



EQUIVALENTES DE REDES UTILIZANDO VIZINHANÇAS ELÉTRICAS COM
POSSÍVEIS APLICAÇÕES EM ESTUDOS DE HARMÔNICOS E
TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS

Cristiano de Oliveira Costa

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientadores: Glauco Nery Taranto
Sergio Gomes Junior

Rio de Janeiro
Junho de 2013

EQUIVALENTES DE REDES UTILIZANDO VIZINHANÇAS ELÉTRICAS COM
POSSÍVEIS APLICAÇÕES EM ESTUDOS DE HARMÔNICOS E
TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS

Cristiano de Oliveira Costa

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA
(COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE
DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE
EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

Examinada por:

Prof. Glauco Nery Taranto, Ph.D.

Prof. Sergio Gomes Jr, D.Sc.

Prof. Leandro Ramos de Araujo, D.Sc.

Prof. Antonio Carlos Siqueira de Lima, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

JUNHO DE 2013

Costa, Cristiano de Oliveira

Equivalentes de Redes Utilizando Vizinhanças Elétricas com Possíveis Aplicações em Estudos de Harmônicos e Transitórios Eletromagnéticos / Cristiano de Oliveira Costa. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2013.

XXIX, 301 p.:il., 29,7 cm.

Orientadores: Glauco Nery Taranto

Sergio Gomes Junior

Dissertação (Mestrado) - UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Elétrica, 2013.

Referências Bibliográficas: p. 261 – 266

1. Equivalentes de Redes. 2. Critério de Vizinhanças Elétricas. 3. Modelos de Ordem Reduzida. 4. Equivalentes Convencionais. 4. Equivalentes Modais. 5. Transitórios Eletromagnéticos I. Taranto, Glauco Nery, *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Elétrica. III. Título.

Aos meus pais, Antônio Fernandes e Maria Célia

“The greater our knowledge increases the more our ignorance unfolds.”

John F. Kennedy

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, pois sem ele, nada seria possível. Agradeço imensamente aos meus pais por serem exemplos tão belos de vida, por toda educação e motivação que me deram, base de tudo, às minhas irmãs por todo carinho e à minha namorada pelo carinho e por compreender os momentos abdicados.

Agradeço aos professores do Programa de Engenharia Elétrica (PEE) do Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE) pela participação na minha formação, e ao meu orientador Glauco Nery Taranto pelo incentivo, pelas discussões e por todas as colaborações essenciais para a realização deste trabalho.

Agradeço aos colegas do Cepel por compartilharem ao longo desses 11 anos suas experiências, ao meu coorientador Sergio Gomes Junior por todo apoio, atenção e excelentes contribuições. Ao engenheiro Franklin Clement Véliz pelas importantes colaborações. Ao pesquisador Sergio Luis Varricchio pelo convívio, pelo apoio, pelo incentivo, pela confiança e pelas excelentes discussões, primordiais para a evolução deste trabalho.

Agradeço aos amigos pelo incentivo, e aos sempre amigos Juan Ignacio Patrício Rossi González e Thiago José Masseran Antunes Parreiras por estarem sempre disponíveis para as mais diversas discussões.

Agradeço ao Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, Cepel, pelo suporte necessário.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

EQUIVALENTES DE REDES UTILIZANDO VIZINHANÇAS ELÉTRICAS COM
POSSÍVEIS APLICAÇÕES EM ESTUDOS DE HARMÔNICOS E TRANSITÓRIOS
ELETROMAGNÉTICOS

Cristiano de Oliveira Costa

Junho / 2013

Orientadores: Glauco Nery Taranto

Sergio Gomes Junior

Programa: Engenharia Elétrica

Este trabalho apresenta uma contribuição ao cálculo de equivalentes de redes para estudos de harmônicos e transitórios eletromagnéticos. Primeiramente é apresentada uma contribuição ao cálculo de equivalentes de redes simplificados na determinação de uma rede interna, utilizando o conceito de vizinhanças elétricas, para que se tenha um sistema reduzido apropriado para os estudos acima citados. O algoritmo de determinação de vizinhanças elétricas e do cálculo do equivalente simplificado são apresentados. É sugerido um critério de automatização para a definição da rede interna.

É apresentado também o cálculo de equivalentes modais, que representam a área externa com excelente precisão para uma faixa de frequências determinada. O cálculo dos polos e resíduos para a construção do sistema reduzido é feito utilizando o Método do Ajuste Vetorial para aproximar respostas em frequência por funções racionais.

Os algoritmos desenvolvidos foram implementados no programa computacional HarmZs do Cepel em uma versão não comercial, utilizado para obtenção dos resultados. São apresentados os testes de validação dos cálculos dos equivalentes modais utilizando sistemas de pequeno, médio e grande porte. Também são incluídas respostas em frequência, comparando-se os resultados dos equivalentes modais e convencionais com os do sistema completo.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

NETWORK EQUIVALENTS USING ELECTRICAL NEIGHBORHOODS WITH
POSSIBLE APPLICATIONS IN HARMONIC AND ELECTROMAGNETIC
TRANSIENTS STUDIES

Cristiano de Oliveira Costa

June / 2013

Advisors: Glauco Nery Taranto

Sergio Gomes Junior

Department: Electrical Engineering

This work proposes a contribution to the calculation of network equivalents for harmonic and electromagnetic transients studies. First of all, a contribution is presented for the calculation of simplified network equivalents on the determination of an internal network, using the concept of electrical neighborhoods, in order to have an appropriated reduced system for the above mentioned studies. The algorithm for electrical neighborhood determination and the calculation of the simplified network equivalent are presented. A criterion for automatization of the internal network determination is proposed.

The calculation of modal equivalent is also presented, where the external area is represented with excellent precision for a given frequency band. The calculation of the poles and residues for the building of the reduced system is made using the Vector Fitting Method, that fits the calculated frequency domain responses with rational functions approximations.

The algorithms developed have been implemented in a non-commercial version of the computer program HarmZs by Cepel which was used to obtain the results. The validation tests of the modal equivalent calculations are presented using small, medium and large scale electrical systems. Frequency responses are also included to compare the results of modal and simplified equivalents with the complete system.

Índice

Capítulo 1 – Introdução	1
1.1 Introdução	1
1.2 Definição da Rede a ser Representada Detalhadamente para Estudos de Transitórios Eletromagnéticos	2
1.3 Pontos principais da dissertação	3
1.3.1 Critério de Vizinhanças Elétricas	4
1.3.2 Aplicação do Método de Ajuste Vetorial – <i>Vector Fitting</i>	6
1.4 Revisão Bibliográfica	6
1.5 Organização do Texto	12
Capítulo 2 – Critério de Vizinhanças Elétricas	14
2.1 Introdução	14
2.2 O Algoritmo de Vizinhanças Elétricas	16
2.3 Detalhes da programação do algoritmo	21
2.4 Produtos Obtidos após Utilização do Algoritmo de Vizinhanças Elétricas ...	30
Capítulo 3 – Equivalentes de Redes Convencionais	33
3.1 Introdução	33
3.2 Cálculo dos Equivalentes Convencionais	34
3.3 Comparação entre os programas HarmZs e Anafas	40
3.3.1 Sistema Elétrico Teste de 5 Barras	41
3.3.2 Sistema Elétrico IEEE 14 Barras	49
3.4 Comparação no HarmZs entre o Modelo Completo e o Sistema Reduzido ...	52
3.5 Método para Definição da Rede Interna para Estudos de Transitórios Eletromagnéticos	65
Capítulo 4 – Equivalentes Modais	73
4.1 Introdução	73
4.2 Cálculo do Equivalente Modal	74
4.3 Inclusão do Equivalente Modal à Rede Interna (Sistema Reduzido)	78
4.3.1 Código DMODAL	79
Capítulo 5 – A Implementação do Ajuste Vetorial no HarmZs	82
5.1 Introdução	82
5.2 Comunicação entre o Matlab e o C++	83
5.3 O Algoritmo para Seleção Automática das Estimativas Iniciais dos Polos ...	85
5.3.1 Otimização da Definição da Ordem de Aproximação	93
5.4 A implementação do Método de Ajuste Vetorial no HarmZs	94
5.4.1 Estrutura Modos	95
5.4.2 Estrutura OpcoesVectorFitting	95
5.4.3 Classe CVectorFitting	97
Capítulo 6 – Testes Realizados	99
6.1 Introdução	99
6.2 IEEE 14 Barras	102
6.2.1 Testes considerando 1 vizinhança	104
6.2.2 Testes considerando 2 vizinhanças	131
6.3 Sistema Sul-Sudeste + Industrial	162
6.3.1 Comparação entre a Rede Externa Completa (Sistema de Transmissão) e Modelada por Polos e Resíduos	166
6.3.2 Comparação entre a Rede Completa e o Modelo Reduzido	173

6.4	Teste em Sistema de Grande Porte – SIN.....	177
6.4.1	Testes Considerando a Segunda Vizinhança.....	178
6.4.2	Testes Considerando a Terceira Vizinhança	213
6.5	Informações sobre os Testes Realizados	249
Capítulo 7 – Conclusões e Propostas de Trabalhos Futuros		256
7.1	Conclusões.....	256
7.2	Propostas de Trabalhos Futuros.....	259
Referências		261
Anexos.....		267
A.1	Interfaces Gráficas do Programa HarmZs	267
A.1.1	Interface 1	267
A.1.2	Interface 2	273
A.2	O Método do Ajuste Vetorial – Vector Fitting.....	279
A.2.1	Estágio 1: Identificação dos Polos.....	280
A.2.2	Estágio 2: Identificação dos Resíduos	283
A.2.3	Recomendações sobre as Estimativas Iniciais dos Polos	284
A.2.4	Realocação de Polos (Método de Ajuste Vetorial Relaxado).....	285
A.3	Criação da DLL do Método do Ajuste Vetorial	287
A.4	Dados dos Sistemas Elétricos Utilizados ao Longo do Texto	290
A.4.1	Sistema Elétrico Teste de 5 Barras	290
A.4.2	Sistema Elétrico IEEE 14 Barras.....	292
A.4.3	Sistema Elétrico Sul-Sudeste / Industrial	295

Lista de Figuras

Figura 1: Fluxograma representativo do algoritmo de vizinhanças elétricas	17
Figura 2: Diagrama unifilar do Sistema Elétrico completo IEEE 14 Barras.....	18
Figura 3: Diagrama UML da classe CVizinhanças	22
Figura 4: Diagrama UML da classe CExecutaVizinhanças	23
Figura 5: Diagrama UML da classe CRelatorioVizinhanças	24
Figura 6: Matriz Y_{barra} do sistema IEEE 14 Barras	25
Figura 7: Rede externa para a vizinhança 1 do Sistema Elétrico IEEE 14 Barras considerando a barra 6 como piloto.....	26
Figura 8: Rede externa para a vizinhança 2 do Sistema Elétrico IEEE 14 Barras considerando a barra 6 como piloto.....	28
Figura 9: Rede interna para a vizinhança 2 do Sistema Elétrico IEEE 14 Barras considerando a barra 6 como piloto.....	29
Figura 10: Rede interna e rede externa definidas pelo algoritmo de vizinhanças	30
Figura 11: Rede interna e rede externa separadas pelo algoritmo de vizinhanças	31
Figura 12: Sistema reduzido representado pelo equivalente acoplado à rede interna	31
Figura 13: Admitâncias primitivas ligadas às barras de fronteira	36
Figura 14: Diagrama unifilar do sistema elétrico exemplo de 5 barras utilizado para comparar os resultados dos cálculos dos equivalentes convencionais gerados pelo HarmZs e pelo Anafas	41
Figura 15: Dados do sistema elétrico exemplo de 5 Barras no formato do programa Anafas.....	41
Figura 16: Interface do programa Sapre utilizada para se executar o programa Anafas	43
Figura 17: Interface para execução de equivalentes de redes no programa Anafas	43
Figura 18: Dados dos equivalentes de 60 Hz calculados pelo programa Anafas	44
Figura 19: Rede externa utilizada no cálculo do equivalente de rede convencional	44
Figura 20: Interface gráfica do HarmZs para comparação com o programa Anafas	48
Figura 21: Dados dos equivalentes de 60 Hz calculados pelo programa HarmZs	48
Figura 22: Rede externa para a vizinhança 1 do Sistema Elétrico IEEE 14 Barras considerando a barra 6 como piloto e a habilitação da opção de inclusão dos elementos série entre barras de fronteira para a rede interna.....	50
Figura 23: Paralelismo de circuitos RL série utilizado para justificar a não consideração das resistências na parte externa da rede quando se está comparando o sistema completo e o sistema reduzido	54
Figura 24: Sistema elétrico de 14 barras utilizado para comparar o modelo completo e o reduzido utilizando equivalentes convencionais no HarmZs	55
Figura 25: Sistema elétrico de 14 barras utilizado para comparar o modelo completo e o reduzido utilizando equivalentes convencionais no HarmZs destacando a rede interna, a rede externa e as barras de fronteira	56
Figura 26: Comparação da resposta em frequência do módulo da impedância da barra 5 entre o sistema elétrico completo original de 14 barras e o modelo reduzido sem as considerações enumeradas.....	57
Figura 27: Comparação da resposta em frequência do ângulo da impedância da barra 5 entre o sistema elétrico completo original de 14 barras e o modelo reduzido sem as considerações enumeradas.....	57
Figura 28: Comparação da resposta em frequência do módulo da impedância da barra 5 nas proximidades da frequência fundamental entre o sistema elétrico completo original de 14 barras e o modelo reduzido sem as considerações enumeradas.....	58

Figura 29: Comparação da resposta em frequência do ângulo da impedância da barra 5 nas proximidades da frequência fundamental entre o sistema elétrico completo original de 14 barras e o modelo reduzido sem as considerações enumeradas.....	59
Figura 30: Resposta em frequência do módulo da impedância da barra 5 do sistema elétrico completo original de 14 barras comparado ao modelo completo com as considerações enumeradas.....	60
Figura 31: Resposta em frequência do ângulo da impedância da barra 5 do sistema elétrico completo original de 14 barras comparado ao modelo completo com as considerações enumeradas.....	60
Figura 32: Resposta em frequência do módulo da impedância da barra 5 do sistema elétrico completo de 14 barras comparada ao do modelo reduzido, ambos com as considerações enumeradas.....	61
Figura 33: Resposta em frequência do ângulo da impedância da barra 5 do sistema elétrico completo de 14 barras comparada ao do modelo reduzido, ambos com as considerações enumeradas.....	61
Figura 34: Sistema elétrico completo de 7 barras contendo um transformador Y/Delta com defasagem de -30 graus	62
Figura 35: Diferenças devido à existência dos transformadores Y/Delta nas respostas em frequência do módulo da impedância da barra 5 comparando o modelo completo e o modelo reduzido	63
Figura 36: Diferenças devido à existência dos transformadores Y/Delta nas respostas em frequência do ângulo da impedância da barra 5 comparando o modelo completo e o modelo reduzido	63
Figura 37: Ampliação para visualizar as diferenças devido à existência dos transformadores Y/Delta nas respostas em frequência do módulo da impedância da barra 5 comparando o modelo completo e o modelo reduzido.....	64
Figura 38: Ampliação para visualizar as diferenças devido à existência dos transformadores Y/Delta nas respostas em frequência do ângulo da impedância da barra 5 comparando o modelo completo e o modelo reduzido.....	64
Figura 39: Interface para automatizar o processo de definição da área de interesse.....	67
Figura 40: Critério de automatização criado através de ferramenta Batch do programa HarmZs	67
Figura 41: Comparação da resposta em frequência do módulo da impedância da barra 5 para a rede completa e sistemas reduzidos para vizinhanças 1, 2 e 3.....	69
Figura 42: Comparação da resposta em frequência do ângulo da impedância da barra 5 para a rede completa e sistemas reduzidos para vizinhanças 1, 2 e 3.....	69
Figura 43: Ampliação na comparação da resposta em frequência do módulo da impedância da barra 5 para a rede completa e sistemas reduzidos para vizinhanças 1, 2 e 3	70
Figura 44: Ampliação na comparação da resposta em frequência do ângulo da impedância da barra 5 para a rede completa e sistemas reduzidos para vizinhanças 1, 2 e 3	70
Figura 45: Comparação da resposta em frequência do módulo da impedância de transferência entre as barras 5 e 13 para a rede completa e sistemas reduzidos para vizinhanças 1, 2 e 3	71
Figura 46: Comparação da resposta em frequência do ângulo da impedância de transferência entre as barras 5 e 13 para a rede completa e sistemas reduzidos para vizinhanças 1, 2 e 3	71

Figura 47: Ampliação na comparação da resposta em frequência do módulo da impedância de transferência entre as barras 5 e 13 para a rede completa e sistemas reduzidos para vizinhanças 1, 2 e 3	72
Figura 48: Ampliação na comparação da resposta em frequência do ângulo da impedância de transferência entre as barras 5 e 13 para a rede completa e sistemas reduzidos para vizinhança 1, 2 e 3.....	72
Figura 49: Conexão entre a rede interna e a rede externa através das barras de fronteira	75
Figura 50: Área de interesse e rede externa apresentadas separadamente	75
Figura 51: Rede externa isolada da área de interesse	76
Figura 52: Sistema reduzido (Área de interesse + rede externa modelada por um equivalentes modal	78
Figura 53: Código DMODAL	80
Figura 54: Rede externa para a vizinhança 2 do Sistema Elétrico IEEE 14 Barras considerando a barra 6 como piloto.....	88
Figura 55: Visualização da resposta em frequência da função de transferência entre as barras de fronteira 1 e 2 da rede externa a partir da vizinhança 2 da barra 6 do Sistema Elétrico IEEE 14 Barras	89
Figura 56: Estrutura Modos.....	95
Figura 57: Estrutura OpcoesVectorFitting	96
Figura 58: Classe CVectorFitting.....	97
Figura 59: Interface 1 para os teste onde não se tem a rede interna definida.....	100
Figura 60: Interface 2 para os testes onde já se tem a rede interna definida	100
Figura 61: Rede externa para a vizinhança 1 do Sistema Elétrico IEEE 14 Barras considerando a barra 6 como piloto.....	104
Figura 62: Resposta em frequência do módulo da impedância da barra 5 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)	106
Figura 63: Resposta em frequência do ângulo da impedância da barra 5 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)	106
Figura 64: Resposta em frequência do módulo da impedância de transferência entre as barras 5 e 11 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)	107
Figura 65: Resposta em frequência do ângulo da impedância de transferência entre as barras 5 e 11 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)	107
Figura 66: Resposta em frequência do módulo da impedância de transferência entre as barras 5 e 12 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)	108
Figura 67: Resposta em frequência do ângulo da impedância de transferência entre as barras 5 e 12 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)	108
Figura 68: Resposta em frequência do módulo da impedância de transferência entre as barras 5 e 13 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)	109
Figura 69: Resposta em frequência do ângulo da impedância de transferência entre as barras 5 e 13 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)	109

Figura 70: Resposta em frequência do módulo da impedância da barra 11 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul).....	110
Figura 71: Resposta em frequência do ângulo da impedância da barra 11 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)	110
Figura 72: Resposta em frequência do módulo da impedância de transferência entre as barras 11 e 12 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)	111
Figura 73: Resposta em frequência do ângulo da impedância de transferência entre as barras 11 e 12 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)	111
Figura 74: Resposta em frequência do módulo da impedância de transferência entre as barras 11 e 13 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)	112
Figura 75: Resposta em frequência do ângulo da impedância de transferência entre as barras 11 e 13 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)	112
Figura 76: Resposta em frequência do módulo da impedância da barra 12 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul).....	113
Figura 77: Resposta em frequência do ângulo da impedância da barra 12 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)	113
Figura 78: Resposta em frequência do módulo da impedância de transferência entre as barras 12 e 13 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)	114
Figura 79: Resposta em frequência do ângulo da impedância de transferência entre as barras 12 e 13 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)	114
Figura 80: Resposta em frequência do módulo da impedância da barra 13 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul).....	115
Figura 81: Resposta em frequência do ângulo da impedância da barra 13 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)	115
Figura 82: Resposta em frequência extrapolada até 5000 Hz do módulo da impedância da barra 5 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul).....	116
Figura 83: Resposta em frequência extrapolada até 5000 Hz do ângulo da impedância da barra 5 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)	116
Figura 84: Resposta em frequência do módulo da impedância da barra 5 considerando a rede completa (vermelho) e os sistemas reduzidos considerando o equivalente modal (azul) e o equivalente convencional (laranja).....	118
Figura 85: Resposta em frequência do ângulo da impedância da barra 5 considerando a rede completa (vermelho) e os sistemas reduzidos considerando o equivalente modal (azul) e o equivalente convencional (laranja).....	118

Figura 102: Resposta em frequência do módulo da impedância da barra 13 considerando a rede completa (vermelho) e os sistemas reduzidos considerando o equivalente modal (azul) e o equivalente convencional (laranja).....	127
Figura 103: Resposta em frequência do ângulo da impedância da barra 13 considerando a rede completa (vermelho) e os sistemas reduzidos considerando o equivalente modal (azul) e o equivalente convencional (laranja).....	127
Figura 104: Resposta em frequência do módulo da impedância da barra 6 considerando a rede completa (vermelho) e os sistemas reduzidos considerando o equivalente modal (azul) e o equivalente convencional (laranja).....	128
Figura 105: Resposta em frequência do ângulo da impedância da barra 6 considerando a rede completa (vermelho) e os sistemas reduzidos considerando o equivalente modal (azul) e o equivalente convencional (laranja).....	128
Figura 106: Resposta em frequência extrapolando a faixa de frequências até 5000 Hz do módulo da impedância da barra 5 considerando a rede completa (vermelho) e o sistema reduzido considerando o equivalente modal (azul).....	129
Figura 107: Resposta em frequência extrapolando a faixa de frequências até 5000 Hz do ângulo da impedância da barra 5 considerando a rede completa (vermelho) e o sistema reduzido considerando o equivalente modal (azul).....	129
Figura 108: Resposta em frequência extrapolando a faixa de frequências até 5000 Hz do módulo da impedância entre as barras 5 e 11 considerando a rede completa (vermelho) e o sistema reduzido considerando o equivalente modal (azul).....	130
Figura 109: Resposta em frequência extrapolando a faixa de frequências até 5000 Hz do ângulo da impedância entre as barras 5 e 11 considerando a rede completa (vermelho) e o sistema reduzido considerando o equivalente modal (azul).....	130
Figura 110: Rede externa para a vizinhança 2 do Sistema Elétrico IEEE 14 Barras considerando a barra 6 como piloto.....	131
Figura 111: Resposta em frequência do módulo da impedância da barra 1 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul).....	134
Figura 112: Resposta em frequência do ângulo da impedância da barra 1 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul).....	134
Figura 113: Resposta em frequência do módulo da impedância de transferência entre as barras 1 e 2 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul).....	135
Figura 114: Resposta em frequência do ângulo da impedância de transferência entre as barras 1 e 2 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul).....	135
Figura 115: Resposta em frequência do módulo da impedância de transferência entre as barras 1 e 4 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul).....	136
Figura 116: Resposta em frequência do ângulo da impedância de transferência entre as barras 1 e 4 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul).....	136
Figura 117: Resposta em frequência do módulo da impedância de transferência entre as barras 1 e 10 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul).....	137
Figura 118: Resposta em frequência do ângulo da impedância de transferência entre as barras 1 e 10 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul).....	137

Figura 119: Resposta em frequência do módulo da impedância de transferência entre as barras 1 e 14 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)	138
Figura 120: Resposta em frequência do ângulo da impedância de transferência entre as barras 1 e 14 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)	138
Figura 121: Resposta em frequência do módulo da impedância da barra 2 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul).....	139
Figura 122: Resposta em frequência do ângulo da impedância da barra 2 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)	139
Figura 123: Resposta em frequência do módulo da impedância de transferência entre as barras 2 e 4 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul).....	140
Figura 124: Resposta em frequência do ângulo da impedância de transferência entre as barras 2 e 4 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul).....	140
Figura 125: Resposta em frequência do módulo da impedância de transferência entre as barras 2 e 10 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)	141
Figura 126: Resposta em frequência do ângulo da impedância de transferência entre as barras 2 e 10 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)	141
Figura 127: Resposta em frequência do módulo da impedância de transferência entre as barras 2 e 14 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)	142
Figura 128: Resposta em frequência do ângulo da impedância de transferência entre as barras 2 e 14 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)	142
Figura 129: Resposta em frequência do módulo da impedância da barra 4 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul).....	143
Figura 130: Resposta em frequência do ângulo da impedância da barra 4 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)	143
Figura 131: Resposta em frequência do módulo da impedância de transferência entre as barras 4 e 10 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)	144
Figura 132: Resposta em frequência do ângulo da impedância de transferência entre as barras 4 e 10 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)	144
Figura 133: Resposta em frequência do módulo da impedância de transferência entre as barras 4 e 14 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)	145
Figura 134: Resposta em frequência do ângulo da impedância de transferência entre as barras 4 e 14 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)	145

Figura 135: Resposta em frequência do módulo da impedância da barra 10 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul).....	146
Figura 136: Resposta em frequência do ângulo da impedância da barra 10 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul).....	146
Figura 137: Resposta em frequência do módulo da impedância de transferência entre as barras 10 e 14 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)	147
Figura 138: Resposta em frequência do ângulo da impedância de transferência entre as barras 10 e 14 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)	147
Figura 139: Resposta em frequência do módulo da impedância da barra 14 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul).....	148
Figura 140: Resposta em frequência do ângulo da impedância da barra 14 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul).....	148
Figura 141: Resposta em frequência extrapolada até 5000 Hz do módulo da impedância da barra 1 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul).....	149
Figura 142: Resposta em frequência extrapolada até 5000 Hz do ângulo da impedância da barra 1 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul).....	149
Figura 143: Resposta em frequência do módulo da impedância da barra 5 considerando a rede completa (vermelho) e os sistemas reduzidos considerando o equivalente modal (azul), o equivalente convencional da vizinhança 1 (laranja) e o equivalente convencional da vizinhança 2 (marrom)	151
Figura 144: Resposta em frequência do ângulo da impedância da barra 5 considerando a rede completa (vermelho) e os sistemas reduzidos considerando o equivalente modal (azul), o equivalente convencional da vizinhança 1 (laranja) e o equivalente convencional da vizinhança 2 (marrom)	151
Figura 145: Resposta em frequência do módulo da impedância de transferência entre as barras 5 e 11 considerando a rede completa (vermelho) e os sistemas reduzidos considerando o equivalente modal (azul), o equivalente convencional da vizinhança 1 (laranja) e o equivalente convencional da vizinhança 2 (marrom).....	152
Figura 146: Resposta em frequência do ângulo da impedância de transferência entre as barras 5 e 11 considerando a rede completa (vermelho) e os sistemas reduzidos considerando o equivalente modal (azul), o equivalente convencional da vizinhança 1 (laranja) e o equivalente convencional da vizinhança 2 (marrom).....	152
Figura 147: Resposta em frequência do módulo da impedância de transferência entre as barras 5 e 12 considerando a rede completa (vermelho) e os sistemas reduzidos considerando o equivalente modal (azul), o equivalente convencional da vizinhança 1 (laranja) e o equivalente convencional da vizinhança 2 (marrom).....	153
Figura 148: Resposta em frequência do ângulo da impedância de transferência entre as barras 5 e 12 considerando a rede completa (vermelho) e os sistemas reduzidos considerando o equivalente modal (azul), o equivalente convencional da vizinhança 1 (laranja) e o equivalente convencional da vizinhança 2 (marrom).....	153
Figura 149: Resposta em frequência do módulo da impedância de transferência entre as barras 5 e 13 considerando a rede completa (vermelho) e os sistemas reduzidos	

Figura 162: Resposta em frequência do ângulo da impedância da barra 13 considerando a rede completa (vermelho) e os sistemas reduzidos considerando o equivalente modal (azul), o equivalente convencional da vizinhança 1 (laranja) e o equivalente convencional da vizinhança 2 (marrom)	160
Figura 163: Resposta em frequência do módulo da impedância da barra 6 considerando a rede completa (vermelho) e os sistemas reduzidos considerando o equivalente modal (azul), o equivalente convencional da vizinhança 1 (laranja) e o equivalente convencional da vizinhança 2 (marrom)	161
Figura 164: Resposta em frequência do ângulo da impedância da barra 6 considerando a rede completa (vermelho) e os sistemas reduzidos considerando o equivalente modal (azul), o equivalente convencional da vizinhança 1 (laranja) e o equivalente convencional da vizinhança 2 (marrom)	161
Figura 165: Sistema Industrial Fictício	162
Figura 166: Sistema de Transmissão Simplificado do Sul-Sudeste	163
Figura 167: Sistema de Transmissão acoplado ao Sistema Industrial	164
Figura 168: Resposta em frequência do módulo da impedância da barra 21 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)	167
Figura 169: Resposta em frequência do ângulo da impedância da barra 21 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)	167
Figura 170: Resposta em frequência do módulo da impedância de transferência entre as barras 21 e 23 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)	169
Figura 171: Resposta em frequência do ângulo da impedância de transferência entre as barras 21 e 23 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)	169
Figura 172: Resposta em frequência do módulo da impedância da barra 23 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)	171
Figura 173: Resposta em frequência do ângulo da impedância da barra 23 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)	171
Figura 174: Resposta em frequência do módulo da impedância da barra 21 considerando a rede completa (vermelho) e o sistema reduzido considerando o equivalente modal (azul)	174
Figura 175: Resposta em frequência do ângulo da impedância da barra 21 considerando a rede completa (vermelho) e o sistema reduzido considerando o equivalente modal (azul)	174
Figura 176: Resposta em frequência do módulo da impedância de transferência entre as barras 21 e 23 considerando a rede completa (vermelho) e o sistema reduzido considerando o equivalente modal (azul)	175
Figura 177: Resposta em frequência do ângulo da impedância de transferência entre as barras 21 e 23 considerando a rede completa (vermelho) e o sistema reduzido considerando o equivalente modal (azul)	175
Figura 178: Resposta em frequência do módulo da impedância da barra 23 considerando a rede completa (vermelho) e o sistema reduzido considerando o equivalente modal (azul)	176

Figura 179: Resposta em frequência do ângulo da impedância da barra 23 considerando a rede completa (vermelho) e o sistema reduzido considerando o equivalente modal (azul).....	176
Figura 180: Diagrama Unifilar da segunda vizinhança da barra Araraquara-SP 500 kV (barra 5202).....	178
Figura 181: Resposta em frequência do módulo da impedância da barra 2630 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul).....	181
Figura 182: Resposta em frequência do ângulo da impedância da barra 2630 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul).....	181
Figura 183: Resposta em frequência do módulo da impedância de transferência entre as barras 2630 e 4321 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul).....	183
Figura 184: Resposta em frequência do ângulo da impedância de transferência entre as barras 2630 e 4321 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul).....	183
Figura 185: Resposta em frequência da parte real da impedância de transferência entre as barras 2630 e 4321 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul).....	184
Figura 186: Resposta em frequência da parte imaginária da impedância de transferência entre as barras 2630 e 4321 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul).....	184
Figura 187: Resposta em frequência do módulo da impedância da barra 3720 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul).....	186
Figura 188: Resposta em frequência do ângulo da impedância da barra 3720 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul).....	186
Figura 189: Resposta em frequência do módulo da impedância de transferência entre as barras 3720 e 4321 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul).....	188
Figura 190: Resposta em frequência do ângulo da impedância de transferência entre as barras 3720 e 4321 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul).....	188
Figura 191: Resposta em frequência do módulo da impedância de transferência entre as barras 4282 e 4321 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul).....	190
Figura 192: Resposta em frequência do ângulo da impedância de transferência entre as barras 4282 e 4321 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul).....	190
Figura 193: Resposta em frequência do módulo da impedância da barra 4316 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul).....	192
Figura 194: Resposta em frequência do ângulo da impedância da barra 4316 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul).....	192
Figura 195: Resposta em frequência do módulo da impedância da barra 4319 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul).....	194

Figura 196: Resposta em frequência do ângulo da impedância da barra 4319 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)	194
Figura 197: Resposta em frequência do módulo da impedância da barra 4321 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)	196
Figura 198: Resposta em frequência do ângulo da impedância da barra 4321 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)	196
Figura 199: Resposta em frequência do módulo da impedância de transferência entre as barras 4321 e 4598 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)	198
Figura 200: Resposta em frequência do ângulo da impedância de transferência entre as barras 4321 e 4598 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)	198
Figura 201: Resposta em frequência do módulo da impedância da barra 4598 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)	200
Figura 202: Resposta em frequência do ângulo da impedância da barra 4598 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)	200
Figura 203: Resposta em frequência do módulo da impedância da barra 4316 considerando a rede completa (vermelho) e o sistema reduzido considerando o equivalente modal (azul)	203
Figura 204: Resposta em frequência do ângulo da impedância da barra 4316 considerando a rede completa (vermelho) e o sistema reduzido considerando o equivalente modal (azul)	204
Figura 205: Resposta em frequência do módulo da impedância de transferência entre as barras 3690 e 4319 considerando a rede completa (vermelho) e o sistema reduzido considerando o equivalente modal (azul)	205
Figura 206: Resposta em frequência do ângulo da impedância de transferência entre as barras 3690 e 4319 considerando a rede completa (vermelho) e o sistema reduzido considerando o equivalente modal (azul)	205
Figura 207: Resposta em frequência da parte real da impedância de transferência entre as barras 3690 e 4319 considerando a rede completa (vermelho) e o sistema reduzido considerando o equivalente modal (azul)	206
Figura 208: Resposta em frequência da parte imaginária da impedância de transferência entre as barras 3690 e 4319 considerando a rede completa (vermelho) e o sistema reduzido considerando o equivalente modal (azul)	206
Figura 209: Resposta em frequência do módulo da impedância da barra 5202 considerando a rede completa (vermelho) e os sistemas reduzidos considerando o equivalente modal (azul) e o equivalente convencional (laranja)	207
Figura 210: Resposta em frequência do ângulo da impedância da barra 5202 considerando a rede completa (vermelho) e os sistemas reduzidos considerando o equivalente modal (azul) e o equivalente convencional (laranja)	208
Figura 211: Resposta em frequência do módulo da impedância de transferência entre as barras 5202 e 3690 considerando a rede completa (vermelho) e os sistemas reduzidos considerando o equivalente modal (azul) e o equivalente convencional (laranja)	208

Figura 212: Resposta em frequência do módulo da impedância de transferência entre as barras 5202 e 4316 considerando a rede completa (vermelho) e os sistemas reduzidos considerando o equivalente modal (azul) e o equivalente convencional (laranja)	209
Figura 213: Resposta em frequência do módulo da impedância de transferência entre as barras 5202 e 4319 considerando a rede completa (vermelho) e os sistemas reduzidos considerando o equivalente modal (azul) e o equivalente convencional (laranja)	209
Figura 214: Resposta em frequência do módulo da impedância da barra 3690 considerando a rede completa (vermelho) e os sistemas reduzidos considerando o equivalente modal (azul) e o equivalente convencional (laranja)	210
Figura 215: Resposta em frequência do módulo da impedância de transferência entre as barras 3690 e 4316 considerando a rede completa (vermelho) e os sistemas reduzidos considerando o equivalente modal (azul) e o equivalente convencional (laranja)	210
Figura 216: Resposta em frequência do módulo da impedância de transferência entre as barras 3690 e 4319 considerando a rede completa (vermelho) e os sistemas reduzidos considerando o equivalente modal (azul) e o equivalente convencional (laranja)	211
Figura 217: Resposta em frequência do módulo da impedância da barra 4316 considerando a rede completa (vermelho) e os sistemas reduzidos considerando o equivalente modal (azul) e o equivalente convencional (laranja)	211
Figura 218: Resposta em frequência do módulo da impedância de transferência entre as barras 4316 e 4319 considerando a rede completa (vermelho) e os sistemas reduzidos considerando o equivalente modal (azul) e o equivalente convencional (laranja)	212
Figura 219: Resposta em frequência do módulo da impedância da barra 4319 considerando a rede completa (vermelho) e os sistemas reduzidos considerando o equivalente modal (azul) e o equivalente convencional (laranja)	212
Figura 220: Diagrama Unifilar da terceira vizinhança da barra Araraquara-SP 500 kV (barra 5202)	215
Figura 221: Resposta em frequência do módulo da impedância de transferência entre as barras 2631 e 29993 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)	217
Figura 222: Resposta em frequência do ângulo da impedância de transferência entre as barras 2631 e 29993 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)	217
Figura 223: Resposta em frequência do módulo da impedância de transferência entre as barras 2638 e 2673 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)	219
Figura 224: Resposta em frequência do ângulo da impedância de transferência entre as barras 2638 e 2673 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)	219
Figura 225: Resposta em frequência do módulo da impedância de transferência entre as barras 2638 e 29993 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)	221
Figura 226: Resposta em frequência do ângulo da impedância de transferência entre as barras 2638 e 29993 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)	221
Figura 227: Resposta em frequência do módulo da impedância de transferência entre as barras 2656 e 4203 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)	223
Figura 228: Resposta em frequência do ângulo da impedância de transferência entre as barras 2656 e 4203 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)	223

Figura 229: Resposta em frequência do módulo da impedância de transferência entre as barras 2656 e 4288 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)	225
Figura 230: Resposta em frequência do ângulo da impedância de transferência entre as barras 2656 e 4288 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)	225
Figura 231: Resposta em frequência do módulo da impedância de transferência entre as barras 36696 e 29998 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)	227
Figura 232: Resposta em frequência do ângulo da impedância de transferência entre as barras 3669 e 29998 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)	227
Figura 233: Resposta em frequência da parte real da impedância de transferência entre as barras 3669 e 29998 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)	229
Figura 234: Resposta em frequência da parte imaginária da impedância de transferência entre as barras 3669 e 29998 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)	229
Figura 235: Resposta em frequência do módulo da impedância de transferência entre as barras 3669 e 29998 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul) para a tolerância de 10^{-8}	230
Figura 236: Resposta em frequência do ângulo da impedância de transferência entre as barras 3669 e 29998 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul) para a tolerância de 10^{-8}	230
Figura 237: Resposta em frequência do módulo da impedância da barra 3696 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)	231
Figura 238: Resposta em frequência do ângulo da impedância da barra 3696 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)	231
Figura 239: Resposta em frequência do módulo da impedância da barra 4288 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)	233
Figura 240: Resposta em frequência do ângulo da impedância da barra 4288 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)	233
Figura 241: Resposta em frequência do módulo da impedância da barra 29998 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)	235
Figura 242: Resposta em frequência do ângulo da impedância da barra 29998 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)	235
Figura 243: Resposta em frequência do módulo da impedância da barra 4316 considerando a rede completa (vermelho) e o sistema reduzido considerando o equivalente modal (azul)	239
Figura 244: Resposta em frequência do ângulo da impedância da barra 4316 considerando a rede completa (vermelho) e o sistema reduzido considerando o equivalente modal (azul)	239

Figura 245: Resposta em frequência do módulo da impedância de transferência entre as barras 3690 e 4319 considerando a rede completa (vermelho) e o sistema reduzido considerando o equivalente modal (azul)	240
Figura 246: Resposta em frequência do ângulo da impedância de transferência entre as barras 3690 e 4319 considerando a rede completa (vermelho) e o sistema reduzido considerando o equivalente modal (azul)	240
Figura 247: Resposta em frequência da parte real da impedância de transferência entre as barras 3690 e 4319 considerando a rede completa (vermelho) e o sistema reduzido considerando o equivalente modal (azul)	241
Figura 248: Resposta em frequência da parte imaginária da impedância de transferência entre as barras 3690 e 4319 considerando a rede completa (vermelho) e o sistema reduzido considerando o equivalente modal (azul)	241
Figura 249: Resposta em frequência do módulo da impedância da barra 5202 considerando a rede completa (vermelho) e os sistemas reduzidos considerando o equivalente modal (azul), o equivalente convencional para a vizinhança 2 (laranja) e o equivalente convencional para a vizinhança 3 (marrom)	243
Figura 250: Resposta em frequência do ângulo da impedância da barra 5202 considerando a rede completa (vermelho) e os sistemas reduzidos considerando o equivalente modal (azul), o equivalente convencional para a vizinhança 2 (laranja) e o equivalente convencional para a vizinhança 3 (marrom)	243
Figura 251: Resposta em frequência do módulo da impedância de transferência entre as barras 5202 e 3690 considerando a rede completa (vermelho) e os sistemas reduzidos considerando o equivalente modal (azul), o equivalente convencional para a vizinhança 2 (laranja) e o equivalente convencional para a vizinhança 3 (marrom)	244
Figura 252: Resposta em frequência do módulo da impedância de transferência entre as barras 5202 e 4316 considerando a rede completa (vermelho) e os sistemas reduzidos considerando o equivalente modal (azul), o equivalente convencional para a vizinhança 2 (laranja) e o equivalente convencional para a vizinhança 3 (marrom)	244
Figura 253: Resposta em frequência do módulo da impedância de transferência entre as barras 5202 e 4319 considerando a rede completa (vermelho) e os sistemas reduzidos considerando o equivalente modal (azul), o equivalente convencional para a vizinhança 2 (laranja) e o equivalente convencional para a vizinhança 3 (marrom)	245
Figura 254: Resposta em frequência do módulo da impedância da barra 3690 considerando a rede completa (vermelho) e os sistemas reduzidos considerando o equivalente modal (azul), o equivalente convencional para a vizinhança 2 (laranja) e o equivalente convencional para a vizinhança 3 (marrom)	245
Figura 255: Resposta em frequência do módulo da impedância de transferência entre as barras 3690 e 4316 considerando a rede completa (vermelho) e os sistemas reduzidos considerando o equivalente modal (azul), o equivalente convencional para a vizinhança 2 (laranja) e o equivalente convencional para a vizinhança 3 (marrom)	246
Figura 256: Resposta em frequência do módulo da impedância de transferência entre as barras 3690 e 4319 considerando a rede completa (vermelho) e os sistemas reduzidos considerando o equivalente modal (azul), o equivalente convencional para a vizinhança 2 (laranja) e o equivalente convencional para a vizinhança 3 (marrom)	246
Figura 257: Resposta em frequência do módulo da impedância da barra 4316 considerando a rede completa (vermelho) e os sistemas reduzidos considerando o equivalente modal (azul), o equivalente convencional para a vizinhança 2 (laranja) e o equivalente convencional para a vizinhança 3 (marrom)	247
Figura 258: Resposta em frequência do módulo da impedância de transferência entre as barras 4316 e 4319 considerando a rede completa (vermelho) e os sistemas reduzidos	

considerando o equivalente modal (azul), o equivalente convencional para a vizinhança 2 (laranja) e o equivalente convencional para a vizinhança 3 (marrom).....	247
Figura 259: Resposta em frequência do módulo da impedância da barra 4319 considerando a rede completa (vermelho) e os sistemas reduzidos considerando o equivalente modal (azul), o equivalente convencional para a vizinhança 2 (laranja) e o equivalente convencional para a vizinhança 3 (marrom)	248
Figura 260: Resposta em frequência do módulo da impedância da barra 3781 considerando a rede completa (vermelho) e os sistemas reduzidos considerando o equivalente modal (azul) e o equivalente convencional para a vizinhança 3 (marrom).....	248
Figura 261: Menu para acessar a interface 1	268
Figura 262: Interface 1 desenvolvida para trabalhar com redes elétricas completas ...	268
Figura 263: Escolha da barra piloto, do número de vizinhanças e da opção de incluir ou não os elementos série existentes entre barras de fronteira à rede interna	269
Figura 264: Opções existentes para o cálculo dos equivalentes à frequência fundamental	270
Figura 265: Escolha dos caminhos da rede interna e da rede externa	270
Figura 266: Informações sobre o critério de vizinhanças elétricas	271
Figura 267: Critério automático de definição da rede interna	271
Figura 268: Aplicação do Método do Ajuste Vetorial no cálculo de equivalentes modais	272
Figura 269: Opções para a execução do Método do Ajuste Vetorial na Interface 1	273
Figura 270: Menu para acessar a Interface 2 – Diálogo Vector Fitting	274
Figura 271: Interface 2 criada para se fazer a comparação entre uma rede representada por seu modelo completo ou pelo modelo reduzido modal (conjunto de polos e resíduos encontrado pelo Método do Ajuste Vetorial)	274
Figura 272: Opções gerais das amostras das funções de transferência da Interface 2	275
Figura 273: Escolha das funções de transferência na Interface 2.....	276
Figura 274: Visualização dos polos e resíduos de uma função de transferência.....	276
Figura 275: Traçados de resposta em frequência utilizando o modelo modal	277
Figura 276: Opções para a execução do Método do Ajuste Vetorial na Interface 2	278
Figura 277: Escolha do compilador que será utilizado pelo MCR.....	288
Figura 278: Arquivos criados no processo de compilação de arquivos do Matlab	289

Lista de Tabelas

Tabela 1: Dados membros da classe CVizinhanças	22
Tabela 2: Funções membros da classe CVizinhanças	22
Tabela 3: Dados membros da classe CExecutaVizinhanças	23
Tabela 4: Funções membros da classe CExecutaVizinhanças	23
Tabela 5: Dados membros da classe CRelatorioVizinhanças	24
Tabela 6: Funções membros da classe CRelatorioVizinhanças	24
Tabela 7: Vizinhança 1 para o sistema elétrico IEEE 14 Barras	26
Tabela 8: Vizinhança 2 para o sistema elétrico IEEE 14 Barras	27
Tabela 9: Comparação dos equivalentes convencionais calculados pelo Anafas e pelo HarmZs para o sistema elétrico de 5 barras	49
Tabela 10: Comparação dos equivalentes convencionais calculados pelo Anafas e pelo HarmZs para o sistema elétrico IEEE 14 barras	51
Tabela 11: Comparação dos equivalentes convencionais calculados pelo Anafas e pelo HarmZs para o sistema elétrico IEEE 14 barras com truncamento no HarmZs	52
Tabela 12: Funções utilizadas para manipular dados do tipo mxArray	84
Tabela 13: Variáveis do tipo mxArray utilizadas	84
Tabela 14: Funções de transferências para a segunda vizinhança	89
Tabela 15: Frequências dos picos para a resposta em frequência da Figura 55	90
Tabela 16: Polos selecionados para a resposta em frequência da Figura 55	90
Tabela 17: Polos ajustados para a resposta em frequência da Figura 55	91
Tabela 18: Comparação entre os polos ajustados e verdadeiros	92
Tabela 19: Dados membros da estrutura Modos	95
Tabela 20: Dados membros da estrutura OpcoesVectorFitting	96
Tabela 21: Dados membros da classe CVectorFitting	98
Tabela 22: Funções membros da classe CVectorFitting	98
Tabela 23: Funções de transferências da vizinhança 1 a partir da barra 6 do Sistema IEEE 14 Barras	105
Tabela 24: Conjunto de polos e resíduos da função de transferência (5,5)	106
Tabela 25: Conjunto de polos e resíduos da função de transferência (5,11)	107
Tabela 26: Conjunto de polos e resíduos da função de transferência (5,12)	108
Tabela 27: Conjunto de polos e resíduos da função de transferência (5,13)	109
Tabela 28: Conjunto de polos e resíduos da função de transferência (11,11)	110
Tabela 29: Conjunto de polos e resíduos da função de transferência (11,12)	111
Tabela 30: Conjunto de polos e resíduos da função de transferência (11,13)	112
Tabela 31: Conjunto de polos e resíduos da função de transferência (12,12)	113
Tabela 32: Conjunto de polos e resíduos da função de transferência (12,13)	114
Tabela 33: Conjunto de polos e resíduos da função de transferência (13,13)	115
Tabela 34: Funções de transferências para a segunda vizinhança	132
Tabela 35: Conjunto de polos e resíduos da função de transferência (1,1)	134
Tabela 36: Conjunto de polos e resíduos da função de transferência (1,2)	135
Tabela 37: Conjunto de polos e resíduos da função de transferência (1,4)	136
Tabela 38: Conjunto de polos e resíduos da função de transferência (1,10)	137
Tabela 39: Conjunto de polos e resíduos da função de transferência (1,14)	138
Tabela 40: Conjunto de polos e resíduos da função de transferência (2,2)	139
Tabela 41: Conjunto de polos e resíduos da função de transferência (2,4)	140
Tabela 42: Conjunto de polos e resíduos da função de transferência (2,10)	141
Tabela 43: Conjunto de polos e resíduos da função de transferência (2,14)	142
Tabela 44: Conjunto de polos e resíduos da função de transferência (4,4)	143

Tabela 45: Conjunto de polos e resíduos da função de transferência (4,10).....	144
Tabela 46: Conjunto de polos e resíduos da função de transferência (4,14).....	145
Tabela 47: Conjunto de polos e resíduos da função de transferência (10,10).....	146
Tabela 48: Conjunto de polos e resíduos da função de transferência (10,14).....	147
Tabela 49: Conjunto de polos e resíduos da função de transferência (14,14).....	148
Tabela 50: Funções de transferências para a para o Sistema Industrial conectado ao Sistema Elétrico Sul-Sudeste.....	166
Tabela 51: Conjunto de polos e resíduos da função de transferência (21,21).....	168
Tabela 52: Conjunto de polos e resíduos da função de transferência (21,23).....	170
Tabela 53: Conjunto de polos e resíduos da função de transferência (23,23).....	172
Tabela 54: Funções de transferências para a segunda vizinhança a partir da barra Araraquara2-SP 500 kV do Sistema Interligado Nacional.....	179
Tabela 55: Funções de transferências para a segunda vizinhança cujos traçados de resposta em frequência serão analisados.....	180
Tabela 56: Conjunto de polos e resíduos da função de transferência (2630,2630).....	182
Tabela 57: Conjunto de polos e resíduos da função de transferência (2630,4321).....	185
Tabela 58: Conjunto de polos e resíduos da função de transferência (3720,3720).....	187
Tabela 59: Conjunto de polos e resíduos da função de transferência (3720,4321).....	189
Tabela 60: Conjunto de polos e resíduos da função de transferência (4282,4321).....	191
Tabela 61: Conjunto de polos e resíduos da função de transferência (4316,4316).....	193
Tabela 62: Conjunto de polos e resíduos da função de transferência (4319,4319).....	195
Tabela 63: Conjunto de polos e resíduos da função de transferência (4321,4321).....	197
Tabela 64: Conjunto de polos e resíduos da função de transferência (4321,4598).....	199
Tabela 65: Conjunto de polos e resíduos da função de transferência (4598,4598).....	201
Tabela 66: Funções de transferências para a segunda vizinhança escolhidas para comparação entre o sistema completo e o sistema reduzido.....	202
Tabela 67: Funções de transferências para a segunda vizinhança escolhidas para terem os traçados de resposta em frequência analisados.....	216
Tabela 68: Conjunto de polos e resíduos da função de transferência (2631,29993).....	218
Tabela 69: Conjunto de polos e resíduos da função de transferência (2638,2673).....	220
Tabela 70: Conjunto de polos e resíduos da função de transferência (2638,29993).....	222
Tabela 71: Conjunto de polos e resíduos da função de transferência (2656,4203).....	224
Tabela 72: Conjunto de polos e resíduos da função de transferência (2656,4288).....	226
Tabela 73: Conjunto de polos e resíduos da função de transferência (3669,29998).....	228
Tabela 74: Conjunto de polos e resíduos da função de transferência (3696,3696).....	232
Tabela 75: Conjunto de polos e resíduos da função de transferência (4288,4288).....	234
Tabela 76: Conjunto de polos e resíduos da função de transferência (29998,29998).....	236
Tabela 77: Funções de transferências para a terceira vizinhança escolhidas para comparação entre o sistema completo e o sistema reduzido.....	238
Tabela 78: Estatística dos testes realizados.....	251
Tabela 79: Comparações entre os tempos de processamentos para as vizinhanças 2 e 3 do SIN a partir da barra 5202 considerando a busca automática da ordem e a possibilidade de aumentar ou diminuir a ordem de aproximação.....	252
Tabela 80: Comparações entre as ordens de aproximação para as vizinhanças 1, 2 e 3 do SIN a partir da barra 5202 considerando a busca automática da ordem e a possibilidade de aumentar ou diminuir a ordem de aproximação.....	253
Tabela 81: Valores das ordens de aproximação das funções de transferência para a vizinhança 2, considerando a opção de busca da ordem e a tolerância de 10^{-6}	254

Tabela 82: Valores das ordens de aproximação das funções de transferência para a vizinhança 2, considerando a opção de busca com possibilidade de aumento automático da ordem, com a tolerância de 10^{-6}	254
Tabela 83: Valores das ordens de aproximação das funções de transferência para a vizinhança 2, considerando a opção de busca com possibilidade de aumento ou diminuição automático da ordem, com a tolerância de 10^{-6}	255
Tabela 84: Funções implementadas na DLL e que serão utilizadas no HarmZs.....	289

Capítulo 1 – Introdução

1.1 Introdução

Embora os sistemas elétricos operem na maior parte do tempo em regime permanente, o estudo de fenômenos transitórios é de suma importância para estes sistemas. Os equipamentos dos sistemas elétricos devem ser projetados para suportar solicitações extremas que ocorrem durante situações transitórias.

