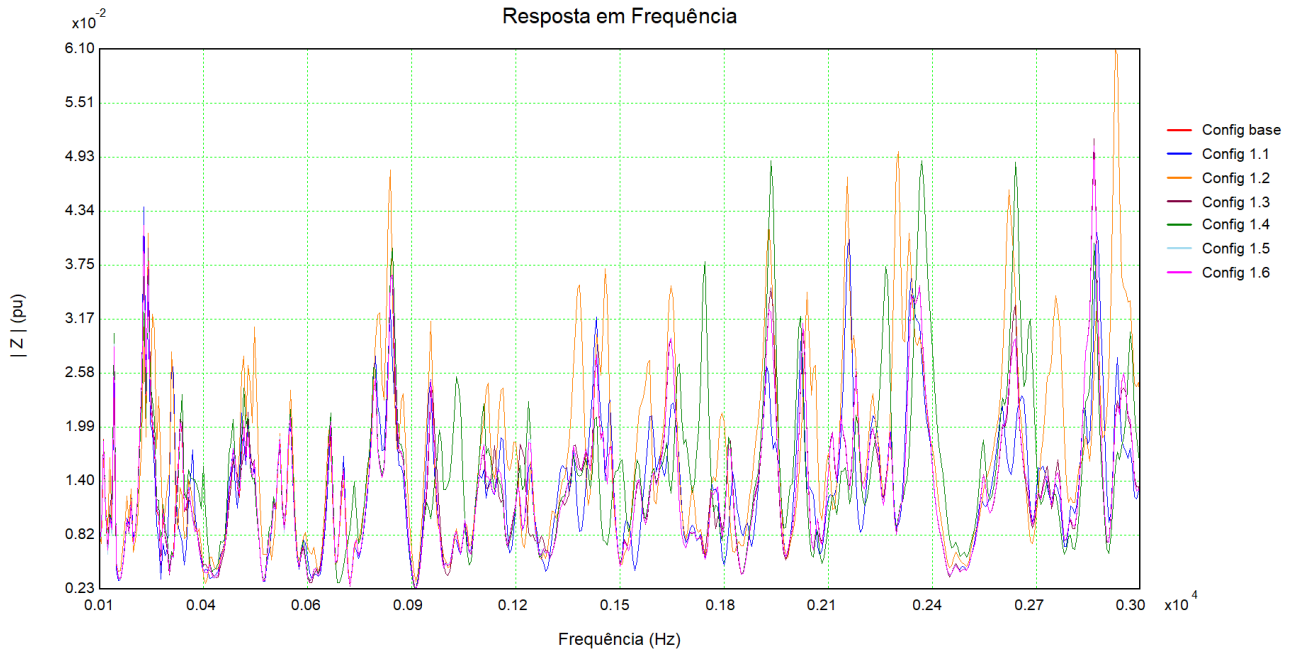


Figura 7-2 – Módulo da impedância em função da frequência, “vista” de Graça Aranha, cenário 1A, com rede completa e 6 retiradas de blocos de obras (valores em p.u.)

7.1.2 Investigações em destaque

Dentre as investigações realizadas neste estudo, em destaque, está a consideração da saída de blocos de empreendimentos de transmissão por descasamento com a entrada em operação do bipolo, como indicado no item 6.

A Figura 7-3 apresenta, para o terminal Graça Aranha, uma comparação entre dois Setores de Impedâncias, extraídos diretamente do programa HarmZs, respectivamente, para um caso de rede completa e outro caso de retirada de bloco de transmissão (alterações topológicas), ambos para a 11ª harmônica.

Observa-se que o Setor da rede completa está inserido no Setor com alterações topológicas, indicando que a condição com alterações topológicas resulta em condição potencialmente mais conservativa no que se refere à concepção dos filtros CA da conversora.

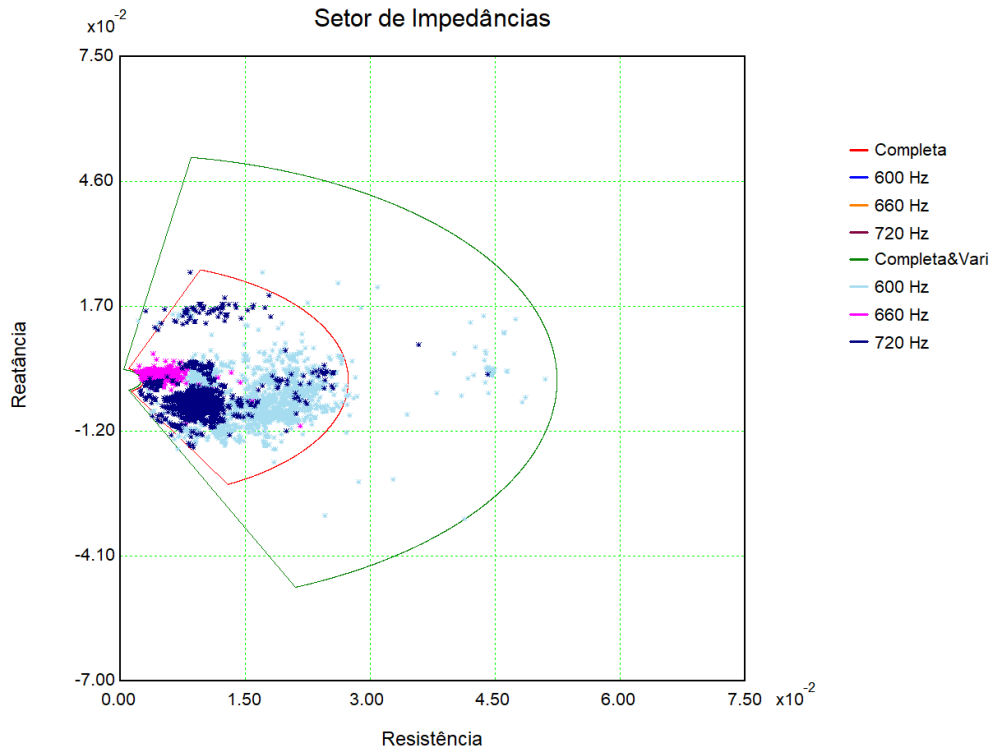


Figura 7-3 –Setores de Impedâncias “vistos” de Graça Aranha, 11ª harmônica - comparação entre rede completa e com alterações topológicas (valores em p.u.)

A Figura 7-4 apresentada a seguir, para a 13ª harmônica, reforça essa percepção.

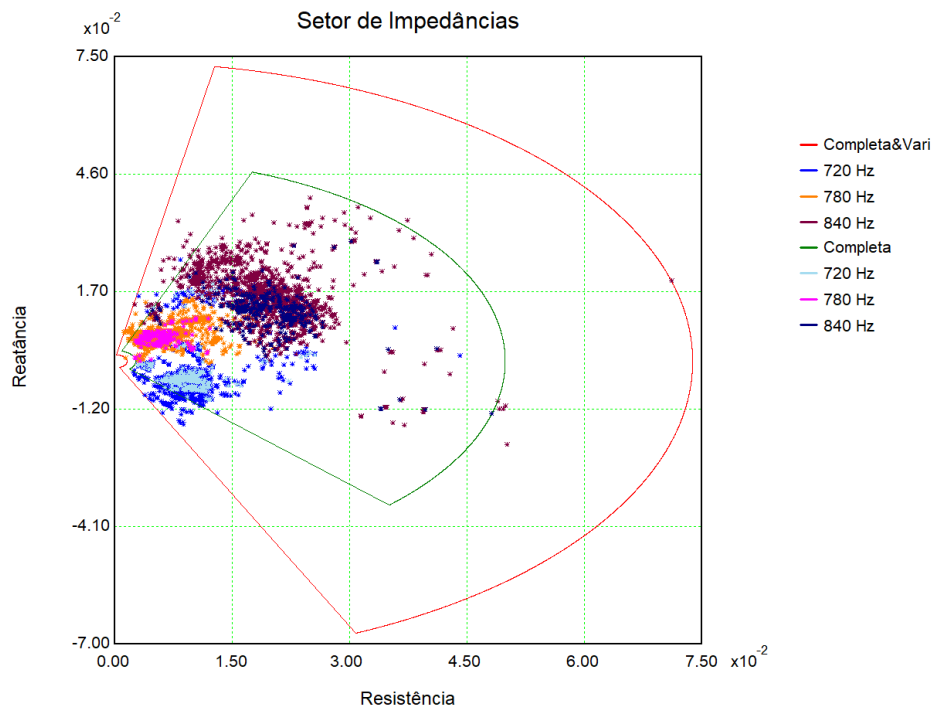


Figura 7-4 – Setores de impedâncias “vistos” de Graça Aranha, 13ª harmônica – comparação entre rede completa e com alterações topológicas (valores em p.u.)

Outra investigação realizada neste estudo foi em relação ao efeito nos resultados das impedâncias harmônicas, ao se ampliar o limite da 3ª para 5ª vizinhança elétrica da barra de análise, para simulações de contingência de elementos da rede, como indicado na metodologia de cálculo do HarmZs ressaltada no item 6.1.

A Figura 7-5 ilustra um dos casos onde foram verificadas as maiores diferenças nos LG's quando da comparação entre os Setores de Impedâncias, considerando contingências até a 3ª e até a 5ª vizinhança. Observa-se que, neste caso, apenas a magnitude da impedância teve pequeno aumento ao se considerar a 5ª vizinhança para aplicação de contingências. Todavia, os ângulos permaneceram praticamente iguais, sendo estes os que usualmente apresentam maior impacto no dimensionamento dos filtros CA.

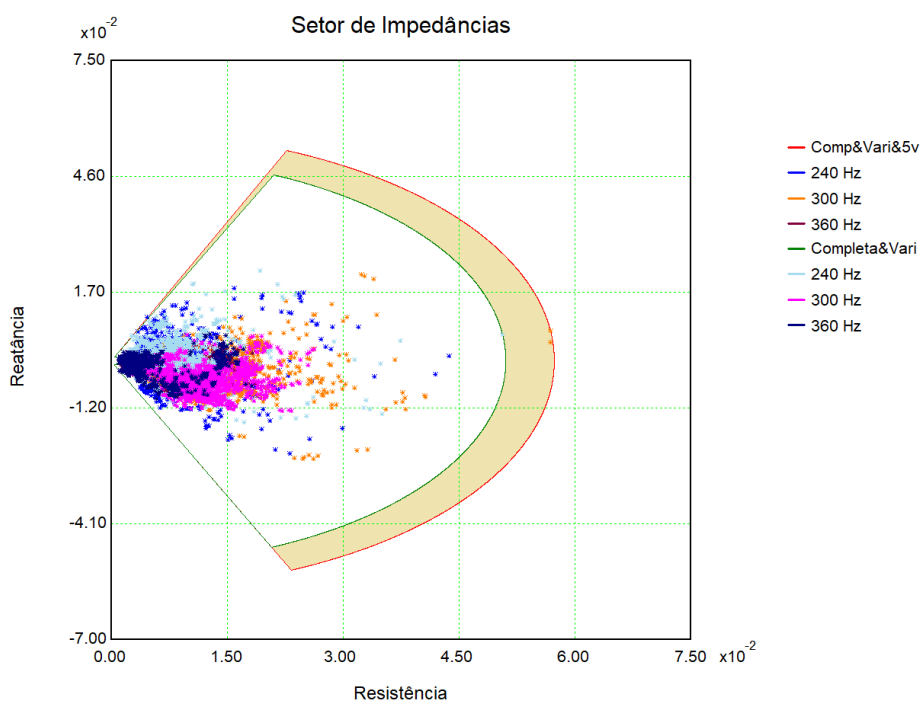


Figura 7-5 – Setores de impedâncias “vistas” de Graça Aranha, 5ª harmônica, rede completa e com alterações topológicas – comparação entre limites de contingências nas 3ª e 5ª vizinhanças (valores em p.u.)

Reforçando essa observação, a Figura 7-6 ilustra a comparação para a 13ª harmônica. Nela são apresentados os Setores de Impedâncias para a rede completa (limites internos e em cor verde) e para a rede com alterações topológicas (limites externos e em cores vermelha e marrom), considerando a 3ª e 5ª vizinhança, respectivamente, como limites de contingências. Estes dois últimos setores estão praticamente sobrepostos, com ângulos praticamente iguais, inclusive na região de baixa resistência, como destacado nessa figura.

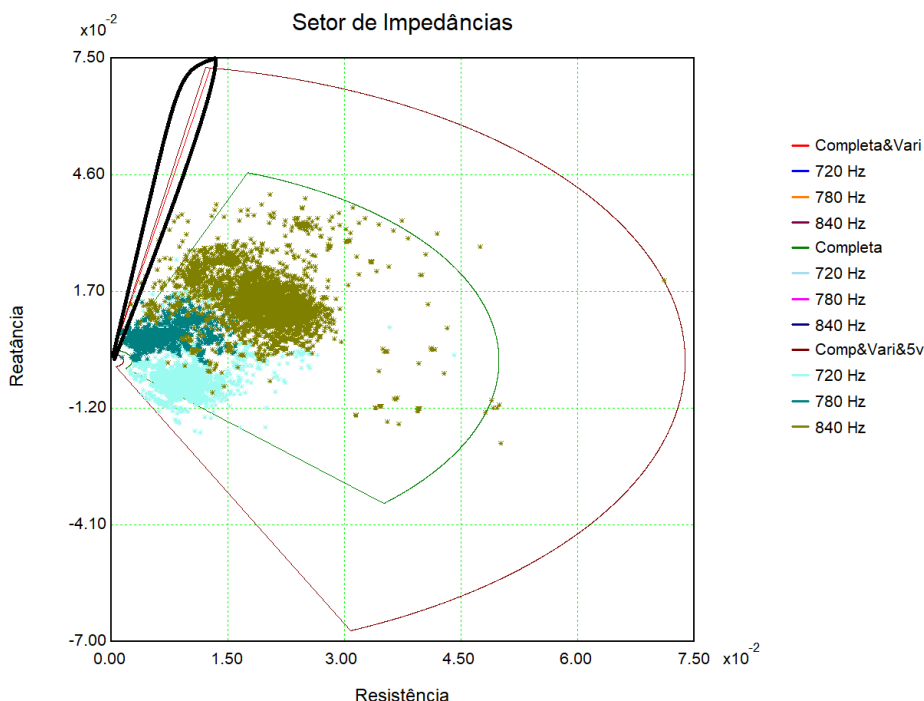


Figura 7-6 – Setores de impedâncias “vistas” de Graça Aranha, 13ª harmônica, rede completa e com alterações topológicas – comparação entre limites de contingências nas 3ª e 5ª vizinhanças (valores em p.u.)

7.1.3 Parâmetros dos lugares geométricos das impedâncias harmônicas

Os parâmetros dos lugares geométricos das impedâncias harmônicas da rede externa, entre a 2ª e a 50ª ordem, resultantes de todos os casos simulados (49 casos), recomendados para o projeto dos filtros CA da conversora de Graça Aranha, estão relacionados na Tabela 7-2. Os dados “primários” utilizados para a obtenção desta tabela podem ser verificados no ANEXO C.

Tabela 7-2 Impedância harmônica “vista” da SE Graça Aranha 500 kV – considerando agrupamentos e desvios de frequência

SE Graça Aranha 500 kV					
Frequência		Módulo Z [Ω]		Ângulo θ [graus]	
Ordem Harmônica	[Hz]	máximo	mínimo	máximo	Mínimo
2	120	281,8	6,3	85,6	-57,0
3	180	281,8	6,2	85,6	-57,0
4	240	281,8	6,2	85,6	-57,0
5	300	127,6	2,6	66,7	-67,5
6	360	75,5	2,6	77,0	-67,5
7	420	154,3	2,6	77,0	-67,5
8	480	154,3	8,6	77,0	-58,9
9	540	158,8	8,6	80,8	-66,7
10	600	158,8	6,2	80,8	-66,7
11	660	158,8	5,1	80,8	-66,7