Fenômenos transitórios em sistemas de potência são causados por operações de chaveamento, defeitos (curto-circuitos), e outros distúrbios, tais como surtos atmosféricos, podendo gerar sobretensões, sobrecorrentes, formas de onda distorcidas, e transitórios eletromecânicos. Os eventos transitórios abrangem uma extensa faixa de frequência e dependendo das características do sistema e da causa primária da condição transitória, podem ter uma duração de alguns microssegundos a vários ciclos da frequência fundamental do sistema [1].

Na análise de sistemas em regime permanente, uma série de simplificações pode ser aplicada sem que a precisão dos resultados seja afetada significativamente. Já nos estudos de transitórios eletromagnéticos, o nível de detalhamento dos modelos matemáticos dos equipamentos deve ser rigoroso. Os elementos que compõem o sistema elétrico, tais como linhas de transmissão, transformadores e diversos outros equipamentos devem ser representados o mais precisamente possível, considerando seus fenômenos físicos tais como ondas viajantes em linhas de transmissão, saturação e histerese de transformadores, dentre outros [2]. Pode-se incluir a modelagem dos transformadores de correntes (TC), com a sua saturação. Pode-se também usar modelos mais elaborados de linhas de transmissão com representação da dependência dos parâmetros longitudinais com a frequência para linhas trifásicas simples, circuito duplo, hexafásica e corrente contínua.

No entanto, considerando a complexidade de um sistema de transmissão de grande porte, representar todos os seus equipamentos torna-se uma tarefa inviável, tanto no que tange ao esforço empenhado pelo analista em preparar os dados de toda a rede com

detalhes, quanto ao esforço computacional (tempo de processamento) despendido para se realizar os estudos de transitórios eletromagnéticos.

Nesse sentido, faz-se necessário modelar de forma detalhada a área de interesse, onde se queira investigar o comportamento diante de fenômenos transitórios eletromagnéticos e utilizar modelos equivalentes, calculados para uma faixa de frequência definida, para modelar a região que não é de interesse no estudo.

Em geral, devido à dificuldade de implementação de equivalentes dinâmicos, além do fato dos bancos de dados das redes de grande porte estarem modelados, na sua maioria, para programas de curto-circuito ou fluxo de potência, os equivalentes empregados em estudos de transitórios eletromagnéticos são calculados a partir da impedância de curto-circuito na frequência fundamental, o que pode ser muito impreciso dependendo da rede a ser representada pelo equivalente e da extensão da área onde será representado seu modelo completo.

1.2 Definição da Rede a ser Representada Detalhadamente para Estudos de Transitórios Eletromagnéticos

É importante frisar que empregar equivalentes de curto-circuito simplificados, geralmente calculados para a frequência fundamental, para reproduzir o comportamento em frequência de uma área de interesse do sistema em uma ampla faixa de frequências é uma tarefa árdua e pode levar a erros consideráveis ou a sistemas com dimensões muito grandes, isto é, com reduções de ordem pequenas.

Logo, para que esse tipo de equivalente de curto-circuito simplificado não prejudique a precisão dos resultados obtidos na área de interesse, faz-se necessário definir uma extensão da rede que será representada detalhadamente. Esta extensão da rede representada com detalhes é, neste trabalho, denominada rede (ou área) interna. A rede interna deve conter, no mínimo, toda a área de interesse. Muitas vezes, para que se tenha boa precisão do comportamento em frequência da área de interesse, a rede interna deve ser bem mais extensa que a área de interesse. Caso a rede interna seja

suficientemente pequena ou abrangendo somente os elementos da área de interesse, os cálculos podem apresentar baixa precisão.

Como observado anteriormente, a definição da rede interna faz-se necessária também para limitar o número de componentes que deverá ser modelado com detalhes e para diminuir o tempo de processamento das simulações. Aliado à dificuldade intrínseca de modelar uma grande parte da rede, soma-se o fato de existirem limitações em alguns programas de transitórios eletromagnéticos do número máximo de componentes que podem ser modelados. No programa ATP, por exemplo, em sua versão 5.8, este número máximo está fixado em 10.000 componentes.

A definição da rede interna também pode ser considerada uma dificuldade existente. Isto se deve ao fato de não ser trivial escolher quantas e quais barras devem ser retidas nesta rede de modo que se tenha uma boa precisão nos cálculos. Esse processo pode levar muitas iterações, onde o analista define uma área interna, calcula o equivalente da parte externa e verifica a qualidade do equivalente integrado à rede interna (sistema reduzido). Essa verificação pode ser feita, por exemplo, fazendo comparações visuais entre as respostas em frequência da rede completa e do sistema reduzido. E, levando-se em consideração que a rede interna fosse escolhida através de diagramas unifilares, tem-se a preocupação de que todas as barras estejam representadas no diagrama e que não há outras ligações entre barras que não foram visualizadas no diagrama.

O uso de equivalentes dinâmicos, modelados para uma determinada faixa de frequências, seria uma solução para o problema da utilização dos equivalentes convencionais de frequência fundamental que são muito dependentes de uma boa definição da área interna.

1.3 Pontos principais da dissertação

Nesta dissertação são abordados dois pontos principais. Numa primeira etapa é apresentada uma contribuição ao cálculo de equivalentes convencionais para estudos de transitórios eletromagnéticos na determinação da rede interna, utilizando o conceito de vizinhanças elétricas. Numa segunda etapa é apresentada a utilização do Método do

Ajuste Vetorial (denominado *Vector Fitting* [3] - [13]) para cálculo de polos e resíduos para construção de sistemas reduzidos. Estes sistemas reduzidos são formados pela área interna, que deve ser modelada com maior precisão, e a área externa, que é modelada por equivalentes modais. Em geral as dimensões do sistema reduzido construído com equivalentes modais podem ser bem menores que as do sistema reduzido construído com equivalentes simplificados devido à excelente precisão normalmente conseguida na representação da área externa para uma faixa de frequências determinada, desprezando apenas os desbalanços (ex. linhas trifásicas não transpostas, cargas, etc.) e não linearidades desta área. Deve-se observar que, caso as não linearidades e desbalanços presentes em uma certa região sejam importantes para a análise da área de interesse, esta região deve fazer parte da área interna, retendo-se as barras correspondentes para a representação detalhada.

1.3.1 Critério de Vizinhanças Elétricas

Como uma primeira etapa deste trabalho, visando amenizar as dificuldades de definição da área interna, foi desenvolvido um algoritmo que utiliza o conceito de vizinhanças elétricas, que facilita significativamente sua definição, de acordo com um erro em frequência considerado aceitável. Essa definição é necessária quando se está analisando equivalentes convencionais de frequência fundamental (curto circuito) onde o analista necessita de uma indicação de até onde é preciso modelar a sua área interna para obter bons resultados nos estudos de transitórios eletromagnéticos. A partir de uma indicação do tamanho da rede interna, o analista poderá modelar somente o necessário dentro de programas de transitórios eletromagnéticos e ainda utilizar os equivalentes convencionais que serão calculados após a utilização do algoritmo de vizinhanças.

A utilização do algoritmo de vizinhanças pode ser estendida a estudos de comportamento harmônico como, por exemplo, em estudos de novos acessantes à rede básica que possuem em sua planta cargas não lineares. Neste sentido, tanto o agente regulador (ANEEL) como o agente operador do sistema elétrico (ONS), considerando suas áreas de atuação, estabeleceram, respectivamente, através do PRODIST e dos Procedimentos de Rede [14], limites individuais e totais de tensão harmônica que devem ser atendidos no ponto de acoplamento comum (PAC) pelas cargas que acessam

a rede elétrica. O impacto de uma carga não linear no PAC deve ser considerado tanto em configurações da rede no momento de sua entrada em operação quanto em configurações futuras e em situações de rede degradada [15]. Em termos práticos, é suficiente contingenciar a rede até um número pré-estabelecido de vizinhanças, não havendo necessidade de se contingenciar todos os elementos do sistema, o que seria um procedimento muito conservador e nada prático. Logo, o algoritmo em questão pode ser aplicado para definir quais os elementos, a partir do PAC e dentro da área definida pelo número de vizinhanças, serão contingenciados.

O objetivo principal deste algoritmo é criar uma ferramenta útil, de processamento rápido e que seja de fácil utilização e não necessite de visualizações de diagramas unifilares, onde poucos parâmetros sejam necessários para a definição da área interna. Para a utilização deste algoritmo, é necessário que o analista informe uma barra piloto, que será o ponto de partida do algoritmo, e o número de vizinhanças elétricas desejado. Deste modo, todas as barras e elementos encontrados dentro do número de vizinhanças escolhido constituirão a área interna. O restante da rede fará parte do modelo equivalente. As barras de fronteira farão parte dos dois sistemas.

Este algoritmo foi implementado no programa de comportamento harmônico HarmZs [16] do Cepel em uma versão não comercial. Como facilidade, pode ser utilizado o banco de dados das redes elétricas no formato deste programa, ou carregar o banco de dados no formato dos programas Anarede [17] e Anatem [18], ambos do Cepel. Os bancos de dados do Sistema Interligado Nacional (SIN), no formato de dados destes dois programas, podem ser obtidos na homepage do Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS.

Neste sentido, pode-se utilizar o HarmZs para a definição da rede interna e para calcular o equivalente convencional de curto-circuito. Numa etapa seguinte, a partir da indicação dada pelo programa HarmZs, pode-se partir para programas de transitórios (por exemplo ATP e PSCAD) e modelar a área indicada pelo programa HarmZs com todo o detalhamento. O restante da rede será modelado através do equivalente convencional que também foi calculado pelo programa.

1.3.2 Aplicação do Método de Ajuste Vetorial – *Vector Fitting*

Como uma segunda etapa deste trabalho, é apresentada uma implementação do Método de Ajuste Vetorial (denominado *Vector Fitting*) [3] - [13] no programa HarmZs em uma versão não comercial. Já existem métodos de cálculo de polos e resíduos implementados no programa HarmZs, mas o Método de Ajuste Vetorial tem se mostrado bastante automático, mantendo as propriedades de rapidez, precisão e robustez. O ajuste vetorial é um método de aproximação de respostas em frequências por funções racionais para diversos tipos de estudo. Este método tem sido bastante utilizado para modelar linhas de transmissão, transformadores e equivalentes de rede, sendo a última aplicação de destacada importância neste trabalho.

1.4 Revisão Bibliográfica

Nos estudos de transitórios eletromagnéticos, a utilização de equivalentes de redes para modelar a área externa é primordial devido à inviabilidade de se utilizar os modelos detalhados de todos os componentes de uma rede elétrica.

A utilização de equivalentes de redes simplificados vem de muito tempo e, por mais que se reconheça a necessidade de equivalentes mais precisos, os equivalentes simplificados são utilizados até hoje.

Vários esforços são despendidos para diminuir os problemas causados na utilização de equivalentes de rede simplificados para estudos de transitórios eletromagnéticos. Por exemplo, em [19] é proposta uma metodologia para definição da extensão mínima da rede a ser modelada de modo que se tenham equivalentes simplificados que representem com boa fidelidade a área externa. Essa metodologia se dá através de aferições no domínio da frequência da impedância calculada no ATP utilizando a rotina *Frequency Scan*, onde uma fonte de corrente de amplitude unitária com espectro variável na frequência é alocada na barra de conexão com a área de interesse. Os equivalentes são calculados imediatamente a montante da barra onde a fonte de corrente foi alocada. O mesmo procedimento é realizado estendendo o cálculo do equivalente para barras mais distantes à barra de alocação das fontes de corrente. O processo é finalizado quando as

respostas da impedância da rede externa, aferidas no ATP, dos últimos dois casos simulados tornarem-se constantes.

Embora os equivalentes simplificados (construídos considerando a resposta da rede externa apenas na frequência fundamental) ainda sejam utilizados atualmente, os primeiros trabalhos sobre equivalentes de redes mais elaborados, construídos considerando a resposta da rede externa para uma faixa de frequências de interesse, foram publicados em 1970. Em [20] é proposto um modelo de equivalente de redes constituído de ramos RLC série conectados em paralelo, que tenha uma característica impedância-frequência similar à rede que o equivalente representa. Os pontos de frequência mínima da resposta em frequência são representados pelas ressonâncias dos ramos RLC e os pontos de frequência máxima dependem da relação entre os indutores e as frequências de ressonância. Em [21] é proposto um modelo de equivalente cuja configuração consiste na conexão série de ramos RLC paralelos.

Na década de 1980, o modelo proposto por [20] foi aperfeiçoado em [22] com a inclusão de um ramo RC para uma melhor representação da resposta do modelo equivalente para frequências mais altas. Tanto em [20] como em [21] e [22], a idéia central é equiparar a impedância da rede equivalente à rede original somente nos pontos de ressonância.

Outros trabalhos buscaram sistematizar o processo de síntese de equivalentes de redes para uma faixa de frequências. Em [23] é apresentado um método iterativo de remoção de polos, baseado no ajuste da curva de resposta em frequência pelo método dos mínimos quadrados, para o cálculo de equivalentes monobarra de redes baseados em circuitos RLC. Em [24] é apresentada uma técnica de síntese de equivalentes multibarras como combinações de equivalentes monobarra. Segundo os autores, este método é mais geral que o apresentado em [23] permitindo a síntese através das conexões série ou paralelo de qualquer combinação de elementos RLC. Em contrapartida, uma solução mais complexa é exigida para a obtenção dos valores dos elementos RLC em questão. Diferente das primeiras referências sobre equivalentes para uma faixa de frequências, onde somente os pontos de ressonância eram levados em consideração, em [23] e [24] diversos outros pontos da faixa de frequências de interesse são considerados na síntese dos circuitos RLC.

Também foram apresentados trabalhos na determinação de equivalentes dinâmicos analíticos (que exigem a modelagem da rede externa no domínio da frequência complexa s). Em [25] e [26] são apresentados trabalhos de equivalentes dinâmicos propondo a modelagem das redes elétricas através do uso de equações algébricas e diferenciais (sistemas descritores). Em [26] é proposta a síntese de circuitos RLC para a determinação de equivalentes dinâmicos monobarra para estudos de transitórios eletromagnéticos a partir dos polos dominantes.

A análise modal também foi aplicada em outros trabalhos. Em [27] são propostos diversos algoritmos que possibilitam uma análise modal em redes elétricas de grande porte de qualquer tipo de complexidade, utilizando a matriz $\mathbf{Y}(s)$. Os algoritmos possibilitam o cálculo de polos, zeros e resíduos de funções de transferência, sensibilidades a parâmetros, resposta no tempo e resposta em frequência. Todos estes algoritmos possuem grande robustez e eficiência e utilizam as propriedades esparsas da matriz de admitância nodal da rede elétrica. Foram apresentadas aplicações em estudos de ressonância subsíncrona, harmônicos e transitórios eletromagnéticos. Neste trabalho ressalta-se o algoritmo para cálculo sequencial de polos dominantes [28] bem como os modelos adotados.

Em [29] e [30] é proposto um novo método baseado na formação do equivalente utilizando os polos e resíduos verdadeiros do sistema. Estes polos e resíduos verdadeiros são calculados a partir da modelagem da rede externa pela matriz $\mathbf{Y}(s)$. Esta técnica de modelagem permite considerar facilmente a variação dos parâmetros elétricos de linhas de transmissão com a frequência. O método proposto pode ser aplicado em sistemas com acoplamento mono-barra ou multi-barras e pode ser aplicado em estudos de desempenho harmônico ou de transitórios eletromagnéticos.

Em [31] o método apresentado em [29] e [30] é generalizado incluindo a parte ativa do equivalente para estudos de comportamento harmônico. Em [32] esta generalização é estendida para estudos de transitórios eletromagnéticos.

Um método para a síntese de equivalentes dinâmicos de redes elétricas multiconectadas é apresentado em [33]. Este método também utiliza a matriz $\mathbf{Y}(s)$ para a modelagem da

rede externa e uma variação do algoritmo descrito em [28] para o cálculo sequencial de polos dominantes e resíduos associados das impedâncias primitivas. Utilizando estes polos e resíduos é possível sintetizar analiticamente circuitos elétricos RLC representativos destas impedâncias. Estes circuitos são, então, conectados às barras de fronteira da rede interna, formando um sistema reduzido.

Embora os trabalhos de [27] a [33] tenham a vantagem de utilizar os polos verdadeiros do sistema, para obtenção destes polos há a necessidade de se fornecer estimativas iniciais próximas dos polos de interesse. Para sistemas de maior porte, necessita-se de muita interação do usuário no fornecimento dessas estimativas. Por este motivo, há dificuldades no cálculo de todos os polos de maneira automática.

Nesta dissertação procurou-se aplicar métodos onde fosse possível obter os polos e resíduos de uma rede elétrica de maneira automática, sem que fosse necessária interação do usuário. Esta independência da ação do usuário tornaria possível a obtenção com facilidade de ferramentas necessárias para o cálculo de equivalentes modais. Métodos de aproximação de respostas em frequência por funções racionais polinomiais, um artifício utilizado para modelar um componente físico ou uma parte do sistema elétrico, propiciam esse automatismo.

A utilização da técnica de aproximação de funções de transferência por funções racionais foi proposta inicialmente em [34] para a modelagem de linhas de transmissão com parâmetros distribuídos, inclusive com a proposta da extensão da análise do eixo $j\omega$ para o plano s nas expressões analíticas das variáveis R e L . Muitas técnicas de aproximação de respostas em frequência por funções racionais foram desenvolvidas, a grande maioria baseadas em rotinas de ajuste linear. No entanto, muitos problemas de instabilidade numérica eram encontrados no ajuste de funções polinomiais de ordem elevada. Este problema limitava as técnicas desenvolvidas a aproximações de ordem muito baixa.

Em [35] é apresentada uma proposta de metodologia para que esses problemas de instabilidade numérica encontrados nas formulações anteriores fossem resolvidos. Em [36] é apresentado um método de pré-processamento para modelos de linhas dependentes da frequência que, basicamente, requer como dados de entrada parâmetros

avaliados na frequência fundamental. Através dessas informações, a configuração típica de uma torre representando a linha equivalente eletricamente é construída. A partir da configuração da torre, a variação dos parâmetros com a frequência é avaliada usando métodos convencionais e subsequentemente aproximada por funções racionais de ordem muito baixa.

Em [37] é apresentada uma técnica de otimização para ajustar funções racionais para a admitância característica $Y_c(\omega)$ e função de propagação $A(\omega)$ de linhas de transmissão para ser usada em conjunto com o modelo apresentado em [35]. Esta técnica foi inicialmente utilizada em [38] e é baseada no método não linear de Levenberg-Marquardt. Em [39] é apresentado um modelo universal para cabos subterrâneos e linhas aéreas também utilizando aproximações por funções racionais. Além do plano s , o plano z também pode ser o domínio para as funções racionais aproximadas, como pode ser observado em [40], [41] e [42].

A utilização de técnicas de ajuste vetorial tem se tornado uma ferramenta muito popular e largamente utilizada na aproximação de respostas em frequência por funções racionais para diversos tipos de estudo. Este método genérico, apresentado por Gustavsen e Semlyen em [3], com a denominação de *Vector Fitting* (Método do Ajuste Vetorial) tem sido bastante utilizado para modelar linhas de transmissão, transformadores e equivalentes de rede, sendo a última aplicação de grande importância para este trabalho. O objetivo do método é aproximar uma função, que pode ser um escalar complexo ou um vetor com elementos complexos por um conjunto de polos e resíduos. No caso da função ser um vetor de elementos complexos, todos os elementos são aproximados por funções racionais que compartilham os mesmos polos. Em [3] são apresentados os fundamentos teóricos do Método do Ajuste Vetorial. Em [4] e [5] é apresentada a aplicação do método nas simulações de transitórios eletromagnéticos em linhas de transmissão. Em [6] é apresentado um método para assegurar a passividade dos equivalentes determinados pelo método para evitar que problemas de instabilidade numérica pudessem ocorrer .

Em [7] Gustavsen apresenta uma versão estendida do Método do Ajuste Vetorial, denominado de *Matrix Fitting*, para aproximação racional de matrizes de admitância dependentes da frequência, onde todos os elementos desta matriz são ajustados de modo

que se obtenha um mesmo conjunto de polos. Propriedades como esparsidade, seleção automática dos polos iniciais, passividade e criação de um equivalente de redes multibarra que pode ser importado pelo ATP estão disponibilizadas em um pacote de arquivos na linguagem Matlab. Em [8] é realizada uma breve apresentação do método citado em [3] e [7] e a aplicação do mesmo na síntese de funções racionais aproximadas para a modelagem de linhas de transmissão, transformadores de potência e equivalentes dinâmicos de redes. Em [9] é apresentada a aplicação do método denominado *Matrix Fitting* na síntese de funções racionais na modelagem de transformadores de potência a partir de medições em campo. Discussões sobre estabilidade numérica do método também são apresentadas. Após o ajuste, o transformador é representado no ATP através de duas possibilidades: representação por um circuito a parâmetros concentrados ou fazendo o uso do elemento *Kizilcay F-Dependent Branch*.

Em [10] é apresentada a aplicação do Método do Ajuste Vetorial, também utilizando o pacote definido como *Matrix Fitting*, para modelagem de transformadores por funções racionais baseados em dados de medições mas para estudos de transitórios eletromagnéticos em altas frequências. Em [11] é apresentado um método para o desenvolvimento de equivalentes de redes dependente da frequência pela aproximação da matriz de admitância por funções racionais baseada no Método do Ajuste Vetorial também utilizando o pacote *Matrix Fitting*. Em [12] é apresentada uma modificação no Método do Ajuste Vetorial, onde a condição assintótica de alta frequência é substituída por uma condição de maior relaxação. Com esta modificação, obteve-se uma melhoria na capacidade do método de realocar os polos para melhores posições. Com isso, obtém-se uma convergência mais rápida e reduz-se o peso sobre a escolha do conjunto de polos iniciais.

Embora muito preciso e robusto, o Método do Ajuste Vetorial sofre com a ineficiência computacional se o equipamento que está sendo estudado tem um número grande de portas. Para tratar esse problema, em [13] é apresentada uma melhoria no método, no quesito tempo computacional, sendo essa melhoria baseada na decomposição QR, que não impõe restrições específicas para os dados ou ao processo de modelagem.

1.5 Organização do Texto

Esta dissertação está dividida em 7 capítulos, incluindo este capítulo de introdução, além de 3 anexos, que serão descritos resumidamente a seguir.

No Capítulo 2 será apresentado o critério de vizinhanças elétricas, utilizado para definição da área interna, para que se tenha um sistema reduzido apropriado para estudos de comportamento harmônico e transitórios eletromagnéticos. Detalhes de implementação do algoritmo de vizinhanças elétricas também serão apresentados.

No Capítulo 3 será apresentado o cálculo dos equivalentes de rede convencionais implementado no programa HarmZs em uma versão não comercial. Serão apresentadas algumas comparações entre o cálculo dos equivalentes realizado pelos programas Anafas e HarmZs. Comparações entre o modelo completo e o modelo reduzido também serão apresentadas utilizando o programa HarmZs. Um critério de automatização para definição da área interna, utilizando esses equivalentes convencionais, também será apresentado.

Os equivalentes modais, que melhor representam o comportamento em frequência de uma parte do sistema, são apresentados no Capítulo 4. O cálculo do equivalente modal, a aplicação do Método do Ajuste Vetorial e a inclusão do equivalente modal à rede interna são os pontos principais deste capítulo.

No Capítulo 5 serão apresentados os detalhes de implementação do Método do Ajuste Vetorial em uma versão não comercial do programa HarmZs. O algoritmo de seleção de polos iniciais e detalhes das classes criadas no programa HarmZs também serão apresentados.

No Capítulo 6 são apresentados os testes de validação dos cálculos dos equivalentes modais. Também serão incluídos nos testes traçados com os equivalentes convencionais para se possa fazer uma comparação dos resultados dos equivalentes modais e convencionais. Serão utilizados sistemas de pequeno, médio e sistemas reais de grande porte.

As principais conclusões deste trabalho e as sugestões de trabalhos futuros estão apresentadas no Capítulo 7.

No Anexo A.1 estão apresentados detalhes de utilização das interfaces gráficas implementadas em uma versão não comercial do programa HarmZs.

A teoria do Método do Ajuste Vetorial, *Vector Fitting*, é apresentada no Anexo A.2.

No Anexo A.4 estão apresentados os dados dos sistemas elétricos de pequeno e médio porte, nos formatos dos programas Anafas e HarmZs, utilizados ao longo deste trabalho.

Capítulo 2 – Critério de Vizinhanças Elétricas

2.1 Introdução

Em estudos de transitórios eletromagnéticos de sistemas reais, devido à ausência de uma base de dados de transitórios completa do Sistema Interligado Nacional e ao tempo de processamento necessário para simular a rede completa, a rede interna (que, evidentemente, contém a área de interesse) nos estudos é modelada em detalhe (por modelos matemáticos completos), enquanto a região externa é modelada através de equivalentes convencionais simplificados, alocados nas barras de fronteira entre a rede interna e externa.

A definição da rede interna é necessária quando se está utilizando equivalentes convencionais de frequência fundamental (curto circuito). A partir desta definição, o analista poderá modelar somente o necessário dentro de programas de simulação no tempo para se obter resultados precisos de transitórios ocorridos dentro da área de interesse, mesmo utilizando equivalentes convencionais.

A definição da rede interna é um problema difícil de ser abordado nesses estudos de transitórios eletromagnéticos. Definir o que será modelado em detalhe e o que fará parte do equivalente representando a parte externa é uma tarefa árdua para o analista. Isso porque, em geral, não se dispõe de ferramentas que o auxiliem nesta definição. Note que esta definição deve ser feita para que o analista possa modelar o mínimo de componentes dentro de programas de transitórios eletromagnéticos, ao mesmo tempo que o sistema reduzido, formado pela conexão da rede interna com o equivalente convencional seja razoavelmente preciso dentro da faixa de frequências do tipo de distúrbio que se está estudando. Desta forma, economiza-se tempo evitando a modelagem em detalhe de componentes desnecessários e também no processamento de casos, uma vez que o seu sistema reduzido é, em princípio, do tamanho mínimo

necessário para obtenção de resultados de transitórios eletromagnéticos precisos dentro da área de interesse.

Um dos conceitos que podem ser aplicados para a definição da rede interna é o de vizinhanças elétricas.

O conjunto de barras e equipamentos de parte de uma rede elétrica que possui conexão direta ou indireta com uma barra escolhida pelo analista é chamado de vizinhança elétrica. Esta barra escolhida é denominada de barra piloto e é o ponto de partida da definição da rede interna na aplicação do conceito de vizinhanças elétricas. A quantidade de barras e equipamentos que participam destas vizinhanças é dada pelo número de vizinhanças escolhida e pela topologia da rede elétrica. Logo, as barras que possuem conexão direta à barra piloto fazem parte da primeira vizinhança. As barras da segunda vizinhança ou de vizinhanças superiores são aquelas que não estão conectadas diretamente à barra piloto mas possuem conexão com esta barra através de barras de uma outra vizinhança. As conexões entre as barras são realizadas através de componentes séries dos sistemas elétricos, tais como linhas de transmissão, transformadores, etc.

A área de interesse pode ser classificada então como uma sub-área do sistema elétrico para o qual a análise do evento transitório tem maior interesse. A rede interna é a área mínima que deve ser modelada detalhadamente para que, quando conectada ao equivalente convencional, forme um sistema reduzido que traga resultados com boa precisão na área de interesse. A rede externa é a área externa à rede interna e que será representada pelo equivalente. Os barramentos dispostos entre as redes interna e externa são denominados barras de fronteira.

Além da sua utilização para estudos de transitórios, a aplicação do algoritmo de vizinhanças elétricas pode ser estendida a estudos de comportamento harmônico como, por exemplo, em estudos de novos acessantes à rede básica que possuem em sua planta cargas não lineares [14], [15].

2.2 O Algoritmo de Vizinhanças Elétricas

Este algoritmo foi implementado em uma versão não comercial do programa de comportamento harmônico HarmZs [16] do Cepel. Como facilidade, pode ser utilizado o banco de dados de redes elétricas no formato deste programa ou carregar os bancos de dados no formato dos programas Anarede [17] e Anatem [18], ambos do Cepel. Os bancos de dados do Sistema Interligado Nacional (SIN), no formato destes dois últimos programas, podem ser obtidos no *site* do Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS.

O algoritmo de vizinhanças elétricas é baseado na estrutura da matriz de admitâncias nodais (ou matriz $\mathbf{Y}_{\text{barra}}$) do sistema completo. A matriz $\mathbf{Y}_{\text{barra}}$ pode ser montada para qualquer frequência que se deseje, sendo que no algoritmo implementado no programa HarmZs é utilizada a frequência fundamental. A matriz é montada somente uma vez e utiliza técnicas avançadas de esparsidade.

Além do algoritmo, foi implementada uma interface gráfica amigável onde o usuário pode utilizar a ferramenta com facilidade. A utilização da interface e suas funcionalidades são apresentadas no Anexo A.1. Para facilitar o entendimento da implementação do algoritmo, o fluxograma da Figura 1 é apresentado e logo após será feita a aplicação do mesmo em uma rede elétrica exemplo. A rede escolhida é o sistema elétrico IEEE 14 barras cujo diagrama unifilar completo está apresentado na Figura 2. Os dados deste sistema elétrico estão apresentados no item A.4.2. Os dados deste sistema foram importados de um arquivo histórico no formato do programa Anarede. Vale observar que originalmente existe um transformador de 3 enrolamentos conectando as barras 4, 8 e 9. No entanto, os transformadores de 3 enrolamentos são representados no programa Anarede por 3 transformadores de 2 enrolamentos, que são os transformadores que ligam as barras 4 a 7, 7 a 9 e 7 a 8, onde a barra 7 é a barra fictícia criada para que seja possível a representação no Anarede. Como o transformador de 2 enrolamentos que conecta as barras 7 e 8 possui tap unitário e o valor deste tap não foi representado no arquivo do programa Anarede, no diagrama unifilar ele está representado por uma linha de transmissão.

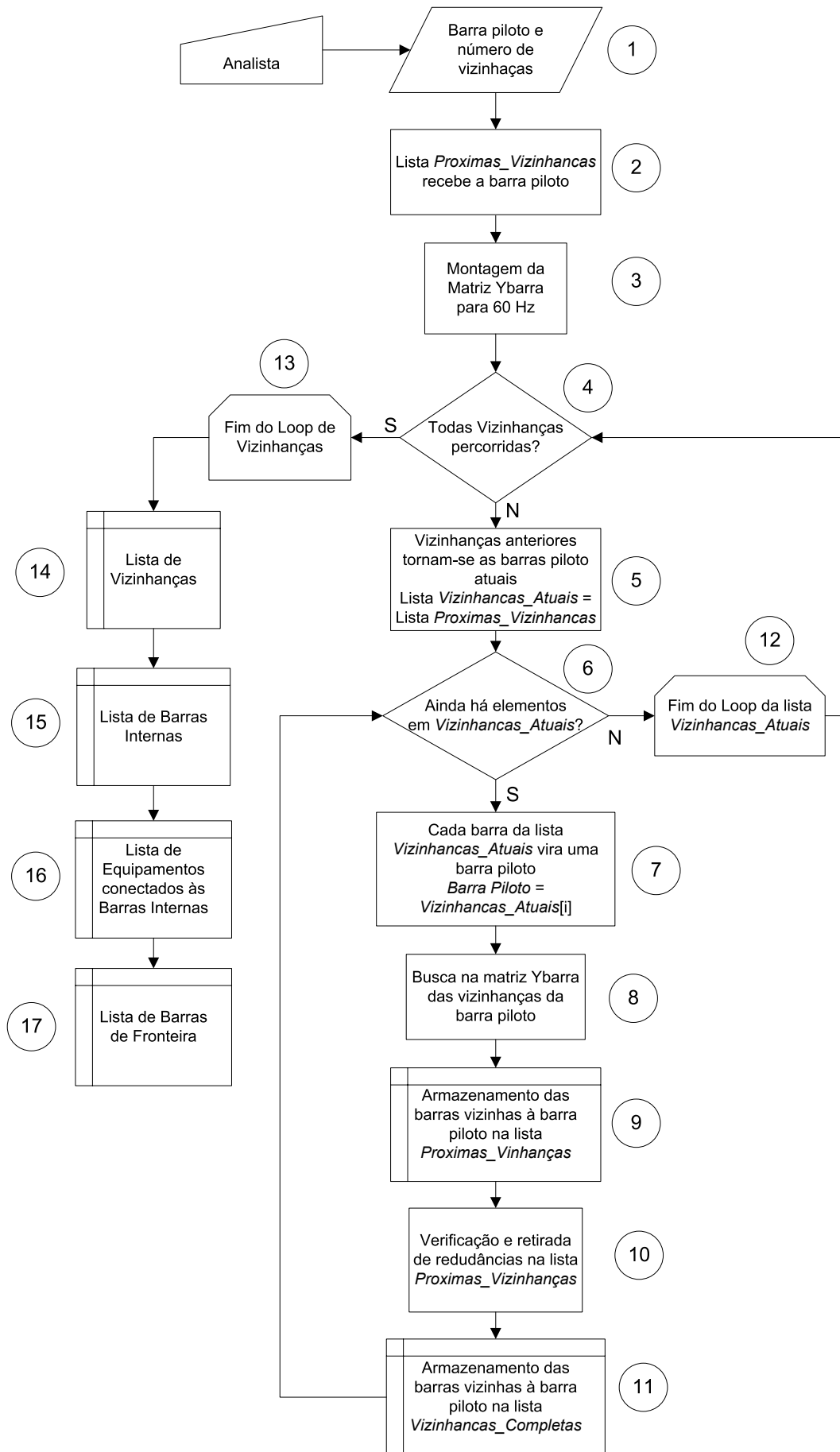


Figura 1: Fluxograma representativo do algoritmo de vizinhanças elétricas

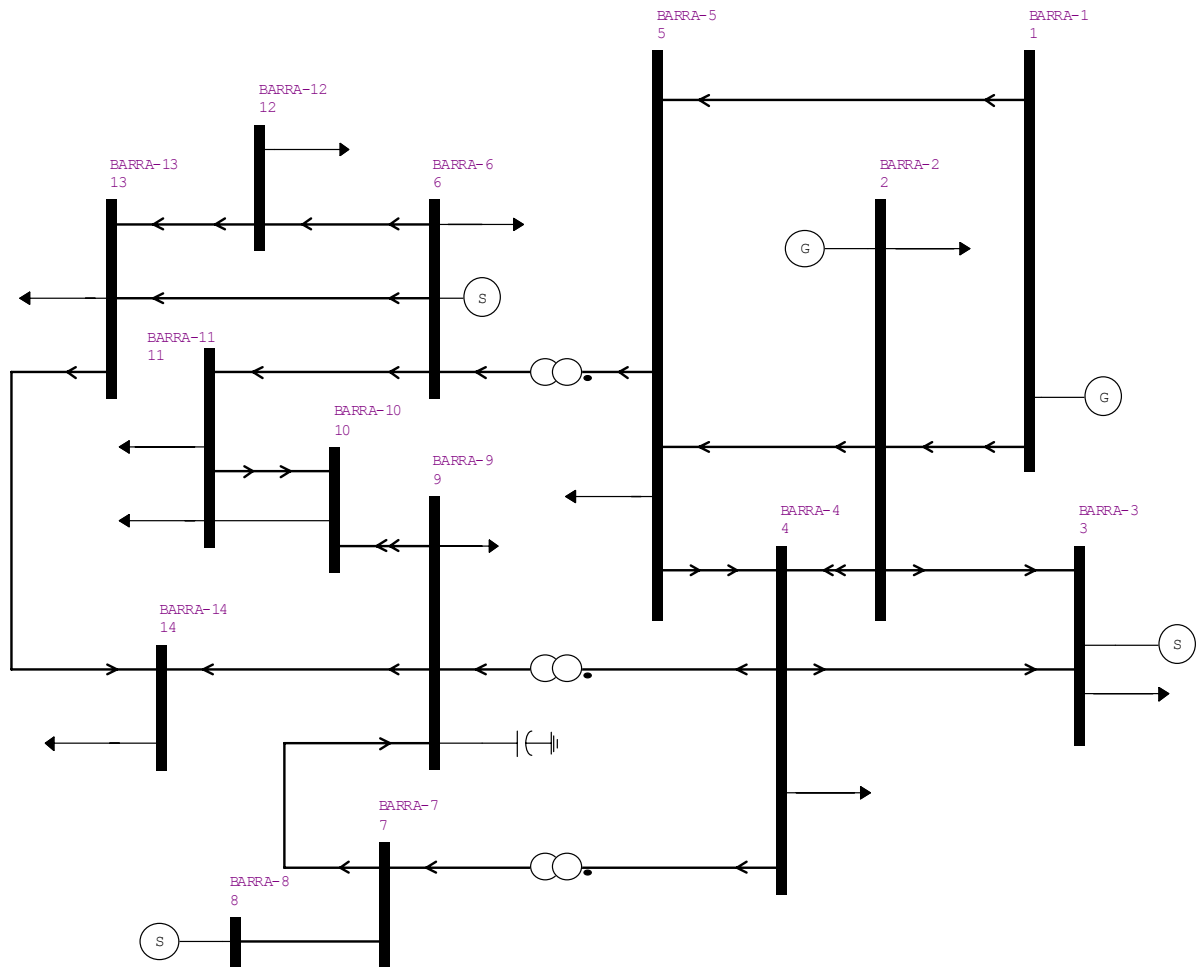


Figura 2: Diagrama unifilar do Sistema Elétrico completo IEEE 14 Barras

Para dar início ao algoritmo, é necessário que o analista escolha uma barra piloto que é o ponto de partida do processo. De um modo geral, a partir dessa barra o algoritmo faz a busca pelas suas vizinhanças até atingir o número de vizinhanças desejado, que também é um dado de entrada necessário. A etapa de entrada de dados do algoritmo é representada pelo bloco numero 1 do fluxograma da Figura 1. A barra piloto escolhida no sistema exemplo da Figura 2 é a barra 6.

Após a escolha dos dados de entrada, é criada uma lista para armazenar todas as barras vizinhas a uma determinada barra. Esta lista é chamada *Proximas_Vizinhanças* e a lógica do algoritmo foi desenvolvida de modo que a barra piloto faça parte desta lista no início da execução do algoritmo. Logo, a primeira vez que esta lista assume um valor é exatamente para receber a barra piloto, já que ela é a vizinhança de número 0. Esta etapa é representada pelo bloco 2 do fluxograma.

É realizada a montagem da matriz $\mathbf{Y}_{\text{barra}}$ do sistema completo para a frequência fundamental. A matriz $\mathbf{Y}_{\text{barra}}$ montada no programa HarmZs é esparsa, complexa e tem dimensão do número de barras do sistema completo adicionado do número de fontes de tensão existentes. As linhas de transmissão são modeladas pelo modelo PI equivalente, não aumentando desde modo a dimensão da mesma, o que ocorreria se cascatas de circuitos PIs fossem utilizadas. A parte da matriz $\mathbf{Y}_{\text{barra}}$ de interesse para o algoritmo de vizinhanças é a do número de barras. O algoritmo de montagem da parte de interesse da matriz $\mathbf{Y}_{\text{barra}}$ é o mesmo dos algoritmos de fluxo de potência convencional, ou seja, cada elemento da diagonal principal é dado pela soma de todas as admitâncias que estão conectadas à barra e os elementos fora da diagonal são dados pelo negativo da soma das admitâncias que conectam as barras em questão. Essa regra de montagem é representada pelas equações (2.1) [43]:

$$\begin{aligned} y_{\text{barra}}(k, k) &= y_k^{sh} + \sum_{m \in \Omega_k} (y_{km} + y_{km}^{sh}) \\ y_{\text{barra}}(k, m) &= -y_{km} \end{aligned} \quad (2.1)$$

onde y_{km} e y_{km}^{sh} são, respectivamente, a admitância série e a metade da admitância total para terra do elemento que liga as barras k e m e y_k^{sh} é a admitância para terra conectada à barra k . Ω_k é o conjunto de barras vizinhas à barra k .

Após a montagem da matriz $\mathbf{Y}_{\text{barra}}$ o algoritmo entra em um laço do número de vizinhanças (bloco 4), que, como descrito anteriormente, é escolhido pelo analista. Neste ponto, as barras existentes na lista *Próximas_Vizinhanças* deixam de ser consideradas barras das próximas vizinhanças e se tornam as barras piloto atuais. Elas são consideradas então as barras da vizinhança em estudo (ou atuais). Para este fim, uma nova lista é criada, a lista *Vizinhanças_Atuais* e todas as barras existentes na lista *Próximas_Vizinhanças* serão transferidas para a lista *Vizinhanças_Atuais*. Ou seja, as barras marcadas como próximas vizinhanças em um laço de vizinhança anterior tornam-se as barras da vizinhança atual. Este procedimento é representado no bloco 5.

Cabe observar que na primeira iteração deste laço a lista *Próximas_Vizinhanças* só contém a barra piloto, que é a barra escolhida pelo analista. Logo, nesta primeira

iteração a lista *Vizinhanças_Atuais* (bloco 5) também só conterá a barra piloto escolhida.

Dado que a lista *Vizinhanças_Atuais* pode conter várias novas barras piloto (que são barras vizinhas de uma barra piloto da iteração anterior), o algoritmo entra em um segundo laço, que é o laço de procura das barras vizinhas a cada barra existente na lista *Vizinhanças_Atuais* (bloco 6). A barra piloto atual é assumida como sendo uma barra da lista *Vizinhanças_Atuais* (bloco 7).

Partindo da atualização da barra piloto (bloco 7), é realizada uma busca na matriz Y_{barra} pela linha cuja posição é dada pela barra piloto atual. Todas as posições que possuem preenchimentos nesta linha da matriz Y_{barra} (referente à barra piloto) são, em princípio, barras vizinhas à barra piloto em sua primeira vizinhança (bloco 8). Todo esse conjunto de barras vizinhas à barra piloto do laço é armazenado na lista *Proximas_Vizinhanças*, que está, neste ponto, vazia. Em princípio, todas as barras vizinhas à barra piloto atual serão armazenadas na lista *Proximas_Vizinhanças* (bloco 9).

Em todas as iterações do laço da lista *Vizinhanças_Atuais* (bloco 6), é realizada uma verificação na lista *Proximas_Vizinhanças* de modo a conferir se a barra encontrada como próxima vizinhança já foi adicionada anteriormente como futura barra piloto. Esta verificação é feita para evitar que o algoritmo perca tempo procurando por barras vizinhas que já foram adicionadas numa etapa anterior e entre num laço infinito. Caso a barra não tenha sido adicionada, ela continua fazendo parte da lista *Proximas_Vizinhanças*. Todas as barras que já fizeram parte desta lista em qualquer iteração do laço farão parte da lista de *Vizinhanças_Completas* (bloco 11). Cabe observar que na primeira vizinhança este bloco 10 nunca conterá barras repetidas.

Após terminar a procura por todas as barras existentes na lista *Vizinhanças_Atuais* (bloco 12), que caracteriza uma vizinhança, o algoritmo passa para a próxima vizinhança (volta ao bloco 4), levando agora como barras piloto atuais, as vizinhanças da barra piloto anterior.

O fim do algoritmo (bloco 13) se dá quando o número de vizinhanças solicitado é alcançado ou quando o número máximo possível de vizinhanças for alcançado, o que

pode acontecer quando o analista fornece um número de vizinhanças maior do que o número máximo de vizinhanças existentes para a barra piloto fornecida.

Uma série de informações é disponibilizada para o analista. Uma das informações é a lista de vizinhanças encontradas (bloco 14). Através desta lista podem ser colhidas informações de cada vizinhança separadamente. Quantas barras existem por vizinhança, os elementos que estão conectados às barras desta vizinhança, dentre outras. Também são fornecidas informações sobre a lista total de barras da rede interna (bloco 15). Também o conjunto de equipamentos que fazem parte da rede interna está armazenado numa lista de equipamentos (bloco 16).

Uma lista contendo as barras de fronteira entre a rede interna e externa (bloco 17) é uma informação muito útil que também é disponibilizada. Nessas barras de fronteira é que serão conectados os equivalentes convencional ou modal, tema dos capítulos seguintes.

Em geral, as barras da última vizinhança encontrada são as barras de fronteira. No entanto, existe uma opção que pode ser escolhida que diz respeito a incluir os elementos que estão conectados entre as barras de fronteira na rede interna. Neste caso, se não existirem ligações diretas das barras da última vizinhança com barras da rede externa, essas barras não serão consideradas barras de fronteira. Detalhes da escolha desta opção serão apresentados no final do item 2.3.

2.3 Detalhes da programação do algoritmo

Este algoritmo foi implementado na linguagem de programação C++ e utiliza os conceitos de orientação a objetos e alocação dinâmica de memória. Foram criadas três classes na implementação do algoritmo: a classe CVizinhanças, a classe CExecutaVizinhanças e a classe CRelatorioVizinhanças.

A classe CVizinhanças armazena os dados de cada vizinhança. A barra piloto desta vizinhança, as barras vizinhas a esta barra piloto, o número da vizinhança e o conjunto de elementos que são ligados a esta barra de interesse são alguns dos dados membros desta classe. Na Figura 3 está apresentado o diagrama em UML da classe CVizinhanças.

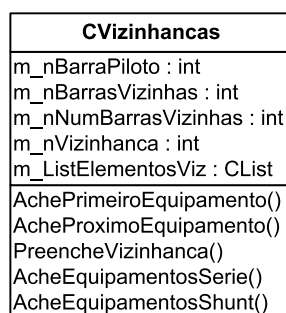


Figura 3: Diagrama UML da classe CVizinhanças

Na Tabela 1 são apresentados os dados membros desta classe e na Tabela 2 suas funções membro.

Tabela 1: Dados membros da classe CVizinhanças

Dado Membro	Descrição
int m_nBarraPiloto	Número da barra piloto para a vizinhança em questão
int m_nBarrasVizinhas	Barras vizinhas à barra piloto em questão
int m_nNumBarrasVizinhas	Número de barras vizinhas à barra piloto
int m_nVizinhanca	Número da vizinhança
CList <CEquipamento*, CEquipamento*> m_ListEquipamentoViz	Lista de equipamentos da vizinhança em questão

Tabela 2: Funções membros da classe CVizinhanças

Dado Membro	Descrição
CEquipamento* AchePrimeiroEquipamento (nTipo)	Acha o primeiro equipamento armazenado na lista m_ListElementosViz de acordo com seu tipo (linha, transformador, carga, etc)
CEquipamento* AcheProximoEquipamento (nTipo)	Acha o próximo equipamento armazenado na lista m_ListElementosViz de acordo com seu tipo (linha, transformador, carga, etc)
void PreencheVizinhanca(int nBarraPiloto, int* nBarrasVizinhas, int nVizinhanca)	Preenche os dados de uma vizinhança
void AcheEquipamentosSerie ()	Acha os equipamentos série da vizinhança
void AcheEquipamentosShunt ()	Acha os equipamentos shunt da vizinhança

A classe CExecutaVizinhanças é a que executa o cálculo das vizinhanças elétricas propriamente dito. Nesta classe é realizada a montagem da matriz Y_{barra} e é feita a identificação e separação das redes interna e externa. Na Figura 4 está apresentado o diagrama em UML da classe CExecutaVizinhanças.

CExecutaVizinhanças
m_nBarraPiloto : int Proximas_Vizinhanças : CList Vizinhanças_Atuais : CList Vizinhanças_Completas : CList Ybarra : Esparsa m_RelatorioViz : CRelatorioVizinhanças pRedeInterna : CRede* pRedeExterna : CRede*
MontarMatrizYbarra() CriarRedesEquivalente() CalcularPrimitivasFreqFundamental() TratarRedundancias()

Figura 4: Diagrama UML da classe CExecutaVizinhanças

Na Tabela 3 são apresentados os dados membros desta classe e na Tabela 4 suas funções membro.

Tabela 3: Dados membros da classe CExecutaVizinhanças

Dado Membro	Descrição
int m_nBarraPiloto	Número da barra piloto informada pelo analista
CList <int, int> Próximas_Vizinhanças	Lista das próximas barras que serão analisadas na vizinhança seguinte
CList <int, int>Vizinhanças Atuais	Lista das barras piloto atuais
CList <int, int>Vizinhanças Completas	Lista de todas as barras de todas as vizinhanças
Esparsa Ybarra	Matriz Y_{barra} esparsa do sistema completo
CRelatorioVizinhanças m_RelatorioViz	Objeto da classe CRelatorioVizinhanças que gerencia objetos da classe CVizinhanças
CRede* pRedeInterna	Rede interna criada após identificação de todas as vizinhanças
CRede* pRedeExterna	Rede externa criada após identificação de todas as vizinhanças

Tabela 4: Funções membros da classe CExecutaVizinhanças

Dado Membro	Descrição
void MontarMatrizYbarra()	Monta a matriz Y_{barra} para a frequência fundamental
void CriarRedesEquivalente()	Identifica e separa as redes interna e externa
void CalcularPrimitivasFreqFundamental()	Executa o cálculo do equivalente convencional
void TratarRedundancias()	Trata as redundâncias do processo

A classe CRelatorioVizinhanças foi desenvolvida para gerenciar todas as vizinhanças criadas, ou seja, gerencia os ponteiros dos objetos do tipo CVizinhanças criados. Todas as vizinhanças são armazenadas em uma lista de ponteiros que é um dado membro da

classe CRelatorioVizinhanças (bloco 14). Na Figura 5 está apresentado o diagrama em UML da classe CRelatorioVizinhanças.

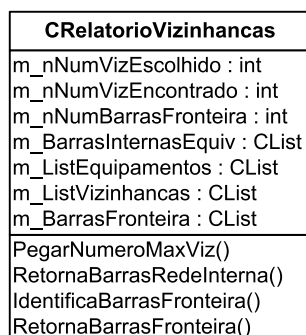


Figura 5: Diagrama UML da classe CRelatorioVizinhanças

Na Tabela 5 são apresentados os dados membros desta classe e na Tabela 6 suas funções membro.