SE Graça Aranha 500 kV					
Frequência		Módulo $ Z $ [Ω]		Ângulo θ [graus]	
Ordem Harmônica	[Hz]	máximo	mínimo	máximo	Mínimo
12	720	110,3	4,0	81,0	-66,7
13	780	184,5	4,0	81,0	-66,7
14	840	184,5	4,0	81,0	-68,9
15	900	184,5	2,5	79,6	-76,8
16	960	163,2	2,5	77,6	-76,8
17	1020	112,4	2,5	77,6	-76,8
18	1080	112,4	9,2	65,4	-72,5
19	1140	166,9	5,4	74,9	-69,4
20	1200	166,9	5,4	74,9	-68,2
21	1260	166,9	5,4	77,1	-68,2
22	1320	93,7	5,6	79,5	-57,4
23	1380	167,7	5,6	79,5	-66,0
24	1440	271,0	6,5	79,5	-78,8
25	1500	271,0	6,5	81,7	-78,8
26	1560	271,0	7,2	81,7	-78,8
27	1620	205,2	7,2	81,7	-75,5
28	1680	205,2	8,4	78,4	-75,5
29	1740	205,2	7,1	78,4	-75,5
30	1800	166,3	2,9	72,0	-73,5
31	1860	123,3	2,9	81,1	-64,9
32	1920	234,9	2,9	81,1	-77,2
33	1980	287,1	5,5	83,3	-80,6
34	2040	287,1	2,8	83,3	-80,6
35	2100	504,3	2,8	83,3	-80,6
36	2160	504,3	2,8	80,7	-70,5
37	2220	504,3	10,3	80,7	-70,5
38	2280	505,2	10,3	79,6	-77,5
39	2340	505,2	10,3	76,8	-80,3
40	2400	505,2	2,8	76,8	-80,3
41	2460	227,1	2,8	82,8	-80,3
42	2520	139,7	2,8	83,6	-79,5
43	2580	353,0	3,7	83,6	-66,4
44	2640	353,0	6,2	83,6	-66,4
45	2700	353,0	6,2	82,2	-74,6
46	2760	232,3	5,1	84,6	-74,6
47	2820	313,3	5,1	84,6	-78,3
48	2880	597,5	5,1	84,6	-78,3
49	2940	597,5	7,8	81,0	-81,3
50	3000	597,5	7,8	79,0	-81,3

7.2 Impedância harmônica vista de Silvânia 500 kV

7.2.1 Análises preliminares

A exemplo do realizado para o terminal de Graça Aranha, como parte das análises preliminares dos resultados das simulações, foram comparadas as respostas em frequência (para a faixa da 2ª a 50ª ordem) do módulo da impedância “vista” do terminal 500 kV de Silvânia, para diferentes casos simulados. A Figura 7-7 apresenta esses resultados para os casos de rede completa com os 7 cenários distintos.

Para o terminal Silvânia, torna-se ainda mais evidente que a consideração dos diferentes cenários implica em respostas distintas da rede, em uma ampla gama de frequências.

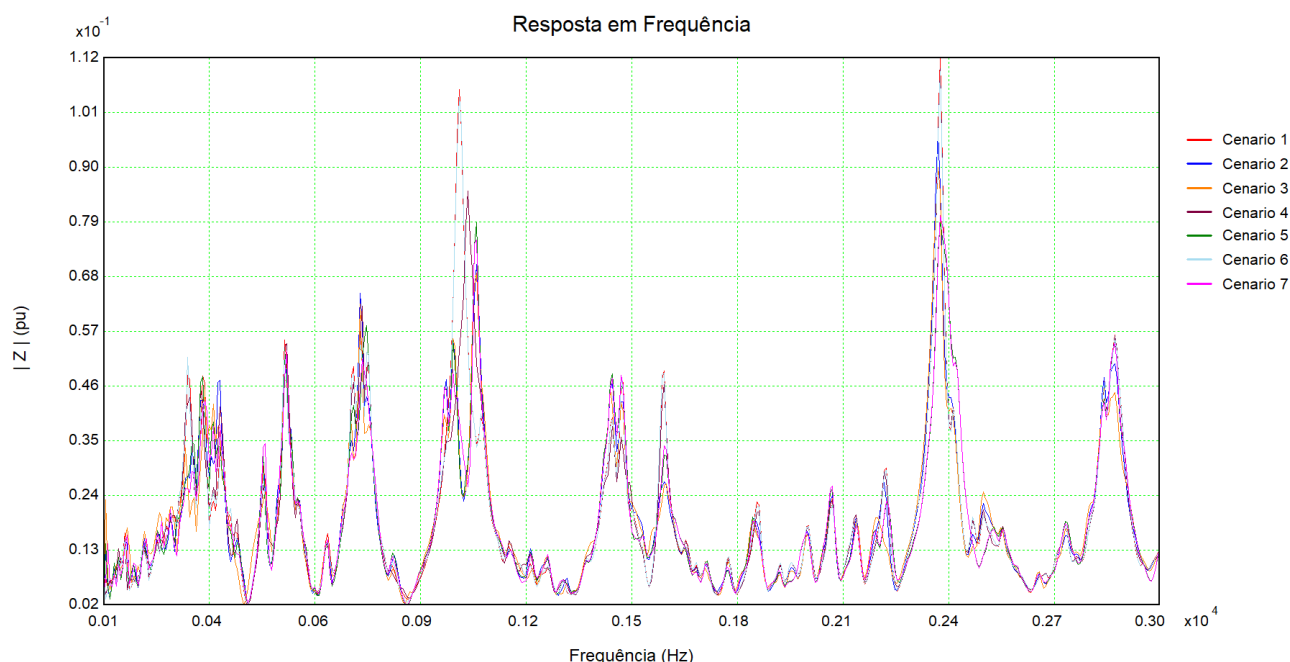


Figura 7-7 – Módulo da impedância em função da frequência, “vista” de Silvânia, rede completa, 7 cenários distintos (valores em p.u.)

7.2.2 Investigações em destaque

A exemplo do realizado para o terminal de Graça Aranha, dentre as investigações realizadas neste estudo, em destaque, está a consideração da saída de blocos de empreendimentos de transmissão por descasamento com a entrada em operação do bipolo, como indicado no item 6. As Figura 7-8 e Figura 7-9 apresentam, para o terminal Silvânia, uma comparação entre dois Setores de Admitâncias, extraídos diretamente do programa HarmZs, respectivamente, para um caso de rede completa e outro caso de retirada de bloco de transmissão (alterações topológicas), para a 5ª e para a 13ª harmônica. Observa-se que o Setor da rede completa está inserido no Setor com alterações

topológicas, indicando que a condição com alterações topológica resulta em condição potencialmente mais conservativa no que se refere à concepção dos filtros CA da conversora.

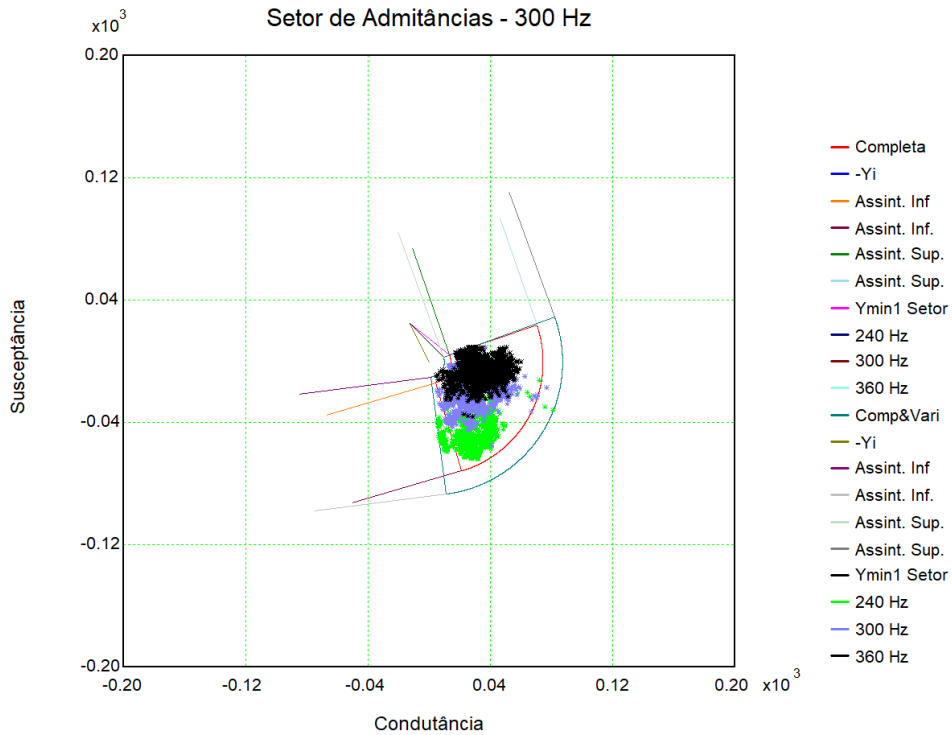


Figura 7-8 – Setores de admitâncias “vistos” de Silvânia, 5ª harmônica – comparação entre rede completa e rede com alterações topológicas (valores em p.u.)

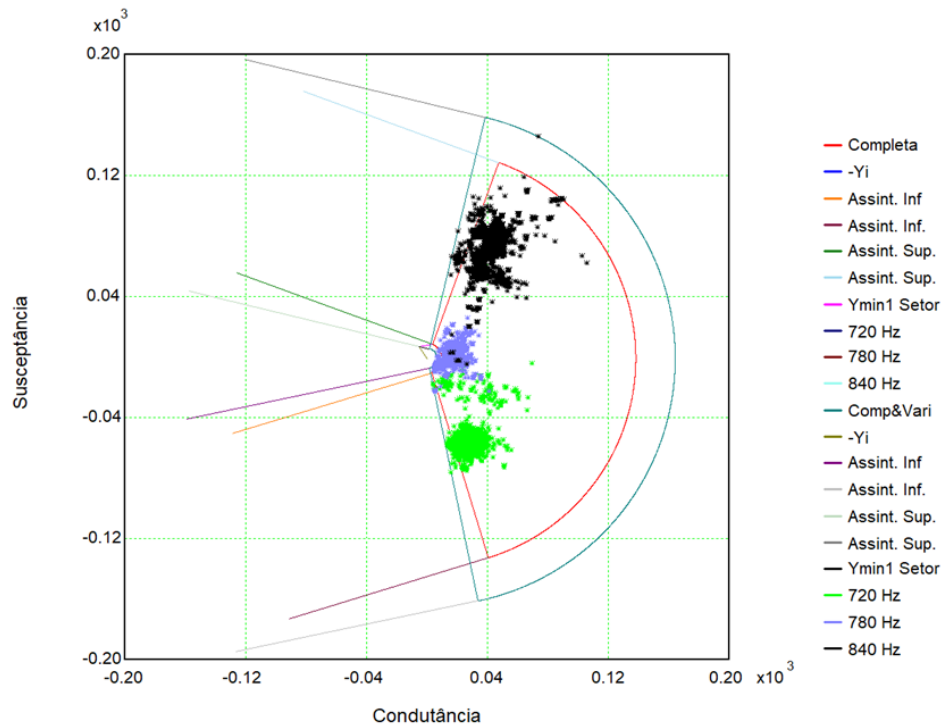


Figura 7-9 –Setores de admitâncias "vistas" de Silvânia, 13ª harmônica – comparação entre rede completa e rede com alterações topológicas (valores em p.u.)

7.2.3 Parâmetros dos lugares geométricos das impedâncias harmônicas

Os parâmetros dos lugares geométricos das impedâncias harmônicas da rede externa, entre a 2ª e a 50ª ordem, resultantes de todos os casos simulados (49 casos), recomendados para o projeto dos filtros CA da conversora de Silvânia, estão relacionados na Tabela 7-3. Os dados "primários" utilizados para a obtenção desta tabela podem ser verificados no ANEXO C.

Tabela 7-3 Impedância harmônica "vista" da SE Silvânia 500 kV – considerando agrupamentos e desvios de frequência

SE Silvânia 500 kV					
Frequência		Módulo $ Z $ [Ω]		Ângulo θ [graus]	
Ordem Harmônica	[Hz]	máximo	mínimo	máximo	Mínimo
2	120	75,3	13,9	73,1	-20,0
3	180	77,2	13,9	82,7	-20,0
4	240	199,1	13,9	82,7	-16,2
5	300	273,6	28,1	82,7	-29,1
6	360	273,6	21,8	76,2	-67,4
7	420	374,8	15,1	77,1	-67,4
8	480	374,8	12,4	77,1	-67,4
9	540	374,8	12,4	77,1	-58,5

SE Silvânia 500 kV					
Frequência		Módulo $ Z $ [Ω]		Ângulo θ [graus]	
Ordem Harmônica	[Hz]	máximo	mínimo	máximo	Mínimo
10	600	178,0	6,5	70,5	-58,5
11	660	162,1	6,5	78,2	-58,5
12	720	409,7	6,5	78,6	-57,9
13	780	409,7	11,6	78,6	-76,9
14	840	409,7	2,9	78,6	-76,9
15	900	358,6	2,9	80,1	-76,9
16	960	491,8	2,9	80,1	-71,5
17	1020	506,0	19,6	80,1	-71,5
18	1080	506,0	29,8	78,2	-82,3
19	1140	506,0	19,5	63,1	-82,3
20	1200	166,1	8,9	7,2	-82,3
21	1260	73,3	5,6	40,7	-72,4
22	1320	101,8	5,6	73,2	-67,5
23	1380	307,1	5,6	80,3	-59,7
24	1440	368,9	6,8	80,3	-66,3
25	1500	368,9	19,8	80,3	-72,0
26	1560	368,9	19,8	70,8	-75,8
27	1620	359,8	19,8	66,6	-79,5
28	1680	359,8	5,4	66,6	-83,3
29	1740	98,4	5,4	59,8	-83,3
30	1800	117,0	5,4	66,3	-83,3
31	1860	117,0	7,8	66,3	-71,3
32	1920	117,0	7,8	66,7	-52,9
33	1980	86,6	7,0	66,7	-52,9
34	2040	163,0	7,0	66,7	-71,3
35	2100	163,0	7,0	75,2	-71,3
36	2160	163,0	7,5	75,2	-71,3
37	2220	172,7	7,7	82,3	-58,1
38	2280	773,2	7,7	83,9	-24,4
39	2340	773,2	7,7	83,9	-76,6
40	2400	773,2	14,1	83,9	-83,7
41	2460	732,6	14,1	73,7	-83,7
42	2520	264,3	14,1	73,7	-83,7
43	2580	143,8	5,1	62,1	-76,2
44	2640	92,3	5,1	66,2	-76,2
45	2700	153,1	5,1	66,7	-63,5
46	2760	187,2	9,9	79,5	-36,5
47	2820	477,4	13,2	79,5	-69,0
48	2880	477,4	14,7	79,5	-81,2
49	2940	477,4	11,0	49,1	-81,2
50	3000	111,0	11,0	49,1	-81,2

8 REFERÊNCIAS

- [1] Estudo de expansão das interligações regionais – Parte II: Expansão da capacidade de exportação da região Norte/Nordeste, Relatório R1 nº EPE-DEE-RE-018/2022-rev1, novembro 2022.
- [2] Manual de Utilização do Programa HarmZs, versão 3.0, CEPEL, julho 2016.
- [3] Cristiano O. Costa, Sergio L. Varricchio, Franklin C. Veliz, Thomas M. Campello, Principais Funcionalidades do Programa HarmZs Aplicadas à Mitigação de Distorções Harmônicas em Sistemas de Potência, XV SEPOPE, Foz do Iguaçu, PR, março 2022.
- [4] De Carli, M. P, et al. Sistema de Transmissão do Rio Madeira: Modelagem da Resistência Harmônica dos Componentes do Sistema Elétrico de Potência para o Projeto de Filtros. Florianópolis: SNPTEE, 2011.
- [5] *Consideration of impedance and tolerances for HVDC converter transformer*, CIGRÉ JWG 12/14.10, Electra 167, August 1996.
- [6] *Network modelling for harmonic studies*, Technical Brochure C4/C6, nº 766, Cigre, April 2019.
- [7] Estudo de Escoamento de Geração na Região Nordeste – Volume 2: Área Norte, Relatório R1 nº EPE-DEE-RE-014/2022-rev1, setembro 2022.
- [8] Procedimentos de Rede – Submódulo 2.8 – Requisitos mínimos para elos em corrente contínua, ONS, 2021.
- [9] Procedimentos de Rede – Submódulo 2.3 – Premissas, critérios e metodologia para estudos elétricos, ONS, 2021.

9 EQUIPE TÉCNICA

EPE

- Bruno Scarpa Alves da Silveira
- Daniel José Tavares de Souza
- Dourival de Souza Carvalho Junior
- Fabiano Schmidt
- Fabio de Almeida Rocha
- Guilherme Alves Araujo Santos (estagiário)
- Paulo Fernando de Matos Araujo
- Rodrigo Ribeiro Ferreira
- Sérgio Felipe Falcão Lima
- Tiago Campos Rizzotto

ONS

- Fabiano Andrade de Oliveira
- Fernando Cattan Jusan
- Hélio Pessoa de Oliveira Junior
- Jaqueline Gomes Pereira
- João Henrique Magalhães de Almeida
- Márcio Nunes Accioly Lins
- Ricardo Antunes

CEPEL

- Cristiano de Oliveira Costa
- Franklin Clement Veliz
- Sergio Luis Varricchio

ANEXO A. EXEMPLOS DE SETORES DE ADMITÂNCIA - GRAÇA ARANHA

As figuras a seguir ilustram alguns resultados obtidos para subestação de Graça Aranha extraídos do programa HarmZs.