Tabela 5: Dados membros da classe CRelatorioVizinhanças

Dado Membro	Descrição
int m_nNumVizEscolhido	Número escolhido de vizinhanças pelo analista
int m_nNumVizEncontrado	Número encontrado de vizinhanças pelo algoritmo
int m_nNumBarrasFronteira	Número encontrado de barras de fronteira
CList <int, int> m_BarrasInternasEquip	Lista das barras da rede interna
CList <CEquipamento*, CEquipamento*> m_ListEquipamentos	Lista de todos os equipamentos da rede interna
CList <Cvizinhanças*, Cvizinhanças*> m_ListVizinhanças	Lista de todas as vizinhanças
CList <int, int> m_BarrasFronteira	Lista de todas as barras de fronteira

Tabela 6: Funções membros da classe CRelatorioVizinhanças

Dado Membro	Descrição
int PegarNumeroMaxViz()	Varre a lista de vizinhanças e identifica a última alcançada
int* RetornaBarrasRedeInterna()	Identifica e retorna as barras da rede interna
void IdentificaBarrasFronteira()	Identifica as barra de fronteira
nt* RetornaBarrasFronteira()	Retorna as barras de fronteira identificadas

Várias funcionalidades para trabalhar com as vizinhanças foram implementadas e o algoritmo tem a possibilidade de fornecer uma série de informações importantes. Uma delas é a lista de todas as barras que fazem parte da rede interna (bloco 15), onde são

incluídas também todas as barras de fronteira (bloco 17). Todos os equipamentos conectados às barras internas também podem ser visualizados (bloco 16).

Finalmente é apresentada a aplicação do algoritmo ao sistema exemplo IEEE 14 Barras cujo diagrama unifilar completo é apresentado na Figura 2. Os dados elétricos deste sistema são apresentados no Anexo A.4.2.

Na Figura 6 está apresentada a montagem da matriz Y_{barra} para o sistema exemplo IEEE 14 barras. Destaca-se o procedimento de busca (bloco 8) para a vizinhança da barra piloto escolhida pelo analista, barra 6. Tem-se que a linha referente a esta barra piloto é a linha 6 da matriz Y_{barra} . Nota-se que as posições (6,5), (6,6), (6,11), (6,12) e (6,13) possuem valores diferentes de zero, ou seja, de acordo com o princípio de montagem da Y_{barra} , existem conexões físicas entre a barra piloto e estas barras. Logo, nesta primeira iteração do bloco 6, o bloco 8 do fluxograma do algoritmo retorna as barras 5, 11, 12 e 13. A diagonal (6,6) é descartada pois o intuito do algoritmo é procurar vizinhanças e é característica da matriz Y_{barra} sempre ter a diagonal preenchida. Logo, a lista *Proximas_Vizinhanças* assume no bloco 9 estas barras acima citadas.

1	⊗	×		×										
2	×	⊗	×	×	×									
3		×	⊗	×										
4		×	×	⊗	×	×	×							
5	×	×		×	⊗	×								
6				×	⊗				×	×	×			
7			×		⊗	×	×							
8					×	⊗								
9			×		×		⊗	×					×	
10							×	⊗	×					
11				×				×	⊗					
12				×						⊗	×			
13				×						×	⊗	×		
14							×				×	⊗		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14

Figura 6: Matriz Y_{barra} do sistema IEEE 14 Barras destacando a posição 6 representando a barra piloto

Pode-se comparar o resultado obtido através dos preenchimentos da matriz Y_{barra} com a análise visual das vizinhanças da barra piloto observadas na Figura 7. As barras desta primeira vizinhança do sistema elétrico em questão são apresentadas na Tabela 7 e coincidem com as barras da primeira vizinhança retornadas pelo algoritmo.

Tabela 7: Vizinhança 1 para o sistema elétrico IEEE 14 Barras

Barra Piloto Original	Barra Piloto Atual	Barras Vizinhas	Vizinhança
6	6	5	1
6	6	11	1
6	6	12	1
6	6	13	1

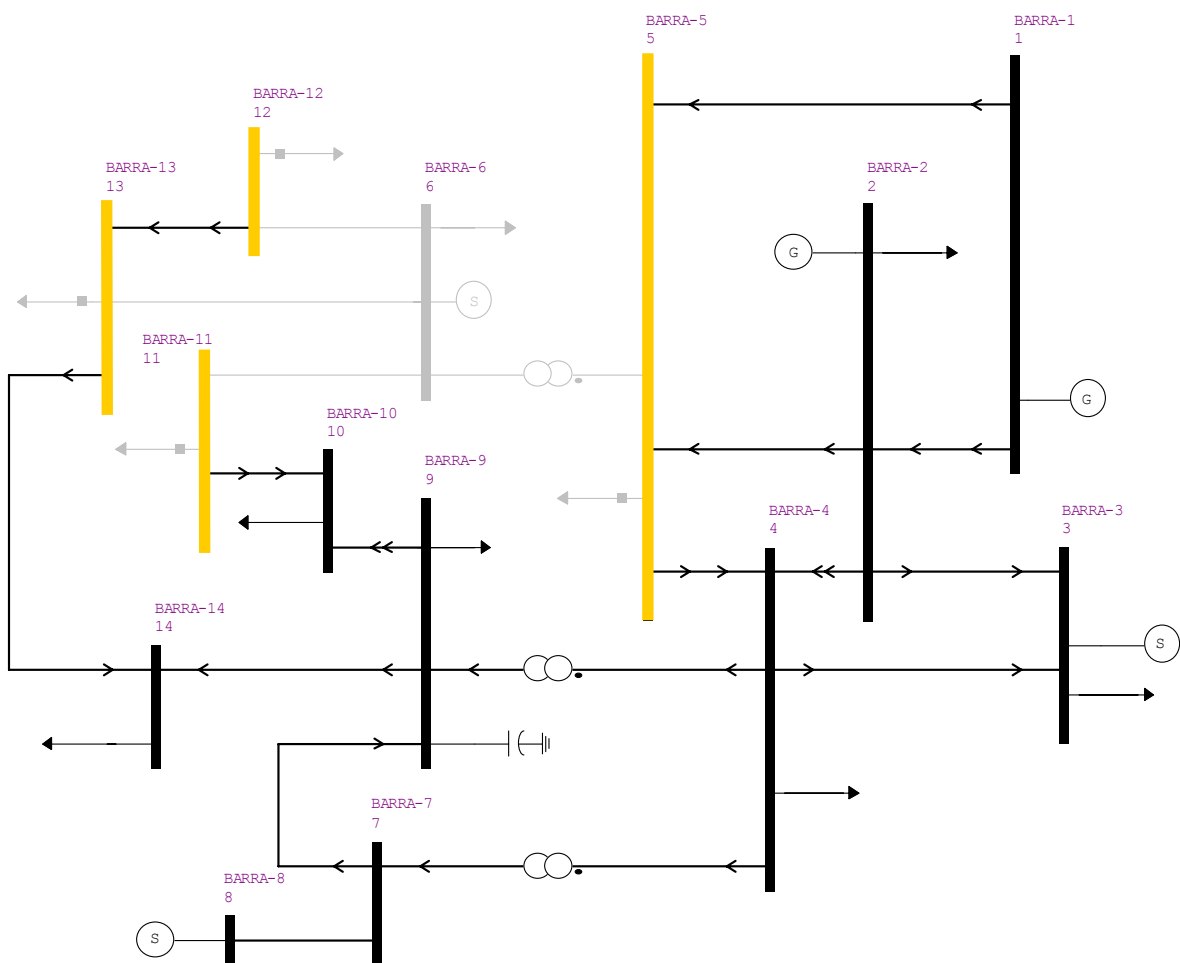


Figura 7: Rede externa para a vizinhança 1 do Sistema Elétrico IEEE 14 Barras considerando a barra 6 como piloto

De modo análogo ao realizado para a barra piloto 6, na próxima etapa do algoritmo, que é a vizinhança 2, as barras que foram armazenadas na lista *Proximas_Vizinhanças* como sendo barras vizinhas à barra piloto 6 preenchem a lista *Vizinhanças_Atuais* para tornarem-se as novas barras piloto (bloco 7). A primeira barra armazenada na lista

Vizinhanças_Atuais é a barra 5 e ela se torna a barra piloto atual. O mesmo procedimento de busca na matriz $\mathbf{Y}_{\text{barra}}$ descrito anteriormente é realizado para esta nova barra piloto. As novas barras vizinhas a esta barra piloto atual são adicionadas na lista *Proximas_Vizinhanças*, assim como as barras vizinhas às barras 11, 12 e 13

Na Figura 8 são apresentadas as barras da vizinhança 2. Estas mesmas barras podem ser verificadas na Tabela 8. Pode-se observar que as barras piloto para a segunda vizinhança são as barras da primeira vizinhança (barras da Tabela 7). Nota-se que a barra 5 possui 3 barras vizinhas que são as barras 1, 2 e 4. As barras 11 e 12 possuem, cada uma, somente uma barra vizinha, sendo respectivamente, as barras 10 e 13. Como a barra 13 já é uma barra piloto da segunda vizinhança, ela é retirada da lista *Proximas_Vizinhanças* (bloco 10). A barra 13 possui duas barras vizinhas, que são as barras 12 e 14. Como a barra 12 já é uma barra piloto da segunda vizinhança, ela também é retirada da lista *Proximas_Vizinhanças*.

Tabela 8: Vizinhança 2 para o sistema elétrico IEEE 14 Barras

Barra Piloto Original	Barra Piloto Atual	Barras Vizinhas	Vizinhança
6	5	1	2
6	5	2	2
6	5	4	2
6	11	10	2
6	12	-	2
6	13	14	2

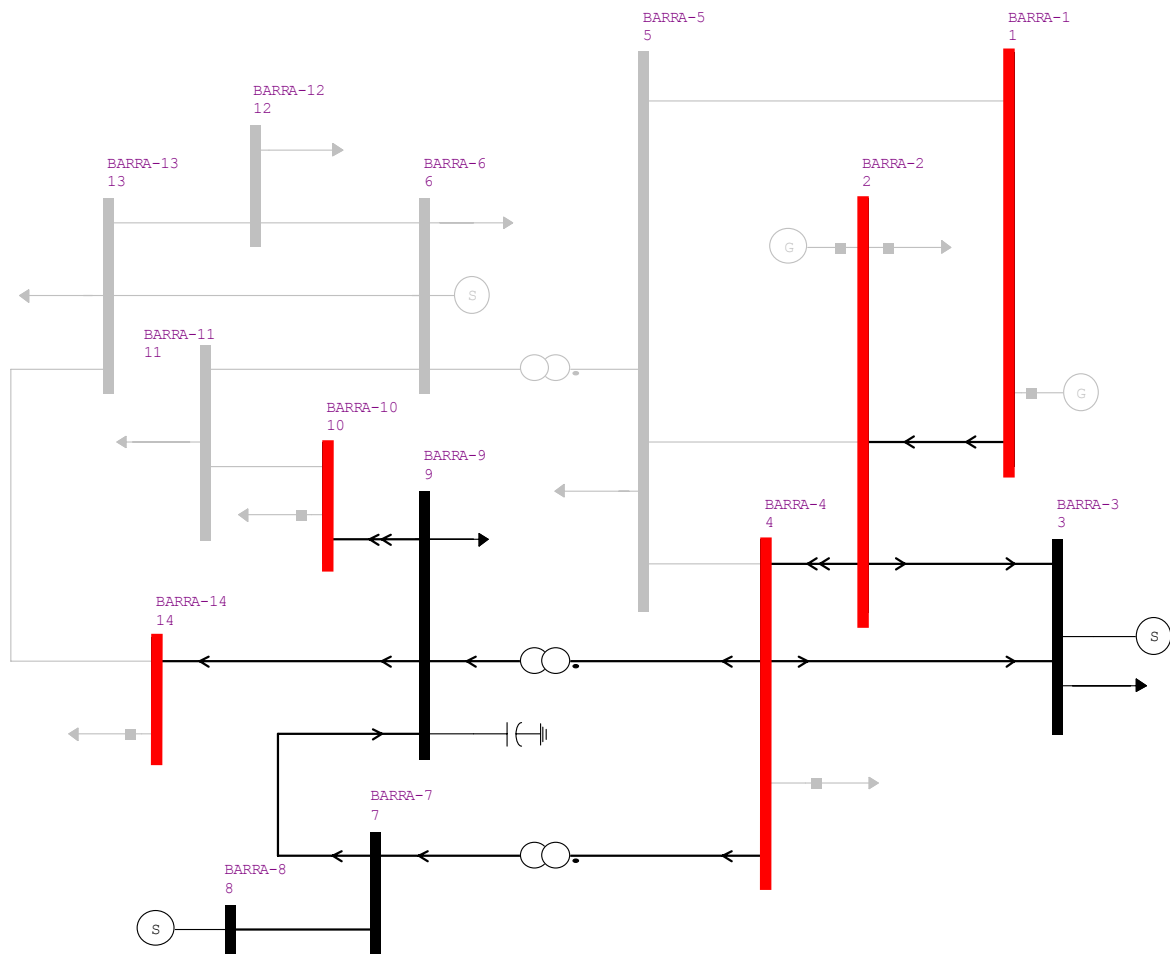


Figura 8: Rede externa para a vizinhança 2 do Sistema Elétrico IEEE 14 Barras considerando a barra 6 como piloto

Esse procedimento é realizado até que o número de vizinhanças escolhido pelo analista seja atingido, neste caso duas vizinhanças. O processo pode ser interrompido caso o número máximo de vizinhanças seja menor que o número de vizinhanças escolhido. Neste sistema exemplo, como a barra 6 possui um limite de 4 vizinhanças, o algoritmo será finalizado quando alcançar o número de vizinhanças escolhido pelo analista.

Ao contrário das figuras anteriores onde é destacada a parte externa da rede, na Figura 9 pode-se observar, em destaque, a rede interna definida através do algoritmo de vizinhanças para duas vizinhanças. Nota-se que os elementos ligados para terra que estão conectados às barras de fronteira fazem parte somente da rede interna. Nota-se também que a opção de incluir os elementos série que estão conectados entre as barras de fronteira não estava habilitada ao executar o algoritmo, pois a linha que conecta as barras 1 e 2 e a linha que conecta as barras 2 e 4 não fazem parte da rede interna. Observa-se que, neste caso, existem 5 barras de fronteira, que são todas as barras da

vizinhança 2. Caso a opção de incluir os elementos série que estão conectados entre as barras de fronteira tivesse sido habilitada, as duas linhas citadas acima fariam parte da rede interna e seriam excluídas da rede externa. A habilitação desta opção também mudaria a quantidade de barras de fronteira encontrada pois, neste caso, a barra 1 não seria mais considerada uma barra de fronteira pois não haveria mais ligação direta desta barra com algum elemento da rede externa.

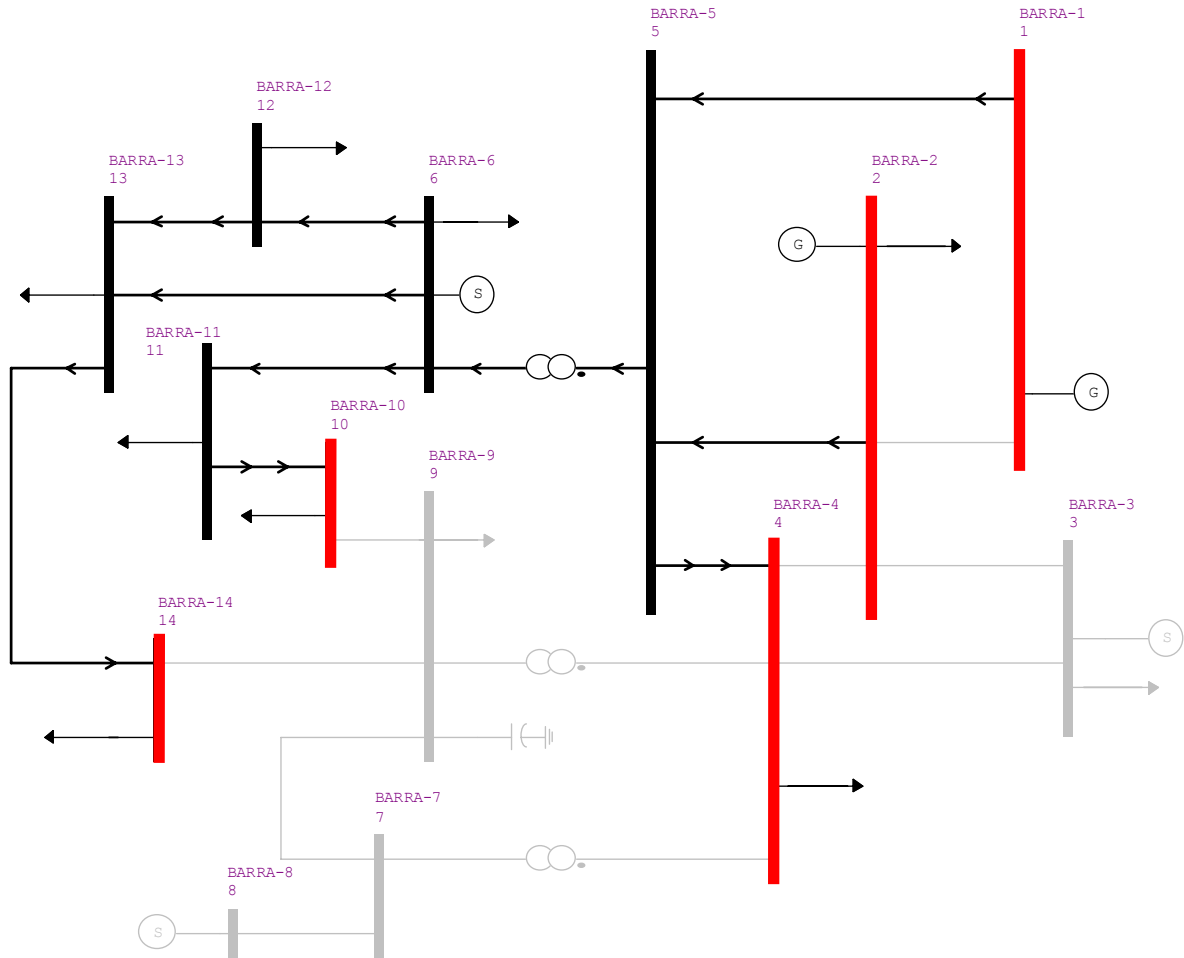


Figura 9: Rede interna para a vizinhança 2 do Sistema Elétrico IEEE 14 Barras considerando a barra 6 como piloto

2.4 Produtos Obtidos após Utilização do Algoritmo de Vizinhanças Elétricas

Como notado anteriormente, a rede elétrica necessária para que seja realizada a aplicação do algoritmo de vizinhanças elétricas é a rede elétrica completa, como apresentado na Figura 2. O objetivo principal do algoritmo é então definir a rede interna e, conseqüentemente, o que será considerado rede externa. Este procedimento de definição é apresentado de forma simplificada na Figura 10. Observa-se que, agora, tem-se bem definidas as duas áreas, conectadas através das n barras de fronteira.

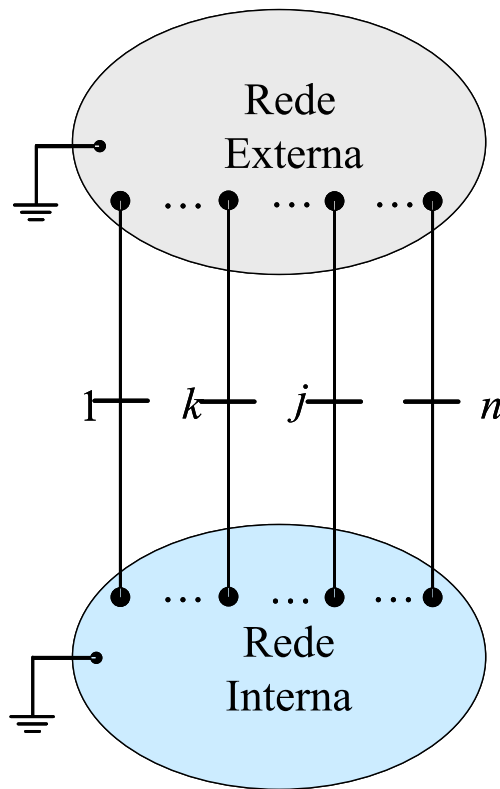


Figura 10: Rede interna e rede externa definidas pelo algoritmo de vizinhanças

Após a definição da área interna, o algoritmo também executa sua segunda tarefa: separar a rede completa em duas redes como apresentado na Figura 11. Como pode ser observado, as barras de fronteira continuam pertencendo simultaneamente às duas redes.

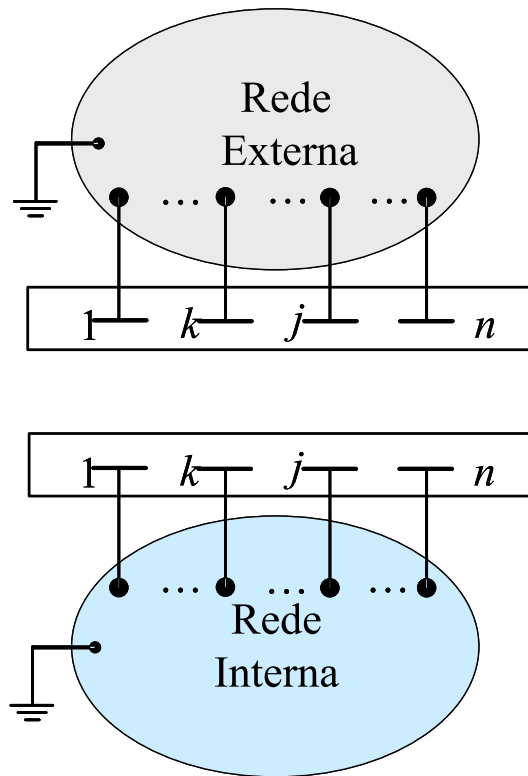


Figura 11: Rede interna e rede externa separadas pelo algoritmo de vizinhanças

Como terceiro e último objetivo do algoritmo, neste caso com aplicação, por exemplo, ao estudo de transitórios eletromagnéticos, tem-se a opção de se realizar o cálculo do equivalente convencional da rede externa, que foi separada da rede interna. Utilizando-se esta opção, as impedâncias primitivas representando o equivalente são calculadas e serão criados equipamentos no arquivo da rede interna para adicionar os efeitos destas impedâncias. Esse sistema reduzido, rede interna em conjunto com o equivalente, é apresentado na Figura 12. O cálculo do equivalente convencional é tema do próximo capítulo.

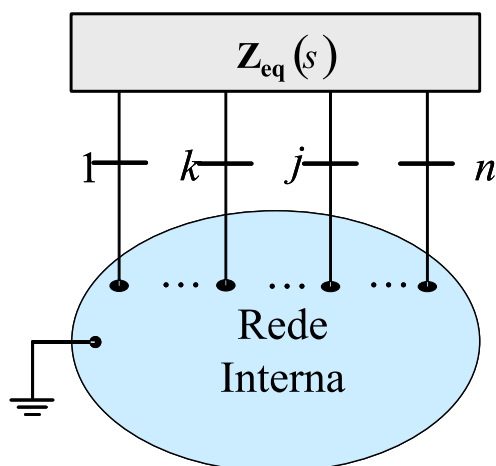


Figura 12: Sistema reduzido representado pelo equivalente acoplado à rede interna

Resumindo, tem-se como produtos do algoritmo de vizinhanças:

- Um arquivo de dados no formato do programa HarmZs com os dados da rede interna.
- Um arquivo de dados, também no formato do programa HarmZs, com os dados da rede externa que é utilizado para se calcular o equivalente convencional (que também será utilizado no cálculo do equivalente modal).
- Tem-se a opção de incluir o efeito da rede externa na rede interna, através do cálculo do equivalente convencional pela criação de equipamentos representando as impedâncias primitivas.

Os tempos de processamento colhidos para o algoritmo de vizinhanças para o sistema de IEEE14 Barras são desprezíveis, e por isto não puderam ser aferidos. Para um sistema de grande porte, composto de aproximadamente 7000 barras e 10000 circuitos série, o tempo de processamento para encontrar o número máximo de vizinhanças a partir de uma barra de interesse, sem fazer a separação entre rede interna e externa, foi 2,981 segundos, para um total de 39 vizinhanças. O tempo de processamento para encontrar três vizinhanças a partir desta mesma barra e separar a rede completa em rede interna e externa foi de 0,686 segundos. Se for incluído o cálculo do equivalente convencional, inclusive com adição dos equipamentos representando as primitivas ao arquivo da rede interna no formato do programa HarmZs, o tempo de processamento fica em 1,872 segundos.

Capítulo 3 – Equivalentes de Redes Conconvencionais

3.1 Introdução

Em estudos de transitórios eletromagnéticos, devido à dificuldade de implementação de equivalentes dinâmicos, é comum utilizar equivalentes de redes calculados a partir das impedâncias de curto-circuito na frequência fundamental. Esses equivalentes são chamados de equivalentes convencionais, equivalentes de curto-circuito ou até mesmo equivalentes de frequência fundamental.

Além desta dificuldade de utilização de equivalentes dinâmicos, soma-se o fato dos bancos de dados das redes de grande porte estarem modelados, na sua maioria, para programas de curto-circuito ou fluxo de potência.

Por esses motivos, torna-se importante o desenvolvimento de uma ferramenta que sirva de auxílio nos estudos de transitórios eletromagnéticos, onde pode-se definir a área interna, que inclui a área de interesse, e, após essa definição, fazer o cálculo dos equivalentes de redes convencionais. Mais importante ainda que isso, é criar uma automatização deste procedimento, onde já se pode ter uma indicação de até onde se deve definir o que fará parte da rede interna e o que fará parte da rede externa (que será substituída por um equivalente).

Nesse capítulo será apresentado o cálculo dos equivalentes de rede convencionais implementado no programa HarmZs em uma versão não comercial. Esses equivalentes serão sintetizados em circuitos RLC série que serão representados no código próprio de equipamentos do programa HarmZs, o código DEQP. Incluindo estes equivalentes calculados à rede interna, tem-se o sistema reduzido.

Serão apresentadas algumas comparações entre o cálculo dos equivalentes realizado pelos programas Anafas e HarmZs. Também serão apresentadas comparações feitas no

programa HarmZs entre o modelo completo e o modelo reduzido (rede interna + equivalentes).

Por fim, será apresentado um critério de automatização para definição da área interna utilizando esses equivalentes convencionais.

3.2 Cálculo dos Equivalentes Convencionais

Os equivalentes convencionais são calculados por meio das impedâncias nodais próprias e de transferências vistas das barras de fronteira para a frequência fundamental. Considerando o cálculo feito pelo HarmZs, as barras de fronteira são oriundas do algoritmo de vizinhanças elétricas. A rede onde estes cálculos são realizados é a rede externa, que foi separada de rede interna também através do algoritmo de vizinhanças elétricas.

A impedância nodal própria é a relação entre a tensão resultante em uma barra devida a uma injeção de corrente nesta mesma barra. A impedância nodal de transferência é a relação entre a tensão resultante em uma barra devida a uma injeção de corrente em outra barra. O valor da corrente injetada é de 1 pu, de modo que o valor da impedância é o próprio valor da tensão resultante.

A partir das impedâncias nodais próprias e de transferência das barras de fronteira, pode-se montar a matriz de impedâncias nodais \mathbf{Z}_{eq} . Esta matriz \mathbf{Z}_{eq} tem dimensão do número de barras de fronteira N_f .

$$\mathbf{Z}_{eq} = \begin{bmatrix} z_{1,1} & \cdots & z_{1,j} & \cdots & z_{1,N_f} \\ \vdots & \ddots & \vdots & & \vdots \\ z_{i,1} & \cdots & z_{i,j} & \cdots & z_{i,N_f} \\ \vdots & & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{N_f,1} & \cdots & z_{N_f,j} & \cdots & z_{N_f,N_f} \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

A matriz admitância nodal \mathbf{Y}_{eq} pode ser determinada como sendo o inverso da matriz de impedância \mathbf{Z}_{eq} como apresentado na equação (3.2).

$$\mathbf{Y}_{\text{eq}} = \mathbf{Z}_{\text{eq}}^{-1} \quad (3.2)$$

A partir da matriz de admitância nodal das barras de fronteira, é possível calcular as impedâncias primitivas que serão sintetizadas como equipamentos em derivação e entre barras. Estes equipamentos serão conectados à rede interna nas barras de fronteira.

A representação da impedância (ou admitância) na forma de um modelo primitivo descreve as características elétricas dos componentes da rede. O modelo primitivo não precisa de, e não fornece, nenhuma informação sobre como os componentes estão conectados para formar a rede. O comportamento de todos os componentes atuando conjuntamente como um sistema é dado pela matriz de admitância nodal que é baseada na análise nodal das equações da rede [45].

A seguir está apresentada a matriz admitância nodal da rede externa vista das barras de fronteira para um sistema exemplo com 3 barras de fronteira. Foi escolhido, como exemplo, 3 barras de fronteira para facilitar o entendimento do cálculo das impedâncias primitivas a partir das admitâncias nodais.

$$\mathbf{Y}_{\text{eq}} = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & y_{13} \\ y_{21} & y_{22} & y_{23} \\ y_{31} & y_{32} & y_{33} \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

A matriz \mathbf{Y}_{eq} pode ser escrita em função das admitâncias equivalentes primitivas localizadas nas barras de fronteira, conforme apresentado na Figura 13.

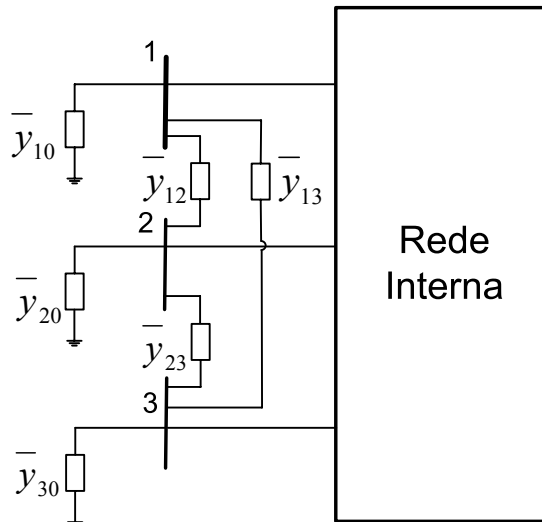


Figura 13: Admitâncias primitivas ligadas às barras de fronteira

Tem-se, pelo algoritmo de montagem da matriz de admitâncias nodal, apresentado na equação (2.1), que a posição y_{11} da matriz \mathbf{Y}_{eq} é dada pelo somatório das admitâncias primitivas que chegam à barra de fronteira número 1:

$$y_{11} = \bar{y}_{10} + \bar{y}_{12} + \bar{y}_{13} \quad (3.4)$$

A posição y_{12} , é dada pelo negativo da admitância primitiva que liga as barras de fronteira 1 e 2:

$$y_{12} = -\bar{y}_{12} \quad (3.5)$$

De (3.5) tem-se que:

$$\bar{y}_{12} = -y_{12} \quad (3.6)$$

Substituindo (3.6) em (3.4), tem-se:

$$y_{11} = \bar{y}_{10} - y_{12} - y_{13} \quad (3.7)$$

Rearranjando (3.7), tem-se:

$$\bar{y}_{10} = y_{11} + y_{12} + y_{13} \quad (3.8)$$

Generalizando, tem-se para a admitância primitiva entre barras:

$$\bar{y}_{ij} = -y_{ij} \quad (3.9)$$

Do mesmo modo, tem-se para a admitância primitiva para terra:

$$\bar{y}_{i0} = y_{i1} + y_{i2} + y_{i3} + \dots + y_{in} \quad (3.10)$$

Cabe observar que a existência de transformadores defasadores na rede externa implicarão em um erro no valor calculado das admitâncias primitivas pois a matriz de admitância nodal Y_{eq} não pode ser representada como uma matriz de valores complexos [49]. Caso o valor do erro seja significativo, a solução pode ser aumentar a rede interna passando a representar este transformador nesta rede e não na rede externa, que será substituída pelo equivalente.

Uma vez que a impedância primitiva é a inverso da admitância primitiva, é fácil determinar os equipamentos entre barras e para a terra que serão criados no programa HarmZs no código de equipamentos DEQP para sintetizar os equivalentes em circuitos RLC.

As impedâncias primitivas entre barras e para terra são dadas, respectivamente, pelas equações (3.11) e (3.12):

$$\bar{z}_{ij} = \frac{1}{\bar{y}_{ij}} \quad (3.11)$$

$$\bar{z}_{i0} = \frac{1}{\bar{y}_{i0}} \quad (3.12)$$

No código DEQP do programa HarmZs, os dados dos equipamentos são compostos pelos valores da resistência, reatância indutiva e capacitância (ou susceptância capacitiva caso os dados estejam em pu) que podem estar conectados em série ou paralelo. Estes equipamentos podem conectar duas barras ou serem ligados em derivação.

A seguir serão apresentadas as equações para associar as impedâncias primitivas aos equipamentos do código de execução DEQP. Caso estes equipamentos conectem duas barras, os índices i e j representarão genericamente as barras DE e PARA. Se o equipamento for representar uma impedância primitiva em derivação, o índice i representará a barra DE e o índice j deve ser “0”, pois no programa HarmZs entende-se que o valor “0” representa a barra de referência.

De acordo com (3.13), associa-se a parte real da impedância primitiva a um resistor e a parte imaginária a uma reatância.

$$\bar{z}_{ij} = r_{ij} + jx_{ij} = \Re(\bar{z}_{ij}) + j\Im(\bar{z}_{ij}) \quad (3.13)$$

Logo, o resistor que representa a parte real da impedância primitiva é dado pela equação (3.14). O valor desse resistor pode ser negativo.

$$r_{ij} = \Re(\bar{z}_{ij}) \quad (3.14)$$

A parte imaginária da impedância primitiva é dada pela equação (3.15) e também pode ter valor positivo ou negativo.

$$x_{ij} = \Im(\bar{z}_{ij}) \quad (3.15)$$

Caso a parte imaginária da impedância primitiva seja positiva, será criado um equipamento RL série. O resistor será dado por (3.14) e a reatância indutiva por (3.15).

Caso a parte imaginária da impedância primitiva seja negativa, será criado um equipamento RC série. O resistor será dado por (3.14). O programa HarmZs utiliza os dados em pu para realizar os cálculos internos. O valor do capacitor em pu é dado por (3.16) onde ω é dado por $2\pi f$, onde f é a frequência fundamental:

$$C_{ij} = \frac{1}{\omega x_{ij}} = \frac{1}{\omega \Im(\bar{z}_{ij})} \quad (3.16)$$

No código DEQP, os dados podem ser apresentados em unidades elétricas (UE) ou em pu. Caso estejam em unidades elétricas, o resistor e a reatância indutiva estarão em ohms e a capacitância estará em μF . Suponha que todos os valores das equações anteriores estejam em pu. Logo, devem ser passados para unidades elétricas caso esta seja a unidade escolhida. Para obter o valor do resistor (\hat{r}_{ij}) e da reatância indutiva (\hat{x}_{ij}) em ohms, basta multiplicá-las pela impedância base, Z_{BASE} , como apresentado em (3.17) e (3.18). O valor da capacitância (\hat{C}_{ij}) em μF é dado por (3.19):

$$\hat{r}_{ij} = r_{ij} Z_{BASE} \quad (3.17)$$

$$\hat{x}_{ij} = x_{ij} Z_{BASE} \quad (3.18)$$

$$\hat{C}_{ij} = \frac{C_{ij}}{Z_{BASE}} = \frac{1}{\omega \Im(\bar{z}_{ij}) Z_{BASE}} \quad (3.19)$$

Caso os elementos estejam em pu, o resistor e a reatância indutiva já estarão em pu e parte capacitiva será representada pela susceptância capacitiva. O valor da susceptância informado no programa HarmZs é dado por (3.20):

$$b_{ij} = \Im(\bar{y}_{ij}) = \omega C_{ij} = \frac{1}{\Im(\bar{z}_{ij})} \quad (3.20)$$

Além do cálculo do equivalente, o algoritmo implementado sintetiza as impedâncias primitivas em circuitos RL ou RC série e já cria o código de execução DEQP com os elementos entre barras e em derivação que representam os equivalentes convencionais. Este código de execução DEQP será criado no arquivo texto que representa a rede interna.

A parte ativa do equivalente, essencial para estudos de transitórios eletromagnéticos, pode ser obtida utilizando o teorema de Norton. Detalhes da inclusão da parte ativa podem ser verificados em [32].

3.3 Comparação entre os programas HarmZs e Anafas

Para validar o valor dos circuitos RLC criados no programa HarmZs com o objetivo de sintetizar os equivalentes convencionais, neste item é feita uma comparação com o programa Anafas [47] do Cepel.

O programa Anafas é um programa de análise de curto circuito em regime permanente e possui a ferramenta de cálculo de equivalentes de curto-circuito. Nesta comparação, o Anafas é utilizado integrado ao programa Sapre [48], também do Cepel, um ambiente que permite executar o Anafas através de uma interface gráfica.

O programa Anafas faz cálculos de equivalentes convencionais das sequências positiva e zero. Como os equivalentes de redes implementados no HarmZs, foco deste trabalho, são de sequência positiva, neste item, serão comparados somente os valores dos equivalentes de sequência positiva.

No Anafas, as impedâncias primitivas dos equivalentes de sequência positiva para a terra são criadas como geradores ou elementos shunt de barra, dependendo se há ou não injeção de corrente na barra em que o elemento se conectará. As impedâncias primitivas dos equivalentes série de sequência positiva podem ser criadas como linhas de transmissão ou transformadores. No caso de barras de fronteira com níveis de tensão diferentes, o programa criará o equivalente série entre essas barras como um transformador.

O critério de escolha da rede interna no Anafas pode ser feito selecionando barras através do diagrama unifilar ou especificando as barras de interesse por meio de uma interface gráfica própria do programa Anafas. O critério de escolha da rede interna utilizado nesta comparação no HarmZs é o de vizinhanças elétricas onde são informados uma barra piloto e o número de vizinhanças até onde se deseja considerar a área interna.

Serão utilizados dois sistemas elétricos para fazer a comparação entre os resultados do equivalente de sequência positiva produzidos pelo HarmZs e pelo Anafas. O primeiro sistema elétrico é um sistema teste de somente 5 barras, criado para que o cálculo dos equivalentes possa ser realizado manualmente com facilidade. A partir deste sistema

elétrico será rapidamente apresentado o procedimento para obtenção dos equivalentes através da interface gráfica do programa Sapre. O segundo sistema elétrico utilizado é o IEEE 14 Barras, quem vem sendo utilizado nesta dissertação.

3.3.1 Sistema Elétrico Teste de 5 Barras

Na Figura 14 é apresentado o diagrama unifilar do sistema elétrico teste de 5 barras, o primeiro sistema teste que será utilizado para realizar a comparação entre os cálculos dos equivalentes de curto-circuito para sequência positiva gerados pelo HarmZs e pelo Anafas. O arquivo de dados elétricos no formato do programa Anafas do sistema de 5 barras é apresentado na Figura 15.

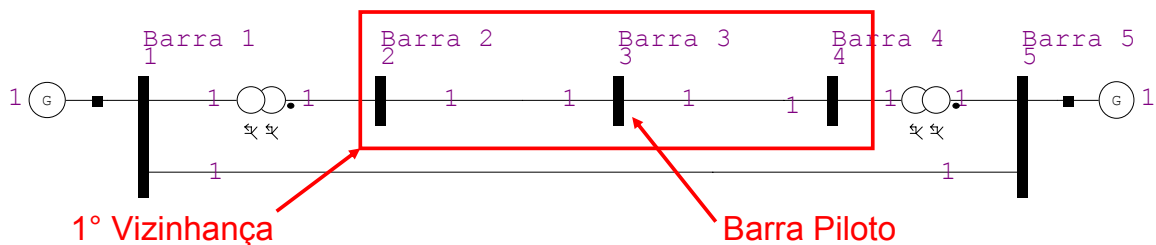


Figura 14: Diagrama unifilar do sistema elétrico exemplo de 5 barras utilizado para comparar os resultados dos cálculos dos equivalentes convencionais gerados pelo HarmZs e pelo Anafas

```

01 (------Titulo do Caso-----)
02 TITU
03 L Caso 5 Barras
04 DBAR
05 (------Dados de Barra-----)
06 (NB CEM BN VPRE ANG VBAS DISJUN DDMMAAADMMMAAA IA SA V
07 (------)
08 1 Barra 1 13.8 1
09 2 Barra 2 138 1
10 3 Barra 3 138 1
11 4 Barra 4 138 1
12 5 Barra 5 13.8 1
13 99999
14 DCIR
15 (------Dados de Circuitos-----)
16 (BF CE BT NCT R1 X1 R0 XO CN S1 S0 TAP TB TCIA DEFE KM
17 (------)
18 1 0 1G 100 100 1
19 5 0 1G 100 100 1
20 1 5 1L 100 100 1
21 2 3 1L 100 100 1
22 3 4 1L 100 100 1
23 1 2 1T 100 100 1
24 4 5 1T 100 100 1
25 99999
  
```

Figura 15: Dados do sistema elétrico exemplo de 5 Barras no formato do programa Anafas

Este arquivo de dados foi montado para que fosse fácil realizar os cálculos das impedâncias primitivas, mesmo sem a utilização de nenhum programa de cálculo de equivalentes. O sistema elétrico de 5 barras não possui carregamento, é um sistema puramente indutivo e todas as reatâncias são iguais a 1 pu (100%). As impedâncias de sequência zero, necessárias para o cálculo do equivalente de sequência zero pelo Anafas, serão consideradas iguais às impedâncias de sequência positiva.

Para que se tenha a mesma rede interna nos dois programas, esta rede foi definida no HarmZs utilizando o critério de vizinhanças elétricas. As barras que foram definidas como fazendo parte da rede interna foram escolhidas como as barras que serão retidas no programa Anafas.

Na definição da rede interna no programa HarmZs, a barra piloto escolhida é a 3 e foi escolhido reter todas as barras e elementos até a primeira vizinhança.

Logo, é fácil visualizar na Figura 14 as barras da rede interna. Estas barras são as de número 2, 3 e 4. As barras de fronteira são as barras 2 e 4 e nessas barras é que serão conectadas as impedâncias primitivas oriundas do cálculo dos equivalentes de curto-circuito de sequência positiva na frequência fundamental.

As barras da rede externa são 1, 2, 4, e 5. As barras 2 e 4 são as barras de fronteira e pertencem às duas redes.

A seguir é apresentada uma interface do Anafas sendo executado através do Sapre. Pode-se visualizar, pela Figura 16, o procedimento para se chegar à opção de cálculo dos equivalentes no Anafas. Essa opção de cálculo é apresentada na Figura 17, onde pode-se observar o conjunto de barras que serão retidas na rede interna. Esse conjunto é formado pelas barras 2, 3 e 4, o mesmo conjunto obtido pelo critério de vizinhanças executado no HarmZs, onde a barra escolhida como piloto foi a barra 3 e o número de vizinhanças foi 1.

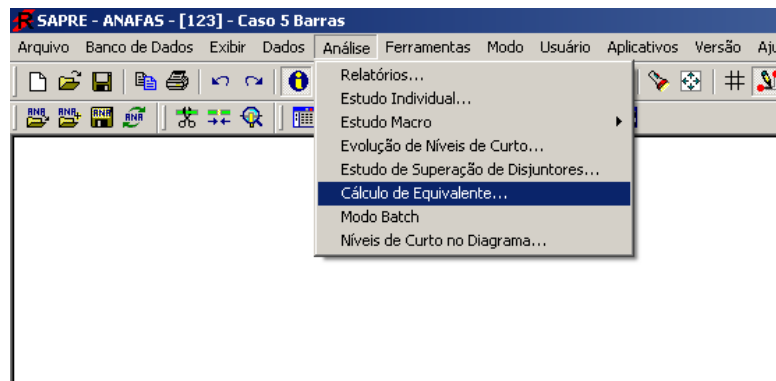


Figura 16: Interface do programa Sapre utilizada para se executar o programa Anafas

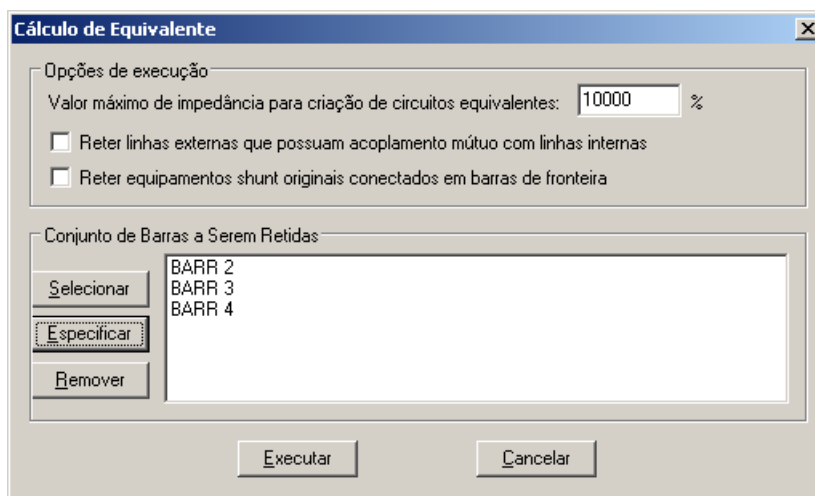


Figura 17: Interface para execução de equivalentes de redes no programa Anafas

Na Figura 18 é apresentado o arquivo do Anafas, já com os equivalentes criados. Pode-se observar as 3 barras que foram retidas (2, 3 e 4) e os elementos criados ligados entre as barras de fronteira (2 e 4) e entre estas e a referência. Esses elementos criados são destacados com um retângulo vermelho. Outra indicação que esses elementos foram criados a partir de um cálculo de equivalentes de redes é que pertencem à área 998. Note que todos os elementos foram criados no código de circuitos DCIR. Os outros circuitos que não foram marcados são os que pertencem à rede interna.

Logo, foram criados dois circuitos representando os equivalentes para terra (shunt nas barras 2 e 4) e um equipamento série entre as barras 2 e 4. Vale lembrar que esses valores estão em por cento. Vale relembrar que os dados a serem comparados com o HarmZs são os de sequência positiva. Logo, os valores de R1 e X1 da Figura 18 são os que serão utilizados.

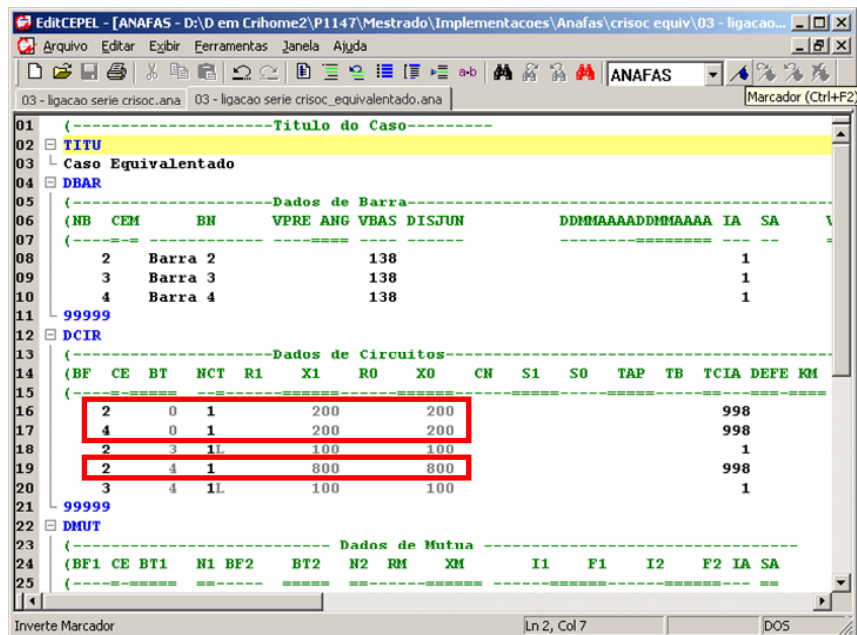


Figura 18: Dados dos equivalentes de 60 Hz calculados pelo programa Anafas

De posse dos valores das impedâncias primitivas calculadas pelo programa Anafas, partiu-se para realizar o mesmo cálculo no programa HarmZs. Antes de apresentar os resultados, o cálculo das impedâncias primitivas será apresentado didaticamente, passo a passo.

Como observado anteriormente, o cálculo de equivalente de redes é feito a partir da rede externa. A rede externa é obtida retirando-se do sistema completo os elementos que fazem parte da rede interna. Pode-se notar, a partir da Figura 14, que a rede externa é formada retirando-se da rede completa a linha que conecta as barras 2 e 3 e a linha que conecta as barras 3 e 4. A barra 3 também será retirada, pois faz parte da rede interna e não é uma barra de fronteira. Na Figura 19 é apresentado o diagrama unifilar da rede externa.

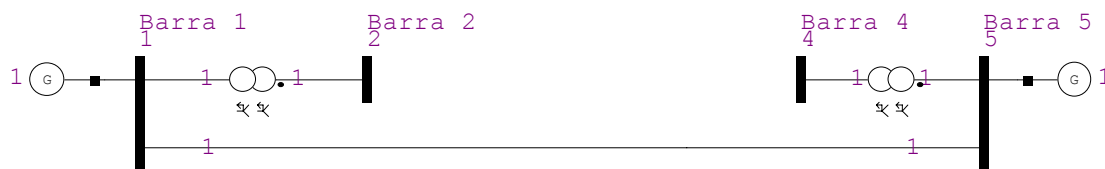


Figura 19: Rede externa utilizada no cálculo do equivalente de rede convencional

O primeiro passo para o cálculo do equivalente, e que não foi mostrado nas equações anteriores, é como calcular as impedâncias na frequência fundamental próprias e de

transferências das barras de fronteira. Para calcular estas impedâncias, é necessário utilizar a matriz de admitâncias nodais da rede externa completa.