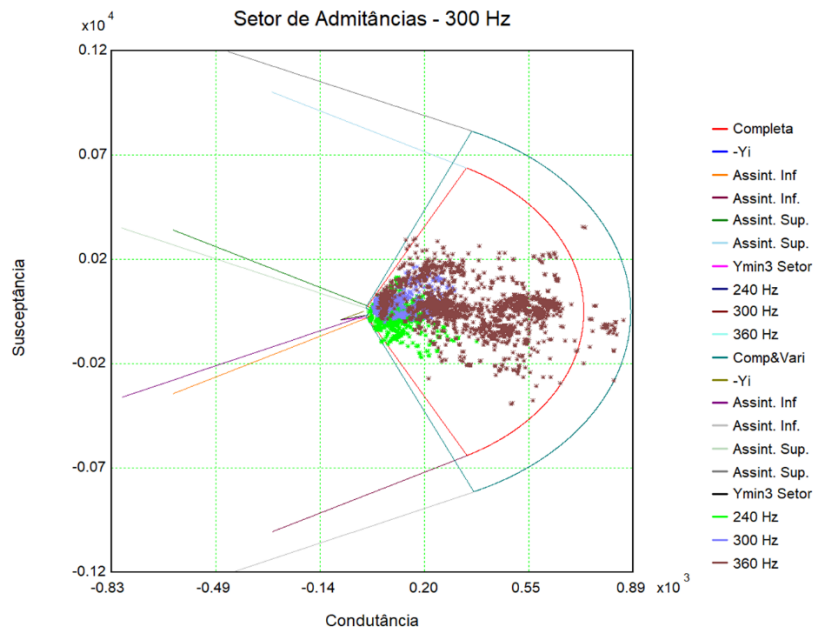


Figura A-1 - 5ª harm: setores angulares de admitâncias, rede completa vs com alterações topológicas

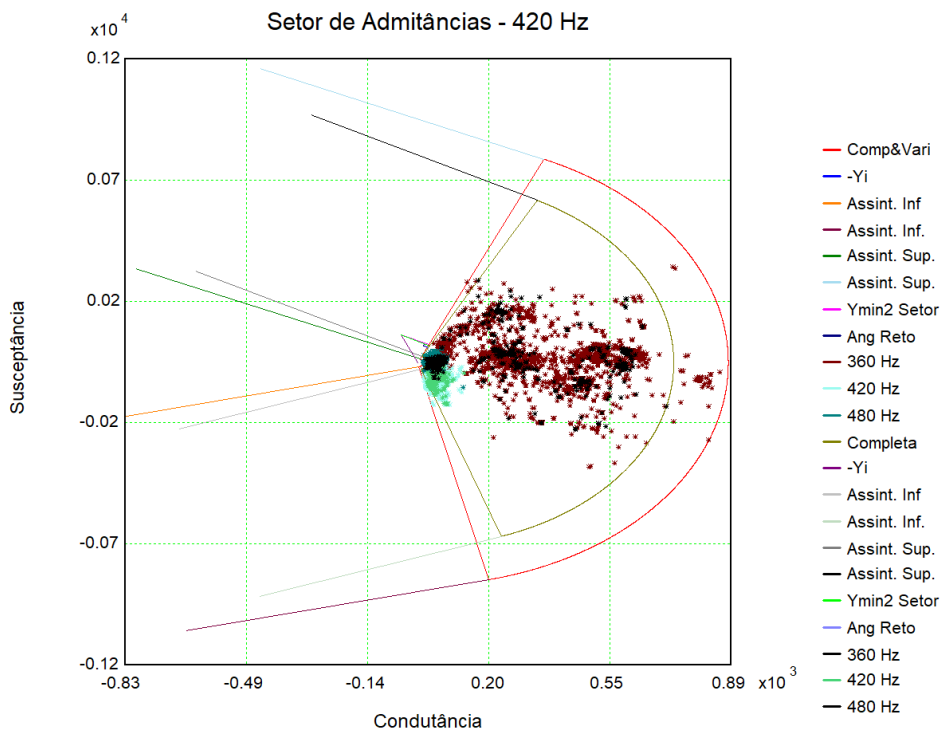


Figura A-2 - 7ª harm: setores angulares de admitâncias, rede completa vs com alterações topológicas

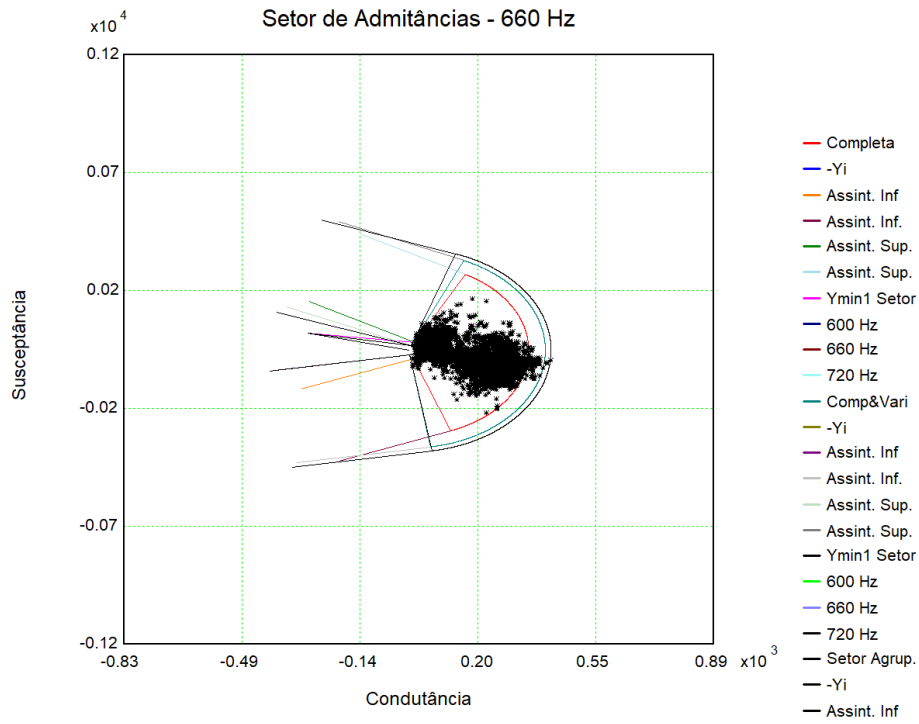


Figura A-3 - 11ª harm: setores angulares de admitâncias, rede completa vs com alterações topológicas – 3ª e 5ª vizinhança

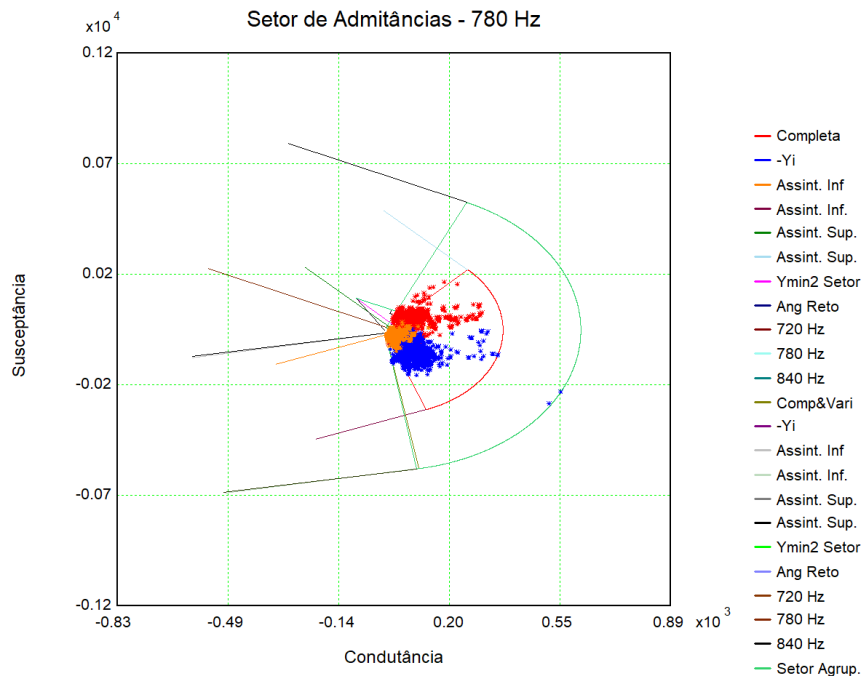


Figura A-4 - 13ª harm: setores angulares de admitâncias, rede completa vs com alterações topológicas

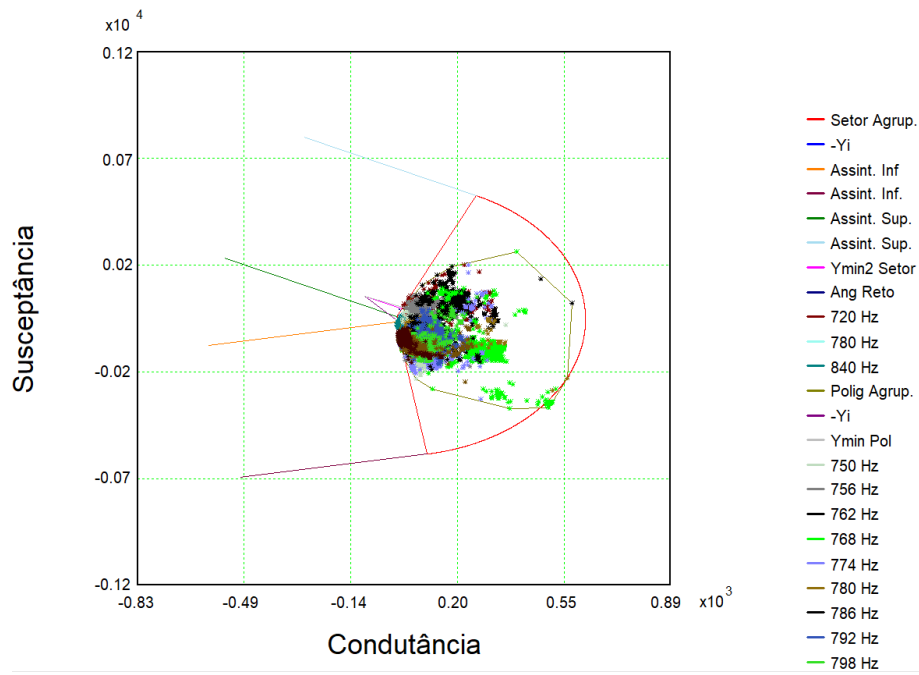


Figura A-5 - 13ª harm: setor angular vs polígono de admitâncias, rede completa vs com alterações topológicas

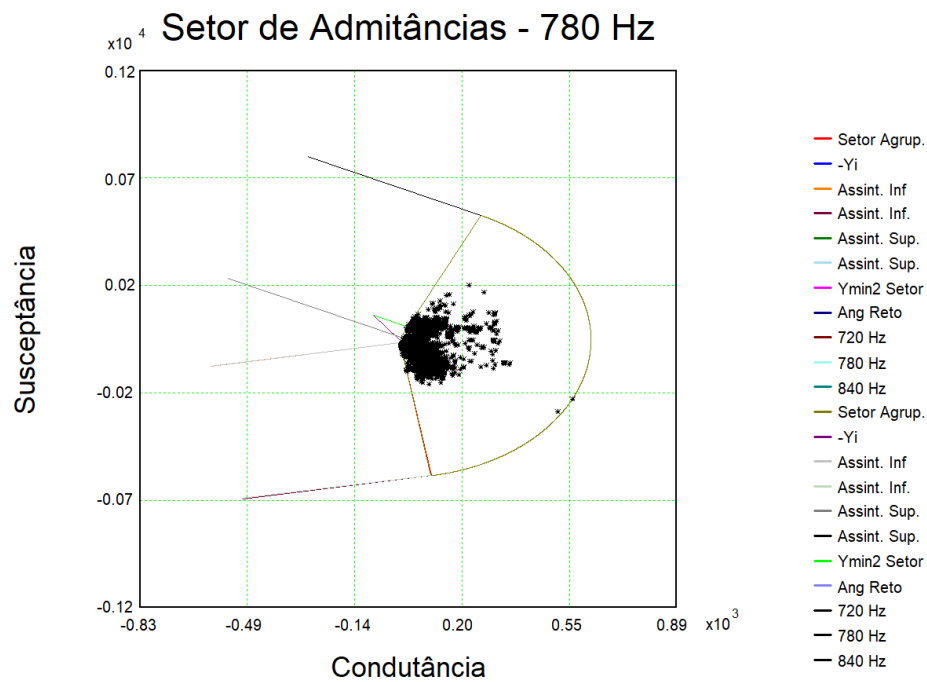


Figura A-6 - 11ª harm: setores de admitâncias, com alterações topológicas - 3ª e 5ª vizinhança

ANEXO B. EXEMPLOS DE SETORES - SILVÂNIA

As figuras a seguir ilustram alguns resultados obtidos para subestação de Silvânia extraídos do programa HarmZs.

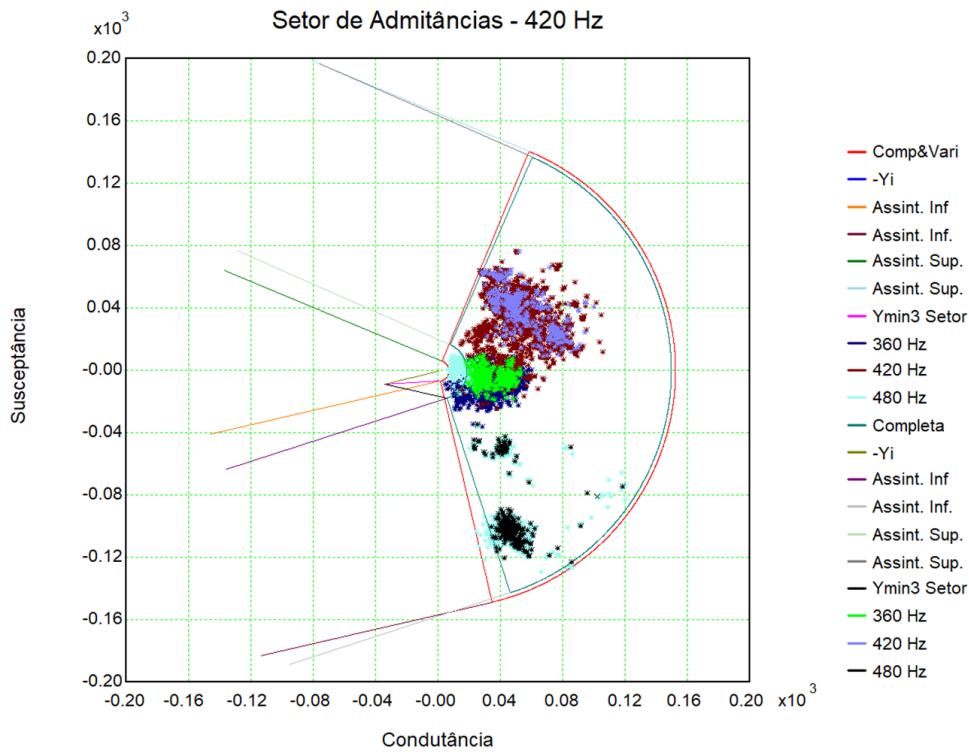


Figura B-1 - 7ª harm: setores angulares de admitâncias, rede completa vs com alterações topológicas

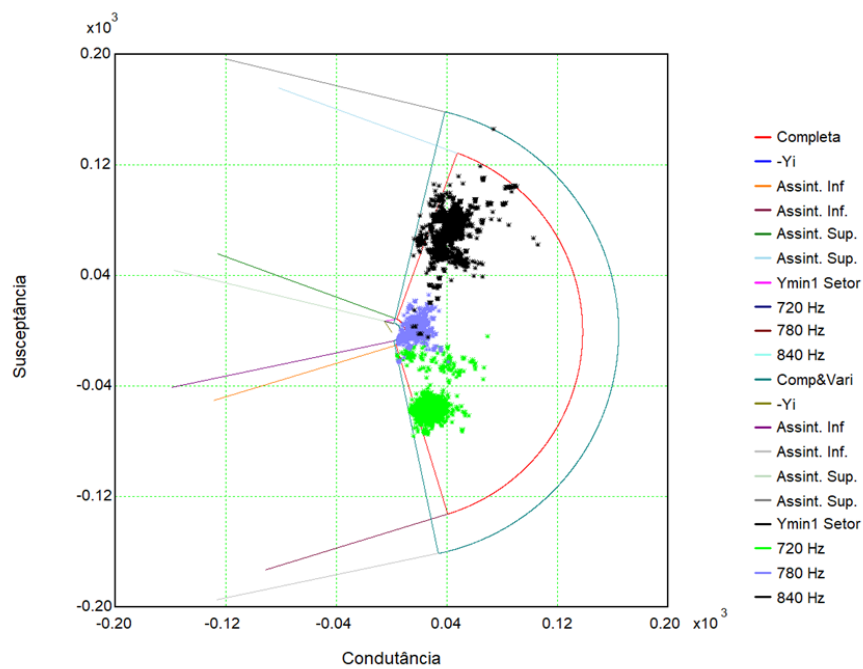


Figura B-2 - 13ª harm: setores angulares de admitâncias, rede completa vs com alterações topológicas

ANEXO C. IMPEDÂNCIAS HARMÔNICAS CALCULADAS

Nas tabelas a seguir podem ser encontrados os dados primários das impedâncias calculadas para cada ordem harmônica, com desvios de frequência ($\pm 0,2$ Hz) e sem considerar os agrupamentos ($h \pm 1$).