O procedimento para montagem da matriz de admitâncias nodais é apresentado em (2.1). A matriz de admitâncias nodais da rede externa do sistema em questão é apresentada em (3.21) e tem a dimensão do número de barras da rede externa, que é igual a 4. Os números externos das barras do sistema elétrico exemplo são apresentados nos retângulos vermelhos para facilitar o entendimento da ordem de montagem da matriz.

$$\mathbf{Y}_{\text{barra}}^{\text{Rede Externa}} = \begin{bmatrix} -j3 & j1 & 0 & j1 \\ j1 & -j1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -j1 & j1 \\ j1 & 0 & j1 & -j3 \end{bmatrix} \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 4 \\ 5 \end{matrix} \quad (3.21)$$

1 2 4 5

A matriz de impedâncias nodais da rede externa completa pode ser obtida como apresentado em (3.22).

$$\mathbf{Z}_{\text{barra}}^{\text{Rede Externa}} = (\mathbf{Y}_{\text{barra}}^{\text{Rede Externa}})^{-1} = \begin{bmatrix} j\frac{2}{3} & j\frac{2}{3} & j\frac{1}{3} & j\frac{1}{3} \\ j\frac{2}{3} & \boxed{j\frac{5}{3}} & \boxed{j\frac{1}{3}} & j\frac{1}{3} \\ j\frac{1}{3} & \boxed{j\frac{1}{3}} & \boxed{j\frac{5}{3}} & j\frac{2}{3} \\ j\frac{1}{3} & j\frac{1}{3} & j\frac{2}{3} & j\frac{2}{3} \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

Da matriz de impedâncias nodais da rede externa extrai-se, nas posições relacionadas às barras de fronteiras, os valores necessários para a montagem da matriz \mathbf{Z}_{eq} . No caso do sistema exemplo, as barras de fronteiras são as barras 2 e 4. Na matriz de impedâncias nodais dada em (3.22), as barras 2 e 4 estão indexadas, respectivamente, nas posições relativas às linhas e colunas 2 e 3. Logo, extrai-se desta matriz os valores das posições (2,2) e (3,3) representando as impedâncias próprias das barras de fronteira (marcadas com retângulos vermelhos) e as posições (2,3) e (3,2) representando as impedâncias de transferências entre as barras de fronteira (marcadas com retângulos azuis). Em (3.23) é

apresentada a matriz \mathbf{Z}_{eq} com os valores das impedâncias próprias e de transferências das barras de fronteira.

$$\mathbf{Z}_{\text{eq}} = \begin{bmatrix} j\frac{5}{3} & j\frac{1}{3} \\ j\frac{1}{3} & j\frac{5}{3} \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

Conforme apresentado em (3.2), a matriz \mathbf{Y}_{eq} pode ser obtida a partir da matriz \mathbf{Z}_{eq} . Esta matriz \mathbf{Y}_{eq} é apresentada em (3.24).

$$\mathbf{Y}_{\text{eq}} = (\mathbf{Z}_{\text{eq}})^{-1} = \begin{bmatrix} -j\frac{5}{8} & j\frac{1}{8} \\ j\frac{1}{8} & -j\frac{5}{8} \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

As admitâncias primitivas, que se referem às admitâncias dos elementos conectados entre as barras de fronteiras ou entre esta e a referência, podem ser extraídas através de manipulações da matriz \mathbf{Y}_{eq} de acordo com (3.9) e (3.10). Os valores das impedâncias primitivas podem ser obtidas de acordo com (3.11) e (3.12) e são apresentadas em (3.25), onde o índice 0 é utilizado para representar as impedâncias primitivas que estão ligadas para terra.

$$\begin{aligned} \bar{z}_{20} &= \frac{1}{\bar{y}_{20}} = \frac{1}{y_{11} + y_{12}} = j2 \\ \bar{z}_{40} &= \frac{1}{\bar{y}_{40}} = \frac{1}{y_{21} + y_{22}} = j2 \\ \bar{z}_{24} &= \frac{1}{\bar{y}_{24}} = \frac{1}{-y_{12}} = j8 \end{aligned} \quad (3.25)$$

Pode-se observar que os valores das impedâncias primitivas encontrados são os mesmos calculados pelo programa Anafas e estão apresentados na Figura 18.

O programa HarmZs executa os mesmos procedimentos anteriormente descritos para a construção dos equivalentes de redes convencionais. Como obter os valores das impedâncias primitivas será apresentado a seguir.

A interface apresentada na Figura 20 foi desenvolvida tanto para cálculo de equivalentes convencionais quanto para equivalentes modais. Neste item serão feitas colocações somente referentes à utilização da mesma para o cálculo de equivalentes convencionais. De modo análogo ao Anafas, também é necessário definir as barras e elementos da rede interna. A rede interna será separada da rede externa e no passo seguinte representada por seu equivalente. Como observado anteriormente, essa definição será feita através do critério de vizinhanças elétricas.

A barra piloto que será informada para o programa HarmZs é a barra 3. Será considerada como rede interna a primeira vizinhança da barra 3. Nota-se então com esse procedimento que a rede interna é a mesma considerada no programa Anafas. Foi escolhida a opção de, além de definir a rede interna a partir da rede completa, também calcular os equivalentes convencionais que serão alocados nas barras de fronteira.

Ao acionar o botão “Definir Rede Interna”, o programa já separa as redes em interna e externa, utiliza a rede externa para calcular os equivalentes e anexa as impedâncias primitivas calculadas à rede interna. As duas redes são salvas no formato do programa e ficam disponíveis para as análises pertinentes.

Na Figura 21 é apresentado o arquivo de dados da rede interna onde, em virtude da escolha da opção de cálculo dos equivalentes convencionais, as impedâncias primitivas conectadas às barras de fronteira já estão anexadas aos dados da rede interna. Estas impedâncias estão apresentadas como equipamentos RLC disponíveis sobre o código DEQP e estão marcadas com um retângulo vermelho. Vale lembrar que os valores apresentados no HarmZs estão em por unidade.

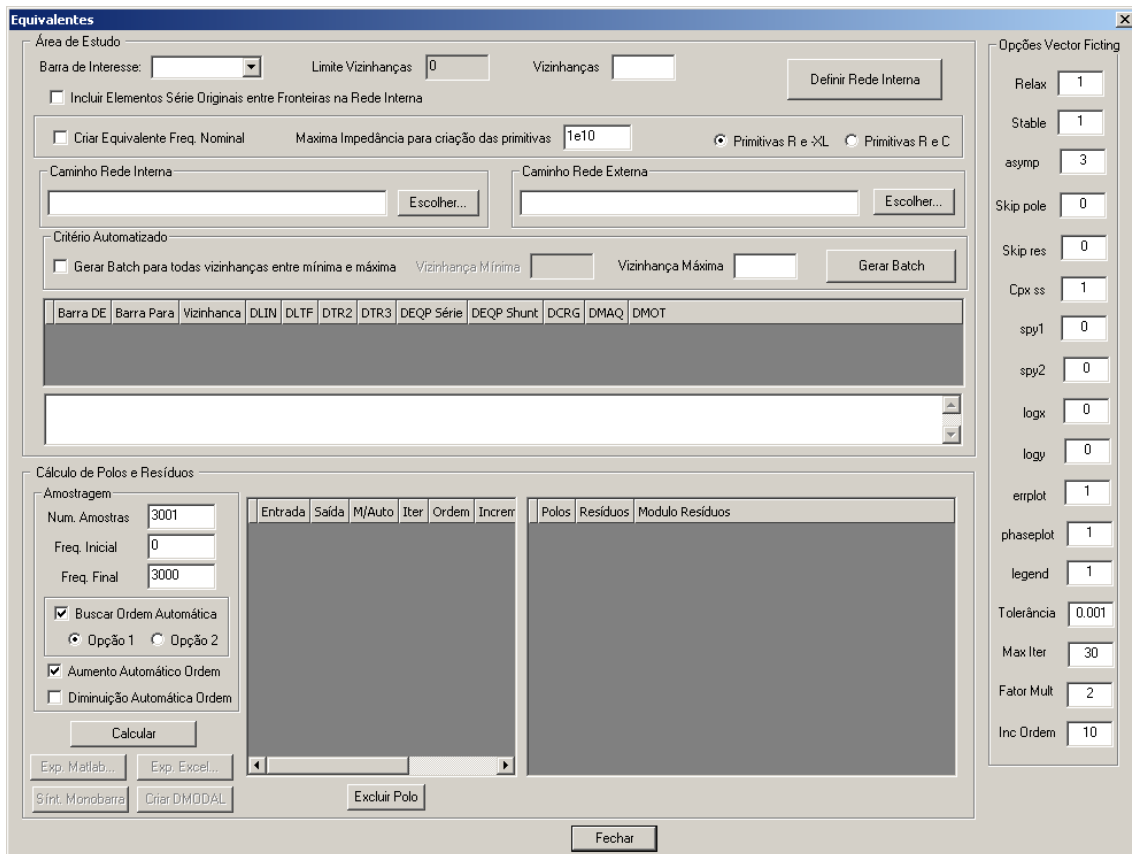


Figura 20: Interface gráfica do HarmZs para comparação com o programa Anafas

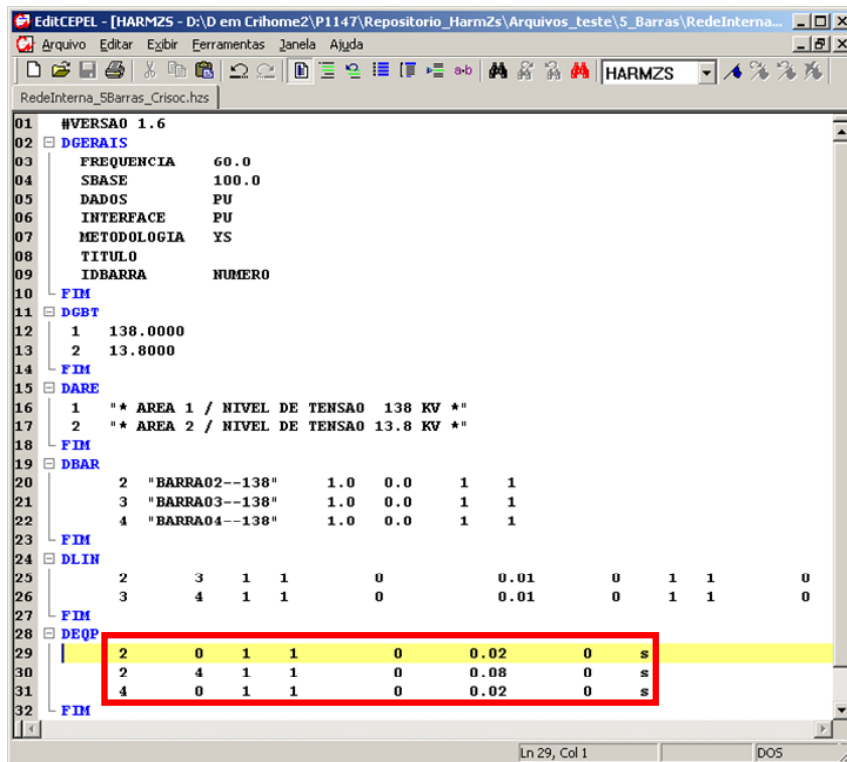


Figura 21: Dados dos equivalentes de 60 Hz calculados pelo programa HarmZs

Na Tabela 9, a título de apresentação da comparação de resultados, podem ser visualizados os valores dos equivalentes calculados pelo programa HarmZs e Anafas, onde os dados do Anafas estão nesta tabela apresentados em pu e não mais em %. Pode-se observar nesta tabela que os valores calculados pelo Anafas e pelo HarmZs são os mesmos.

Tabela 9: Comparação dos equivalentes convencionais calculados pelo Anafas e pelo HarmZs para o sistema elétrico de 5 barras

Barra De	Barra Para	Anafas		HarmZs	
		Resistência (pu)	Reatância (pu)	Resistência (pu)	Reatância (pu)
2	0	0	0,02	0	0,02
4	0	0	0,02	0	0,02
2	4	0	0,02	0	0,02

3.3.2 Sistema Elétrico IEEE 14 Barras

Na seção anterior foi realizada a comparação entre os equivalentes convencionais calculados pelo HarmZs e pelo Anafas para o sistema de pequeno porte de 5 barras, cujos elementos são representados somente pela parte reativa. O cunho da comparação realizada para este pequeno sistema elétrico é didático.

Nesta seção será apresentada a comparação entre os equivalentes calculados pelos programas HarmZs e Anafas para o sistema elétrico IEEE 14 Barras. O sistema elétrico de 14 barras também é um sistema de pequeno porte, mas possui a representação de vários elementos, tais como linhas de transmissão curtas e longas, transformadores, capacitor série, shunt de barra e geradores.

Para que se abrangesse um maior número de elementos na rede externa, que é a parte que será substituída pelo equivalente, optou-se por definir a rede interna como sendo a primeira vizinhança a partir da barra piloto 6. Para que a rede interna ficasse idêntica no HarmZs e no Anafas, a opção de incluir os elementos série que estão conectando barras de fronteira foi habilitada. Isso porque no Anafas esta inclusão não é opcional e sempre os elementos série conectados entre barras de fronteira são incluídos na área retida.

O diagrama unifilar do sistema IEEE 14 barras e a sua separação entre rede interna e rede externa é apresentado na Figura 22. As barras marcadas na cor amarela são as barras da primeira vizinhança. Observa-se que existe uma única diferença entre a rede interna da Figura 22 e da Figura 7, que é à inclusão da linha entre as barras 12 e 13, e se deve ao fato da habilitação da opção de inclusão de elementos série que conectam as barras de fronteira. Logo, observa-se que após a habilitação, a barra 12 não mais será considerada barra de fronteira pois ela não tem conexão com a rede externa. As barras de fronteira então serão as barras 5, 11 e 13 e nelas serão adicionados os equivalente calculados.

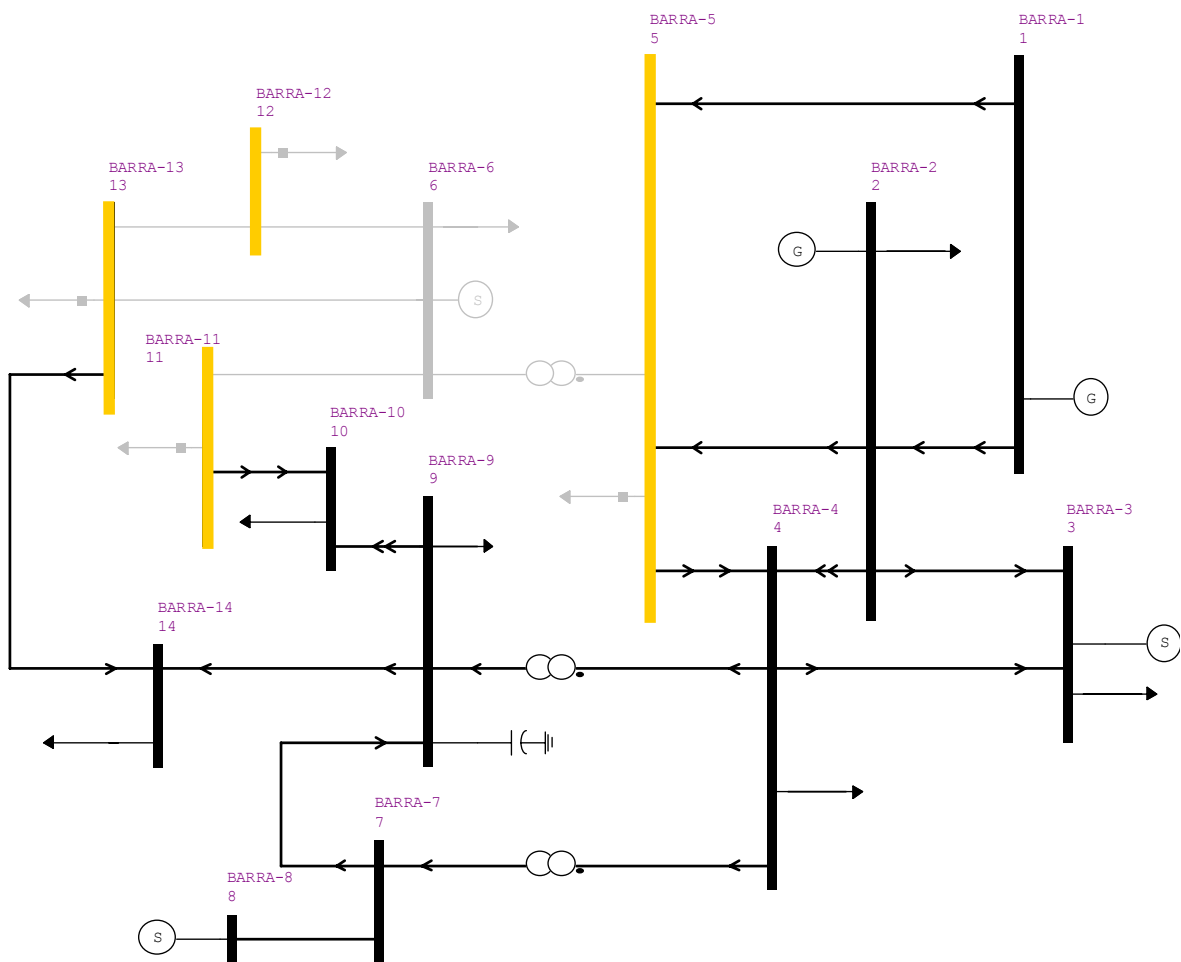


Figura 22: Rede externa para a vizinhança 1 do Sistema Elétrico IEEE 14 Barras considerando a barra 6 como piloto e a habilitação da opção de inclusão dos elementos série entre barras de fronteira para a rede interna

Foram então calculados os equivalentes de rede através do Anafas e do HarmZs. Os procedimentos para cálculo destes equivalentes foram os mesmos seguidos no teste anterior, quando se fez a comparação para o sistema exemplo de 5 barras. Os resultados

desta comparação podem ser visualizados na Tabela 10. Nesta tabela são apresentados os valores das impedâncias primitivas calculadas.

Tabela 10: Comparação dos equivalentes convencionais calculados pelo Anafas e pelo HarmZs para o sistema elétrico IEEE 14 barras

Barra De	Barra Para	Anafas		HarmZs	
		Resistência (pu)	Reatância (pu)	Resistência (pu)	Reatância (pu)
5	0	3,5136	13,705	3,558219	13,66639
5	11	12,876	79,474	12,81308	79,52245
5	13	37,801	183,61	37,66084	183,7222
11	0	99,207	168,15	99,2794	167,683
11	13	105,79	171,8	105,7902	171,7972
13	0	245,9	281,71	245,7851	281,0461

Os valores calculados pelo Anafas e pelo HarmZs encontram-se na mesma ordem de grandeza mas nota-se uma diferença entre eles em alguns casos já para a primeira casa decimal. Buscou-se então investigar o porquê desta diferença já que se esperava que os valores fossem idênticos.

Foi observado que as diferenças entre os resultados foram oriundas de diferenças no truncamento nos dados de entrada do programa Anafas. Como os dados de entrada foram fornecidos para o programa Anafas através do arquivo do tipo “.ana”, existem espaços predefinidos para os vários campos que devem ser preenchidos e por esse motivo, muitos dados devem ser truncados nos arquivos de entrada do Anafas. Como os dados elétricos foram fornecidos para o programa HarmZs através do arquivo histórico do Anarede, que é binário, esse truncamento não ocorre. Logo, um valor que no HarmZs pode ser fornecido como 0.0469899985299372, no Anafas será fornecido como 0.04699 (4.699%).

Optou-se então por truncar os valores no programa HarmZs de maneira análoga ao truncamento realizado no programa Anafas. Após novo cálculo dos equivalentes nos dois programas, os valores das impedâncias primitivas podem ser comparadas na Tabela 11.

Tabela 11: Comparação dos equivalentes convencionais calculados pelo Anafas e pelo HarmZs para o sistema elétrico IEEE 14 barras com truncamento no HarmZs

Barra De	Barra Para	Anafas		HarmZs	
		Resistência (pu)	Reatância (pu)	Resistência (pu)	Reatância (pu)
5	0	3,5136	13,705	3,513626959	13,70531902
5	11	12,876	79,474	12,87623735	79,47392341
5	13	37,801	183,61	37,80067663	183,6065567
11	0	99,207	168,15	99,20652298	168,1508312
11	13	105,79	171,8	105,7877214	171,7979077
13	0	245,9	281,71	245,8962191	281,7109417

Nota-se que os resultados do programa HarmZs coincidem em todas as casas decimais (consideradas no truncamento) com os valores informados pelo programa Anafas. Do mesmo modo que os dados de entrada foram truncados, os dados de saída (valores das impedâncias primitivas) também o são. Como no HarmZs não houve necessidade de se truncar os valores de saída, ele apresenta os resultados com maior precisão.

3.4 Comparação no HarmZs entre o Modelo Completo e o Sistema Reduzido

Quando equivalentes de redes estão sendo utilizados, a comparação entre o modelo completo e o sistema reduzido (rede interna e equivalentes) é sempre importante. Modelar uma parte da rede por um equivalente é uma saída interessante para não se modelar o sistema completo, mas saber o quanto preciso é o equivalente tem grande importância e influência direta nos resultados obtidos.

No entanto, sabe-se que não é uma tarefa fácil substituir uma rede em geral de grande porte por um equivalente convencional. O quanto irá se estender a rede interna para ter boa precisão nos resultados da área de interesse tem uma influência muito significativa e caso não se modele por completo essa parte do sistema, nem o mínimo de exatidão será alcançado.

De qualquer modo, o objetivo deste item não é comparar a influência da definição da área interna, e sim verificar a integração da rede interna com os equivalentes através da comparação da resposta em frequência do sistema completo e do sistema reduzido. E, para que essa comparação seja possível e apresente resultados exatos, várias

considerações devem ser feitas. Por ter que haver essas considerações, fica ainda mais evidente que o equivalente convencional realmente tem suas limitações e deve sempre ser usado com muita cautela.

Estas considerações são baseadas no fato de que os equivalentes convencionais só produzem resultados iguais ao do sistema completo para a frequência fundamental. No entanto, ao se desprezar todos os efeitos resistivos e capacitivos, mantendo-se apenas as modelagem das indutâncias do sistema, o equivalente será composto por indutâncias equivalentes que são iguais para todas as frequências, fazendo com que a resposta em frequência do sistema reduzido seja igual à do sistema completo.

A seguir são apresentadas estas considerações que foram feitas na rede externa para que a comparação entre as respostas em frequência do sistema completo e do modelo reduzido sejam coincidentes:

1. Rede externa sem representação das capacitâncias (rede externa sem banco de capacitores e modelo de linha curta). As capacitâncias dos equipamentos (linhas, filtros, TCSCs, compensadores estáticos, dentre outros) da rede externa devem ser desprezadas para não ressonarem com as indutâncias. Cargas com potência reativa negativa também não podem ser consideradas, pois uma carga que possua potência reativa negativa será transformada em um circuito RC (série ou paralelo, de acordo com o modelo escolhido pelo usuário). Evidentemente a resposta em frequência de um sistema com muitos capacitores associados a indutores é diferente de um circuito RLC série equivalente. Como a rede interna obviamente faz parte da rede completa, nela podem ser representadas todas as capacitâncias.
2. Rede externa puramente indutiva e sem perdas. As resistências dos equipamentos (linhas, transformadores, máquinas e equipamentos RL) também devem ser desprezadas da rede externa para não haver paralelismo entre circuitos RL série, como o apresentado na Figura 23. Como as cargas são transformadas em circuitos RLC série ou paralelo, a parte ativa deve ser desconsiderada. Note que neste paralelismo, como apresentado na Figura 23, caso R_1 ou R_2 sejam diferentes de zero, a parte real da associação ($\text{Re}(Z_{AB})$) é

dependente da frequência. Caso se represente um circuito deste tipo por um circuito equivalente RL, a parte real não será dependente da frequência. Como a rede interna obviamente faz parte da rede completa, nela podem ser representadas todas as resistências e capacitâncias.

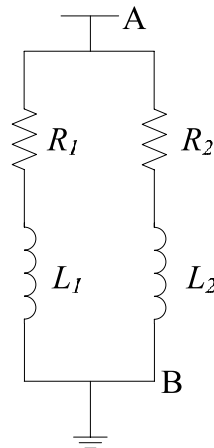


Figura 23: Paralelismo de circuitos RL série utilizado para justificar a não consideração das resistências na parte externa da rede quando se está comparando o sistema completo e o sistema reduzido

3. Não é possível modelar as linhas com o efeito da dependência com a frequência (código DLTF).
4. A variação da resistência com a frequência das linhas de transmissão definidas através do código DFCF (dados de fatores de correção da resistência com a frequência) também não pode ser representada, mesmo porque, de acordo com a consideração 2, as resistências não devem ser consideradas.
5. Não pode ser considerada a defasagem dos transformadores de 2 enrolamentos Y/Delta pois esta defasagem não pode ser fisicamente realizável utilizando circuitos monofásicos e elementos passivos, devendo ser representado por relações fasoriais. Para um modelo ser fisicamente realizável, entradas reais devem produzir saídas reais. No caso dos transformadores com tap complexo, pode ser visto em [49] que polos reais são associados a resíduos complexos e pares de polos complexos são associados a pares de resíduos complexos não conjugados, caracterizando que o modelo em questão não é fisicamente realizável. Em [49] também é apresentado um modelo de transformador com

defasagem angular que poderia ser usado para cálculo da resposta em frequência.

Na Figura 24 é apresentado o sistema elétrico utilizado para fazer a comparação entre o sistema completo e o reduzido. Este sistema elétrico é o mesmo utilizado no Capítulo 2 e neste capítulo na comparação entre o HarmZs e o Anafas. Os dados completos deste sistema estão apresentados no Anexo A.4.

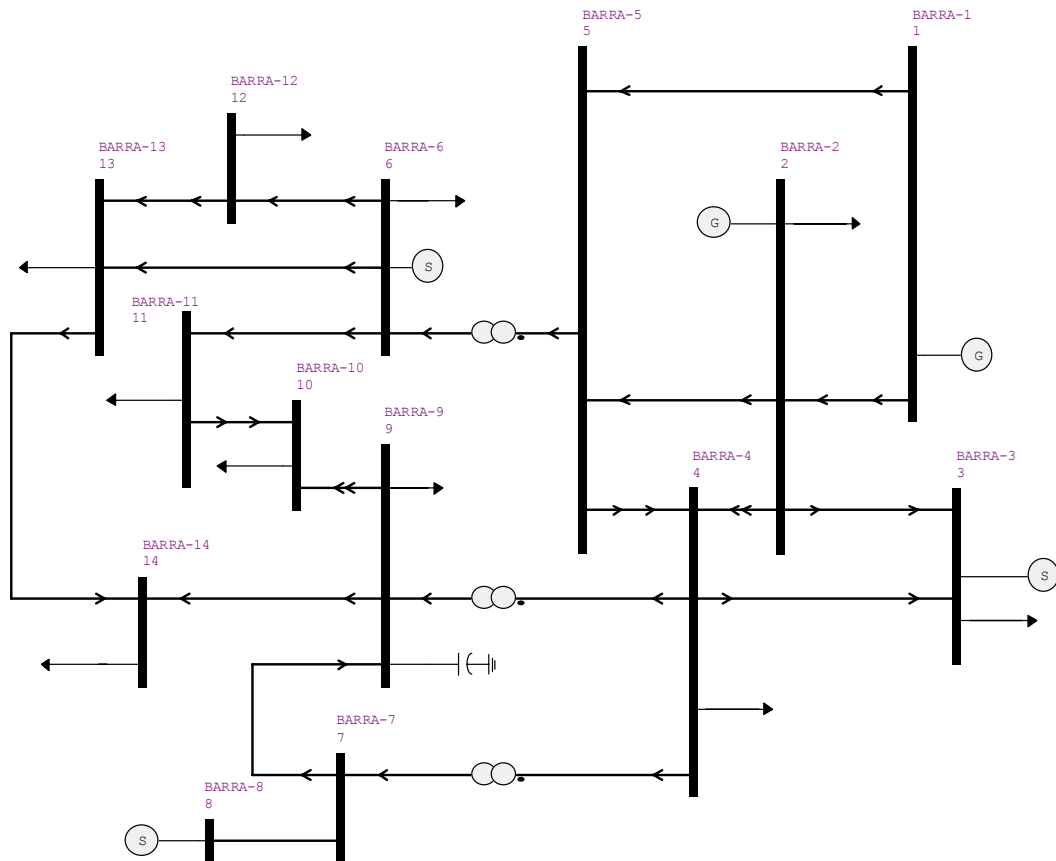


Figura 24: Sistema elétrico de 14 barras utilizado para comparar o modelo completo e o reduzido utilizando equivalentes convencionais no HarmZs

Para facilitar a aplicação deste sistema exemplo, será considerada como área de interesse a primeira vizinhança da barra 6, que é então formada pelas barras 6, 5, 11, 12 e 13. Ainda sem saber até onde se modelar a rede interna para se ter um bom equivalente, será considerado que a rede interna deve ir até a segunda vizinhança da barra 6.

Logo, para definição da rede interna, a barra 6 será considerada a piloto e essa área conterá barras e equipamentos até a segunda vizinhança. Esses parâmetros, que devem ser escolhidos pelo usuário para definição da rede interna, são os mesmos do Capítulo 2.

Na Figura 25 é novamente apresentada a rede completa, mas desta vez destacando a rede interna (elementos marcados em preto), a rede externa (elementos marcados em cinza) e as barras de fronteira (marcadas em vermelho).

Escolheu-se monitorar a resposta em frequência da barra 5, que é uma barra da área de interesse (primeira vizinhança da barra 6).

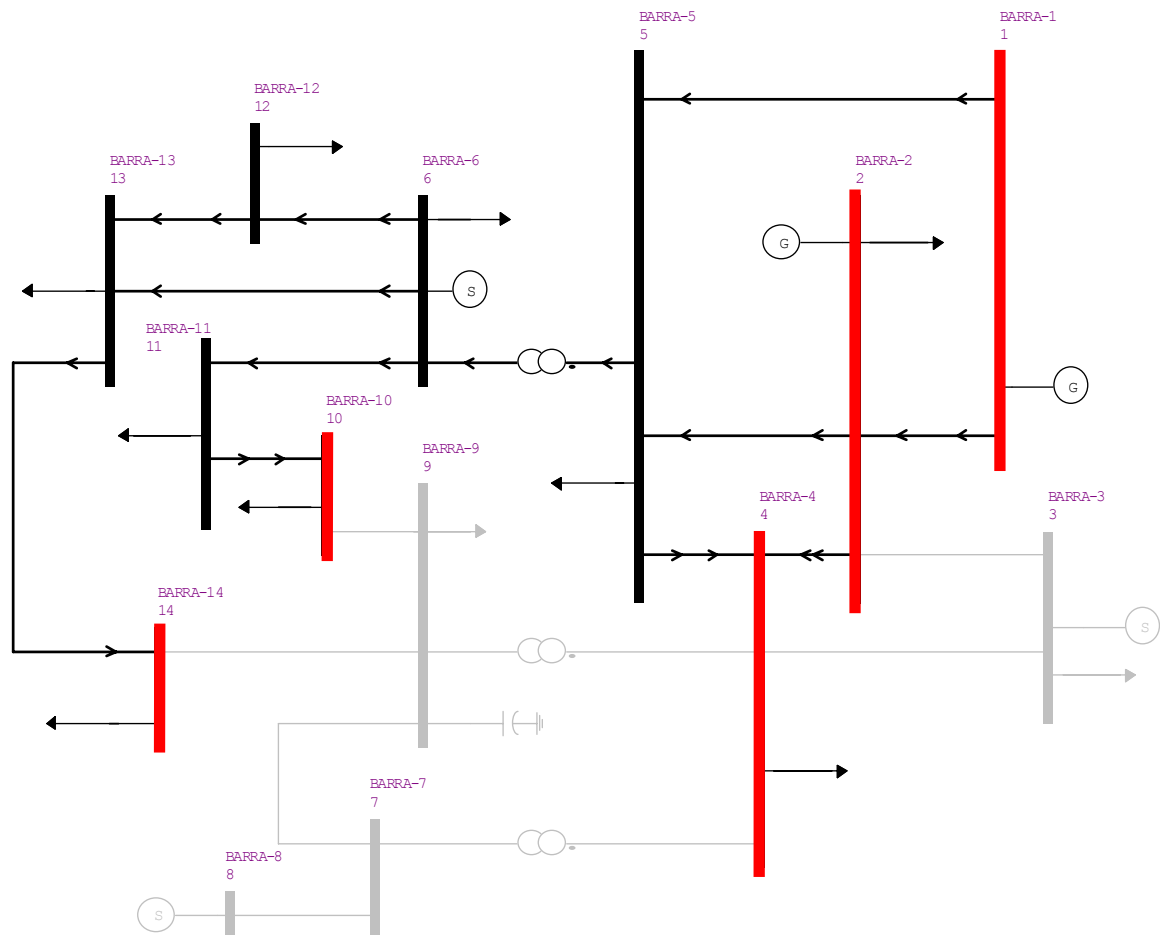


Figura 25: Sistema elétrico de 14 barras utilizado para comparar o modelo completo e o reduzido utilizando equivalentes convencionais no HarmZs destacando a rede interna, a rede externa e as barras de fronteira

Antes de se verificar a exatidão entre o modelo completo e o reduzido através da comparação da resposta em frequência, levando em conta todas as considerações, cujo objetivo é verificar a correta implementação dos cálculos do equivalente convencional no programa HarmZs, é feita a mesma comparação sem levar em conta as considerações. O intuito desta primeira comparação é mostrar a diferença entre as respostas em frequência do sistema completo e reduzido quando as considerações não são feitas e o quanto se está errando, neste sistema de pequeno porte, em considerar o equivalente convencional. Vale lembrar que esse efeito pode ser minimizado em

sistemas maiores expandindo-se a rede interna até mais vizinhanças e monitorando a resposta em frequência em barras mais distantes das fronteiras.

Logo, na Figura 26 e na Figura 27 são apresentadas as respostas em frequência (respectivamente módulo e ângulo da impedância) da barra 5 do sistema elétrico completo e do sistema reduzido. Nota-se que, quando não são feitas as considerações enumeradas, as respostas em frequência são bastante diferentes, concluindo-se que definir a área interna até a segunda vizinhança não bastaria neste caso. Evidentemente, esse é um exemplo de pequeno porte usado para aplicar os conceitos e não se justificaria utilizar equivalentes de redes.

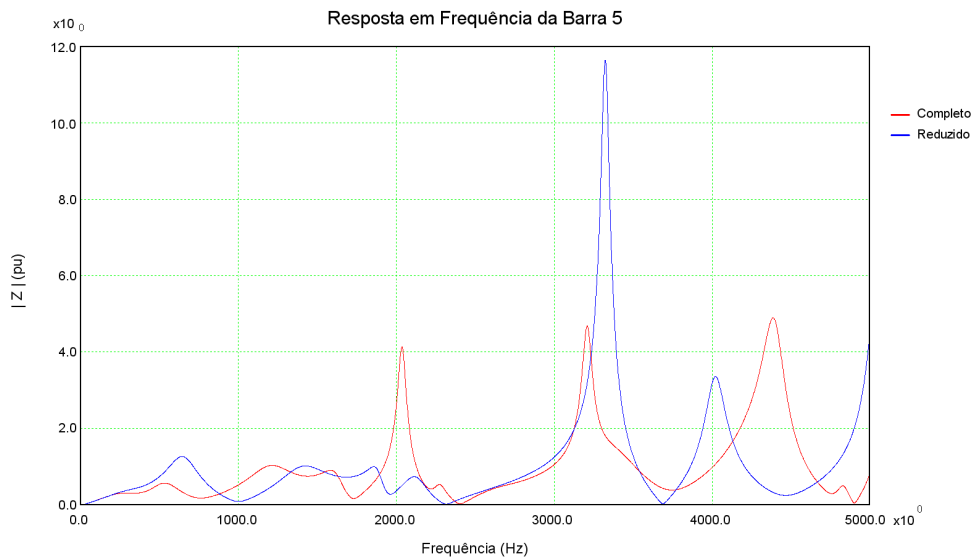


Figura 26: Comparação da resposta em frequência do módulo da impedância da barra 5 entre o sistema elétrico completo original de 14 barras e o modelo reduzido sem as considerações enumeradas

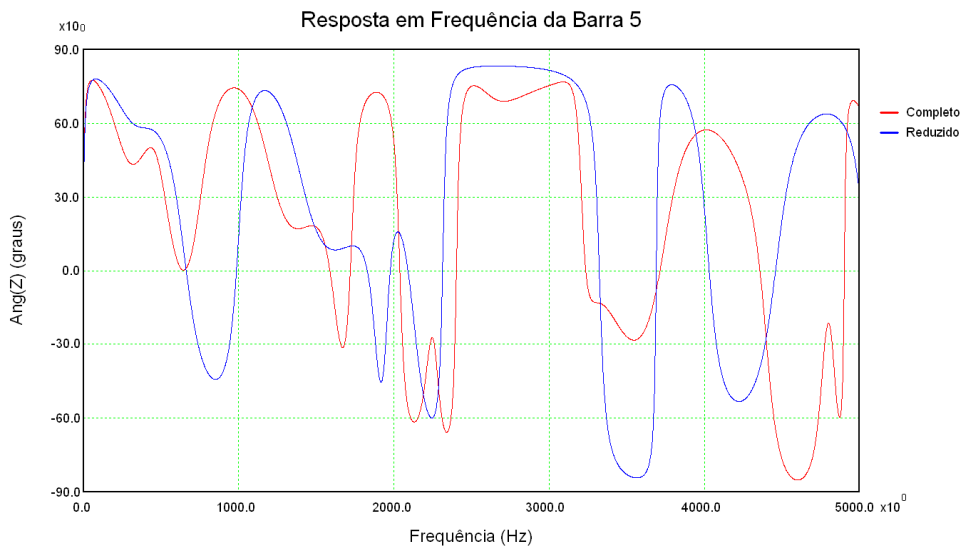


Figura 27: Comparação da resposta em frequência do ângulo da impedância da barra 5 entre o sistema elétrico completo original de 14 barras e o modelo reduzido sem as considerações enumeradas

Cabe observar que, no arquivo original do sistema elétrico, os transformadores e máquinas já foram modelados sem a resistência e também não existe defasamento nos transformadores. Mas, mesmo sem esses elementos, as respostas em frequência da Figura 26 e da Figura 27 já são bem diferentes quando são comparadas às redes completa e reduzida.

Para provar que o cálculo do equivalente convencional está correto, na Figura 28 e na Figura 29 são apresentadas ampliações na resposta em frequência na faixa de 0 a 100 Hz com o destaque para a frequência fundamental que neste caso é 60 Hz. Pode-se visualizar nestas figuras que o valor da módulo e do ângulo da impedância da barra 5 são os mesmos quando comparados o sistema completo e o sistema reduzido neste ponto da frequência de 60 Hz.

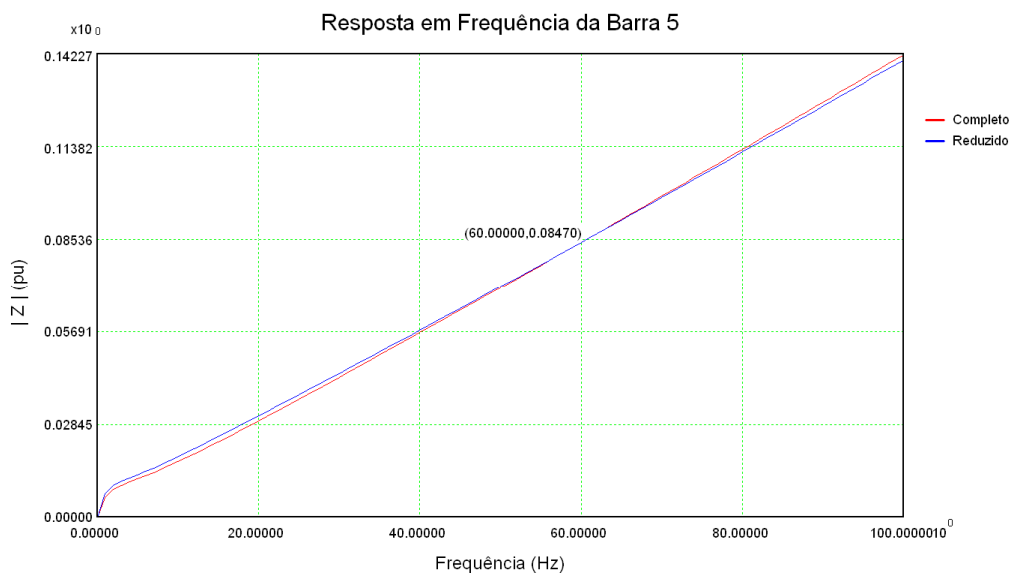


Figura 28: Comparação da resposta em frequência do módulo da impedância da barra 5 nas proximidades da frequência fundamental entre o sistema elétrico completo original de 14 barras e o modelo reduzido sem as considerações enumeradas

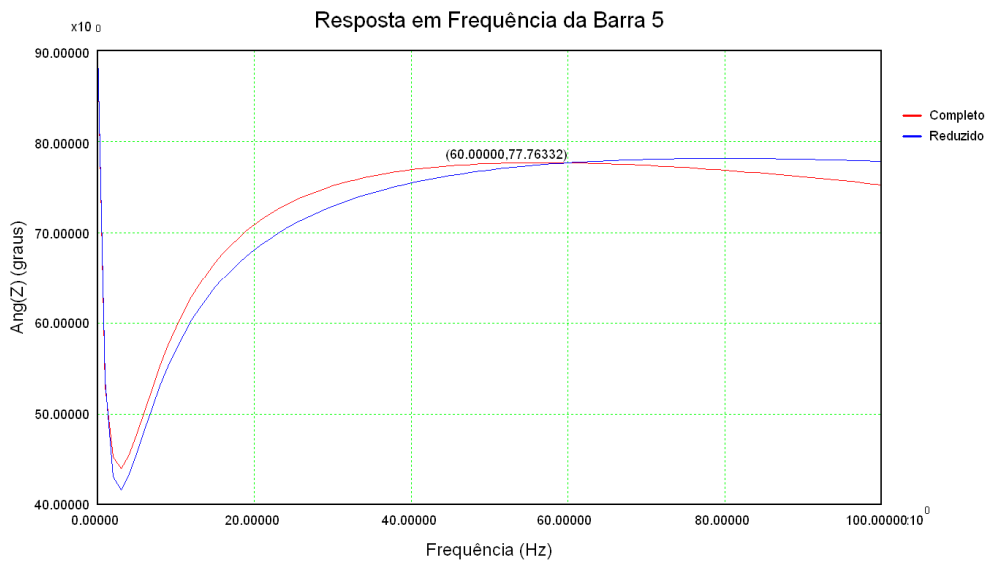


Figura 29: Comparação da resposta em frequência do ângulo da impedância da barra 5 nas proximidades da frequência fundamental entre o sistema elétrico completo original de 14 barras e o modelo reduzido sem as considerações enumeradas

Em seguida, algumas considerações são estabelecidas para a rede externa à área de interesse baseada no sistema completo, dando origem a um sistema elétrico de 14 barras modificado que não possui a representação das resistências, capacitâncias e correção hiperbólica das linhas de transmissão, e sem a representação da parte ativa das cargas (que seriam modeladas por circuitos RL paralelos). Como citado anteriormente, nos arquivos originais, não há valores para resistência e defasagem dos transformadores, nem resistência de armadura de máquinas, mas caso existissem, também deveriam ser retirados da rede externa. Para se ter a noção da diferença entre as duas redes, na Figura 30 e na Figura 31 são apresentadas comparações em frequência do módulo e do ângulo da impedância da barra 5 dos dois sistemas completos, sendo o de legenda “Original”, a rede elétrica de 14 barras considerando todos os elementos na rede interna e externa (resistências, capacitâncias, correção hiperbólica, dentre outros) e o da legenda “Modificado”, a rede elétrica de 14 barras com as considerações enumeradas.

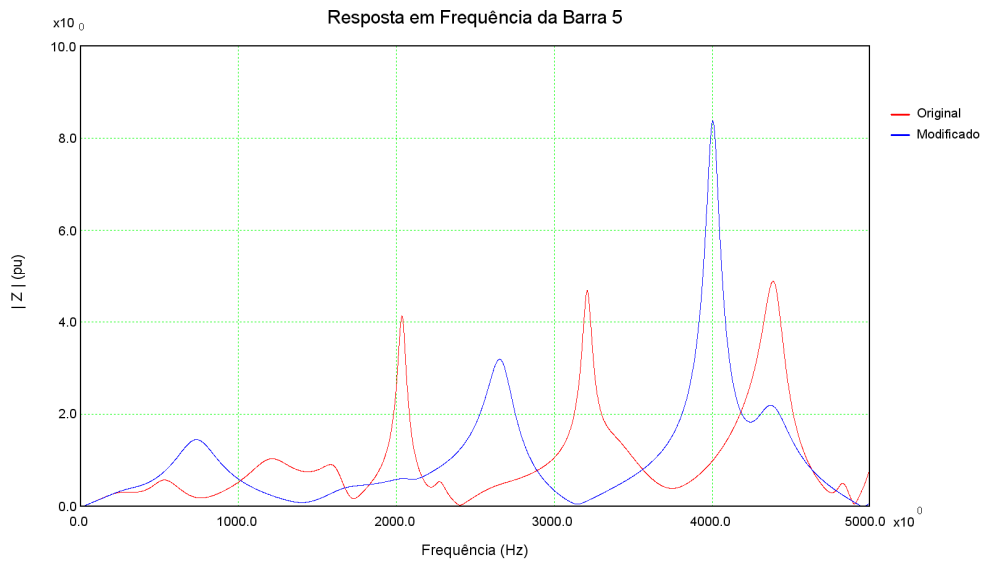


Figura 30: Resposta em frequência do módulo da impedância da barra 5 do sistema elétrico completo original de 14 barras comparado ao modelo completo com as considerações enumeradas

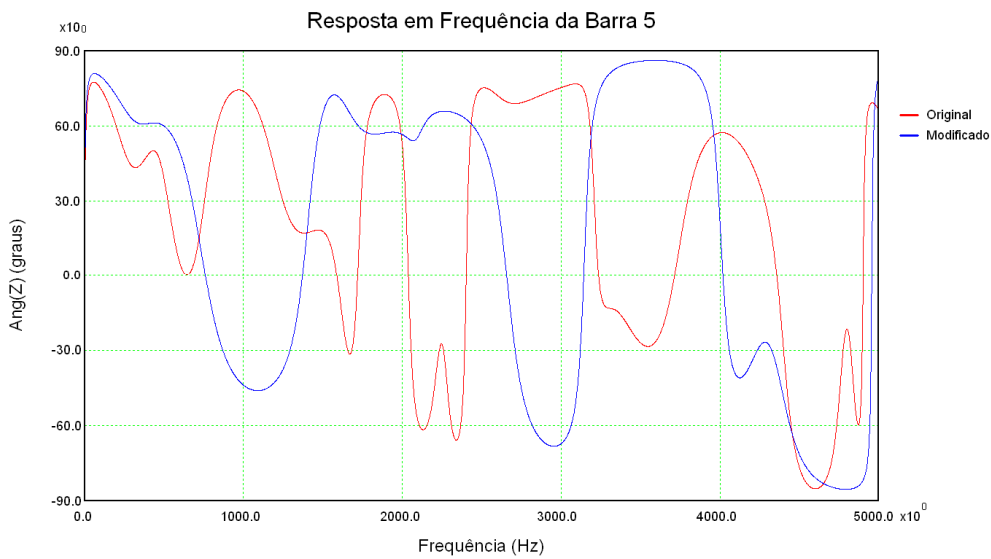


Figura 31: Resposta em frequência do ângulo da impedância da barra 5 do sistema elétrico completo original de 14 barras comparado ao modelo completo com as considerações enumeradas

Finalmente, na Figura 32 e na Figura 33 são apresentadas as comparações em frequência do módulo e do ângulo da impedância da barra 5 entre o modelo completo (mas com as considerações que devem ser feitas) e o modelo reduzido (criado a partir do arquivo completo com as considerações). Pode-se notar que há uma concordância perfeita entre as curvas, evidenciando que os cálculos dos equivalentes foram feitos corretamente.

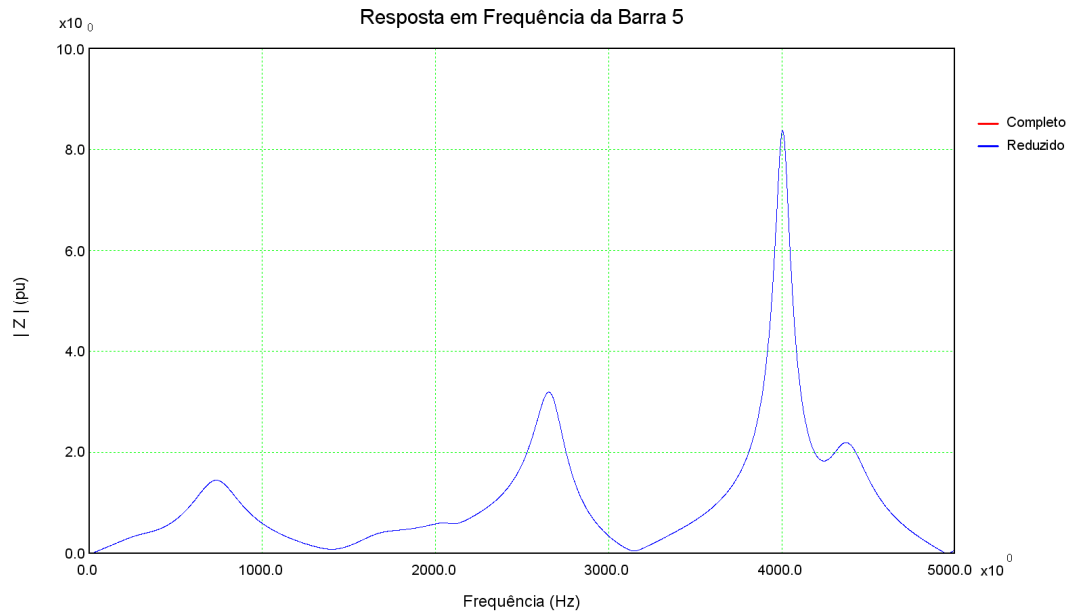


Figura 32: Resposta em frequência do módulo da impedância da barra 5 do sistema elétrico completo de 14 barras comparada ao do modelo reduzido, ambos com as considerações enumeradas

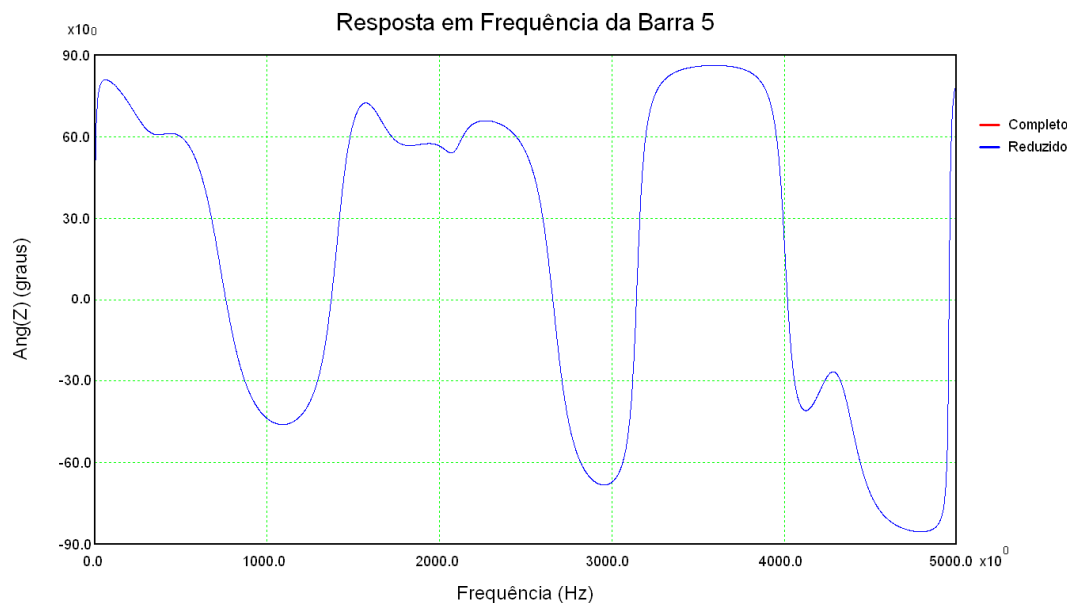


Figura 33: Resposta em frequência do ângulo da impedância da barra 5 do sistema elétrico completo de 14 barras comparada ao do modelo reduzido, ambos com as considerações enumeradas

Foi realizada uma última comparação para mostrar a influência em se considerar o defasamento dos transformadores Y/Delta na rede externa. Originalmente, a rede elétrica de 14 barras não possui representação do defasamento em nenhum transformador. Para incluir o efeito do defasamento, partiu-se do arquivo com as considerações que devem ser realizadas e adicionou-se um valor de defasamento de -30 graus em dois transformadores da rede externa, os que ligam as barras 4 a 7 e 4 a 9 e estão marcados com uma seta azul na Figura 34. Não se preocupou em considerar o

defasamento do transformador existente entre as barras 6 e 5 mesmo sabendo que o fluxo de potência seria alterado, mudando o ponto de operação do sistema. Isso porque a diferença do fluxo de potência não impacta diretamente no traçado da resposta em frequência em questão. A diferença de fluxo de potência até causaria impacto indireto pois haveria diferenças nas tensões do sistema e conseqüentemente nos parâmetros de circuitos das cargas. No entanto, para melhor efeito de comparação, considerou-se os valores dos parâmetros das cargas sem alteração, mudando-se apenas a defasagem dos transformadores em questão, com o objetivo de isolar o real impacto da defasagem no traçado da resposta em frequência.

Na Figura 35 e na Figura 36, é possível visualizar as diferenças entre os traçados de resposta em frequência do módulo e do ângulo da impedância da barra 5, comparando a rede completa e o modelo reduzido.

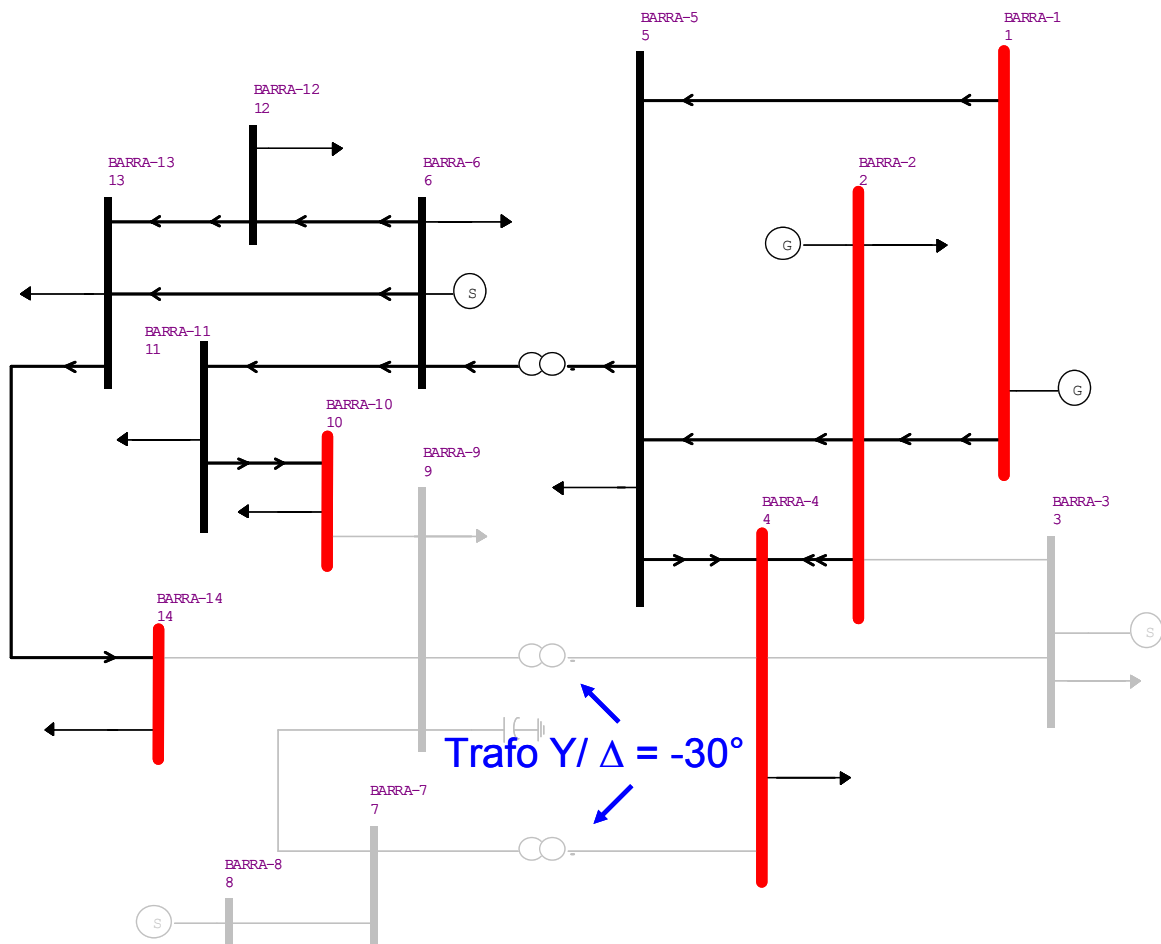


Figura 34: Sistema elétrico completo de 7 barras contendo um transformador Y/Delta com defasagem de -30 graus

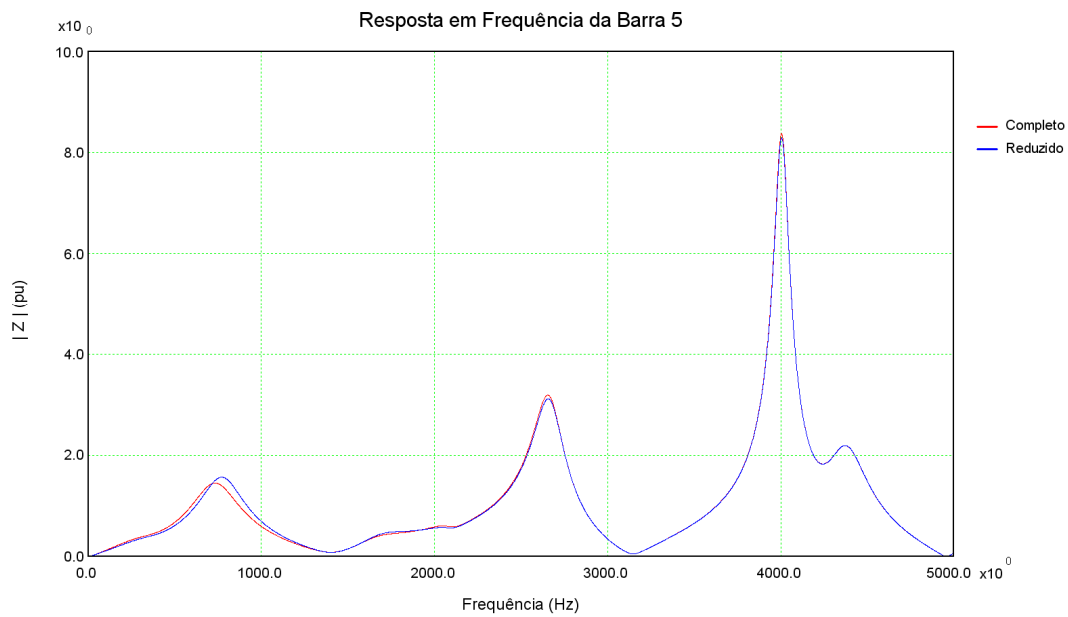


Figura 35: Diferenças devido à existência dos transformadores Y/Delta nas respostas em frequência do módulo da impedância da barra 5 comparando o modelo completo e o modelo reduzido

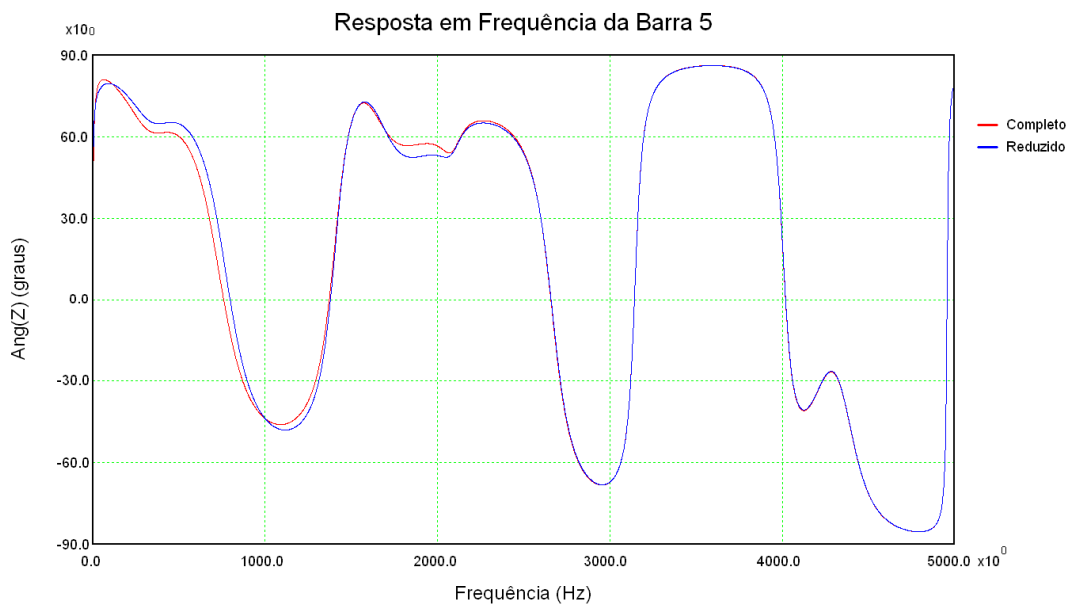


Figura 36: Diferenças devido à existência dos transformadores Y/Delta nas respostas em frequência do ângulo da impedância da barra 5 comparando o modelo completo e o modelo reduzido

Na Figura 37 e na Figura 38 é apresentada uma ampliação na faixa de frequência de 0 a 1500, onde essa diferença causada pelo defasamento dos transformadores se mostrou mais evidente.

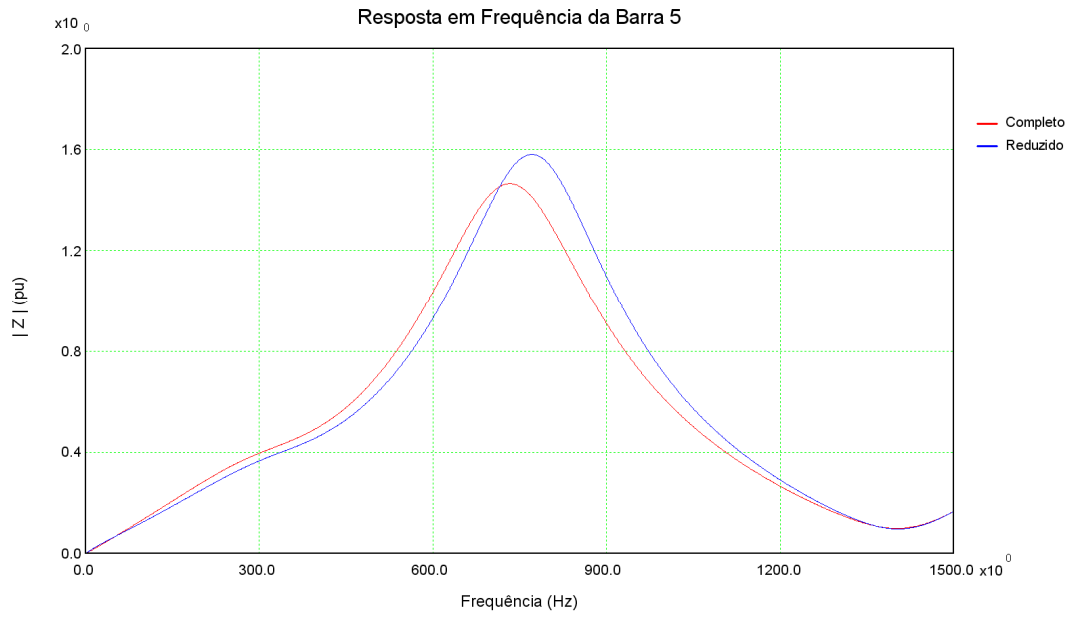


Figura 37: Ampliação para visualizar as diferenças devido à existência dos transformadores Y/Delta nas respostas em frequência do módulo da impedância da barra 5 comparando o modelo completo e o modelo reduzido

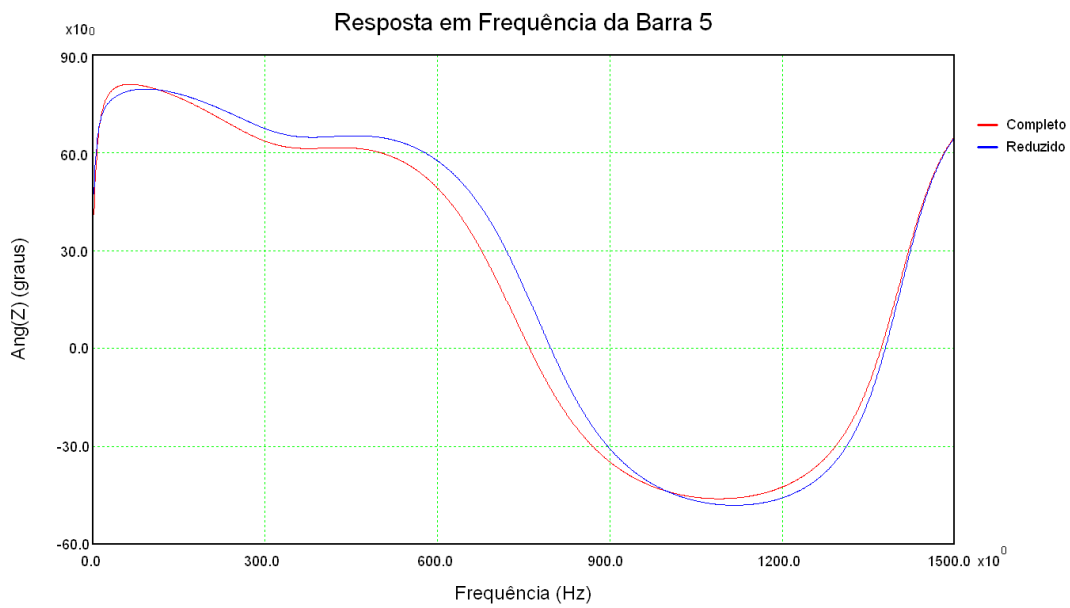


Figura 38: Ampliação para visualizar as diferenças devido à existência dos transformadores Y/Delta nas respostas em frequência do ângulo da impedância da barra 5 comparando o modelo completo e o modelo reduzido

3.5 Método para Definição da Rede Interna para Estudos de Transitórios Eletromagnéticos

A definição da rede interna é um desafio em estudos de transitórios eletromagnéticos. Definir quantas vizinhanças a partir de uma barra se deseja considerar pode não ser o suficiente para se obter um bom equivalente. A rede interna pode ser relativamente pequena levando a resultados imprecisos dos estudos ou pode acontecer de o número de vizinhanças escolhido ser maior que o necessário, perdendo-se desempenho e tempo na modelagem, em programas de transitórios eletromagnéticos, de uma rede interna maior que o necessário.

Logo, a criação de um critério para definição da rede interna mínima torna-se extremamente importante.

Mas qual critério deveria ser utilizado? Comparar o erro do módulo e do ângulo da rede modelada até uma certa vizinhança com a resposta do sistema completo? Mas quais frequências seriam mais importantes? Qual tolerância de erro seria cabível? Um artigo recente [50] (a ser publicado no IEEE PES General Meeting 2013) propõe três índices, baseados no cálculo da energia espectral contida em um sinal, para definir:

1. A máxima frequência em que o sistema reduzido deve reproduzir, com determinada exatidão, o comportamento do modelo completo (primeiro índice).
2. Qual o conjunto de pólos e resíduos associados resultariam em um sistema reduzido de determinada ordem que produziria o menor erro possível (segundo índice).
3. O erro global do sistema reduzido (terceiro índice).

Infelizmente, devido à indisponibilidade do artigo à época apropriada, não foi possível se tentar a utilização do primeiro e do segundo índice no método de definição da área interna. Desta forma, decidiu-se como critério de definição fazer uma avaliação visual da resposta em frequência do módulo e do ângulo de funções de transferência de determinadas barras importantes da área de interesse. Assim, o analista pode observar as curvas traçadas e decidir qual vizinhança deve ser utilizada para definir a rede interna,

dando importância à faixa de frequências de interesse, descartando faixas que não são de interesse, dentre outros pontos que podem ser considerados na análise das curvas. O traçado das curvas poderia ser facilmente obtido utilizando uma das ferramentas existentes no programa HarmZs para trabalhar com grupos de arquivos, a ferramenta “batch”.

Foi então desenvolvido um algoritmo que realiza sucessivas definições da rede interna utilizando o conceito de vizinhanças elétricas, a partir de uma vizinhança mínima até uma vizinhança máxima definidas pelo analista, monitorando as funções de transferência das barras de fronteira de uma vizinhança base que pode ser entendida como a vizinhança que delimita a área de interesse. Esta vizinhança base também é uma variável do problema.

Ao mesmo tempo que o algoritmo realiza sucessivas definições da rede interna, é criado um arquivo “batch” com um script de traçados de curvas de resposta em frequência de módulo e ângulo das funções de transferência das barras de fronteira da vizinhança base. Após a criação do arquivo “batch”, o programa HarmZs pode executar este arquivo criado para posteriormente se visualizar as curvas de resposta em frequência. Após a realização dos traçados, uma inspeção visual nas curvas de módulo e ângulo pode ser feita como indicação de qual vizinhança mais se aproxima das curvas do sistema completo. Cabe lembrar que, para se fazer a comparação, os traçados da rede completa também são solicitados no arquivo “batch”.

Na Figura 39 é apresentada uma interface gráfica destacando, com um retângulo vermelho, a parte desta interface responsável pelo critério de automatização. No exemplo da figura, o arquivo “batch” a ser criado executará traçados a partir da vizinhança 1 até a vizinhança 3. As barras de fronteira que darão origem às funções de transferência fazem parte das barras da vizinhança escolhida no campo “Vizinhanças”. No exemplo, a vizinhança base escolhida é a vizinhança 1, que, como explicado anteriormente, delimita a área de interesse.

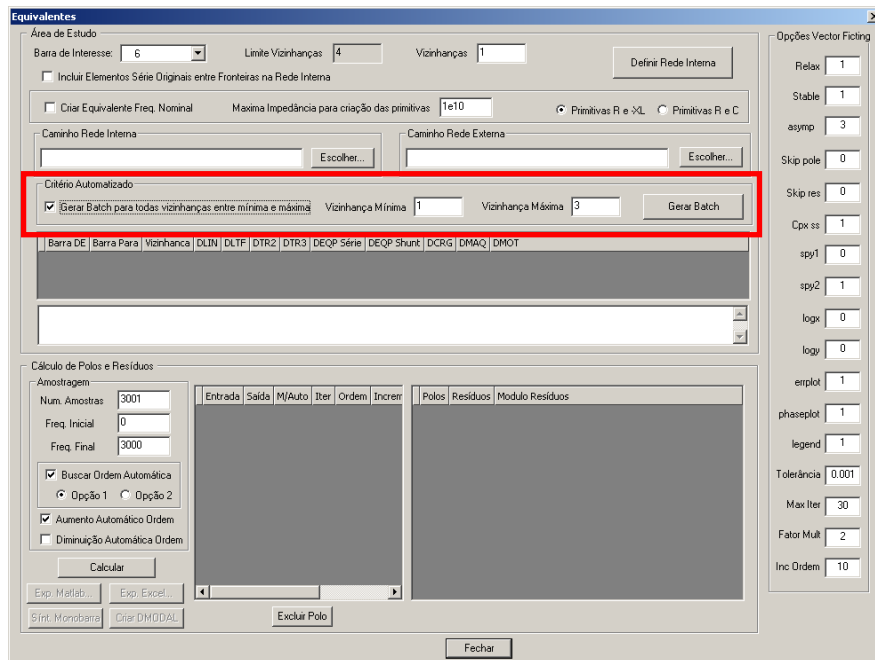


Figura 39: Interface para automatizar o processo de definição da área de interesse

Na Figura 40 é apresentada uma parte do arquivo “batch” criado pela ferramenta de automatização do critério de definição da rede interna. Pode-se notar que os traçados da área definida pelas vizinhanças 1, 2 e 3 são comparados ao traçado da rede completa. Outra funcionalidade interessante implementada é a estatística das redes internas definidas pelas vizinhanças. Através destas estatísticas pode-se ter uma noção do quanto a rede interna vai crescendo à medida que um número maior de vizinhanças é escolhido.

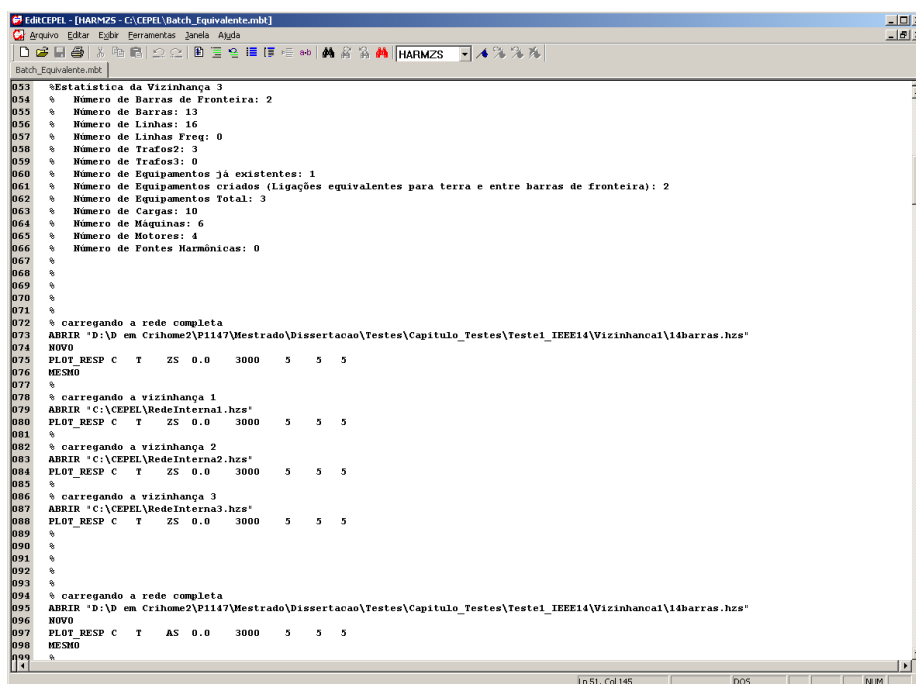


Figura 40: Critério de automatização criado através de ferramenta Batch do programa HarmZs

Como exemplos, são apresentados alguns traçados de resposta em frequência do módulo e do ângulo de impedâncias próprias e de transferência de barras da fronteira da área de interesse (definida pela vizinhança base).

É importante notar que, não só as impedâncias próprias devem ser monitoradas, mas que a resposta em frequência de impedâncias de transferência também devem ser analisadas, e o algoritmo já está preparado para solicitar o traçado destas impedâncias.

Na Figura 41 e na Figura 42 são apresentados, respectivamente, os traçados do módulos e dos ângulos da impedância própria vista da barra 5 (rede elétrica IEEE 14 Barras) comparando a resposta do sistema completo (curva na cor vermelha), modelo reduzido para uma vizinhança (curva na cor azul), modelo reduzido para duas vizinhanças (curva na cor laranja) e modelo reduzido para três vizinhanças (curva na cor marrom).

Pode-se observar que, para este sistema exemplo, a representação de apenas uma vizinhança traz vários prejuízos ao estudo, pois comparando os traçados do modelo reduzido para uma vizinhança com o sistema completo, nota-se que as duas respostas em frequência são totalmente diferentes mesmo para frequências baixas, apenas coincidindo para a frequência fundamental, na qual o equivalente foi preparado.

A segunda vizinhança também apresenta resultados muito ruins, sendo coincidentes em apenas poucas frequências. Já para a terceira vizinhança, as curvas são bem coincidentes e seria necessário modelar a rede interna até esta vizinhança e representar o resto da rede como um equivalente convencional.

Evidentemente que para se conseguir um grau de exatidão tão grande com poucas vizinhanças para sistemas de grande porte quanto para a terceira vizinhança deste exemplo é uma tarefa muito difícil, mas resultados ruins como obtidos para a primeira e segunda não são desejáveis.

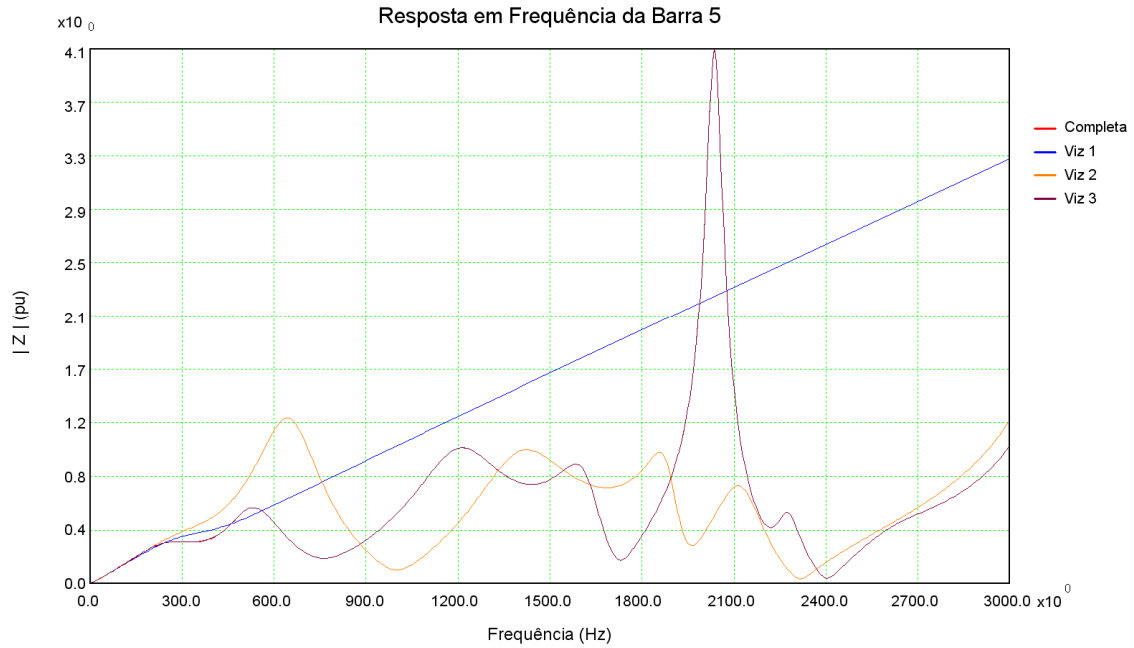


Figura 41: Comparação da resposta em frequência do módulo da impedância da barra 5 para a rede completa e sistemas reduzidos para vizinhanças 1, 2 e 3

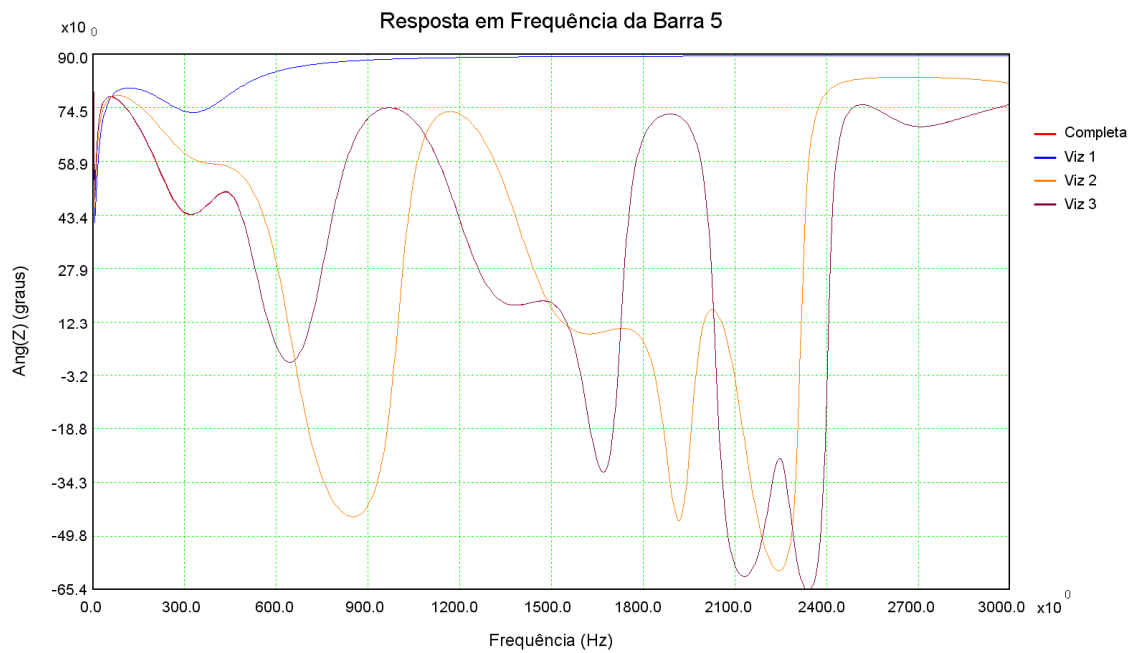


Figura 42: Comparação da resposta em frequência do ângulo da impedância da barra 5 para a rede completa e sistemas reduzidos para vizinhanças 1, 2 e 3

Na Figura 43 e na Figura 44 são apresentadas as ampliações dos traçados nas proximidades da frequência fundamental, onde pode-se notar o comportamento do sistema completo e modelos reduzidos para baixas frequências além da coincidência entre módulo e ângulo da impedância própria da barra 5 para a frequência fundamental (60 Hz).

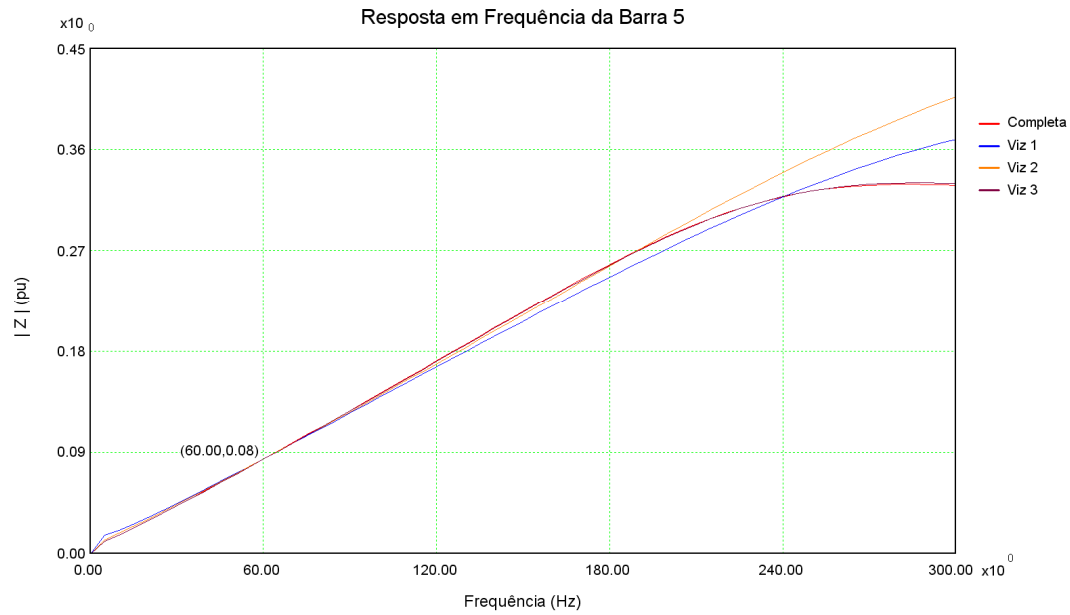


Figura 43: Ampliação na comparação da resposta em frequência do módulo da impedância da barra 5 para a rede completa e sistemas reduzidos para vizinhanças 1, 2 e 3

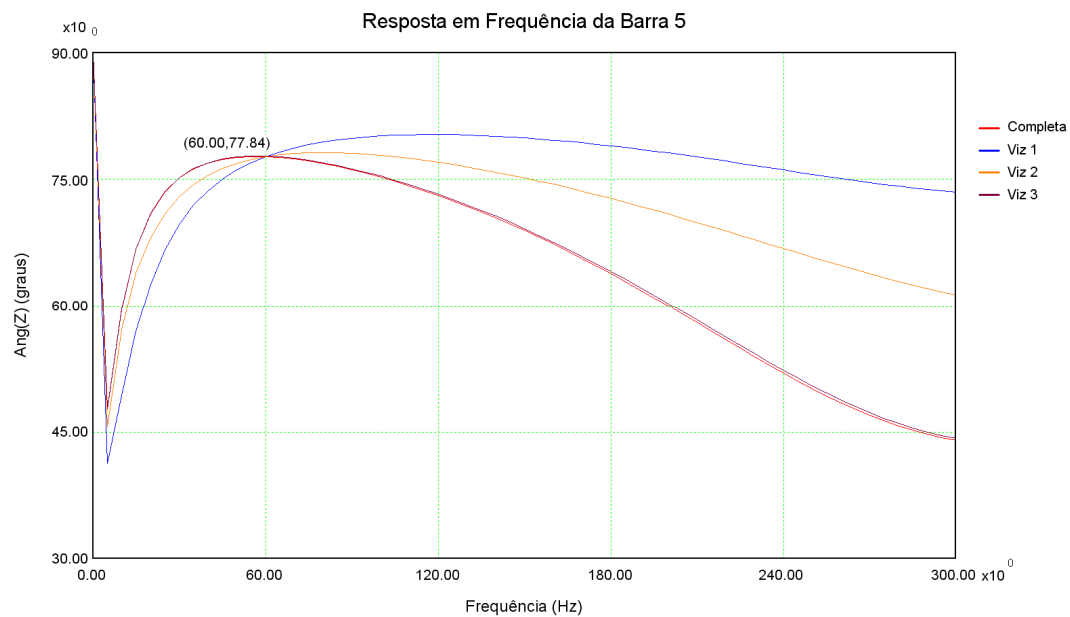


Figura 44: Ampliação na comparação da resposta em frequência do ângulo da impedância da barra 5 para a rede completa e sistemas reduzidos para vizinhanças 1, 2 e 3

Na Figura 45 e na Figura 46 são apresentados, respectivamente, os traçados dos módulos e dos ângulos da impedância de transferência entre as barras 5 e 13, comparando a resposta do sistema completo (curva na cor vermelha), modelo reduzido para uma vizinhança (curva na azul), modelo reduzido para duas vizinhanças (curva na cor laranja) e modelo reduzido para três vizinhanças (curva na cor marrom). Nota-se que os resultados para a resposta em frequência desta função de transferência

considerando os modelos reduzidos levam a mesma conclusão que os resultados obtidos para a barra 5

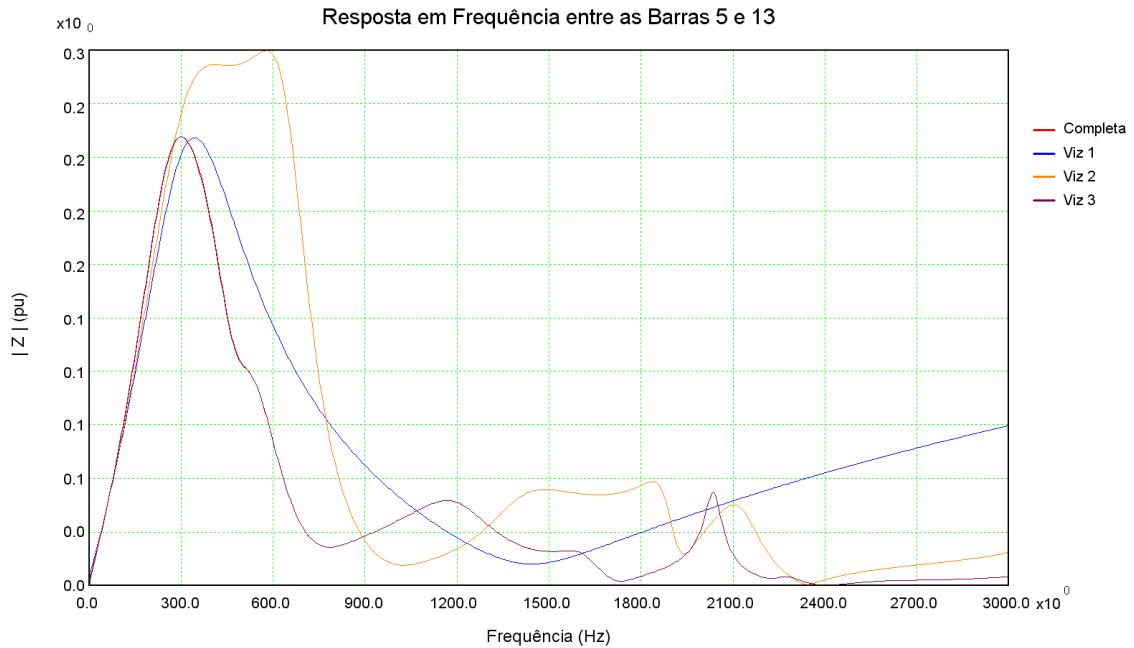


Figura 45: Comparação da resposta em frequência do módulo da impedância de transferência entre as barras 5 e 13 para a rede completa e sistemas reduzidos para vizinhanças 1, 2 e 3

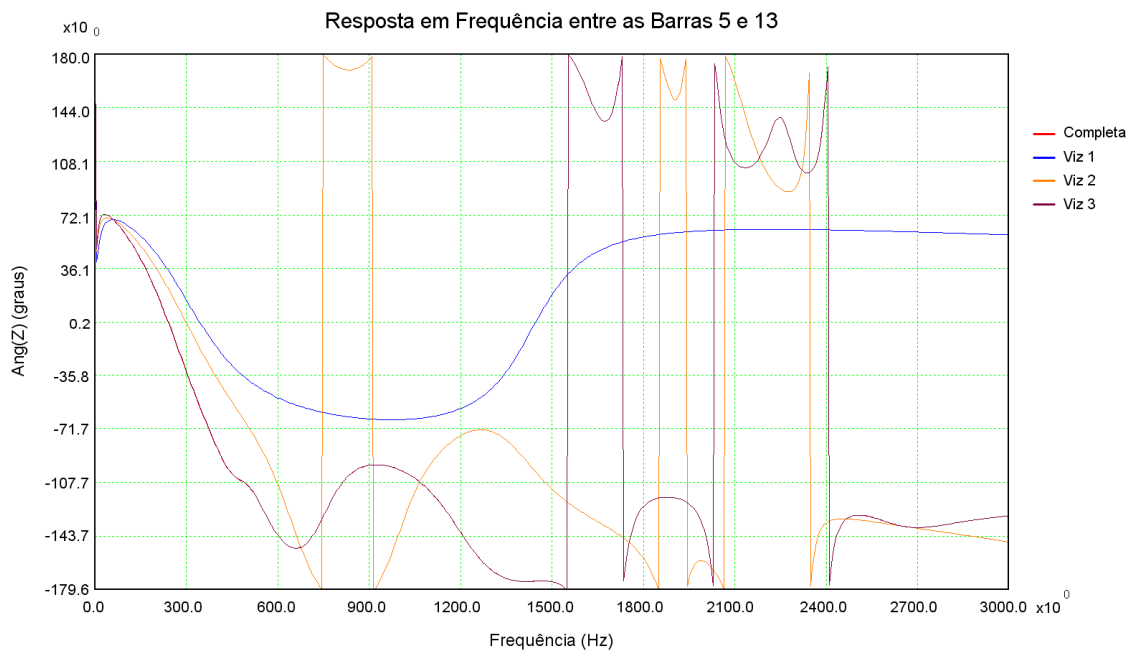


Figura 46: Comparação da resposta em frequência do ângulo da impedância de transferência entre as barras 5 e 13 para a rede completa e sistemas reduzidos para vizinhanças 1, 2 e 3

Na Figura 47 e na Figura 48 são apresentadas as ampliações dos traçados nas proximidades da frequência fundamental, onde pode-se notar o comportamento do sistema completo e modelos reduzidos para baixas frequências além da coincidência

entre módulo e ângulo da impedância de transferência entre as barras 5 e 13 para a frequência fundamental (60 Hz).

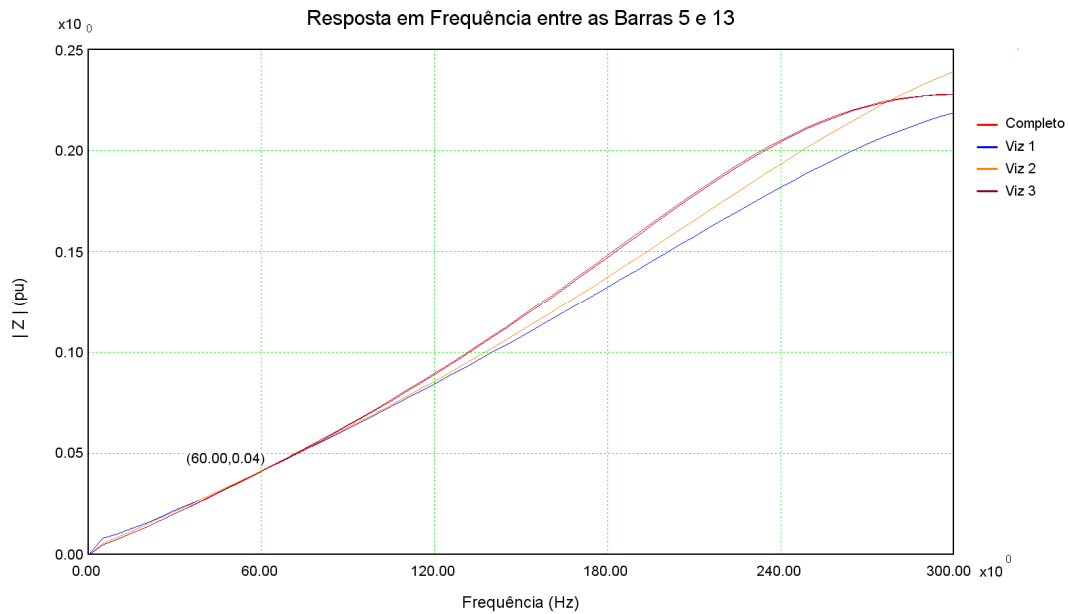


Figura 47: Ampliação na comparação da resposta em frequência do módulo da impedância de transferência entre as barras 5 e 13 para a rede completa e sistemas reduzidos para vizinhanças 1, 2 e 3

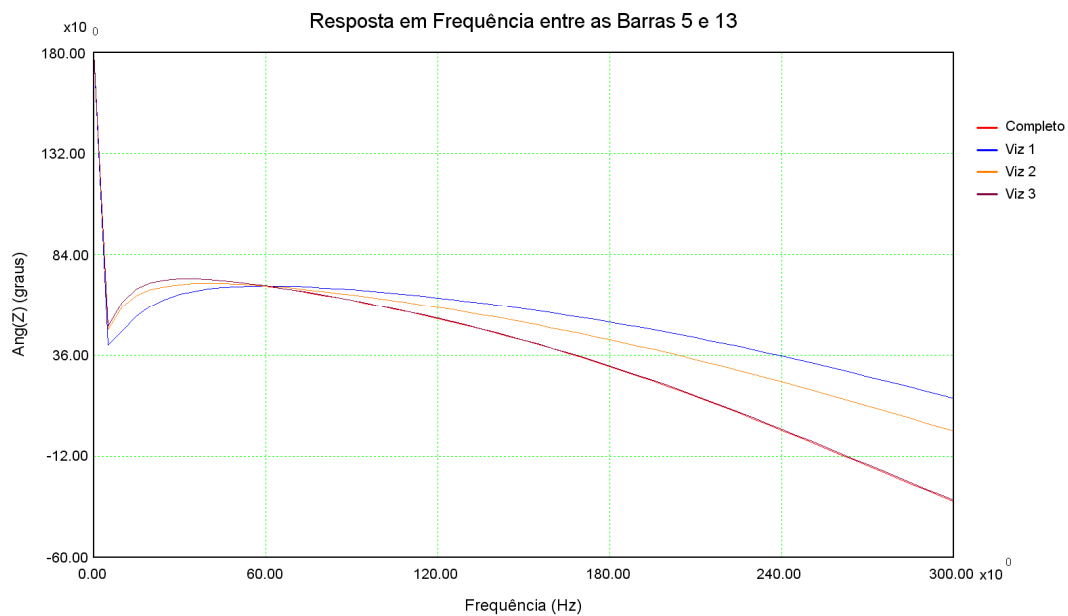


Figura 48: Ampliação na comparação da resposta em frequência do ângulo da impedância de transferência entre as barras 5 e 13 para a rede completa e sistemas reduzidos para vizinhança 1, 2 e 3

Neste item só foram mostradas as respostas em frequência da impedância própria da barra 5 e da de transferência entre as barras 5 e 13. Evidentemente todas as funções de transferência devem ser analisadas para que se tenha certeza que a definição da área interna até certa vizinhança é aceitável.

Capítulo 4 – Equivalentes Modais

4.1 Introdução

Como foi apresentado no capítulo anterior, a utilização de equivalentes de redes convencionais (ou equivalentes de curto-circuito) para representar uma determinada parte de uma rede é um procedimento bastante usual.

Também foram apresentados os problemas na utilização de equivalentes convencionais para estudos de transitórios eletromagnéticos, tais como necessidade de se definir a área mínima interna, que deve ser maior que a área de interesse. Necessita-se, então, representar mais elementos dos que realmente fazem parte da área de interesse. E caso essa representação de mais elementos não seja feita, seja por falta de modelos precisos ou dificuldade de representar muitos elementos nos programas de transitórios eletromagnéticos ou, até mesmo, pela falta de informações do que se está errando no espectro em frequência na utilização do equivalente convencional, a imprecisão nos resultados tende a ser grande.

A utilização de equivalentes que representem o comportamento de uma parte do sistema em frequência contorna este problema de utilização dos equivalentes convencionais em estudos de comportamento harmônico e transitórios eletromagnéticos. Como será apresentado neste capítulo, esses equivalentes em frequência serão construídos com base na representação por polos e resíduos e, por esse motivo, são chamados de equivalentes modais.

Existem diversos algoritmos para o cálculo de polos e resíduos, especialmente desenvolvidos para sistemas modelados pela matriz $Y(s)$. Como exemplos, podem ser citados os métodos da Secante [27], [51], de Newton [27], [52]; de Rayleigh [27], de Polos Dominantes [27], [52] e o método de Cálculo Sequencial de Polos Dominantes [27]. Com exceção do método da Secante, todos os métodos citados encontram-se implementados no programa HarmZs e poderiam ser usados para construir os equivalentes modais. Todos esses métodos calculam os polos verdadeiros existentes no

sistema e não polos fictícios que produzem um bom ajuste da curva de resposta em frequência no eixo $j\omega$.

No entanto, todos os métodos anteriormente citados necessitam de estimativas iniciais próximas dos polos de interesse e são muito dependentes dessas estimativas para se obter um conjunto de polos que represente bem o sistema na faixa de frequências de interesse. Somado a este fato, há também dificuldades no cálculo de todos os polos de maneira automática e problemas de convergência nestes métodos iterativos podem ocorrer. Neste caso, há um esforço grande para conseguir o conjunto de polos necessários para um bom equivalente, necessitando de muita interação do usuário na busca de boas estimativas para o algoritmo, prejudicando o automatismo do processo.

Para evitar o problema da falta de automatismo na obtenção de estimativas iniciais de polos presente nos métodos iterativos acima citados, pode-se utilizar o Método do Ajuste Vetorial (*Vector Fitting*). Das vantagens apresentadas pelo método, destacam-se a facilidade de execução do mesmo e o nível de automatismo que pode ser alcançado para as aproximações das respostas em frequência. O método tem se mostrado muito promissor e robusto. Tem-se como uma desvantagem do método que, como é feita uma aproximação da resposta em frequência, os polos encontrados não são os polos verdadeiros do sistema. Ao contrário dos métodos por aproximação, os métodos por truncamento, como os desenvolvidos para a modelagem por matriz $\mathbf{Y}(s)$, apresentam os polos verdadeiros. Detalhes do método *Vector Fitting* podem ser visualizados no Anexo A.2. Já os detalhes de implementação em uma versão não comercial do programa HarmZs podem ser visualizados no Capítulo 5.

4.2 Cálculo do Equivalente Modal

Neste item serão apresentados os procedimentos para cálculo do equivalente modal de redes elétricas.

Na Figura 49 é apresentada uma rede elétrica completa composta pelas redes interna, externa e suas barras de fronteira. Pode ser feita a suposição que a rede interna foi definida através do algoritmo de vizinhanças elétricas ou definida manualmente pelo

analista. Podemos classificar as duas redes destacadas na figura como dois subsistemas onde os elementos desses dois subsistemas são interligados pelas n barras de fronteira. Dentre as n barras de fronteira são destacadas as barras k e j que facilitarão o entendimento da metodologia do cálculo dos equivalentes modais.

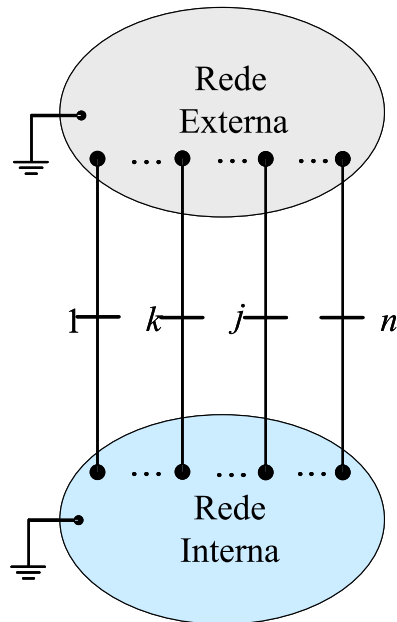


Figura 49: Conexão entre a rede interna e a rede externa através das barras de fronteira

Primeiramente, as duas redes devem ser separadas nas barras de fronteira como apresentado na Figura 50. O objetivo é manter a rede interna íntegra com o seu modelo matemático completo e isolar a rede externa, que será substituída pelo equivalente modal.

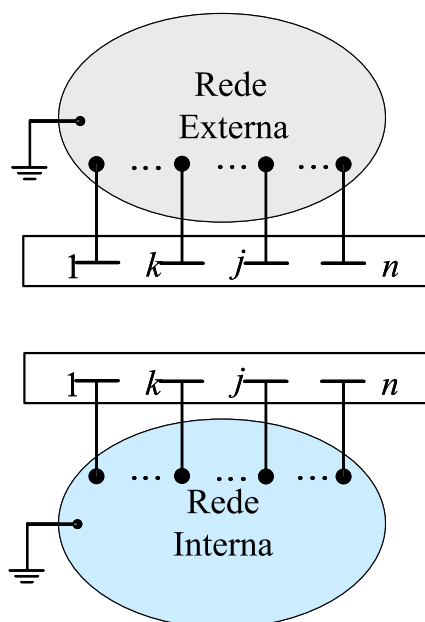


Figura 50: Área de interesse e rede externa apresentadas separadamente

Na Figura 51 é apresentada a rede externa como um sistema isolado, onde os equivalentes modais serão calculados a partir das n barras de fronteira desconsiderando a rede interna.

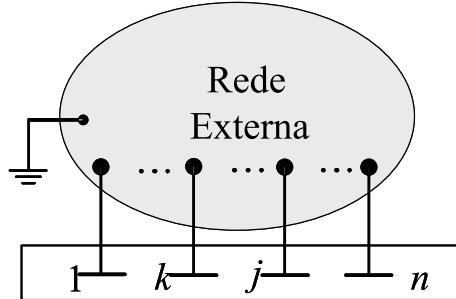


Figura 51: Rede externa isolada da área de interesse

Basicamente, o que se deseja é aproximar as respostas em frequência (próprias e de transferência) vistas das barras de fronteira por funções racionais cuja forma fatorada é dada pela equação (4.1).

$$z_{eq-kj}(s) \cong \sum_{i \in \Omega_{kj}} \frac{R_i^{(kj)}}{(s - \lambda_i^{(kj)})} + d^{(kj)} + e^{(kj)}s \quad (4.1)$$

onde $\lambda_i^{(kj)}$ é um dos polos da aproximação da resposta em frequência, $R_i^{(kj)}$ é o resíduo associado ao polo $\lambda_i^{(kj)}$, $d^{(kj)}$ é denominado termo direto e $e^{(kj)}$ o termo linear com s .