Tabela C-1 Dados Primários da Impedância harmônica "vista" da SE Graça Aranha 500 kV

SE Graça Aranha 500 kV													
Frequência		$\Delta f = -0,2$ Hz				$\Delta f = 0$ Hz				$\Delta f = +0,2$ Hz			
# h	f	Z _{max}	Z _{min}	Θ _{max}	Θ _{min}	Z _{max}	Z _{min}	Θ _{max}	Θ _{min}	Z _{max}	Z _{min}	Θ _{max}	Θ _{min}
	[Hz]	[Ω]	[Ω]	[$^{\circ}$]	[$^{\circ}$]	[Ω]	[Ω]	[$^{\circ}$]	[$^{\circ}$]	[Ω]	[Ω]	[$^{\circ}$]	[$^{\circ}$]
2	120	18,5	6,4	75,2	-31,4	18,9	6,5	75,9	-23,7	19,5	6,3	76,5	-16,6
3	180	281,8	20,0	85,4	-53,2	274,2	20,7	85,5	-55,2	259,6	21,3	85,6	-57,0
4	240	125,0	6,2	64,7	-56,6	127,6	6,3	65,6	-53,2	122,5	7,3	66,7	-53,3
5	300	75,5	8,2	30,4	-53,8	66,1	7,9	33,5	-53,0	65,8	7,7	35,9	-53,5
6	360	52,4	2,6	48,1	-67,5	48,2	2,8	54,0	-66,0	43,5	2,8	55,7	-63,9
7	420	69,6	12,4	76,1	-0,1	70,9	13,1	76,8	-8,1	68,3	13,8	77,0	-14,9
8	480	145,4	13,5	65,5	-51,9	151,4	15,3	63,5	-55,9	154,3	17,6	61,4	-58,9
9	540	94,1	8,7	55,0	-52,1	93,9	9,4	53,7	-55,4	91,7	8,6	53,4	-55,0
10	600	158,8	10,9	80,8	-61,8	131,0	10,4	80,7	-66,3	140,3	9,9	79,5	-66,7
11	660	64,3	6,2	56,0	-43,0	60,3	6,3	56,9	-51,8	47,8	6,7	57,2	-57,2
12	720	85,4	5,2	80,8	-63,9	110,3	8,0	79,0	-65,3	88,9	5,1	76,5	-66,7
13	780	59,6	4,0	81,0	-19,7	61,9	4,1	80,0	-2,9	58,7	6,2	78,2	-4,8
14	840	159,1	18,8	79,3	-13,8	184,5	25,4	79,3	-23,4	160,6	30,1	79,6	-39,5
15	900	163,2	4,7	43,6	-68,9	156,6	7,5	61,1	-67,7	137,0	11,0	67,8	-62,4
16	960	41,4	2,5	71,8	-76,8	51,6	2,7	75,3	-74,1	64,0	2,9	77,6	-66,5
17	1020	99,7	11,8	57,8	-72,5	90,1	9,6	63,0	-72,1	90,4	10,5	54,7	-67,7
18	1080	88,4	9,2	46,6	-66,1	101,1	9,5	61,2	-69,4	112,4	9,7	63,0	-66,7
19	1140	68,8	9,5	62,7	-15,1	75,7	9,9	65,4	-15,5	84,8	10,9	64,2	-18,4
20	1200	150,8	5,4	64,8	-67,1	166,9	9,0	66,8	-68,2	109,6	7,3	74,9	-64,0
21	1260	72,9	11,3	67,8	-46,4	86,4	11,4	74,5	-48,6	93,7	11,8	71,0	-49,6
22	1320	45,5	5,6	49,2	-56,0	75,6	6,8	71,3	-57,4	80,4	5,6	77,1	-50,2
23	1380	62,2	9,3	75,0	-25,2	72,3	11,5	78,4	-12,1	84,4	14,8	79,5	-5,2

SE Graça Aranha 500 kV													
Frequência		$\Delta f = -0,2 \text{ Hz}$				$\Delta f = 0 \text{ Hz}$				$\Delta f = +0,2 \text{ Hz}$			
# h	f [Hz]	Z _{max} [Ω]	Z _{min} [Ω]	Θ _{max} [°]	Θ _{min} [°]	Z _{max} [Ω]	Z _{min} [Ω]	Θ _{max} [°]	Θ _{min} [°]	Z _{max} [Ω]	Z _{min} [Ω]	Θ _{max} [°]	Θ _{min} [°]
24	1440	118,6	6,5	66,4	-62,7	108,2	8,6	66,4	-66,0	167,7	11,3	72,2	-58,1
25	1500	267,0	8,2	73,1	-75,5	271,0	11,0	72,6	-77,4	163,6	14,8	74,7	-78,8
26	1560	78,2	7,2	74,7	-42,5	64,4	9,1	78,2	-43,3	86,4	9,2	81,7	-51,9
27	1620	134,4	12,3	71,6	-51,4	122,6	14,5	63,1	-56,9	99,4	13,6	64,5	-32,8
28	1680	205,2	18,2	78,4	-59,2	173,4	18,0	77,5	-71,2	133,0	22,3	72,6	-75,5
29	1740	123,2	12,3	69,2	-63,2	166,3	12,0	46,2	-73,5	126,4	8,4	57,6	-70,3
30	1800	123,3	7,1	66,7	-57,8	99,1	10,9	65,2	-49,5	108,1	10,1	72,0	-64,9
31	1860	46,0	2,9	62,0	-58,0	37,7	5,2	64,1	-49,1	55,1	6,8	68,1	-64,9
32	1920	69,3	18,0	81,1	-5,6	93,9	8,9	77,1	-0,2	89,2	14,5	76,9	-15,5
33	1980	213,7	20,6	60,7	-73,1	234,9	8,8	34,7	-77,2	76,6	6,3	29,8	-75,4
34	2040	111,5	5,5	78,9	-74,7	190,7	8,5	83,3	-80,6	287,1	20,1	81,6	-80,5
35	2100	76,2	4,4	38,9	-69,2	110,9	2,8	68,4	-69,1	136,1	5,8	73,9	-41,1
36	2160	127,4	18,9	80,7	-43,4	229,8	16,3	74,9	-37,6	504,3	18,2	72,1	-43,7
37	2220	171,0	15,8	79,6	-57,3	261,1	20,3	71,3	-67,2	172,4	18,8	72,4	-70,5
38	2280	131,6	10,3	71,9	-53,7	118,6	12,2	64,6	-26,1	137,1	12,9	71,2	-37,7
39	2340	197,1	15,5	75,9	-71,9	505,2	20,0	76,8	-70,3	327,0	20,2	72,1	-77,5
40	2400	227,1	27,7	3,8	-80,3	176,7	18,8	-15,3	-76,6	146,0	18,4	-9,8	-77,7
41	2460	43,7	5,9	21,8	-79,5	33,0	2,8	33,5	-72,7	35,1	3,9	59,6	-63,6
42	2520	48,1	3,7	80,7	-15,0	49,1	9,0	81,6	-44,4	64,8	6,2	82,8	-22,5
43	2580	128,6	8,7	83,3	-43,0	139,7	13,1	83,6	-19,3	101,9	21,8	81,6	-29,3
44	2640	312,2	23,8	57,9	-56,0	320,0	25,5	60,8	-63,3	353,0	12,7	66,0	-66,4
45	2700	135,2	6,2	62,0	-54,3	133,8	9,7	81,3	-55,9	232,3	15,0	82,2	-55,4
46	2760	199,7	12,5	73,2	-69,2	220,5	11,9	67,3	-74,6	204,8	6,9	70,5	-64,3
47	2820	151,5	7,6	78,3	-48,2	88,3	5,1	80,4	-71,1	168,7	6,6	84,6	-44,3
48	2880	305,3	26,7	81,0	-70,2	313,3	16,4	54,4	-74,0	114,0	9,7	62,3	-78,3
49	2940	597,5	23,4	79,0	-71,7	458,9	21,9	64,9	-76,4	220,6	18,7	62,9	-75,4
50	3000	379,0	7,8	59,3	-64,8	166,7	10,0	58,0	-81,3	125,3	20,9	67,2	-78,2