Ω_{kj} é o conjunto de polos dominantes utilizados para aproximar as impedâncias

$$z_{eq-kj}(s).$$

O método utilizado para a aproximação das respostas em frequência é o Método do Ajuste Vetorial. Através deste método, conjuntos de polos e resíduos são encontrados para realizar as aproximações das respostas em frequência. Embora exista a possibilidade de se encontrar o mesmo conjunto de pólos dominantes para todas as funções de transferência e que obter um conjunto único de polos seja necessário para, posteriormente, desenvolver a síntese por circuitos RLC, como não será abordada a síntese para o equivalente modal neste trabalho, optou-se por encontrar um conjunto de polos dominantes diferente para cada função de transferência.

Essas respostas em frequência das impedâncias próprias e de transferência das barras de fronteira são calculadas pelo programa HarmZs para uma determinada faixa de frequências e armazenadas em um vetor complexo (partes real e imaginária das impedâncias próprias e de transferência das barras de fronteira). As amostras de frequência também são armazenadas em um outro vetor. O Método do Ajuste Vetorial é então executado considerando como dados de entrada o vetor complexo de impedâncias e o vetor de frequências. A ordem do ajuste, ou seja, o número de polos que serão necessários para a aproximação, também deve ser informada para o método. O dado de saída do método é um conjunto de polos $\lambda_i^{(kj)}$ e resíduos $R_i^{(kj)}$.

Cabe lembrar que o cálculo dos polos e resíduos poderia ser realizado por qualquer um dos métodos citados na introdução desde capítulo, como, por exemplo, o método de Newton, Polos Dominantes ou Cálculo Sequencial de Polos Dominantes. Mas, como explicado, o Método do Ajuste Vetorial se mostrou robusto e prático de se utilizar, mostrando um automatismo importantíssimo e necessário no cálculo dos equivalentes modais.

Maiores detalhes sobre a implementação do Método do Ajuste Vetorial (*Vector Fitting*) em uma versão não comercial do programa HarmZs podem ser visualizados no Capítulo 5.

Logo, como cada impedância própria e de transferência das n barras de fronteira pode ser escrita como um conjunto de polos e resíduos, como apresentado em (4.1), pode-se construir, a partir destes conjuntos, a matriz de impedâncias nodal equivalente $\mathbf{Z}_{eq}(s)$, como apresentado em (4.2). A diagonal da matriz $\mathbf{Z}_{eq}(s)$ é construída substituindo o valor de uma frequência s_k para cada conjunto de polos e resíduos das impedâncias próprias de cada barra de fronteira. De maneira análoga, as posições da matriz $\mathbf{Z}_{eq}(s)$ fora da diagonal são construídas com o conjunto de polos e resíduos das impedâncias de transferência entre barras de fronteira.

$$\mathbf{Z}_{\text{eq}}(s_k) = \begin{bmatrix} z_{eq-11}(s_k) & \cdots & z_{eq-1k}(s_k) & \cdots & z_{eq-1j}(s_k) & \cdots & z_{eq-1n}(s_k) \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{eq-k1}(s_k) & \cdots & z_{eq-kk}(s_k) & \cdots & z_{eq-kj}(s_k) & \cdots & z_{eq-kn}(s_k) \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{eq-j1}(s_k) & \cdots & z_{eq-jk}(s_k) & \cdots & z_{eq-jj}(s_k) & \cdots & z_{eq-jn}(s_k) \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{eq-n1}(s_k) & \cdots & z_{eq-nk}(s_k) & \cdots & z_{eq-nj}(s_k) & \cdots & z_{eq-nn}(s_k) \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

4.3 Inclusão do Equivalente Modal à Rede Interna (Sistema Reduzido)

Após a montagem da matriz $\mathbf{Z}_{\text{eq}}(s)$, que representa a rede externa, o equivalente modal deve ser conectado à rede interna. A conexão do equivalente modal à rede interna dá origem ao chamado sistema reduzido, que é apresentado na Figura 52.

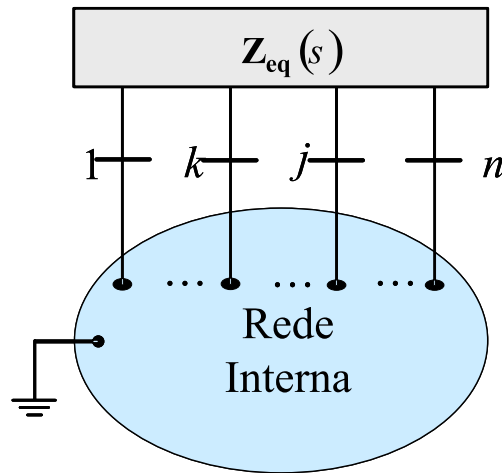


Figura 52: Sistema reduzido (Área de interesse + rede externa modelada por um equivalentes modal

A princípio a rede interna seria modelada de forma completa no programa de simulação desejado conforme as suas especificidades e a matriz $\mathbf{Z}_{\text{eq}}(s)$ seria representada por um conjunto de impedâncias que seriam conectadas à rede interna ou por um modelo matemático matricial linear a ser resolvido como um novo componente externo que recebe injeções de correntes e aplica tensões na rede interna, conforme dado em [7] e [44].

Para validação dos resultados deste trabalho utilizou-se uma modelagem da rede interna por matriz $\mathbf{Y}(s)$ que permite gerar as respostas em frequência das diversas funções de transferência desejadas, ou a análise modal da rede. Neste caso, para conectar o equivalente modal à rede interna, a matriz de impedâncias nodal equivalente $\mathbf{Z}_{\text{eq}}(s)$ deve ser invertida para se obter a matriz de admitâncias nodal equivalente $\mathbf{Y}_{\text{eq}}(s)$ como apresentado em (4.3).

$$\mathbf{Y}_{\text{eq}}(s) = \mathbf{Z}_{\text{eq}}^{-1} \quad (4.3)$$

Logo, a inclusão do equivalente modal pode ser feita diretamente na matriz $\mathbf{Y}(s)$ da rede interna somando a cada posição desta matriz, nas posições das barras de fronteira k e j , o termo $y_{eq-kj}(s)$, conforme apresentado em (4.4).

$$y_{kj}^{\text{nov}}(s) = y_{kj}(s) + y_{eq-kj}(s) \quad (4.4)$$

Na equação (4.4), $y_{kj}(s)$ é um elemento da matriz $\mathbf{Y}(s)$ da rede interna. O elemento $y_{eq-kj}(s)$ se refere ao elemento nas posições $k-j$ da matriz $\mathbf{Y}_{\text{eq}}(s)$. Já $y_{kj}^{\text{nov}}(s)$ é o elemento da nova matriz $\mathbf{Y}(s)$ do sistema reduzido.

Muitas vezes se está interessado em estudar uma rede de pequeno porte conectada a uma de grande porte. Com a utilização de equivalentes modais, é possível gerar uma matriz de admitâncias que considera as duas redes com a mesma dimensão da matriz que representa a rede de pequeno porte. Desta forma, o alto esforço computacional que o estudo demandaria, caso ambas as redes fossem representadas na íntegra, pode ser significativamente reduzido.

4.3.1 Código DMODAL

Como apresentado no item anterior, o Método do Ajuste Vetorial é utilizado para aproximar curvas de resposta em frequência das impedâncias das barras de fronteira da rede externa por funções racionais cuja forma fatorada é dada pela equação (4.1). Foi apresentado também em (4.4) o efeito da inclusão do equivalente modal na rede interna formando o sistema reduzido. Mas de qual modo o analista conseguiria fazer a inclusão

do equivalente modal à rede interna, se agora a rede externa não é mais caracterizada por equipamentos como linhas de transmissão, transformadores, bancos de reatores, capacitores, dentre outros, e sim por conjuntos de polos e resíduos?

A solução encontrada foi criar um código de equivalentes modais chamado de código de execução DMODAL onde fosse possível armazenar todos os polos e resíduos calculados. Este código DMODAL contém as barras DE e PARA das funções de transferências das barras de fronteira e o conjunto de polos e resíduos para cada função. O termo $d^{(kj)}$ e o termo $e^{(kj)}$, também apresentados em (4.1), fazem parte deste código. A Figura 53 apresenta uma parte do código DMODAL para o equivalente modal a partir da segunda vizinhança da rede IEEE 14 Barras. Cabe observar que, se o polo é complexo, não há necessidade de informar o seu conjugado. Na leitura do código DMODAL, o programa HarmZs já entende que o polo é complexo e que deverá ser considerado seu conjugado. A mesma lógica é aplicada para os resíduos.

```

EdiTCPEPL - HARMZS - D:\D em Crihome2\P1147\Mestrado\Dissercao\Testes\Capitulo 6 - Testes\Teste1_IEEE14\Vizinhanca2\DMODAL.hzs
Arquivo Editar Exibir Ferramentas Janela Ajuda
DMODAL.hzs
HARMZS
002 DMODAL
003 % De Para
004 1 1
005 Termo_D 0.35538653041698396000+j0.000000000000
006 Termo_E -0.0000033799978806641+j0.000000000000
007 % Polos
008 -10.70215240558682600000+j0.00000000000000000000
009 -117.7600042516276300000+j0.00000000000000000000
010 -470.7136101379502600000+j981.8543968320443600000
011 -355.8603445894262900000+j2417.13259806683200000
012 -966.5753467746571900000+j9241.20588312724090000
013 -5044.211637285630800000+j9033.28187671964220000
014 -491.1491369091152100000+j13505.61931566612700000
015 -62.2889648840554400000+j20031.32010821565600000
016 -1852.446443220226200000+j26033.46605050750100000
017 -25817.32528010830700000+j87278.95668506750400000
018 FIMP
019 % De Para
020 1 2
021 Termo_D 0.02812223131501085500+j0.000000000000
022 Termo_E -0.0000033197047548479+j0.000000000000
023 % Polos
024 -11.09129540493186800000+j0.00000000000000000000
025 -121.8939377409412700000+j0.00000000000000000000
026 -470.7059463364508900000+j981.8619563545205400000
027 -355.8604616411712400000+j2417.13302314143040000
028 -966.57798879138963000000+j9241.20178815192230000
029 -5047.001610152969200000+j9033.28501364471430000
030 -491.1490801140614300000+j13505.61921455977800000
031 -62.21443391369677500000+j20031.47139619640800000
032 -5133.753606197202300000+j27204.37884323028300000
033 -710.8039582405770000000+j28426.86852735550200000
034 FIMP
035 % De Para
036 1 4
037 Termo_D 0.01134724452677378200+j0.000000000000
038 Termo_E -0.00000020271310171435+j0.000000000000
039 % Polos
040 -10.82673724301897300000+j0.00000000000000000000
041 -120.0935946516309800000+j0.00000000000000000000
042 -470.70939721884133000000+j981.8582327058131800000
043 -355.8604121017025400000+j2417.13293675950260000
044 -966.57616167859135000000+j9241.20567178027700000
045 -5045.5264606675019000000+j9034.65711977443240000
046 -491.14905694015465000000+j13505.61910648492800000
047 -61.985324395990801000000+j20031.34139688811800000
048 -6635.8697141641478000000+j22349.96275045504800000
049 -298.34862720387014000000+j25811.28995203931500000
050 FIMP
-0.00057379039235907570+j0.00000000000000000000
-0.06528911870341300200+j0.00000000000000000000
547.27786600305149000000+j190.1348615533793000000
799.9063033625092200000+j936.1433083010224500000
31.65105713249883800000+j343.6325745459386300000
227.42350270770187000000+j165.1385165386983500000
808.1069026505190300000+j139.7927640720515100000
1640.056620491408900000+j13.89821627690346300000
1706.959621951326400000+j754.4509687927121600000
43678.19511289695900000+j27557.02873014527400000
-0.00062059496932348576+j0.00000000000000000000
-0.06897671168785216000+j0.00000000000000000000
544.1215150383092100000+j183.6474669435440300000
754.8869868664595500000+j302.8190387910668700000
-38.96907379993863600000+j73.1546352947435250000
197.5063548951639400000+j130.7877246941941800000
-347.217621249229700000+j11.90596218617625200000
-1616.881287727751000000+j13.9596330292105800000
1684.213538703670000000+j2005.831584450992300000
-1107.862909954507000000+j2661.001075342997900000
-0.008879797887799916210+j0.00000000000000000000
-0.0515105097516600400+j0.000000000000000000000
524.06845764984087000000+j170.0256814087597900000
285.15143487737930000000+j103.1788769927560900000
-939.62209716774828000000+j1047.391106513702400000
53.96865807549399800000+j960.8404149685497900000
-55.34456016264572800000+j62.83619540940096500000
1321.9956318894529000000+j36.29831839080446800000
192.84999886663360000000+j837.3142100911834400000
-1320.704275502056600000+j988.5195273240752800000
Ln 1, Col 1 DOS NUM

```

Figura 53: Código DMODAL

Este código de execução DMODAL é criado automaticamente nas interfaces dos equivalentes modais do programa HarmZs. Existem botões nestas interfaces onde o

analista passa o caminho e o nome do arquivo que conterà o código DMODAL e todo o conteúdo é salvo automaticamente.

Após o procedimento de salvar os conjuntos de polos e resíduos em um arquivo texto, formatado para o programa HarmZs, este código deve ser anexado ao arquivo da rede interna para formar o sistema reduzido. Ao fazer a leitura deste arquivo, o programa guarda todos os conjuntos de polos e resíduos na memória do computador, como faz com todos os equipamentos (linhas, transformadores, dentre outros). Quando for necessário realizar algum cálculo onde o efeito do equivalente deve ser incluído, essa inclusão é realizada como apresentado em (4.4).

Cabe lembrar que $y_{eq-kj}(s)$ é o elemento da matriz $\mathbf{Y}_{eq}(s)$ que é dada como o inverso da matriz $\mathbf{Z}_{eq}(s)$ (equação (4.3)). A matriz $\mathbf{Z}_{eq}(s)$ foi apresentada em (4.2). O elemento genérico k,j desta matriz é dado pela equação (4.1).

Capítulo 5 – A Implementação do Ajuste Vetorial no HarmZs

5.1 Introdução

Através do Método do Ajuste Vetorial, *Vector Fitting*, é possível aproximar respostas em frequência por funções racionais. Logo, curvas de respostas em frequência podem ser representadas por conjuntos de polos e resíduos. Uma das aplicações do método é no cálculo de equivalentes de redes.

A grande vantagem da utilização do método no HarmZs (versão não comercial) para o cálculo de equivalentes modais é a facilidade de implementação e o automatismo para calcular todos os polos e resíduos de uma só vez. Como observado no Capítulo 4, o programa HarmZs já possui outros métodos de cálculo de polos e resíduos implementados, mas existem algumas limitações para a utilização na construção de equivalentes, pois há dificuldades de cálculo de todos os polos de uma só vez.

O algoritmo do Método de Ajuste Vetorial foi desenvolvido utilizando a linguagem procedural Matlab [53] e é disponibilizado na internet com todo o código fonte liberado. Como o código fonte do HarmZs é em C++, foi criada uma DLL do código fonte no Matlab utilizando o Matlab Compiler, que compila arquivos com extensão “.m” em arquivos com extensão “.exe” ou “.dll”. Esta DLL é utilizada em uma versão não comercial do programa HarmZs. Detalhes da criação dessa DLL são apresentados no Anexo A.3. A comunicação entre a DLL e o programa HarmZs é feita através de MEX files [54], um pacote de arquivos necessários na comunicação entre a linguagem C e o Matlab.

Neste capítulo serão apresentados alguns detalhes de implementação do algoritmo do Método do Ajuste Vetorial. Também serão apresentadas as classes e estruturas que foram criadas.

5.2 .Comunicação entre o Matlab e o C++

O Matlab é uma linguagem matricial e todas as variáveis declaradas nesta linguagem, sejam elas escalares, vetores, matrizes, strings, dentre outras, são armazenadas como matrizes. Em C/C++, para fazer a leitura de bibliotecas compiladas nesta linguagem, uma variável do Matlab é declarada como do tipo *mxArray*. A estrutura *mxArray* traz informações tais como o tipo da matriz (se é matriz de inteiros, reais, complexos, strings, ...), suas dimensões, se é esparsa ou não, dentre outras características.

A comunicação entre o Matlab e o C/C++ é realizada através de duas bibliotecas: *MX Matrix Library* e *MEX Library*. Para acessar e manipular a estrutura *mxArray* é necessário usar as funções API existentes na biblioteca *MX Matrix Library*. Uma API (*Application Programming Interface* ou Interface de Programação de Aplicativos) é um conjunto de rotinas e padrões estabelecidos por um *software* para a utilização das suas funcionalidades por aplicativos que não pretendem envolver-se em detalhes da implementação do software, mas apenas usar suas funcionalidades. Os arquivos da biblioteca *MEX Library*, chamados também de *MEX-files*, dão suporte à utilização de executáveis do Matlab, fornecendo uma interface entre o Matlab e as subrotinas C/C++ (também subrotinas Fortran). Quando compilados, *MEX-files* são dinamicamente carregados e permitem que códigos que não são escritos em Matlab acessem funções escritas no Matlab.

Na Tabela 12 estão apresentadas as funções utilizadas para manipular a estrutura *mxArray* na implementação do Método do Ajuste Vetorial em uma versão não comercial do HarmZs e uma breve descrição das mesmas:

Tabela 12: Funções utilizadas para manipular dados do tipo mxArray

Função	Descrição
mxMalloc	Aloca memória dinamicamente
mxCreateNumericMatrix	Cria uma matriz numérica do tipo mxArray de dimensão n por m
mxSetPr	Define a parte real de uma matriz de complexos
mxSetPi	Define a parte imaginária de uma matriz de complexos
mxSetData	Define os dados de uma matriz que não é de complexos
mxGetData	Captura os dados de uma matriz de não complexos para um ponteiro
mxGetPr	Captura para um ponteiro de reais a parte real de uma matriz de complexos
mxGetPi	Captura para um ponteiro de reais a parte imaginária de uma matriz de complexos
mxGetDimensions	Captura as dimensões de uma matriz
mxDestroyArray	Libera a memória alocada dinamicamente para a variável criada pela função mxCreateNumericMatrix

Maiores informações podem ser encontradas em [54].

Na Tabela 13 estão apresentadas as variáveis criadas no C++ para entrar com os parâmetros necessários para a execução do Método do Ajuste Vetorial e as variáveis de saída obtidas pelo mesmo método. Na coluna 1 da tabela é descrito o nome da variável, na coluna 2 se a variável é de entrada ou saída e na coluna 3 a descrição da variável.

Tabela 13: Variáveis do tipo mxArray utilizadas

Variável	Argumento	Descrição
fs	Entrada	Valores da curva a ser ajustada (resposta em frequência)
s	Entrada	Vetor de frequências
poles	Entrada	Valores iniciais dos polos
weight	Entrada	Peso para dar maior precisão a determinadas amostras de frequências
Opts_vector	Entrada	Vetor de opções do Método do Ajuste Vetorial
bExito	Saída	Variável lógica que indica sucesso ou não no ajuste
SER	Saída	Matrizes A , b , c , d e e da representação de espaço de estados $f(s) \approx \mathbf{c}(s\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}\mathbf{b} + d + se$
poles	Saída	Novos polos
rmserr	Saída	Erro médio quadrático da aproximação de $f(s)$
fit	Saída	Aproximação racional das amostras

5.3 O Algoritmo para Seleção Automática das Estimativas Iniciais dos Polos

A ordem de aproximação do modelo e valor inicial dos polos são duas características importantes e devem ser abordadas com cuidado. A escolha de uma ordem de aproximação muito superior à quantidade de polos necessários para se ter um bom ajuste não atrapalha nos resultados finais, pois os polos que não são dominantes para determinada função de transferência possuirão resíduos associados muito pequenos. Embora a escolha de uma ordem muito superior ao necessário não atrapalhe no ajuste, ela pode causar problemas de performance e deixar o algoritmo do Método do Ajuste Vetorial lento. Já a escolha de uma ordem de aproximação baixa, com poucos polos para representar o modelo, pode levar a um ajuste ruim da curva, deixando de representar ressonâncias ou desviando as ressonâncias dos pontos onde elas realmente ocorrem.

Embora exista a possibilidade de se encontrar o mesmo conjunto de pólos dominantes para todas as funções de transferência e que obter um conjunto único de polos seja necessário para, posteriormente, desenvolver a síntese por circuitos RLC, como não será abordada a síntese para o equivalente modal neste trabalho, optou-se por encontrar um conjunto de polos dominantes diferente para cada função de transferência. Logo, para cada função de transferência, é primordial definir a ordem de aproximação necessária.

O valor inicial dos polos também é de suma importância. Para funções com picos de ressonância, os polos iniciais devem ser complexos conjugados com uma pequena atenuação. A pequena atenuação assegura que não ocorram possíveis problemas de solução linear em virtude de matrizes do sistema mal condicionadas. A parte imaginária β deve cobrir toda a faixa de frequência de interesse, reduzindo a probabilidade da realocação de polos a grandes distâncias e evitando assim a necessidade de muitas iterações para se conseguir um bom ajuste da curva.

Os pares de polos para funções com picos de ressonâncias devem ser escolhidos como apresentado na equação (5.1).

$$a_n = -\alpha + j\beta, \quad a_{n+1} = -\alpha - j\beta \quad (5.1)$$

onde:

$$\alpha = \beta/100 \quad (5.2)$$

Recomenda-se especificar o valor de β espaçado linearmente ao longo da faixa de frequências. Em alguns casos, a distribuição logarítmica pode fornecer uma convergência mais rápida.

Logo, foi desenvolvido um algoritmo para seleção automática dos polos iniciais e para definição da ordem da aproximação, dados que farão parte dos parâmetros de entrada do Método do Ajuste Vetorial. Este algoritmo é baseado na resposta em frequência da função de transferência em questão considerando a rede externa completa, verificando-se o número de picos da curva passada através das variáveis fs e s da Tabela 13. A cada mudança de concavidade da curva, um pico é computado. Sabe-se que para cada pico deve ser considerado um par de polos complexos conjugados. Sabe-se também que podem existir polos reais ou polos cujos efeitos são minimizados pela proximidade a zeros das funções de transferência, não provocando a mudança de concavidade da resposta em frequência.

A ordem de aproximação inicial será dada então pelo número de picos multiplicado por 2 e multiplicado por um fator de correção (*FatorMulti*). Multiplica-se por 2 para representar o complexo conjugado. Multiplica-se pelo fator de correção para levar em consideração possíveis polos reais e polos menos dominantes. Nos exemplos apresentados nessa dissertação, o fator de correção é igual a 2. Logo, para cada pico serão definidos 4 polos.

$$OrdemAproximação = NumPICOS \times 2 \times FatorMulti \quad (5.3)$$

Existem duas opções para seleção automática dos polos iniciais. Na primeira opção, encontra-se a ordem de aproximação a partir do número de picos conforme a equação (5.3) e se espaça linearmente os polos. Na segunda opção, do mesmo modo da primeira, encontra-se a ordem de aproximação, só que as frequências dos picos farão parte das

estimativas (cada pico é responsável por duas estimativas – estimativas de polos complexos e seus conjugados) e o restante das estimativas serão linearmente espaçadas entre eles. As diferenças entre as duas opções podem ser visualizadas no exemplo descrito abaixo e visualizadas na Tabela 16.

Vale lembrar que o analista pode optar por não utilizar o algoritmo para encontrar a ordem de aproximação, definindo esta ordem a seu critério. Após essa escolha, os polos iniciais serão linearmente espaçados respeitando a ordem definida pelo usuário.

Pode-se também utilizar o algoritmo como base de definição da ordem, onde após o cálculo dos polos, o analista verifica o valor dos resíduos e retira do modelo reduzido o número de polos cujos resíduos associados sejam pequenos, ou aumente a ordem, caso o número de polos escolhidos pelo algoritmo não seja suficiente para que se alcance a convergência do ajuste. Assim, caso o número de polos seja maior que o necessário, a ordem de aproximação será o número de polos definido pelo algoritmo menos o número de polos com resíduos pequenos associados. Caso o número de polos seja insuficiente, a ordem de aproximação será o número de polos definido pelo algoritmo mais um número de polos que o usuário estabelecerá para que se alcance a convergência. Mais tarde será apresentada a opção para que este ajuste fino da ordem de aproximação seja feito de modo automático.

De modo a facilitar o entendimento do algoritmo de seleção de polos, o mesmo é aplicado a um exemplo de equivalente modal de redes para o sistema IEEE 14 Barras, considerando como rede interna os elementos até segunda vizinhança, tomando como ponto de partida (barra piloto) a barra 6. Esse mesmo sistema é aplicado em outros exemplos desta dissertação.

A Figura 8, já apresentada anteriormente no Capítulo 2, é novamente apresentada na Figura 54, para facilitar o entendimento. Nesta figura é apresentada a rede interna até a vizinhança 2 marcada em tom mais claro. A parte da rede marcada em tom mais escuro diz respeito à rede externa e exatamente esta parte externa é que se tornará um equivalente modal. Pode-se também notar as barras de fronteira marcadas na cor vermelha.

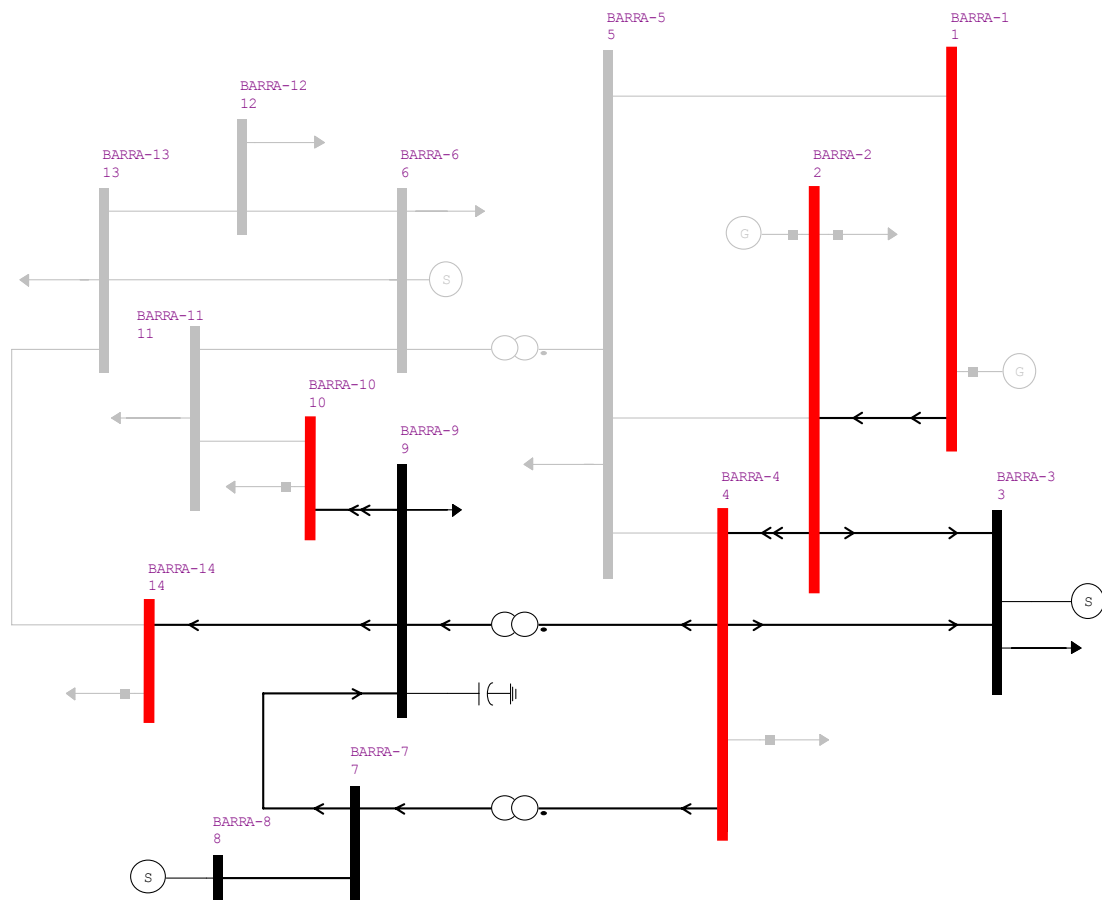


Figura 54: Rede externa para a vizinhança 2 do Sistema Elétrico IEEE 14 Barras considerando a barra 6 como piloto

O equivalente modal deve ser calculado a partir das funções de transferência das barras de fronteiras. Na Tabela 14 a seguir são apresentadas todas as funções de transferência para este exemplo em questão.

Tabela 14: Funções de transferências para a segunda vizinhança a partir da barra 6 do Sistema Elétrico IEEE 14 Barras

Barras de Fronteira	
Barra De	Barra Para
1	1
1	2
1	4
1	10
1	14
2	2
2	4
2	10
2	14
4	4
4	10
4	14
10	10
10	14
14	14

Para exemplificar, será tomado como exemplo a função de transferência entre as barras 1 e 2, considerando somente a rede externa (rede marcada em preto). A resposta em frequência de 0 a 1000 Hz desta função de transferência é apresentada na Figura 55. Pode-se visualizar dois picos nesta resposta em frequência. As frequências onde ocorrem estes picos são apresentadas na Tabela 15.

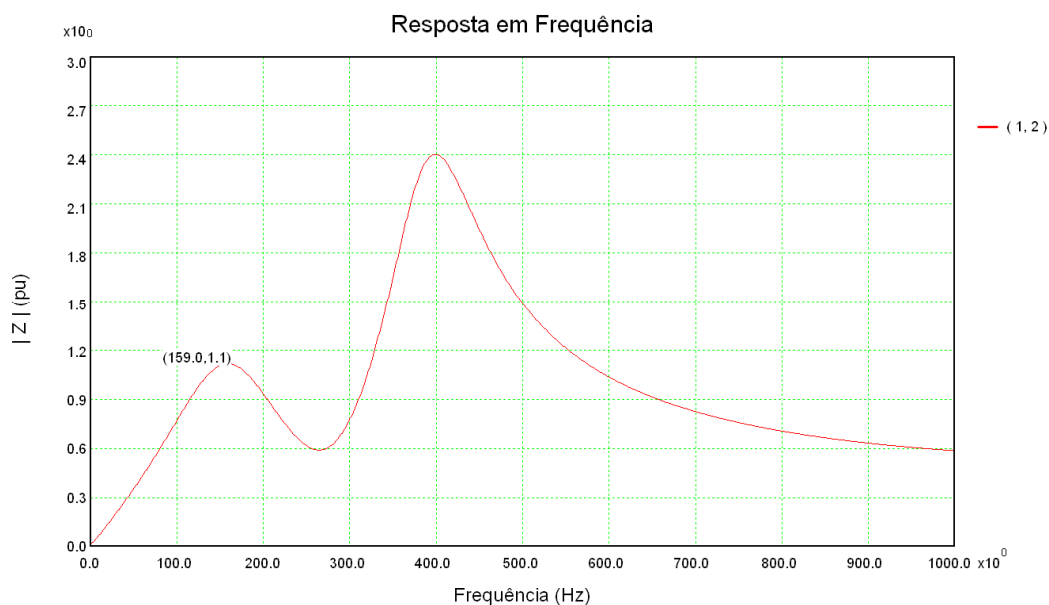


Figura 55: Visualização da resposta em frequência da função de transferência entre as barras de fronteira 1 e 2 da rede externa a partir da vizinhança 2 da barra 6 do Sistema Elétrico IEEE 14 Barras

Tabela 15: Frequências dos picos para a resposta em frequência da Figura 55

Número do Pico	Frequência do Pico (Hz)
1	159
2	399

Foi realizada a aplicação do algoritmo para as duas opções de seleção dos polos iniciais, onde as estimativas variam na faixa de frequências de 0 a 1000 Hz. O fator de correção utilizado foi igual a 2. Logo, a ordem de aproximação é dada pela multiplicação dos 2 picos por 2 para considerar o complexo conjugado e novamente multiplicado por 2 para considerar os polos reais e outros polos menos dominantes (fator de correção), totalizando 8 polos. Como frisado anteriormente, na opção 1, a ordem é encontrada automaticamente e todos os polos são espaçados linearmente. Na opção 2, as frequências dos picos fazem parte das estimativas e o restante das estimativas são linearmente espaçadas entre eles.

Tabela 16: Polos selecionados para a resposta em frequência da Figura 55

Número do Polo	Opção 1		Opção 2	
	Polos Selecionados (1/s + jRad/s)	Frequência do Polo (Hz)	Polos Selecionados (1/s + jRad/s)	Frequência do Polo (Hz)
1	0,000+j0,000	0	0,000+j0,000	0
2	0,000+j0,000	0	0,000+j0,000	0
3	-20,944+j2094,395	333,333	-9,990+j999,026	159
4	-20,944-j2094,395	-333,333	-9,990-j999,026	-159
5	-41,888+j4188,790	666,667	-25,070+j2506,991	399
6	-41,888-j4188,790	-666,667	-25,070-j2506,991	-399
7	-62,832+j6283,185	1000	-62,832+j6283,185	1000
8	-62,832-j6283,185	-1000	-62,832-j6283,185	-1000

Pode-se notar na Tabela 16 que as frequências cujos picos ocorrem são estimativas para a opção 2. Na opção 1, mesmo que elas sejam identificadas, não farão parte das estimativas, que são espaçadas linearmente na faixa de frequências de 0 a 1000 Hz. Entende-se que, devido a algumas estimativas serem as frequências dos picos, elas estão mais próximas aos valores dos polos complexos, e por esse motivo pode haver menos iterações para se obter o conjunto de polos e resíduos necessários para um bom ajuste.

Os valores dos polos alcançados nos ajustes utilizando as duas opções estão apresentados na Tabela 17. Nesta tabela é apresentada a coluna com a frequência do polo ajustado para que fosse possível verificar a diferença entre a frequência do valor inicial do polo (Tabela 16) e a frequência do polo após o ajuste. Comparando as duas opções de seleção inicial, os polos retornados pelo Método do Ajuste Vetorial após a

convergência final foram praticamente os mesmos. Observa-se uma diferença para os valores ajustados entre as duas opções para os dois polos reais e para o último par complexo. As diferenças entre os polos reais podem ser explicadas analisando-se os valores dos seus resíduos associados, cujos módulos são apresentados na mesma tabela. Pode-se verificar que os valores dos resíduos associados aos pólos reais são muito pequenos se comparados aos outros pólos. Já a diferença encontrada para o último par complexo pode ser explicada por estes polos estarem fora da faixa de frequências do ajuste, que foi de 0 a 1000 Hz. Observa-se que os outros dois pares complexos de polos, que estão dentro da faixa de frequências escolhida, cujas frequências encontram-se muito perto das frequências onde ocorrem os picos, tem valores muito semelhantes.

Tabela 17: Polos ajustados para a resposta em frequência da Figura 55

No. Polo	Opção 1			Opção 2		
	Polos Ajustados	Freq. Polo (Hz)	Módulo Resíduo	Polos Ajustados	Freq. Polo (Hz)	Módulo Resíduo
1	-15,124 +j0,000	0	0,001	-11,396 +j0,000	0	0,001
2	-120,577 +j0,000	0	0,067	-123,399 +j0,000	0	0,070
3	-470,709 +j981,858	156,268	574,284	-470,700 +j981,853	156,267	574,260
4	-470,709 -j981,858	-156,268	574,284	-470,700 -j981,853	-156,267	574,260
5	-355,860 +j2417,133	384,699	813,356	-355,857 +j2417,132	384,698	813,346
6	-355,860 -j2417,133	-384,699	813,356	-355,857 -j2417,132	-384,698	813,346
7	-1996,344 +j11804,258	1878,706	1030,38	-1953,944 +j11706,733	1863,184	986,623
8	-1996,344 -j11804,25	-1878,706	1030,38	-1953,944 -j11706,733	-1863,184	986,623

Para se fazer uma simples comparação, os polos verdadeiros, para a rede em estudo, considerando a faixa de frequências de 0 a 1000 Hz, foram calculados no programa HarmZs utilizando o Método de Polos Dominantes. Foram considerados como estimativas iniciais os valores dos polos selecionados pela opção 2. Os valores convergidos para estes polos estão apresentados na Tabela 18. Para facilitar a comparação, os polos encontrados no ajuste utilizando a opção 1 e a opção 2 são novamente apresentados. Nota-se que os valores encontrados no ajuste estão bem próximos dos valores dos polos verdadeiros encontrados pelo Método de Polos Dominantes para os polos da faixa de interesse com resíduos não desprezíveis. No

entanto, os demais pólos possuem certa diferença, que não impactam no ajuste do Método do Ajuste Vetorial. Isto comprova que polos que não influenciam significativamente no ajuste não terão alto grau de precisão, mas também não impactam na qualidade do resultado obtido. Observa-se ainda que as diferenças são mais pronunciadas quando o polo em questão está fora da faixa de interesse. Neste caso estes pólos devem ser deslocados significativamente em relação às suas reais posições para conseguir minimizar suficientemente pequenos erros de ajuste da resposta em frequência que não tenham sido eliminados pelos demais polos.

Quanto à velocidade de convergência, comparando as duas opções implementadas, a opção 2 mostrou melhores resultados, mas as diferenças notadas nas aplicações do método foram muito pequenas. No caso do ajuste da função de transferência entre as barras 1 e 2, foram necessárias duas iterações para o ajuste na opção 1 e somente uma iteração para o ajuste utilizando a opção 2. A justificativa para esta pequena diferença é dada pela capacidade de realocação de polos existente no método, onde os polos da iteração anterior são utilizados como polos iniciais da iteração seguinte. A tolerância utilizada para ambas opções foi 10^{-5} . Esta capacidade de realocação de polos inclusive justificaria o fato dos polos do ajuste utilizando a opção 1 apresentarem até melhores resultados que a opção 2, quando os valores são comparados ao cálculo dos polos utilizando o Método de Polos Dominantes.

Tabela 18: Comparação entre os polos ajustados e verdadeiros

No. Polo	Opção 1	Opção 2	Método de Polos Dominantes
1	-15,124 +j0,000	-11,396 +j0,000	-10.821 +j0.000
2	-120,577 +j0,000	-123,399 +j0,000	-119.249 +j0.000
3	-470,709 +j981,858	-470,700 +j981,853	-470.711 +j981.857
4	-470,709 -j981,858	-470,700 -j981,853	-470.711 -j981.857
5	-355,860 +j2417,133	-355,857 +j2417,132	-355.860 +j2417.133
6	-355,860 -j2417,133	-355,857 -j2417,132	-355.860 -j2417.133
7	-1996,344 +j11804,258	-1953,944 +j11706,733	-61.923 +j20031.514
8	-1996,344 -j11804,25	-1953,944 -j11706,733	-61.923 -j20031.514

5.3.1 Otimização da Definição da Ordem de Aproximação

Como explicado anteriormente, o algoritmo de definição da ordem inicial de aproximação e de seleção dos polos iniciais é baseado no número de picos da resposta em frequência de cada função de transferência das barras de fronteira da rede externa modelada por completo. Foi apresentado em (5.3) o valor da ordem baseado no número de picos, onde devem ser compensados os conjugados dos polos complexos e possíveis polos reais ou menos dominantes.

De qualquer modo, esta definição é um ponto de partida para o ajuste. A ordem de aproximação por (5.3) pode ser definida além do necessário ou até mesmo insuficiente.

Como observado também, uma definição maior que a necessária não compromete a convergência do ajuste desde que o valor não seja tão grande que faça o processamento do método perder performance sem necessidade. Vale lembrar que o HarmZs foi desenvolvido em C++ mas o Método de Ajuste Vetorial está implementado em Matlab e foi compilado para uma biblioteca para ser lido em uma versão não comercial do HarmZs. Como o Matlab não é uma linguagem voltada para performance, é importante evitar uma ordem de aproximação inicial demasiadamente grande.

Uma definição da ordem menor que a necessária traz problemas para o ajuste. Pode-se até conseguir que o método convirja, mas somente com tolerâncias do erro altas, o que leva a ajustes não muito precisos. Utilizando valores padrão de tolerância, possivelmente o limite de iterações vai ser alcançado.

Por esses motivos, foi feita a implementação de verificação da ordem inicial definida após a aplicação do Método de Ajuste Vetorial, aumentando ou diminuindo a ordem de aproximação do modelo automaticamente.

Após o primeiro ajuste, o número de iterações é verificado. Existem duas opções de verificações que podem ser escolhidas na interface gráfica do programa:

- Caso o número de iterações seja menor que o número de iterações máximo informado pelo usuário, a ordem de aproximação será diminuída. O quanto a

ordem pode diminuir deverá ser informado pelo usuário. O valor padrão apresentado na interface do programa HarmZs é de 10 polos. Após a diminuição da ordem, o método é aplicado novamente, verificando-se o novo número de iterações alcançado. Caso este número continue menor que o limite de iterações, uma nova diminuição é feita. Esse processo continua até que o método não convirja para a ordem diminuída. Neste momento, a última ordem de aproximação que não levou ao limite de iterações é restabelecida, o método é novamente aplicado e o processamento é realizado com sucesso. Pode-se também estabelecer um limite de decrementos e, caso este limite seja alcançado antes do método não convergir (que é o critério de parada), o processamento também é finalizado.

- Caso o número de iterações seja maior que número de iterações máximo informado pelo usuário, a ordem de aproximação será aumentada. O quanto a ordem será aumentada deverá ser informado pelo usuário. O valor padrão apresentado na interface do programa é o mesmo da diminuição da ordem, 10 polos. A cada aumento, o método é novamente aplicado e o número de iterações é verificado. O processamento é finalizado quando o número de iterações obtido é menor que o número de iterações máximo, ou quando o limite de incrementos é alcançado.

Cabe lembrar que a ativação destas opções de verificação poderão comprometer o tempo de processamento, principalmente quando é habilitada a opção de diminuir a ordem. No capítulo de testes serão apresentadas comparações para um sistema de grande porte com as todas as possibilidades de verificação, apresentando os tempos de processamento e o valor da ordem de aproximação obtidos.

5.4 A implementação do Método de Ajuste Vetorial no HarmZs

Após compilar o código do algoritmo do Método de Ajuste Vetorial em Matlab, foi necessário desenvolver várias implementações para que fosse possível a utilização da

biblioteca criada no HarmZs (versão não comercial). A seguir serão apresentadas algumas estruturas e classes que foram criadas.

5.4.1 Estrutura Modos

Esta estrutura foi criada para armazenar os valores de um polo e seu resíduo associado. Também são armazenadas as barras de injeção (entrada) e monitoração (saída) da função de transferência desejada. Caso o equivalente seja monobarra, os valores dos elementos (resistência e capacitância do ramo paralelo, resistência e indutância do ramo série) também podem ser apresentados. Uma função de transferência possui n polos, logo, serão criados n objetos desta estrutura.

Na Figura 56 está apresentado o diagrama em UML da estrutura Modos. Na Tabela 19 são apresentados os dados membros desta estrutura.

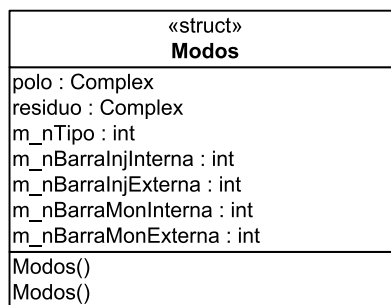


Figura 56: Estrutura Modos

Tabela 19: Dados membros da estrutura Modos

Dado Membro	Descrição
Complex polo	Parte real e imaginária do polo
Complex residuo	Parte real e imaginária do resíduo associado
int m_nTipo	Se o polo é complexo ou real
int m_nBarralnjInterna	Número interno da barra de injeção
int m_nBarralnjExterna	Número externo da barra de injeção
int m_nBarraMonInterna	Número interno da barra de monitoração
int m_nBarraMonExterna	Número externo da barra de monitoração

5.4.2 Estrutura OpcoesVectorFitting

Esta estrutura foi criada para armazenar as opções necessárias para execução do Método de Ajuste Vetorial. Estas opções são definidas nas interfaces criadas no programa HarmZs e podem ser modificadas a critério do usuário.

Na Figura 57 está apresentado o diagrama em UML da estrutura OpcoesVectorFitting e na Tabela 20 são apresentados os dados membros desta estrutura.

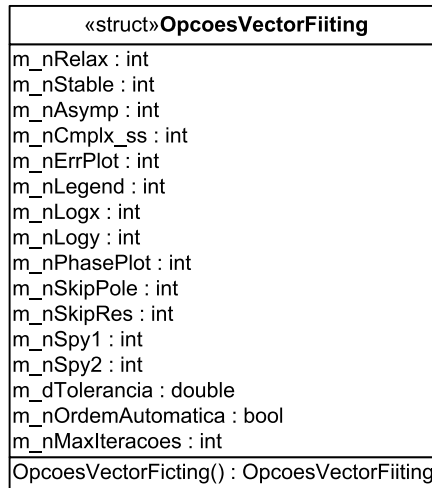


Figura 57: Estrutura OpcoesVectorFitting

Tabela 20: Dados membros da estrutura OpcoesVectorFitting

Dado Membro	Descrição
int m_nRelax	= 1 → permite o relaxamento de restrições de não-trivialidade
int m_nStable	= 0 → permite que existam polos instáveis = 1 → força a existência de somente polos estáveis
int m_nAsymp	= 0 → Modelo com $d = 0, e = 0$ = 1 → Modelo com $d \neq 0, e = 0$ = 2 → Modelo com $d \neq 0, e \neq 0$
int m_nCmplx_ss	= 1 → Modelo em espaço de estado complexo ($\mathbf{A}, \mathbf{b}, \mathbf{c}, d, e$) com \mathbf{A} diagonal = 0 → Modelo em espaço de estado real com \mathbf{A} diagonal
int m_nErrPlot	= 1 → Inclui o traçado do desvio no gráfico
int m_nLegend	= 1 → Inclui legendas nos gráficos
int m_nLogx	= 0 → traçados usando a abscissa com escala linear = 1 → traçados usando a abscissa com escala logarítmica
int m_nLogy	= 0 → traçados usando a ordenada com escala linear = 1 → traçados usando a ordenada com escala logarítmica
int m_nSkipPole	= 1 → não realiza o cálculo de polos
int m_nSkipRes	= 1 → não realiza o cálculo de \mathbf{c}, d, e . (usar o valor “1” pode ser útil para aumentar a velocidade de computação)
int m_nSpy1	= 1 → traça o resultado do ajuste (magnitude) associado com a primeira etapa de VF (identificação de polos)
int m_nSpy2	= 1 → cria o traçado do resultado do ajuste (magnitude)
double m_dTolerancia	Tolerância do erro para critério de parada do método
BOOL m_nOrdemAutomatica	Indica se o usuário definiu a ordem do modelo ou se vai ser utilizada a ordem automática
int m_nMaxIteracoes	Número máximo de iterações que pode ser alcançado

5.4.3 Classe CVectorFitting

Esta classe faz toda a preparação para que a DLL do Método de Ajuste Vetorial seja chamada. Todas as variáveis necessárias para a chamada da DLL são criadas. Nela também se faz a seleção inicial dos polos. É nessa classe que os valores das funções de transferência (impedâncias complexas das barras de fronteira para a faixa de frequência desejada), necessários para o Método de Ajuste Vetorial, são calculados.

Na Figura 58 está apresentado o diagrama em UML da classe CVectorFitting.

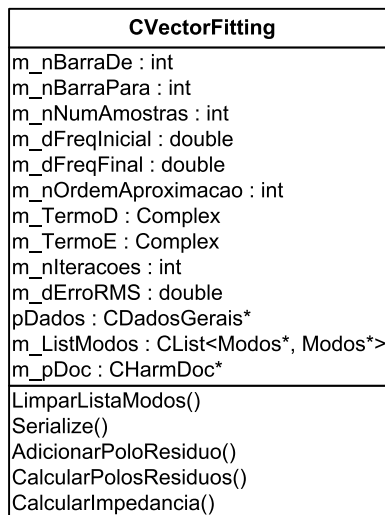


Figura 58: Classe CVectorFitting

Na Tabela 21 são apresentados os dados membros desta classe e na Tabela 22 suas funções membro.

Tabela 21: Dados membros da classe CVectorFitting

Dado Membro	Descrição
int m_nBarraDe	Número externo da barra de injeção
int m_nBarraPara	Número externo da barra de monitoração
int m_nNumAmostras	Número de amostras de frequências
double m_dFreqInicial	Frequência inicial da faixa de frequências estudada
double m_dFreqFinal	Frequência final da faixa de frequências estudada
int m_nOrdemAproximacao	Ordem de aproximação do número de polos
Complex m_TermoD	Valor do termo d
Complex m_TermoE	Valor do termo e
double m_dErroRMS	Valor do erro médio quadrático obtido
int m_nIteracoes	Número de iterações alcançado até obter a convergência
CDadosGerais* pDados	Ponteiro para o objeto de CDadosGerais (dados gerais da rede elétrica como, por exemplo, a frequência nominal, se os dados estão em pu, dentre outros)
CList<Modos*, Modos*> m_ListModos	Armazena em uma lista os objetos do tipo Modos que contem informações de um polo, resíduo associado e barras de injeção e monitoração. Se for complexo não adiciona conjugado
CHarmDoc* m_pDoc	Ponteiro para o objeto da classe CHarmDoc que acessa um grande número de informações sobre a rede elétrica, cálculos diversos, metodologias, dentre outras

Tabela 22: Funções membros da classe CVectorFitting

Dado Membro	Descrição
void LimparListaModos()	Limpa a lista m_ListModos para executar o cálculo de novas funções de transferência
int Serialize(CString& str, int nIDVersao = VERATUAL)	Faz a leitura de dados de funções de transferência (barras de injeção, barras de monitoração, polos e resíduos) escritas em arquivos texto, através do código DMODAL
void AdicionarPoloResiduo(CString& str)	Utilizada na leitura de arquivos texto com código DMODAL para criar um objeto da estrutura Modos, assumir o valor do polo e do resíduo e adicionar esse objeto à lista m_ListModos
int CalcularPolosResiduos(int nBarra1, int nBarra2, int nN, int nNs, double dFreqInicial, double dFreqFinal, OpcoesVectorFicting OptVect)	Chama as funções da DLL do <i>Vector Fitting</i> para calcular os polos e resíduos para a função de transferência desejada
Complex CalcularImpedancia(Complex s)	Calcula a impedância através da equação $z_{eq-kj}(s) \cong \sum_{i \in \Omega} \frac{R_i^{(kj)}}{(s - \lambda_i^{(kj)})} + d^{(kj)} + e^{(kj)}s$ para uma determinada frequência

Capítulo 6 – Testes Realizados

6.1 Introdução

Neste capítulo serão apresentados os testes de validação dos cálculos dos equivalentes modais. Serão realizados dois tipos de testes, levando-se em consideração as seguintes características:

- Testes onde a rede interna não está definida: será utilizado primeiramente o critério de vizinhanças elétricas para que esta seja definida. Após esta definição será calculado o equivalente modal a partir da rede externa, cuja rede é subproduto do algoritmo de vizinhanças. Para isto, é utilizada a interface gráfica denominada de Interface Gráfica 1, apresentada na Figura 59, onde o arquivo completo da rede é utilizado. Utilizando esta interface, há uma separação da rede completa em rede interna e rede externa para, a partir desta rede externa, ser calculado o equivalente modal (aplicando o Método do Ajuste Vetorial). Também será utilizada a Interface Gráfica 2, apresentada na Figura 60 para validar a criação dos equivalentes modais realizando a comparação entre a rede externa a partir do seu modelo completo e do seu modelo reduzido (polos e resíduos calculados pelo Método do Ajuste Vetorial). Estes exemplos se referem aos itens 6.2 (caso IEEE 14 Barras) e 6.4 (Teste em Sistema de Grande Porte – SIN).
- Testes onde já se tem a rede interna bem definida: somente o cálculo do equivalente modal será utilizado. Para isto, é utilizada a interface gráfica denominada de Interface Gráfica 2, apresentada na Figura 60, onde somente o arquivo da rede externa será utilizado para o cálculo do equivalente. Neste caso, o analista deve ter a rede interna e externa separadas e fornecer a rede externa como dado de entrada para o programa, para que seja aplicado o Método do Ajuste Vetorial. Será validada a criação dos equivalentes modais realizando a comparação entre a rede externa utilizando o modelo completo e o modelo reduzido (polos e resíduos calculados pelo Método do Ajuste Vetorial). Este exemplo se refere ao item 6.3 (caso Sistema Sul-Sudeste + Industrial).