Tabela C-2 Dados Primários da Impedância harmônica "vista" da SE Silvânia 500 kV

SE Silvânia 500 kV													
Frequência		$\Delta f = -0,2 \text{ Hz}$				$\Delta f = 0 \text{ Hz}$				$\Delta f = +0,2 \text{ Hz}$			
# h	f [Hz]	Z _{max} [Ω]	Z _{min} [Ω]	Θ _{max} [°]	Θ _{min} [°]	Z _{max} [Ω]	Z _{min} [Ω]	Θ _{max} [°]	Θ _{min} [°]	Z _{max} [Ω]	Z _{min} [Ω]	Θ _{max} [°]	Θ _{min} [°]
2	120	75,3	31,5	73,0	-19,2	74,2	28,5	71,5	-20,0	71,9	25,4	69,7	-19,9
3	180	69,1	13,9	73,1	8,0	71,2	14,5	71,8	10,1	74,3	15,1	69,2	14,9
4	240	75,5	30,2	82,5	5,3	75,9	28,7	82,6	9,6	77,2	28,1	82,7	13,9
5	300	199,1	31,5	76,1	-16,2	193,3	31,9	76,2	-14,2	185,8	32,5	76,1	-10,7
6	360	248,5	39,6	63,9	-19,4	254,1	41,9	66,3	-20,0	273,6	43,9	67,8	-29,1
7	420	174,2	21,8	45,8	-67,4	158,6	22,6	43,3	-67,4	144,0	22,8	42,3	-67,1
8	480	362,0	15,1	76,6	-44,9	372,7	16,4	77,0	-45,8	374,8	17,7	77,1	-46,6
9	540	148,4	12,4	69,5	-48,1	165,2	14,8	70,5	-43,6	178,0	17,1	69,1	-37,0
10	600	116,5	37,9	13,9	-56,9	116,3	40,9	20,5	-56,8	128,7	44,1	25,6	-58,5
11	660	66,7	6,5	51,2	-18,6	80,5	6,9	52,2	2,1	92,1	7,9	58,9	0,7
12	720	133,0	25,5	77,4	-2,5	152,6	28,3	78,2	2,7	162,1	30,7	77,5	13,5
13	780	374,6	47,7	78,6	-54,0	382,7	54,0	77,5	-56,5	409,7	46,4	75,9	-57,9
14	840	180,2	19,5	10,9	-76,9	161,0	15,2	8,5	-76,5	132,1	11,6	14,4	-75,0
15	900	159,2	4,7	45,8	-68,7	153,1	3,6	44,2	-61,7	145,4	2,9	47,1	-43,6
16	960	277,7	20,7	78,5	23,0	300,6	19,6	78,8	31,7	358,6	21,7	80,1	32,5
17	1020	491,8	70,5	75,4	-71,5	467,2	62,5	77,1	-71,0	489,6	68,2	78,2	-69,6
18	1080	506,0	29,8	59,5	-70,2	444,6	38,6	62,9	-69,6	383,7	64,5	63,1	-68,3
19	1140	166,1	39,1	-19,5	-82,3	157,2	32,9	-14,7	-76,9	145,1	30,6	-20,2	-78,1
20	1200	68,8	22,3	-14,1	-70,2	68,6	22,7	-8,5	-70,6	68,7	19,5	-10,5	-72,4
21	1260	68,0	15,5	-0,5	-67,5	63,2	11,5	6,4	-62,9	54,6	8,9	7,2	-61,0
22	1320	73,3	6,7	40,1	-54,0	65,4	6,9	40,7	-59,7	59,5	5,6	34,5	-51,4
23	1380	81,8	6,8	67,6	-0,9	93,4	9,2	73,2	7,3	101,8	11,1	73,0	21,2
24	1440	195,1	28,5	80,3	-13,9	254,7	35,3	79,4	-24,9	307,1	25,4	79,6	-32,7
25	1500	334,7	40,3	70,8	-52,9	368,9	45,8	68,3	-60,8	360,9	49,2	68,3	-66,3
26	1560	242,4	26,1	32,7	-65,3	253,5	27,2	11,4	-68,2	209,4	19,8	-12,7	-72,0
27	1620	275,6	38,5	54,6	-68,5	359,8	39,6	66,6	-71,9	182,1	23,0	52,2	-75,8
28	1680	72,2	26,2	-5,8	-68,8	74,5	26,6	-22,0	-71,0	69,4	22,9	-35,7	-79,5

SE Silvânia 500 kV													
Frequência		$\Delta f = -0,2 \text{ Hz}$				$\Delta f = 0 \text{ Hz}$				$\Delta f = +0,2 \text{ Hz}$			
# h	f [Hz]	Z _{max} [Ω]	Z _{min} [Ω]	Θ _{max} [°]	Θ _{min} [°]	Z _{max} [Ω]	Z _{min} [Ω]	Θ _{max} [°]	Θ _{min} [°]	Z _{max} [Ω]	Z _{min} [Ω]	Θ _{max} [°]	Θ _{min} [°]
29	1740	51,5	7,0	40,6	-83,3	63,7	5,4	56,3	-82,6	82,8	12,9	51,1	-79,5
30	1800	98,4	12,3	59,8	-60,7	79,9	15,1	41,3	-71,3	56,1	11,0	35,1	-68,5
31	1860	89,2	15,0	63,1	-34,4	103,7	19,6	60,9	-45,1	117,0	19,7	66,3	-52,6
32	1920	56,7	7,8	43,3	-52,9	27,6	8,2	59,5	-51,2	36,4	11,1	48,1	-21,4
33	1980	54,8	9,3	48,9	-16,6	56,7	14,3	60,7	-27,7	86,6	13,7	66,7	-23,9
34	2040	58,5	15,0	25,6	-50,5	53,3	7,0	31,9	-35,2	55,8	9,5	54,6	-22,9
35	2100	163,0	13,7	64,8	-71,3	135,9	18,3	60,7	-70,5	100,4	7,5	53,9	-57,1
36	2160	127,7	21,2	75,2	-33,5	113,2	18,8	73,2	-48,8	127,7	15,4	73,7	-58,1
37	2220	156,6	21,7	75,0	-24,4	143,2	22,1	73,3	-18,1	145,3	20,9	72,3	-19,4
38	2280	138,1	7,7	68,2	-7,8	147,7	12,1	79,0	-5,6	172,7	18,1	82,3	8,8
39	2340	508,9	39,0	82,2	23,4	715,9	48,2	82,6	5,9	773,2	57,6	83,9	-23,6
40	2400	732,6	92,8	61,3	-72,7	436,4	62,0	24,3	-76,6	526,5	43,7	16,6	-73,9
41	2460	264,3	25,7	73,7	-83,7	252,4	14,8	52,3	-83,4	202,5	14,1	13,4	-80,6
42	2520	142,6	15,9	45,3	-71,5	133,3	20,0	35,8	-64,0	143,8	19,4	17,6	-66,6
43	2580	78,6	24,2	5,9	-75,8	79,9	15,9	-1,5	-76,2	58,0	15,0	28,7	-75,2
44	2640	51,3	9,7	48,4	-63,5	60,6	5,1	53,4	-47,5	70,9	5,8	62,1	-15,8
45	2700	92,3	9,9	63,3	-10,1	80,3	14,3	66,2	-7,0	84,0	16,0	64,8	-5,6
46	2760	146,5	13,3	37,5	-36,5	153,1	13,2	49,3	-14,8	144,6	16,2	66,7	-14,9
47	2820	118,5	38,8	74,0	-27,1	175,9	35,8	73,6	-13,0	187,2	46,8	79,5	-13,5
48	2880	390,4	51,6	46,5	-44,0	477,4	83,6	31,3	-66,9	280,5	68,6	21,8	-69,0
49	2940	111,0	27,9	-40,1	-81,2	85,0	17,3	-8,5	-77,5	80,5	14,7	27,6	-70,1
50	3000	79,0	11,0	41,9	-46,2	78,1	22,9	49,1	-38,9	98,1	22,3	47,8	-43,1