Na Figura 59 e na Figura 60, são apresentadas as duas interfaces gráficas implementadas no programa HarmZs e que serão utilizadas nos testes seguintes. No Anexo A.1 são apresentados detalhes destas interfaces.

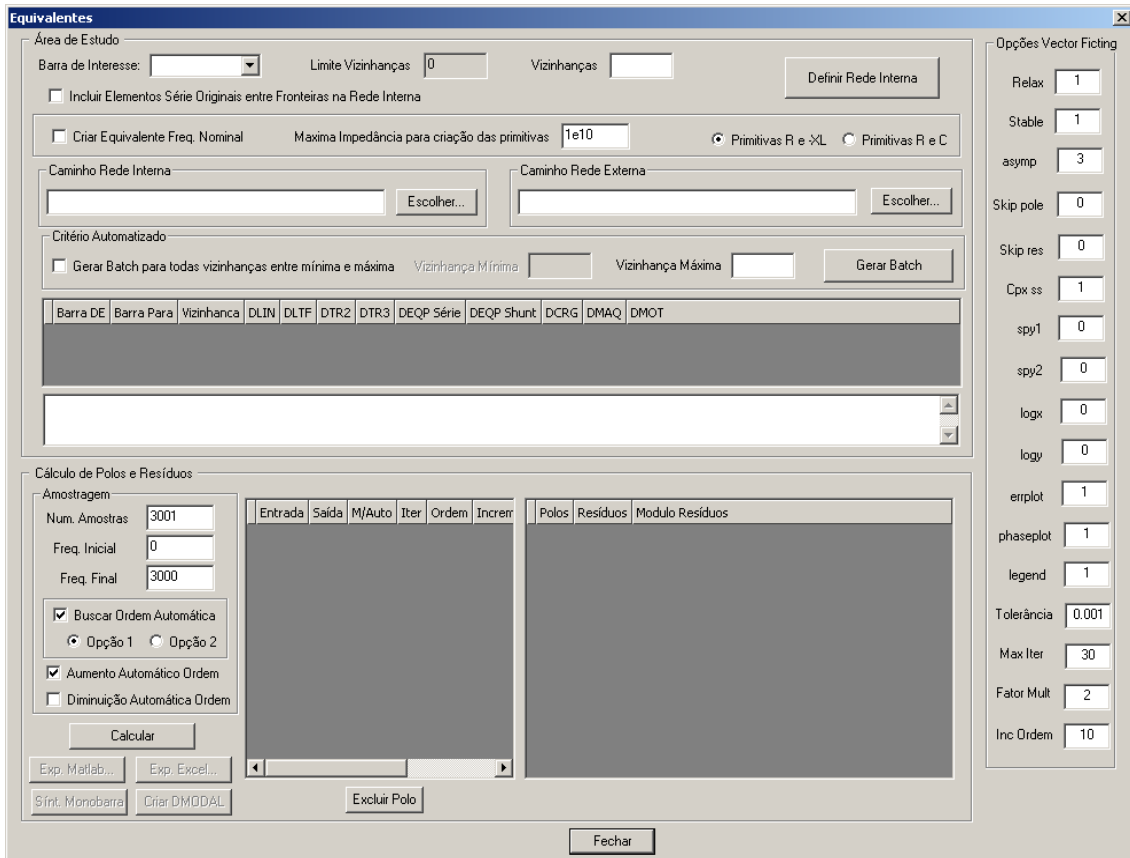


Figura 59: Interface 1 para os teste onde não se tem a rede interna definida

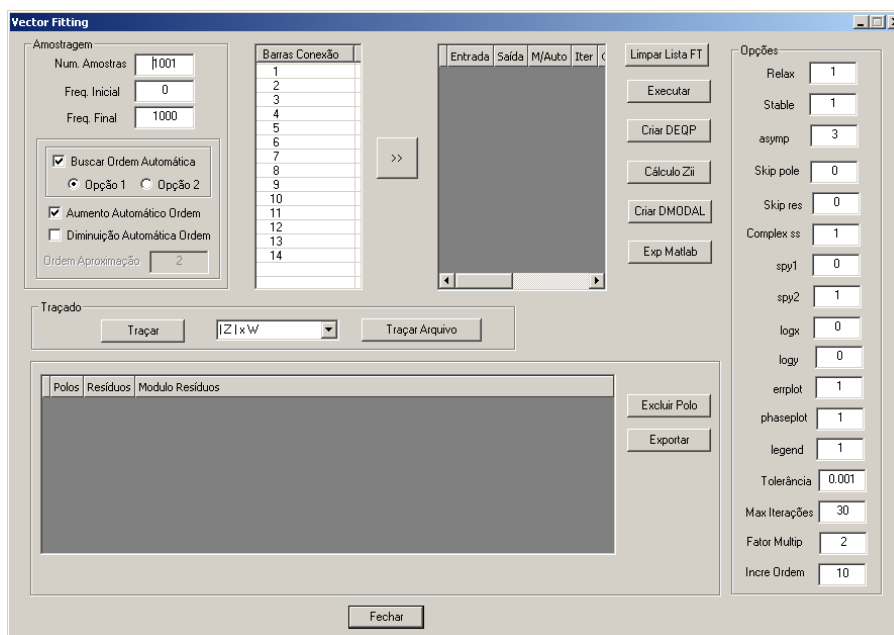


Figura 60: Interface 2 para os testes onde já se tem a rede interna definida

Também serão traçadas curvas com a resposta em frequência do sistema reduzido considerando equivalentes convencionais para que seja comparada a diferença entre os resultados dos equivalentes convencional e modal.

Nos ajustes vetoriais utilizou-se uma tolerância de erro igual a 10^{-6} . Isto significa que o erro médio quadrático de todas as curvas ajustadas é menor do que esta tolerância. No entanto, quando o equivalente modal é conectado à rede interna (sistemas reduzidos), este erro pode aumentar um pouco. Não foram medidos os erros dos sistemas reduzidos, no entanto, em todos os casos analisados, as curvas eram visualmente coincidentes, indicando que os erros continuavam muito baixos. Deve-se ressaltar que estas pequenas diferenças de ordens de grandeza de erros entre as curvas de resposta em frequência que podem variar por exemplo de 10^{-4} a 10^{-6} , são irrelevantes, considerando que na modelagem em um programa de transitórios eletromagnéticos, este tipo de erro é desprezível frente a outras considerações assumidas como, por exemplo, a definição aproximada de altura média para cálculo de parâmetros de linhas, resistividade e estratificação de solo, modelagem de dependência com a frequência dos equipamentos, capacitâncias parasitas, não linearidades, entre muitas outras.

As opções de busca automática da ordem de aproximação e do ajuste automático desta ordem, opções apresentadas no item 5.3.1, serão aplicadas em todos os testes apresentados.

Para todos os testes serão apresentadas tabelas contendo os valores dos polos e seus resíduos associados para as aproximações obtidas pelo Método do Ajuste Vetorial. Nestas tabelas, para apresentar os valores do módulo dos resíduos, ou quando os valores dos polos eram muito pequenos ou grandes, optou-se por utilizar a notação científica do tipo “1,23e-4” no lugar de “1,23 10^{-4} ” para facilitar a visualização dos resultados. Os valores dos ângulos dos resíduos estão apresentados em graus.

6.2 IEEE 14 Barras

O primeiro teste será realizado no sistema elétrico IEEE14 Barras. Este sistema já foi utilizado nesta dissertação para diversos testes.

Como informado na introdução deste capítulo, neste teste será suposto que não se tem a rede interna definida e que se deseja defini-la através do critério de vizinhanças elétricas e usar um equivalente modal para o restante da rede. Logo, será utilizado o sistema completo IEEE 14 Barras para que seja definida esta rede interna. Do mesmo modo que em exemplos anteriores onde foi utilizado este sistema, a barra piloto, dado de entrada do algoritmo de vizinhanças, é a barra 6. Serão apresentadas simulações considerando duas redes internas, uma definida até a primeira vizinhança e outra até segunda vizinhança, ambas a partir da barra piloto. Serão traçadas todas as curvas de resposta em frequência próprias e de transferências das barras de fronteira da primeira vizinhança para que seja possível comparar os resultados entre a primeira e segunda vizinhanças.

Primeiramente, serão apresentadas as comparações entre a rede externa completa e a rede externa representada por seu modelo modal. Entenda-se como rede externa completa a rede subproduto do algoritmo de vizinhanças onde todos os elementos desta rede são modelados por seus modelos matemáticos completos (modelos das linhas, equipamentos RLC, transformadores, motores, dentre outros). O modelo modal é dado por um conjunto de polos e resíduos ajustados pelo Método do Ajuste Vetorial. Estas comparações serão feitas por 2 traçados em cada gráfico, a primeira em vermelho do sistema elétrico externo completo e a segunda em azul do modelo modal dado pela

equação
$$z_{eq-kj}(s) \cong \sum_{i \in \Omega_{kj}} \frac{R_i^{(kj)}}{(s - \lambda_i^{(kj)})} + d^{(kj)} + e^{(kj)}s.$$
 Cabe observar que as comparações

apresentadas serão do módulo e do ângulo das impedâncias próprias e de transferências das barras de fronteira.

Após validar o modelo reduzido (modal) para a rede externa, são apresentadas comparações entre a rede completa (rede interna e rede externa conectadas, ambas representadas por seus modelos matemáticos completos) e o sistema reduzido (rede interna e equivalente modal). Para validar o cálculo do equivalente modal para as 2

redes internas consideradas (vizinhança 1 e vizinhança 2), serão comparados 3 traçados para a vizinhança 1 e 4 traçados para a vizinhança 2 (pois nos testes da vizinhança 2 é considerado o traçado do sistema reduzido considerando a vizinhança 1, para comparação) em cada gráfico.

Optou-se por monitorar as respostas em frequências das barras de fronteira da vizinhança 1 na apresentação das comparações do modelo reduzido. Logo, para a vizinhança 2, também serão monitoradas as barras de fronteira da vizinhança 1. Esta escolha foi tomada para que fosse possível visualizar a evolução do equivalente convencional da vizinhança 1 para a vizinhança 2. Optou-se também por monitorar a barra piloto.

Deste modo, um resumo das comparações do sistema completo e do sistema reduzido é apresentado a seguir:

- Modelo completo, onde toda a rede do sistema elétrico IEEE 14 Barras é representado;
- Sistema reduzido composto pela rede interna (1 ou 2 vizinhanças) e equivalente modal;
- Sistema reduzido composto pela rede interna (1 e/ou 2 vizinhanças) e equivalente convencional na frequência fundamental (60 Hz).

Para a aplicação do Método do Ajuste Vetorial, foi considerada a faixa de frequência de 0 a 3000 Hz, com um total de 3001 amostras (passo de 1 Hz). Optou-se por realizar a busca automática da ordem de aproximação e por fazer o ajuste automático da ordem (aumento ou diminuição da ordem) caso fosse possível. Assim, evita-se uma baixa ordem de aproximação ou, no caso oposto, uma ordem muito maior que a necessária. O fator de correção utilizado foi igual a 2 e o fator de incremento/diminuição foi igual a 2 polos.

6.2.1 Testes considerando 1 vizinhança

A Figura 61 apresenta a rede do Sistema Elétrico IEEE 14 Barras e em evidência as duas redes: a rede interna até a vizinhança 1, apresentada com seus elementos na cor cinza, e a rede externa à vizinhança 1, apresentada na cor preta. As barras marcadas na cor amarela denotam as barras de fronteira da vizinhança 1.

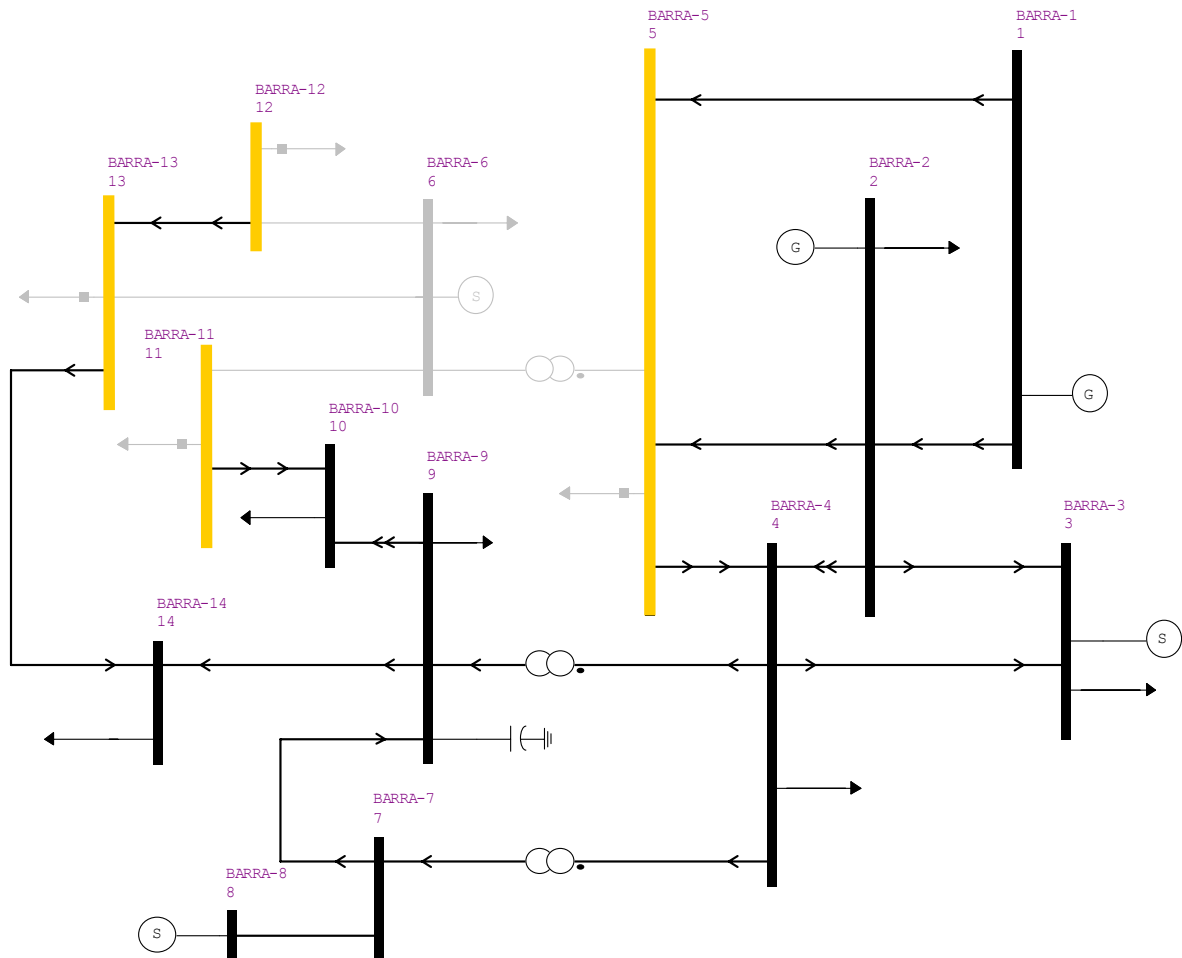


Figura 61: Rede externa para a vizinhança 1 do Sistema Elétrico IEEE 14 Barras considerando a barra 6 como piloto

Considerando as 4 barras de fronteira, tem-se, na Tabela 23, todas as funções de transferência entre elas que serão apresentadas nas comparações. A ordem de aproximação do ajuste e o número de iterações alcançado de cada função de transferência também são apresentados nesta tabela. Quando foi preciso fazer o incremento ou decremento da ordem de aproximação (item 5.3.1), o valor da quantidade de incrementos (valor positivo) ou decrementos (valor negativo) é apresentado entre parênteses na mesma coluna da ordem.

Tabela 23: Funções de transferências da vizinhança 1 a partir da barra 6 do Sistema IEEE 14 Barras

FTs das Barras de Fronteira			
Barra De	Barra Para	Ordem	Iterações
5	5	26 (-1)	1
5	11	24 (2)	2
5	12	20 (-2)	2
5	13	20 (-2)	2
11	11	20 (6)	4
11	12	18 (7)	2
11	13	18 (7)	2
12	12	18 (7)	1
12	13	18 (7)	1
13	13	18 (7)	1

A seguir serão apresentadas duas comparações:

- Comparação entre a rede elétrica externa completa e representada pelo modelo

modal dado pela equação
$$z_{eq-kj}(s) \cong \sum_{i \in \Omega_{kj}} \frac{R_i^{(kj)}}{(s - \lambda_i^{(kj)})} + d^{(kj)} + e^{(kj)}s;$$

- Comparação entre a rede completa e o modelo reduzido para a vizinhança 1.

6.2.1.1 Comparação entre a Rede Externa Completa e a Rede Representada pelo Modelo Modal

Da Figura 62 até a Figura 81 tem-se a comparação entre as respostas em frequência dos módulos e ângulos das impedâncias das barras de fronteira da rede externa representada por seu modelo completo (gráficos em vermelho) e a rede externa representada pelo

modelo modal dado por
$$z_{eq-kj}(s) \cong \sum_{i \in \Omega_{kj}} \frac{R_i^{(kj)}}{(s - \lambda_i^{(kj)})} + d^{(kj)} + e^{(kj)}s$$
 (gráficos em azul).

Nos gráficos representados pelo modelo modal (gráficos em azul), tem-se na legenda a ordem de aproximação do modelo. Os valores dos polos e resíduos associados para esta ordem estão apresentados da Tabela 24 à Tabela 33. Os polos complexos com parte imaginária negativa não estão apresentados nas tabelas para poupar espaço, mas eles foram calculados e contabilizados no valor informado para a ordem de aproximação.

Pode-se observar em todos os gráficos que as duas curvas estão sobrepostas, o que indica que o modelo modal representa com fidelidade a rede externa e que a aplicação do Método do Ajuste Vetorial foi realizada com sucesso.

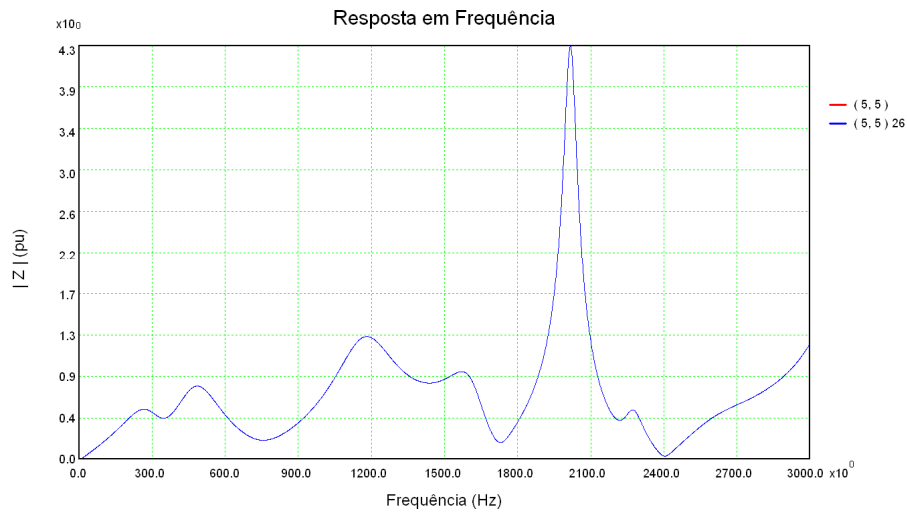


Figura 62: Resposta em frequência do módulo da impedância da barra 5 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)

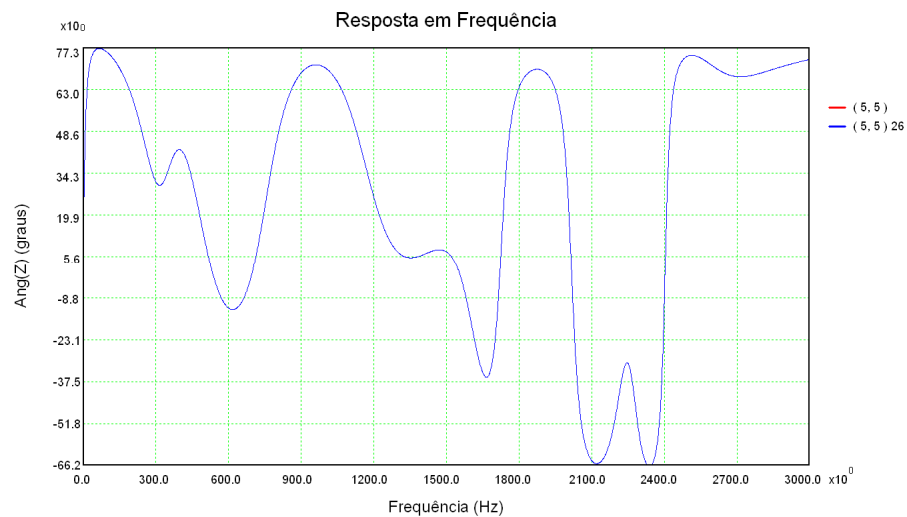


Figura 63: Resposta em frequência do ângulo da impedância da barra 5 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)

Tabela 24: Conjunto de polos e resíduos da função de transferência (5,5)

Freq (Hz)	Polo	Resíduo	
		Mód.	Âng.
0,0	-6,50054	3,01e-2	180
0,0	-18,9600	5,81e-3	180
0,0	-88,1371	3,36e-2	180
0,0	-1,41e+6	1,78e+8	180
285,4	-587,175 + j 1793,29	2,66e+2	-4,74
477,3	-668,754 + j 2999,05	5,11e+2	28,3
1170,9	-834,834 + j 7356,77	8,58e+2	37,0
1614,9	-530,938 + j 10146,7	3,69e+2	-53,3
1577,2	-6267,98 + j 9909,62	1,72e+2	-33,8
2017,1	-181,943 + j 12673,9	7,65e+2	-1,45
2272,4	-279,530 + j 14278,0	9,79e+1	-26,9
2597,5	-1153,66 + j 16320,8	1,73e+2	84,8
3197,0	-175,657 + j 20087,6	9,18e+2	17,4
3353,2	-1495,14 + j 21068,5	1,14e+3	-10,8
4515,0	-2973,25 + j 28368,3	4,86e+3	17,7

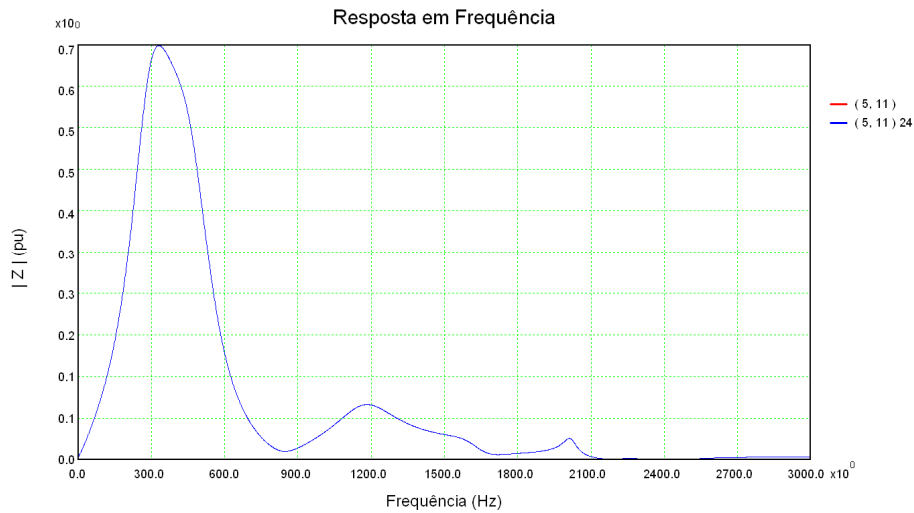


Figura 64: Resposta em frequência do módulo da impedância de transferência entre as barras 5 e 11 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)

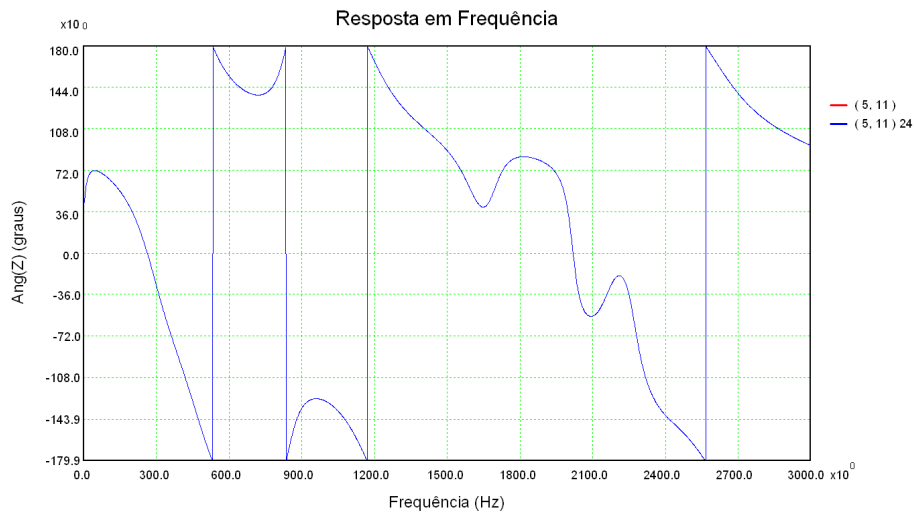


Figura 65: Resposta em frequência do ângulo da impedância de transferência entre as barras 5 e 11 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)

Tabela 25: Conjunto de polos e resíduos da função de transferência (5,11)

Freq (Hz)	Polo	Resíduo	
		Mód.	Âng.
0,0	-0,12479	6,95e-5	0,00
0,0	-6,82262	4,54e-2	180
0,0	-41,5512	3,03e-2	180
0,0	-72,0233	4,51e-2	180
285,4	-587,175 + j 1793,29	4,62e+2	8,94
477,3	-668,754 + j 2999,05	4,05e+2	177
1170,9	-834,835 + j 7356,77	8,37e+1	-174
1614,9	-530,937 + j 10146,7	1,29e+1	-18,3
1573,7	-6284,11 + j 9887,87	9,51e+0	22,0
2017,1	-181,943 + j 12673,9	6,43e+0	-6,18
2272,4	-279,527 + j 14278,0	1,02e+0	-67,9
2597,5	-1153,58 + j 16320,8	6,20e+0	-149
3201,9	-138,323 + j 20118,3	1,52e+0	9,86
3406,7	-1491,91 + j 21404,8	6,71e+0	1,04



Figura 66: Resposta em frequência do módulo da impedância de transferência entre as barras 5 e 12 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)

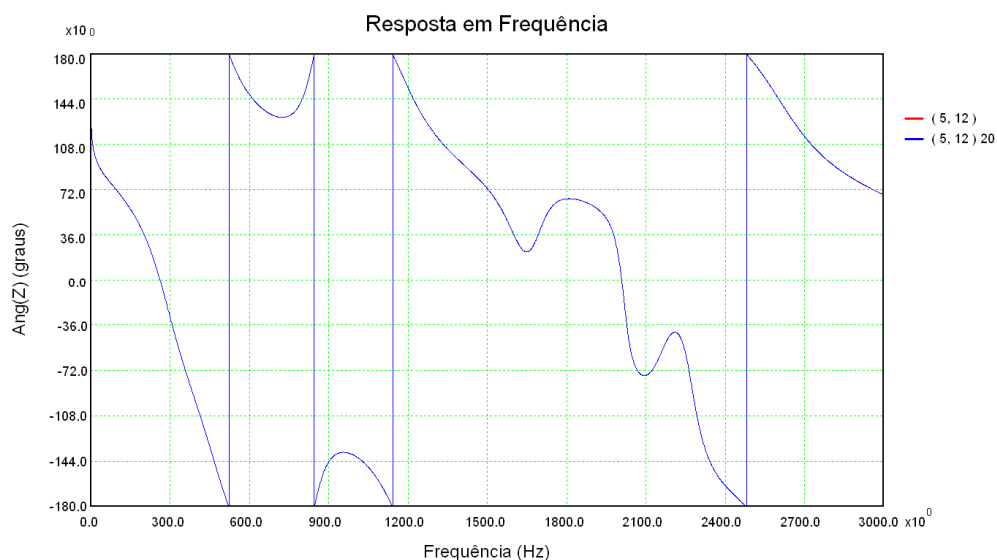


Figura 67: Resposta em frequência do ângulo da impedância de transferência entre as barras 5 e 12 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)

Tabela 26: Conjunto de polos e resíduos da função de transferência (5,12)

Freq (Hz)	Polo	Resíduo	
		Mód.	Âng.
0,0	-6,18391	2,11e-3	0,00
0,0	-53,1209	1,10e-1	0,00
285,4	-587,186 + j 1793,30	2,76e+2	7,37
477,3	-668,761 + j 2999,06	2,40e+2	172
1170,9	-834,912 + j 7356,72	4,69e+1	173
1614,9	-530,849 + j 10146,5	6,79e+0	-36,2
1422,8	-5919,42 + j 8939,67	4,92e+0	17,6
2017,1	-181,948 + j 12673,9	3,20e+0	-26,9
2272,5	-279,085 + j 14278,6	4,91e-1	-90,6
2598,7	-1157,69 + j 16328,4	2,92e+0	-175
3315,7	-500,165 + j 20833,4	2,63e+0	-29,2



Figura 68: Resposta em frequência do módulo da impedância de transferência entre as barras 5 e 13 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)

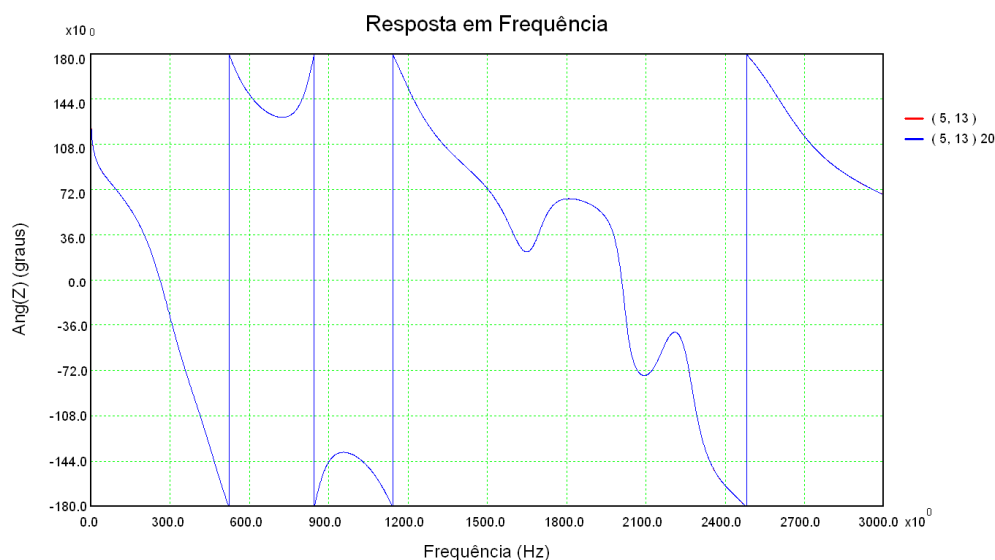


Figura 69: Resposta em frequência do ângulo da impedância de transferência entre as barras 5 e 13 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)

Tabela 27: Conjunto de polos e resíduos da função de transferência (5,13)

Freq (Hz)	Polo	Resíduo	
		Mód.	Âng.
0,0	-6,18391	2,11e-3	0,00
0,0	-53,1209	1,10e-1	0,00
285,4	-587,186 + j 1793,30	2,76e+2	7,37
477,3	-668,761 + j 2999,06	2,40e+2	172
1170,9	-834,912 + j 7356,72	4,69e+1	173
1614,9	-530,849 + j 10146,5	6,79e+0	-36,2
1422,8	-5919,42 + j 8939,67	4,92e+0	17,6
2017,1	-181,948 + j 12673,9	3,20e+0	-26,9
2272,5	-279,085 + j 14278,6	4,91e-1	-90,6
2598,7	-1157,69 + j 16328,4	2,92e+0	-175
3315,7	-500,165 + j 20833,4	2,63e+0	-29,2

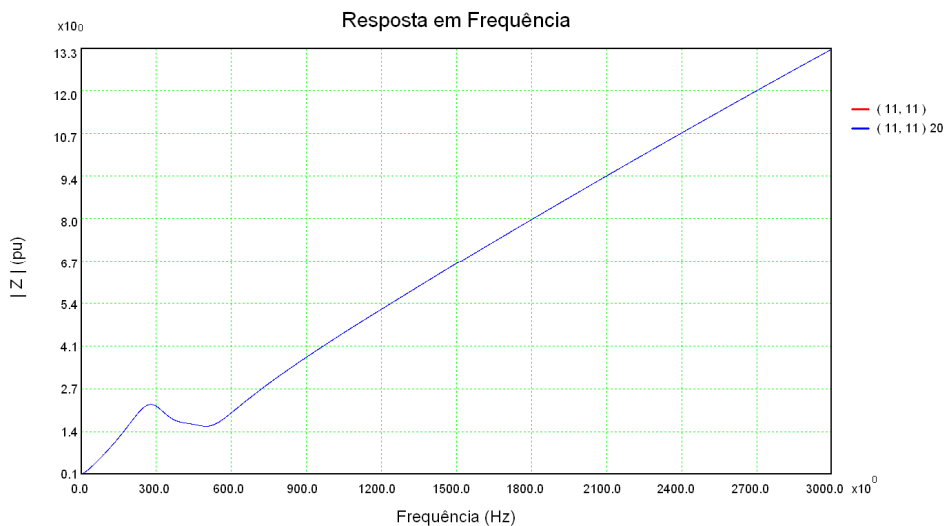


Figura 70: Resposta em frequência do módulo da impedância da barra 11 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)

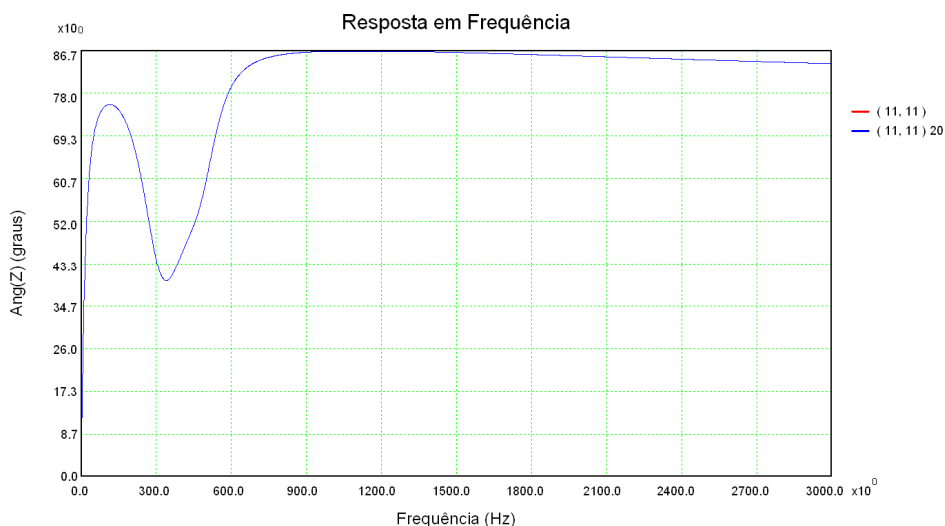


Figura 71: Resposta em frequência do ângulo da impedância da barra 11 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)

Tabela 28: Conjunto de polos e resíduos da função de transferência (11,11)

Freq (Hz)	Polo	Resíduo	
		Mód.	Âng.
0,0	-0,62298	1,81e-2	180
0,0	-6,50499	6,05e-2	180
0,0	-17,7440	1,50e-2	180
0,0	-56,9345	3,53e-1	180
0,0	-20253,4	4,96e+1	180
0,0	-54015,5	6,53e+5	180
285,4	-587,174 + j 1793,30	8,01e+2	22,6
477,3	-668,761 + j 2999,04	3,21e+2	-35,1
1170,9	-834,332 + j 7356,77	8,15e+0	-24,2
1614,4	-531,735 + j 10143,8	4,50e-1	17,2
2017,3	-183,453 + j 12674,8	5,47e-2	-11,3
2273,3	-306,633 + j 14283,8	1,24e-2	-111
2605,1	-1161,17 + j 16368,4	2,24e-1	-28,0

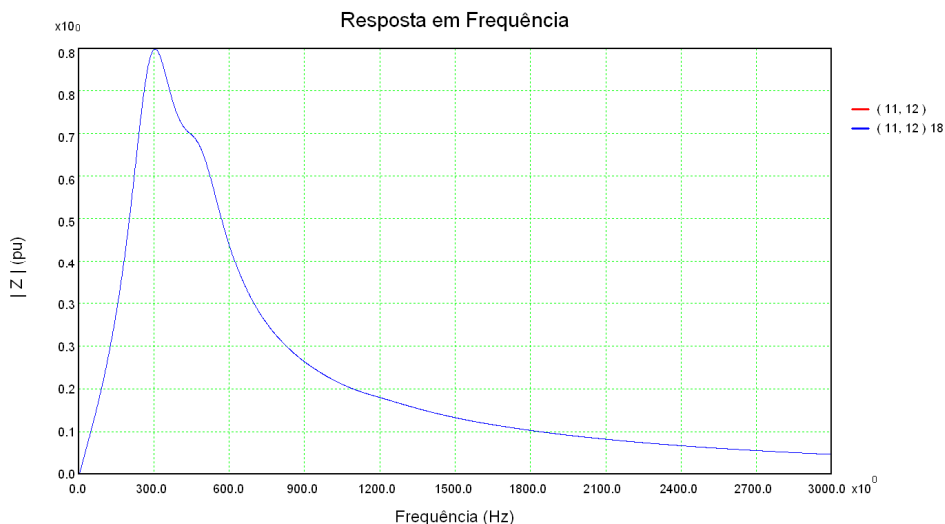


Figura 72: Resposta em frequência do módulo da impedância de transferência entre as barras 11 e 12 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)

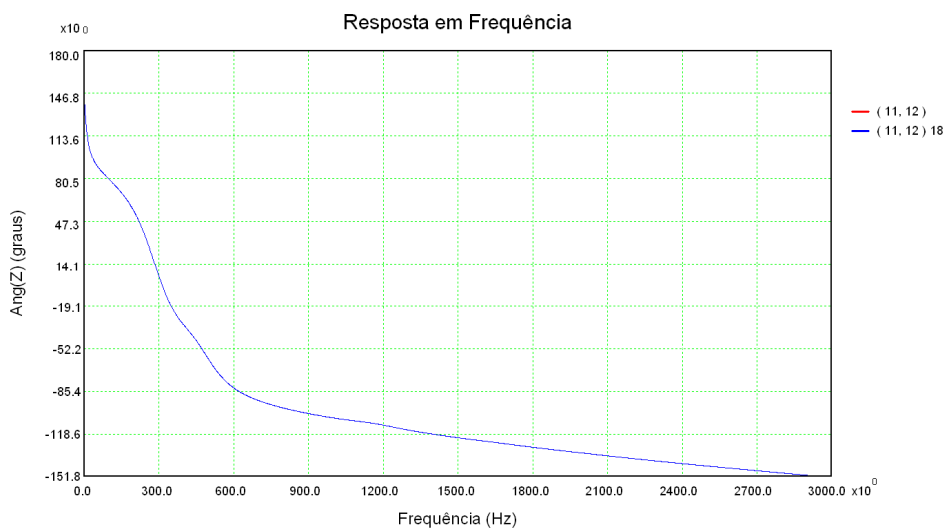


Figura 73: Resposta em frequência do ângulo da impedância de transferência entre as barras 11 e 12 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)

Tabela 29: Conjunto de polos e resíduos da função de transferência (11,12)

Freq (Hz)	Polo	Resíduo	
		Mód.	Âng.
0,0	-7,50946	4,21e-3	0,00
0,0	-56,6285	6,75e-1	0,00
0,0	-18664,7	1,80e+3	180
0,0	-52593,1	5,71e+2	0,00
285,4	-587,173 + j 1793,30	4,79e+2	21,1
477,3	-668,762 + j 2999,04	1,90e+2	-39,9
1170,9	-834,300 + j 7356,77	4,57e+0	-38,0
1614,4	-531,705 + j 10143,6	2,37e-1	-0,70
2017,3	-183,590 + j 12674,8	2,72e-2	-32,0
2273,4	-308,731 + j 14283,9	6,01e-3	-133
2605,4	-1166,11 + j 16370,2	1,05e-1	-53,6

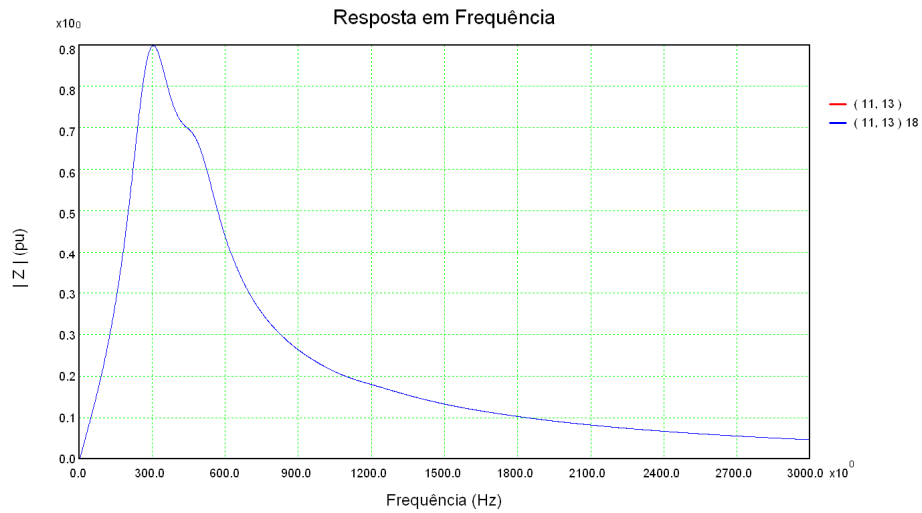


Figura 74: Resposta em frequência do módulo da impedância de transferência entre as barras 11 e 13 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)

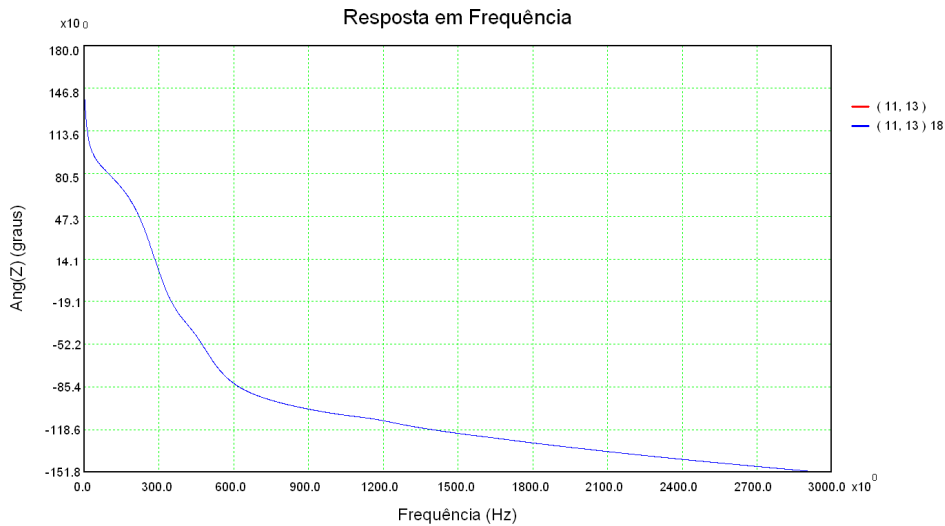


Figura 75: Resposta em frequência do ângulo da impedância de transferência entre as barras 11 e 13 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)

Tabela 30: Conjunto de polos e resíduos da função de transferência (11,13)

Freq (Hz)	Polo	Resíduo	
		Mód.	Âng.
0,0	-7,50946	4,21e-3	0,00
0,0	-56,6285	6,75e-1	0,00
0,0	-18664,7	1,80e+3	180
0,0	-52593,1	5,71e+2	0,00
285,4	-587,173 + j 1793,30	4,79e+2	21,1
477,3	-668,762 + j 2999,04	1,90e+2	-39,9
1170,9	-834,300 + j 7356,77	4,57e+0	-38,0
1614,4	-531,705 + j 10143,6	2,37e-1	-0,70
2017,3	-183,590 + j 12674,8	2,72e-2	-32,0
2273,4	-308,731 + j 14283,9	6,01e-3	-133
2605,4	-1166,11 + j 16370,2	1,05e-1	-53,6

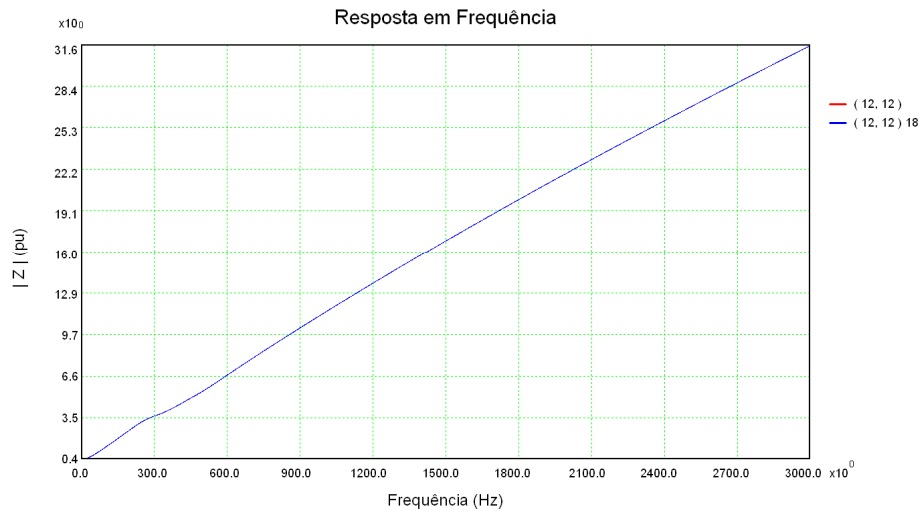


Figura 76: Resposta em frequência do módulo da impedância da barra 12 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)

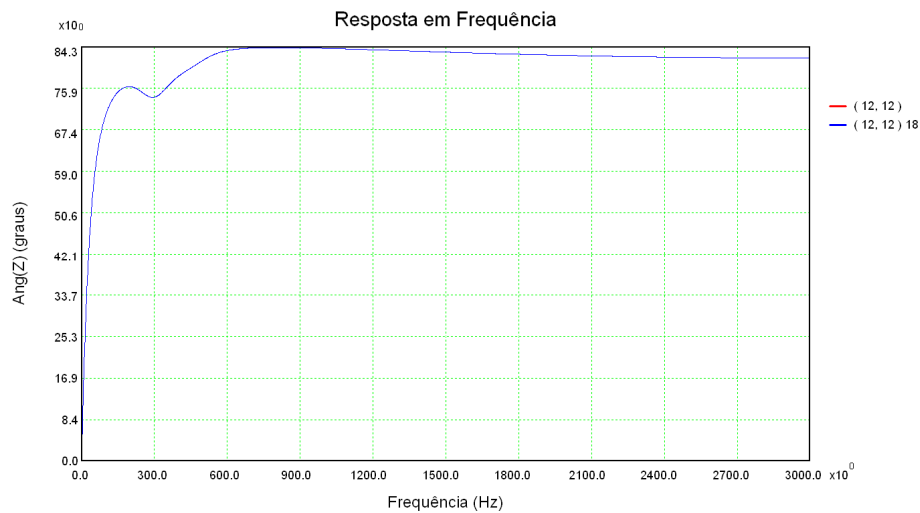


Figura 77: Resposta em frequência do ângulo da impedância da barra 12 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)

Tabela 31: Conjunto de polos e resíduos da função de transferência (12,12)

Freq (Hz)	Polo	Resíduo	
		Mód.	Âng.
0,0	-12,3956	7,55e-4	180
0,0	-57,2078	1,33e+0	180
0,0	-14530,1	2,02e+1	180
0,0	-18706,3	1,46e+5	180
285,4	-587,183 + j 1793,30	2,86e+2	19,5
477,3	-668,745 + j 2999,03	1,12e+2	-44,8
1170,9	-834,531 + j 7356,73	2,56e+0	-51,9
1614,5	-534,011 + j 10144,4	1,26e-1	-18,7
2018,7	-188,151 + j 12683,7	1,38e-2	-54,7
2267,1	-336,272 + j 14244,4	3,30e-3	-143
2599,9	-1193,69 + j 16335,7	5,18e-2	-76,5

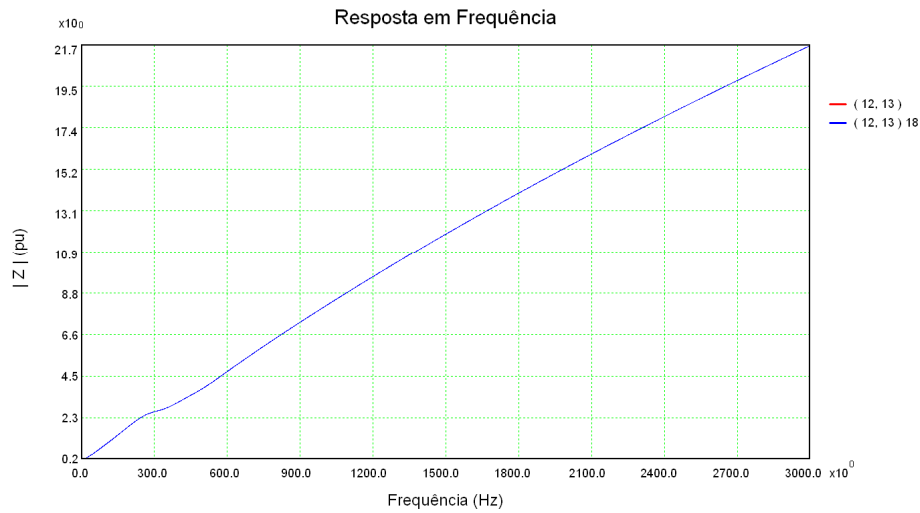


Figura 78: Resposta em frequência do módulo da impedância de transferência entre as barras 12 e 13 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)

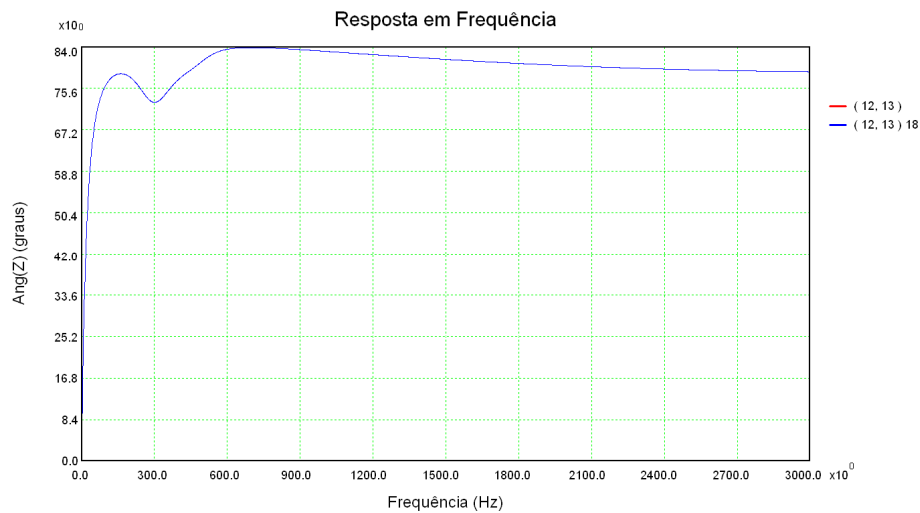


Figura 79: Resposta em frequência do ângulo da impedância de transferência entre as barras 12 e 13 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)

Tabela 32: Conjunto de polos e resíduos da função de transferência (12,13)

Freq (Hz)	Polo	Resíduo	
		Mód.	Âng.
0,0	-12,3956	7,55e-4	180
0,0	-57,2078	1,33e+0	180
0,0	-14530,1	2,02e+1	180
0,0	-18706,3	1,46e+5	180
285,4	-587,183 + j 1793,30	2,86e+2	19,5
477,3	-668,745 + j 2999,03	1,12e+2	-44,8
1170,9	-834,531 + j 7356,73	2,56e+0	-51,9
1614,5	-534,011 + j 10144,4	1,26e-1	-18,7
2018,7	-188,151 + j 12683,7	1,38e-2	-54,7
2267,1	-336,272 + j 14244,4	3,30e-3	-143
2599,9	-1193,69 + j 16335,7	5,18e-2	-76,5

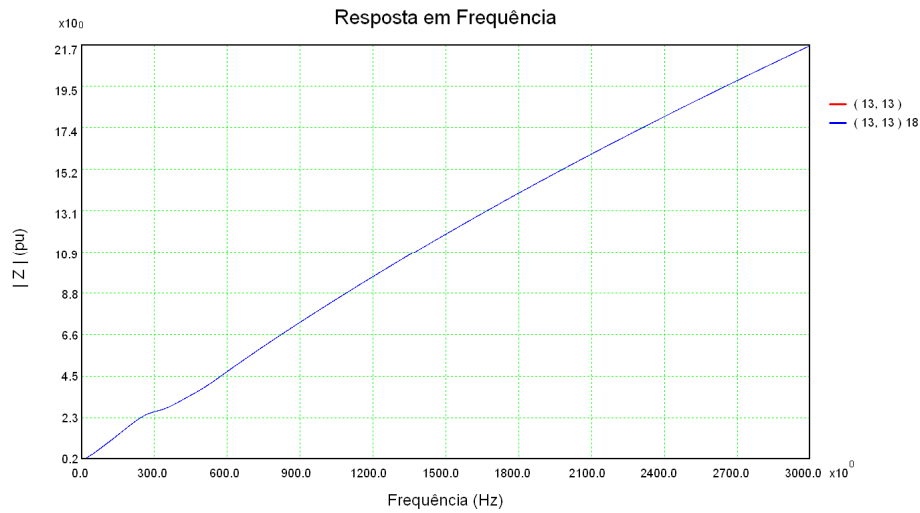


Figura 80: Resposta em frequência do módulo da impedância da barra 13 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)

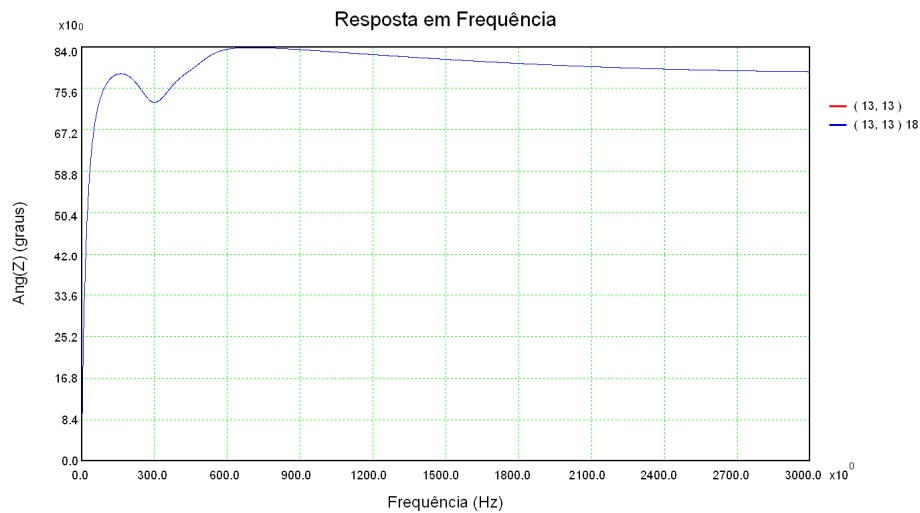


Figura 81: Resposta em frequência do ângulo da impedância da barra 13 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)

Tabela 33: Conjunto de polos e resíduos da função de transferência (13,13)

Freq (Hz)	Polo	Resíduo	
		Mód.	Âng.
0,0	-12,3956	7,55e-4	180
0,0	-57,2078	1,33e+0	180
0,0	-14530,1	2,02e+1	180
0,0	-18706,3	1,46e+5	180
285,4	-587,183 + j 1793,30	2,86e+2	19,5
477,3	-668,745 + j 2999,03	1,12e+2	-44,8
1170,9	-834,531 + j 7356,73	2,56e+0	-51,9
1614,5	-534,011 + j 10144,4	1,26e-1	-18,7
2018,7	-188,151 + j 12683,7	1,38e-2	-54,7
2267,1	-336,272 + j 14244,4	3,30e-3	-143
2599,9	-1193,69 + j 16335,7	5,18e-2	-76,5

Em todos os gráficos anteriores, os traçados foram de 0 a 3000 Hz, que é exatamente a faixa de frequência de interesse para a aplicação do Método do Ajuste Vetorial. Pode-se observar que os resultados obtidos foram excelentes. Porém, se a faixa de frequências para os traçados for extrapolada, o erro fora da faixa de interesse torna-se grande. Logo, é importantíssimo que o ajuste seja feito para a faixa de frequências a ser estudada, que deve estar de acordo com o fenômeno transitório em questão. Na Figura 82 e na Figura 83 são apresentados os traçados gráficos do módulo e do ângulo da impedância própria da barra 5 considerando somente a rede externa, para o ajuste feito até 3000 Hz e o traçado feito até 5000 Hz. Observa-se que após 3000 Hz existe diferença entre a curva do sistema completo e a curva ajustada pelo método.

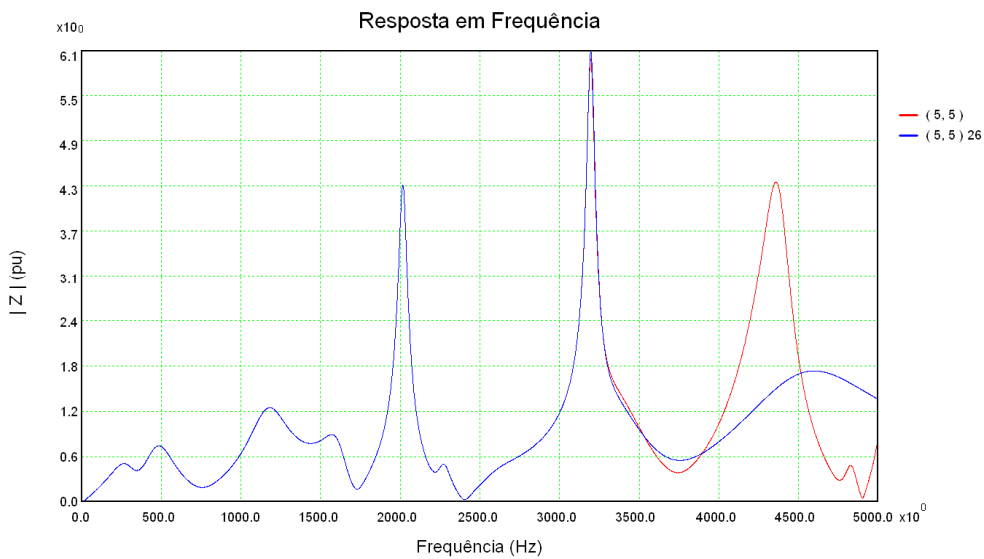


Figura 82: Resposta em frequência extrapolada até 5000 Hz do módulo da impedância da barra 5 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)

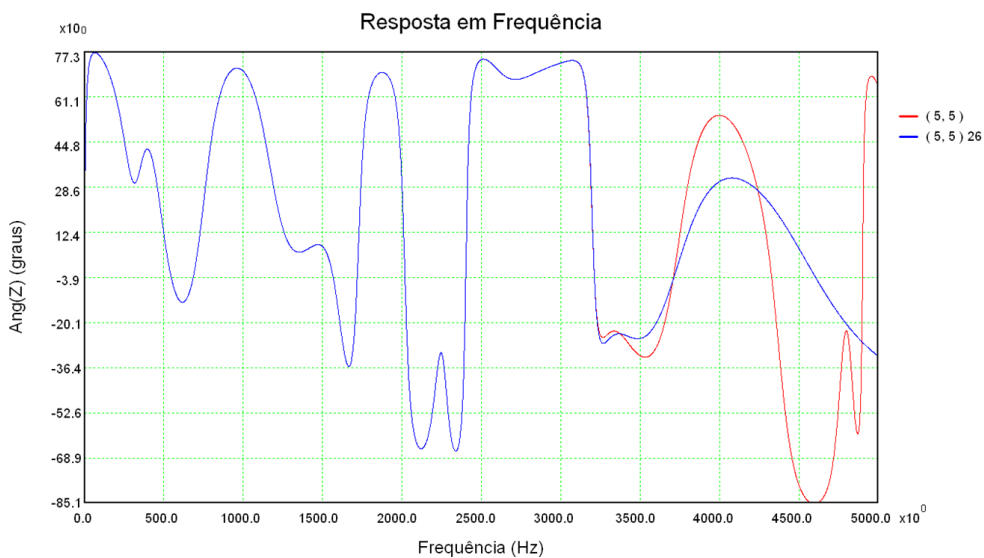


Figura 83: Resposta em frequência extrapolada até 5000 Hz do ângulo da impedância da barra 5 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)

6.2.1.2 Comparação entre a Rede Completa e o Modelo Reduzido

Neste item é feita a comparação entre a rede completa do sistema IEEE 14 barras (modelada por todos os seus equipamentos) e os sistemas reduzidos compostos pelo equivalente modal e o equivalente convencional para a vizinhança 1. O objetivo principal da comparação é avaliar a qualidade do equivalente modal acoplado à rede interna. Como objetivo secundário, a resposta em frequência do sistema reduzido utilizando equivalentes convencionais também é apresentada para que se possa comparar a sua aplicação frente à rede completa e ao sistema reduzido composto pelo equivalente modal. Estas comparações são feitas utilizando as respostas em frequências do módulo e do ângulo das impedâncias vistas das barras de fronteira (impedâncias próprias e de transferência).

Estas comparações podem ser visualizadas da Figura 84 à Figura 105. A curva em vermelho é sempre a resposta em frequência do sistema completo. A curva em azul representa a resposta do sistema reduzido composto pelo equivalente modal e a curva em cor laranja representa a resposta do sistema reduzido composto pelo equivalente convencional.

Pode-se observar por estas comparações que as curvas do sistema completo (vermelho) e as do sistema reduzido composto pelo equivalente modal (azul) são coincidentes, validando que o equivalente modal tem excelente qualidade e representa com total fidelidade o que está além da rede interna.

Pode-se observar também que o equivalente convencional, levando-se em consideração apenas a primeira vizinhança como rede interna, é ruim e difere em muitas frequências da resposta da rede completa. Se esta configuração de rede interna fosse utilizada com o equivalente convencional, os resultados dos estudos seriam em grande parte errados.

Vale frisar que, com exceção da resposta em frequência da barra 6 (Figura 104 e Figura 105), todas as respostas em frequências são vistas de barras de fronteira. Realmente era de se esperar que essas respostas não fossem de muita qualidade quando o equivalente em questão fosse o convencional. No caso da vizinhança 1, a única barra da rede interna que não é barra de fronteira é a barra 6. Por este motivo a comparação foi feita também

nesta barra. Para que se possa visualizar a evolução do equivalente convencional com mais vizinhanças frente ao sistema completo, as mesmas barras de fronteira da vizinhança 1 serão utilizadas para se fazer as comparações dos testes na vizinhança 2.

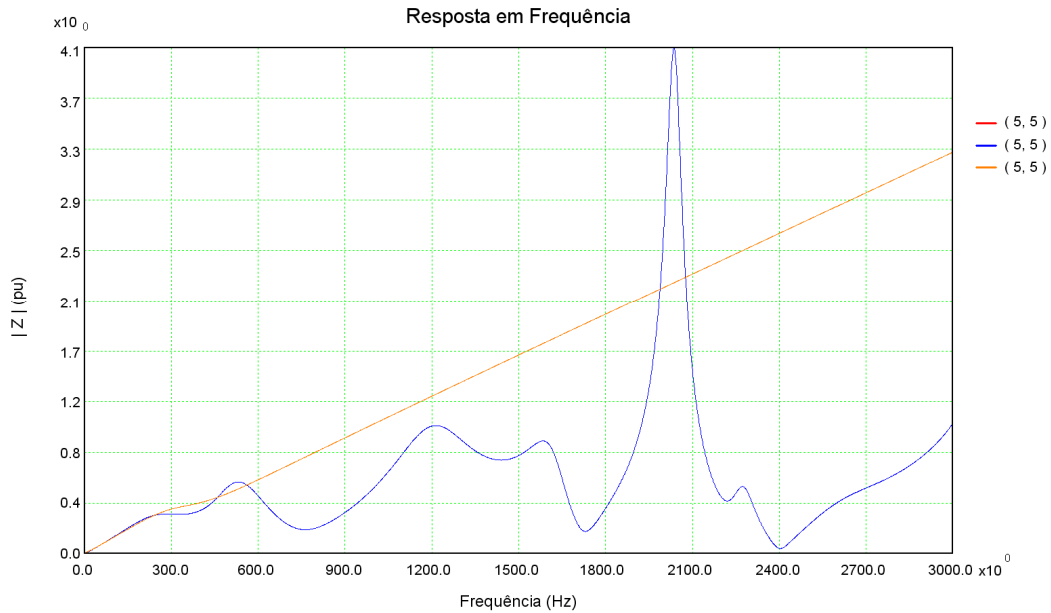


Figura 84: Resposta em frequência do módulo da impedância da barra 5 considerando a rede completa (vermelho) e os sistemas reduzidos considerando o equivalente modal (azul) e o equivalente convencional (laranja)

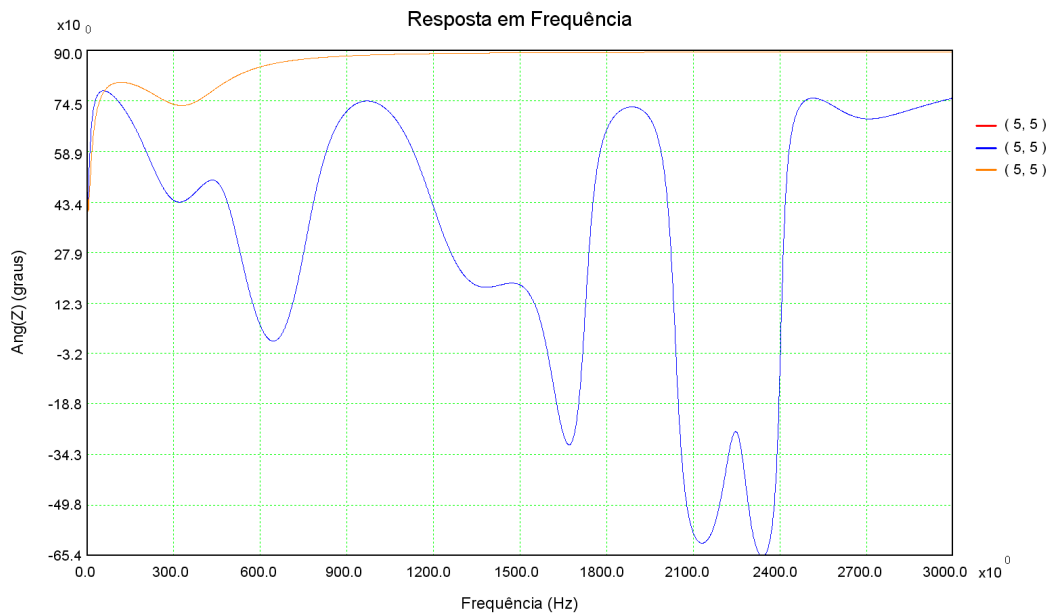


Figura 85: Resposta em frequência do ângulo da impedância da barra 5 considerando a rede completa (vermelho) e os sistemas reduzidos considerando o equivalente modal (azul) e o equivalente convencional (laranja)

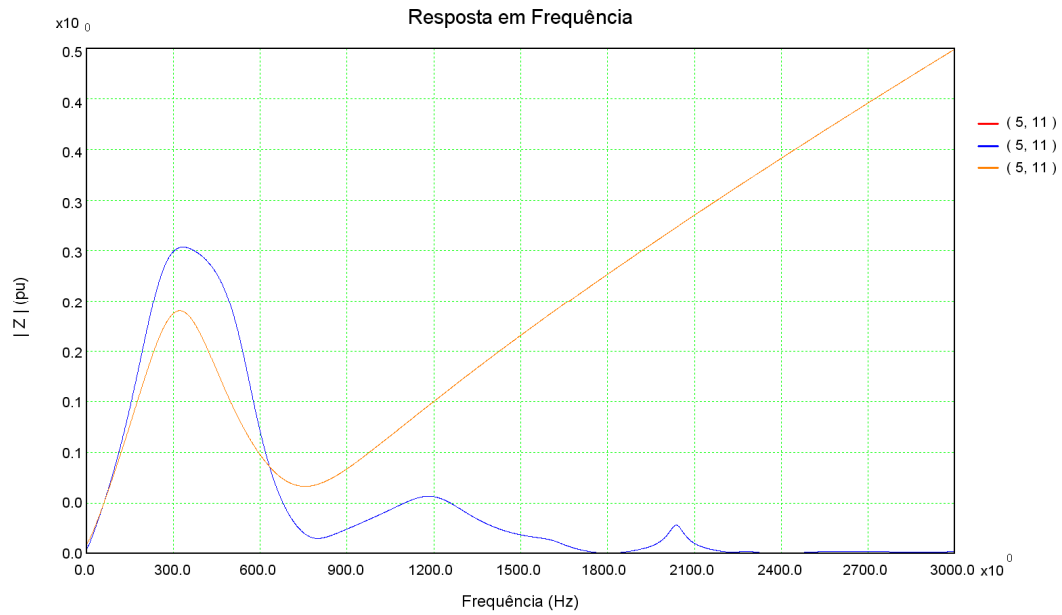


Figura 86: Resposta em frequência do módulo da impedância de transferência entre as barras 5 e 11 considerando a rede completa (vermelho) e os sistemas reduzidos considerando o equivalente modal (azul) e o equivalente convencional (laranja)

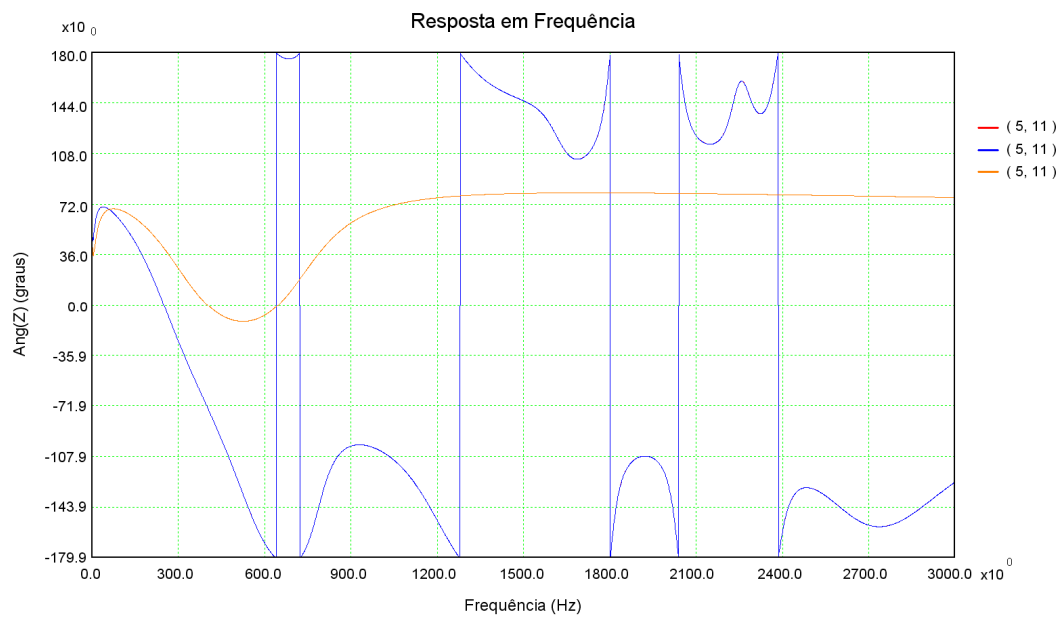


Figura 87: Resposta em frequência do ângulo da impedância de transferência entre as barras 5 e 11 considerando a rede completa (vermelho) e os sistemas reduzidos considerando o equivalente modal (azul) e o equivalente convencional (laranja)

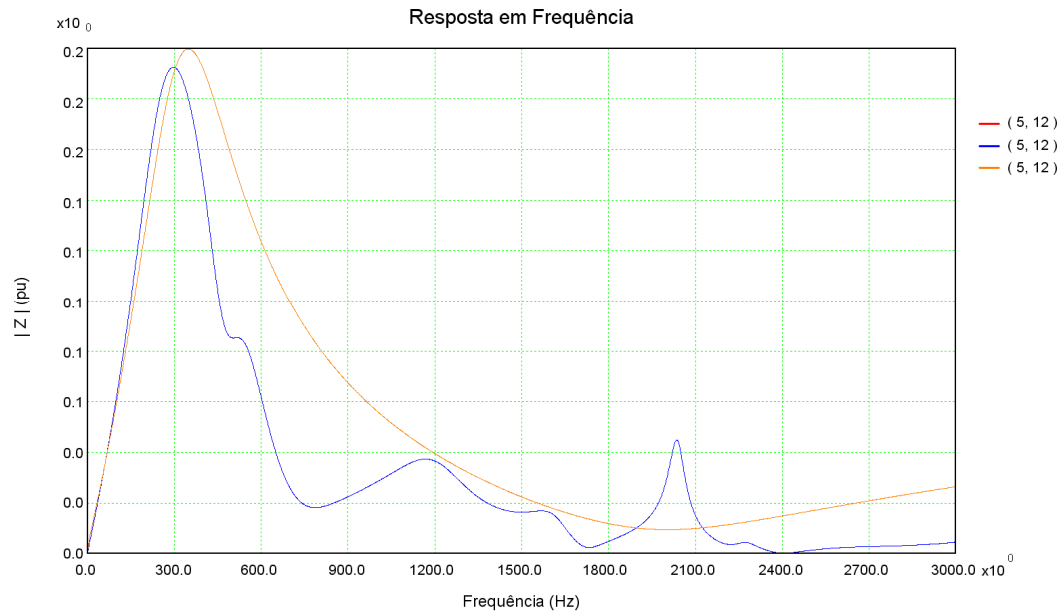


Figura 88: Resposta em frequência do módulo da impedância de transferência entre as barras 5 e 12 considerando a rede completa (vermelho) e os sistemas reduzidos considerando o equivalente modal (azul) e o equivalente convencional (laranja)

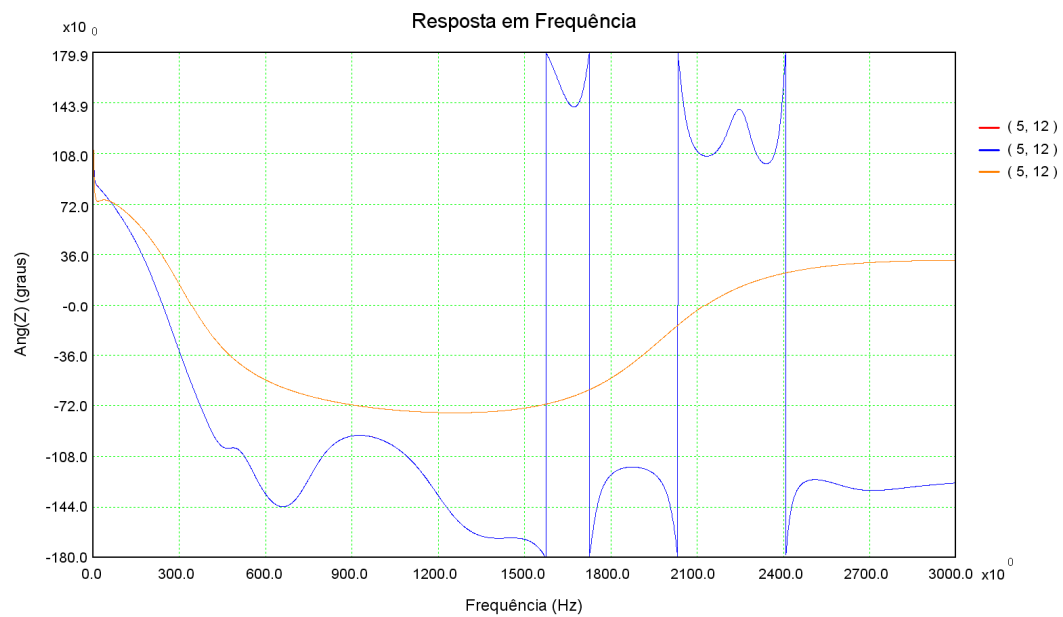


Figura 89: Resposta em frequência do ângulo da impedância de transferência entre as barras 5 e 12 considerando a rede completa (vermelho) e os sistemas reduzidos considerando o equivalente modal (azul) e o equivalente convencional (laranja)

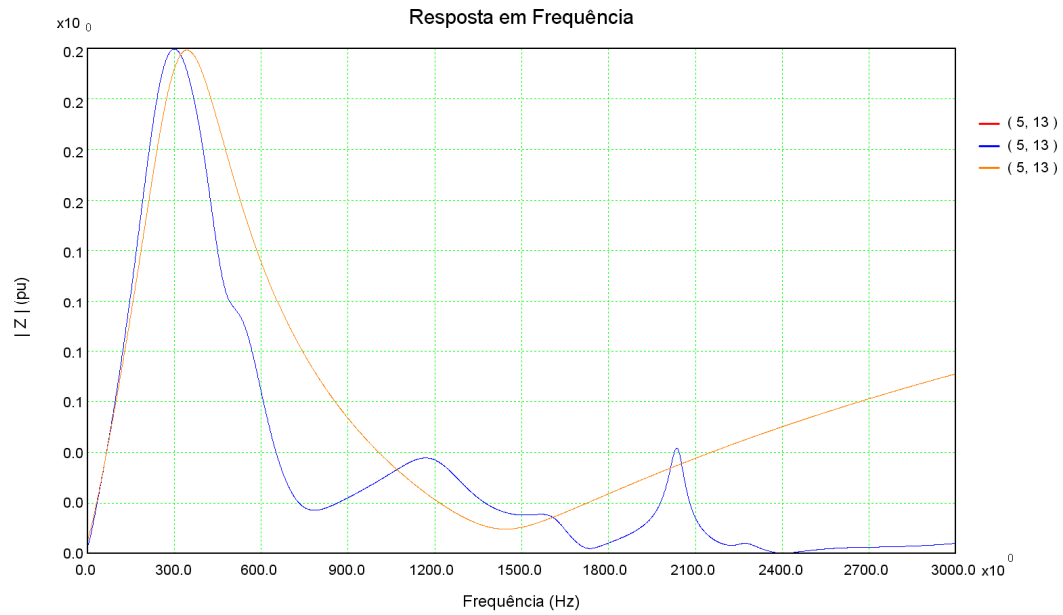


Figura 90: Resposta em frequência do módulo da impedância de transferência entre as barras 5 e 13 considerando a rede completa (vermelho) e os sistemas reduzidos considerando o equivalente modal (azul) e o equivalente convencional (laranja)

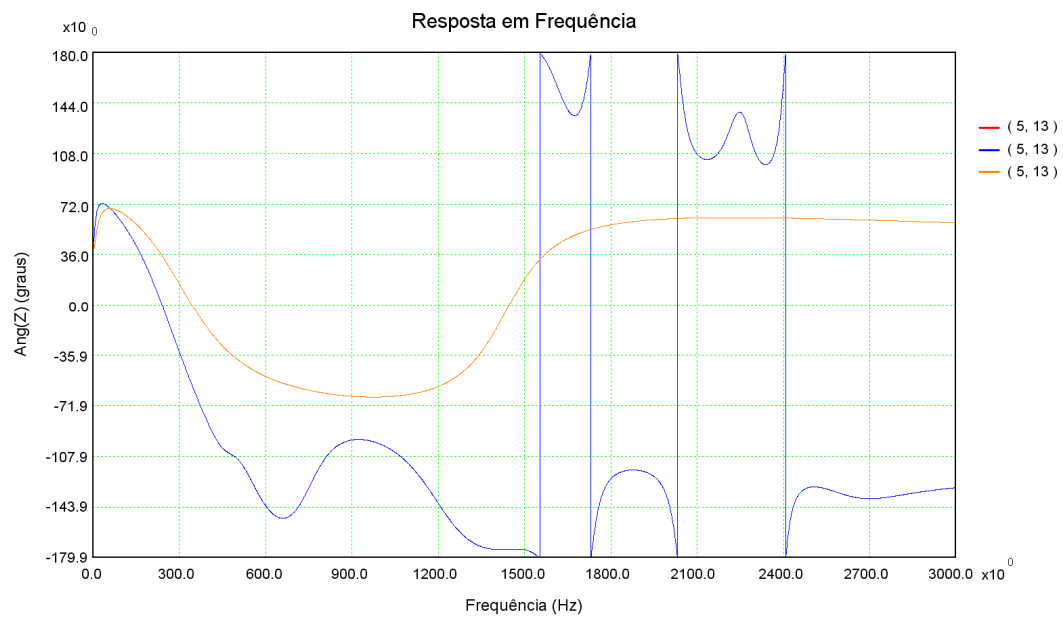


Figura 91: Resposta em frequência do ângulo da impedância de transferência entre as barras 5 e 13 considerando a rede completa (vermelho) e os sistemas reduzidos considerando o equivalente modal (azul) e o equivalente convencional (laranja)

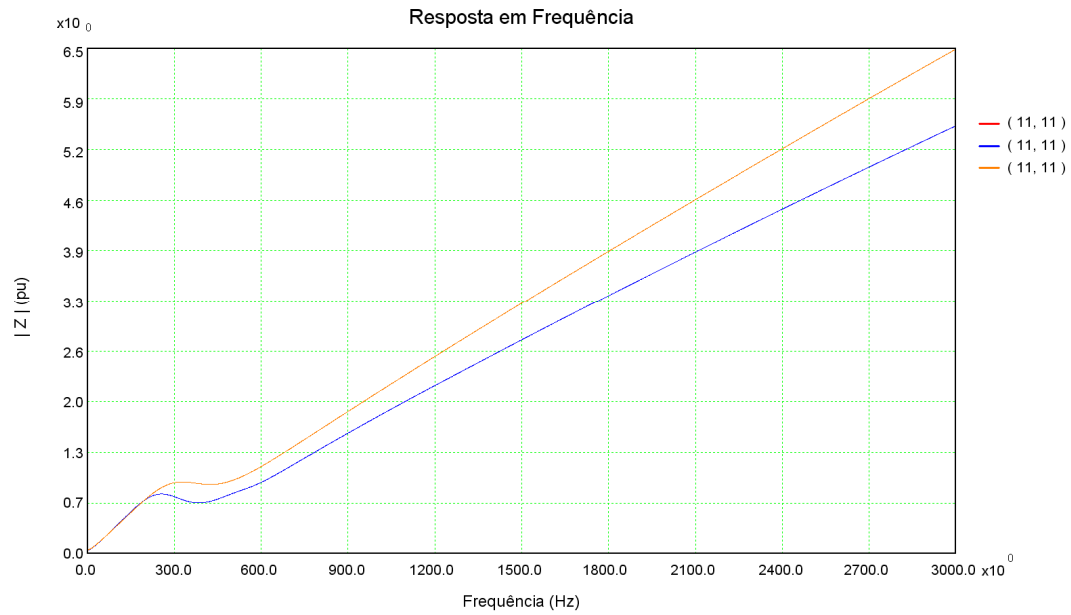


Figura 92: Resposta em frequência do módulo da impedância da barra 11 considerando a rede completa (vermelho) e os sistemas reduzidos considerando o equivalente modal (azul) e o equivalente convencional (laranja)

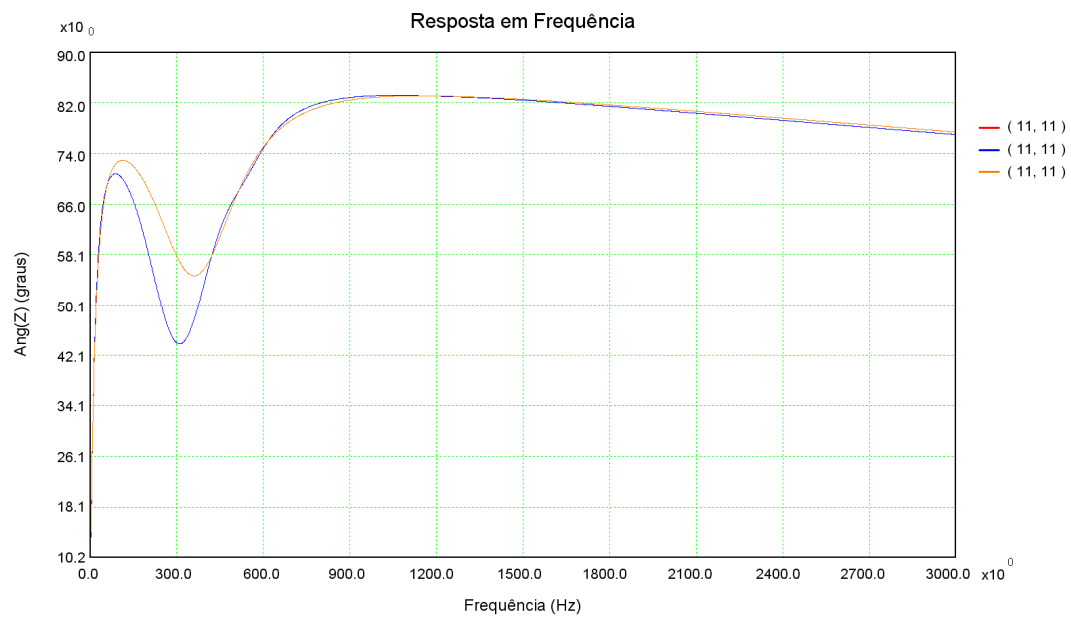


Figura 93: Resposta em frequência do ângulo da impedância da barra 11 considerando a rede completa (vermelho) e os sistemas reduzidos considerando o equivalente modal (azul) e o equivalente convencional (laranja)

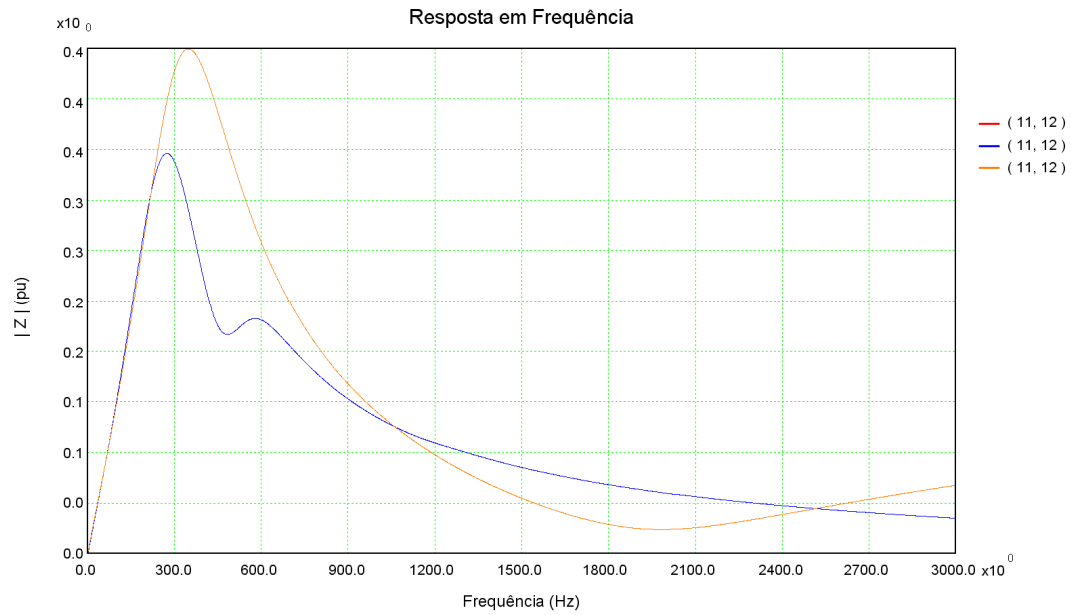


Figura 94: Resposta em frequência do módulo da impedância de transferência entre as barras 11 e 12 considerando a rede completa (vermelho) e os sistemas reduzidos considerando o equivalente modal (azul) e o equivalente convencional (laranja)

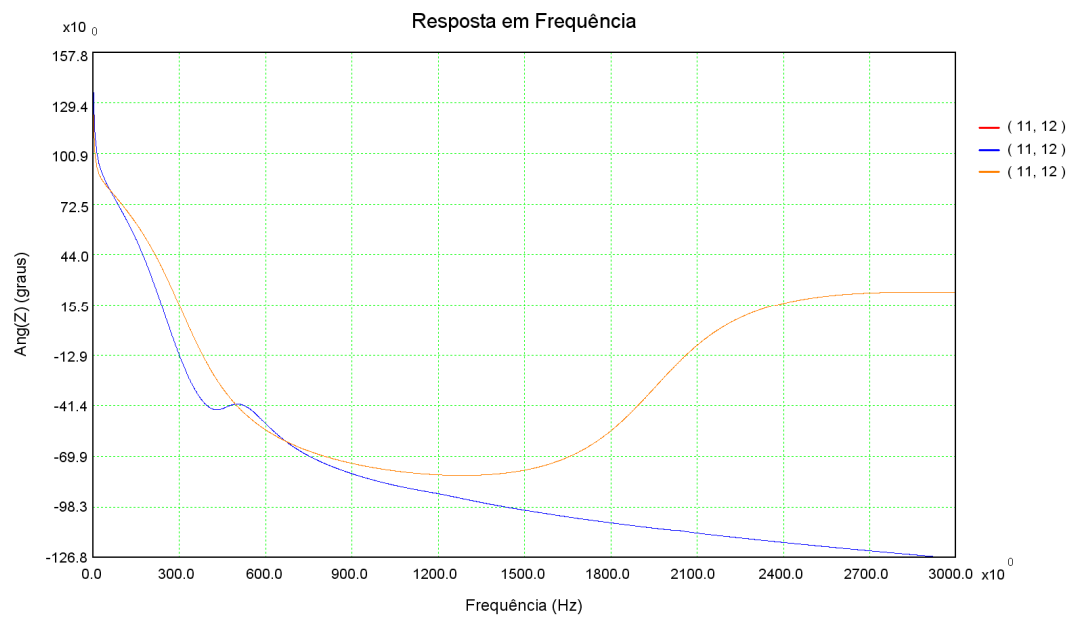


Figura 95: Resposta em frequência do ângulo da impedância de transferência entre as barras 11 e 12 considerando a rede completa (vermelho) e os sistemas reduzidos considerando o equivalente modal (azul) e o equivalente convencional (laranja)

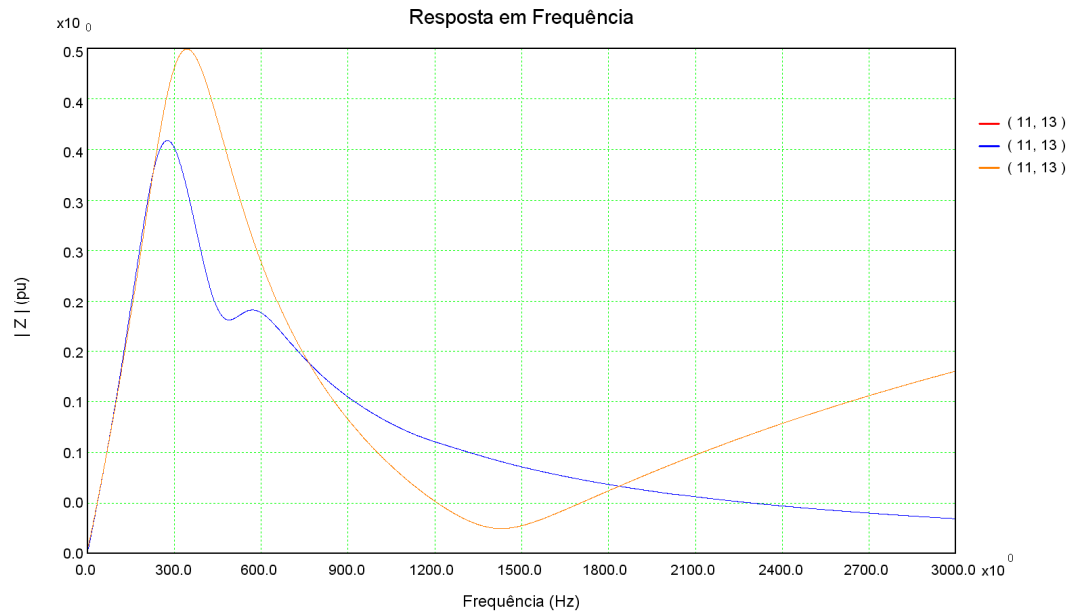


Figura 96: Resposta em frequência do módulo da impedância de transferência entre as barras 11 e 13 considerando a rede completa (vermelho) e os sistemas reduzidos considerando o equivalente modal (azul) e o equivalente convencional (laranja)

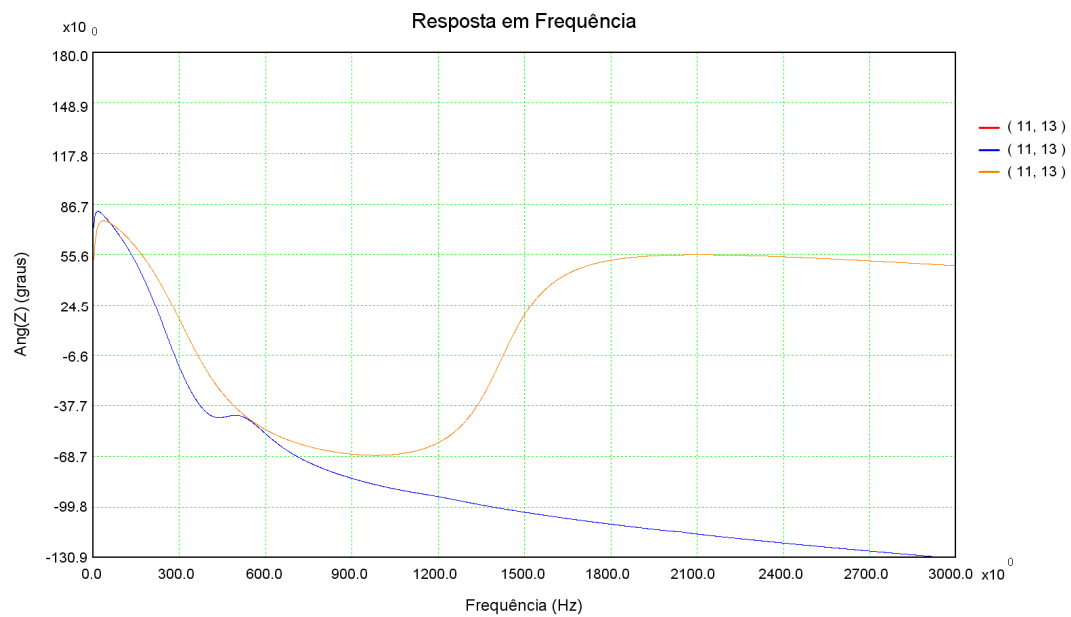


Figura 97: Resposta em frequência do ângulo da impedância de transferência entre as barras 11 e 13 considerando a rede completa (vermelho) e os sistemas reduzidos considerando o equivalente modal (azul) e o equivalente convencional (laranja)

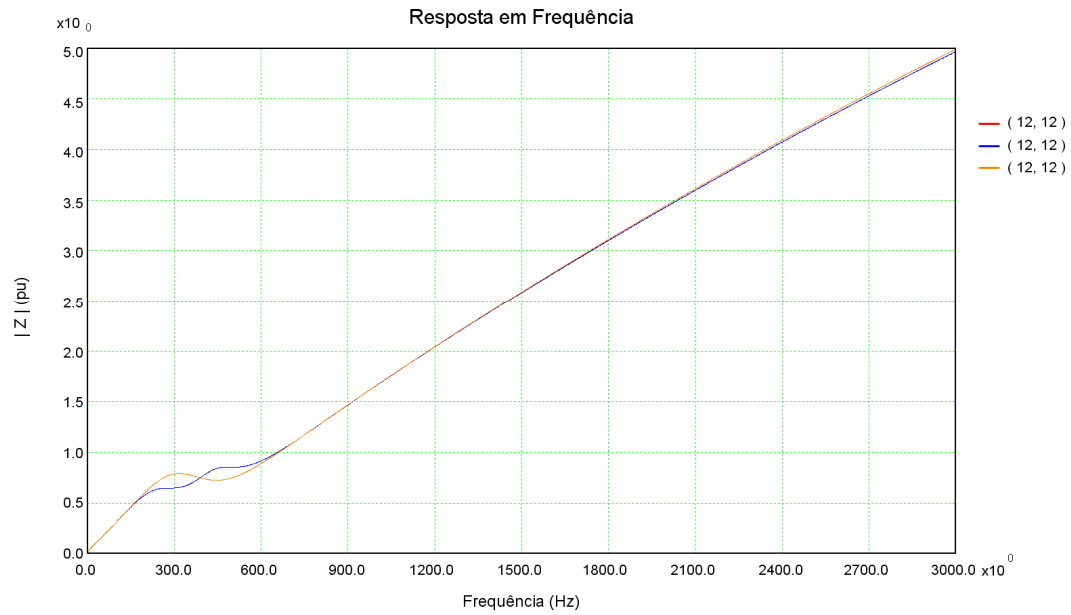


Figura 98: Resposta em frequência do módulo da impedância da barra 12 considerando a rede completa (vermelho) e os sistemas reduzidos considerando o equivalente modal (azul) e o equivalente convencional (laranja)

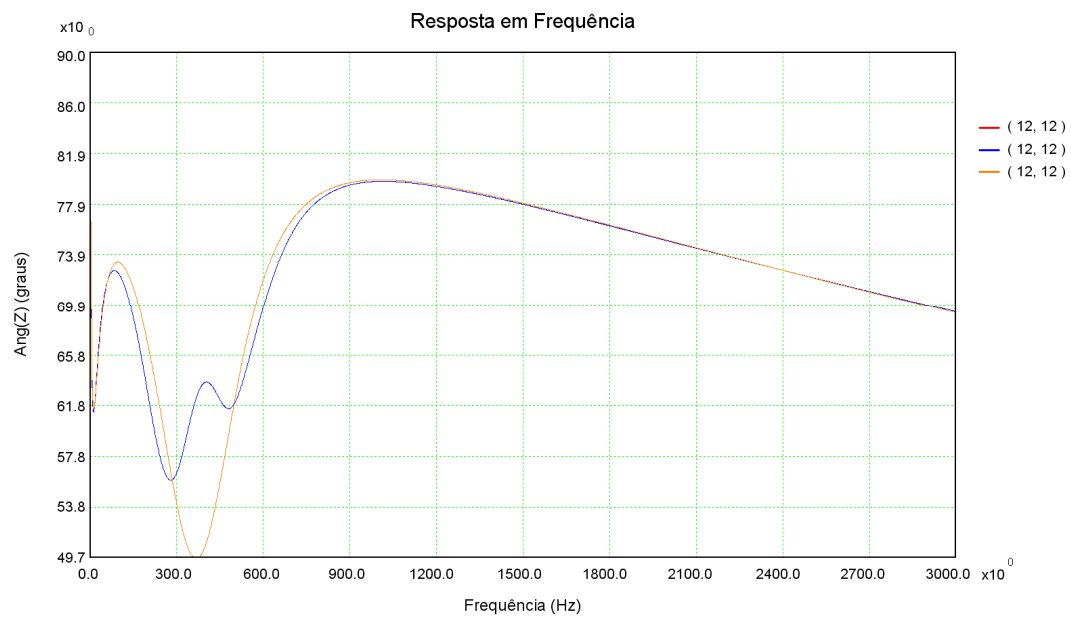


Figura 99: Resposta em frequência do ângulo da impedância da barra 12 considerando a rede completa (vermelho) e os sistemas reduzidos considerando o equivalente modal (azul) e o equivalente convencional (laranja)

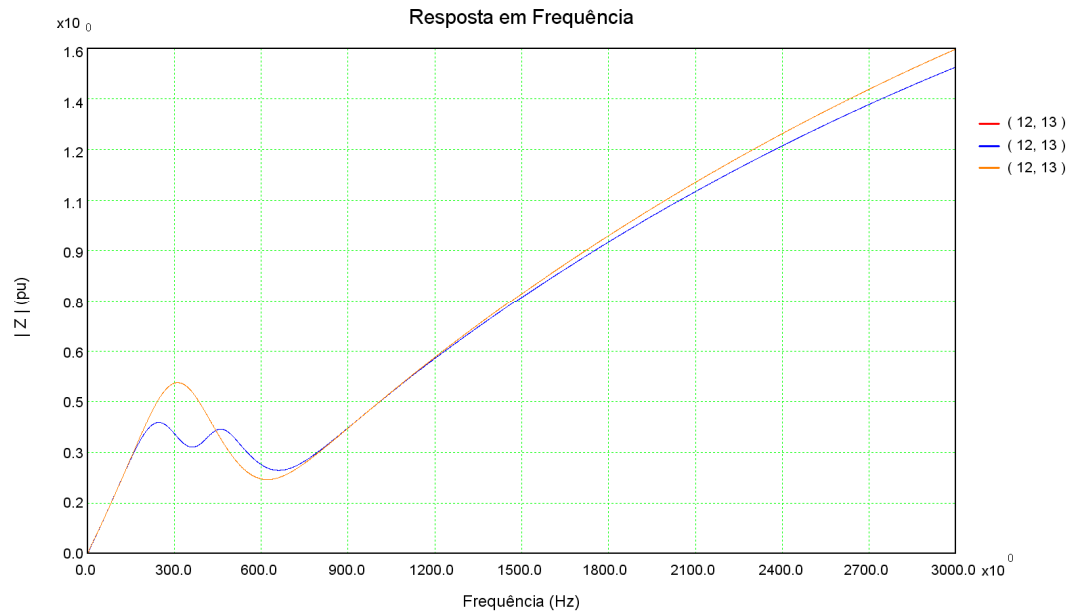


Figura 100: Resposta em frequência do módulo da impedância de transferência entre as barras 12 e 13 considerando a rede completa (vermelho) e os sistemas reduzidos considerando o equivalente modal (azul) e o equivalente convencional (laranja)

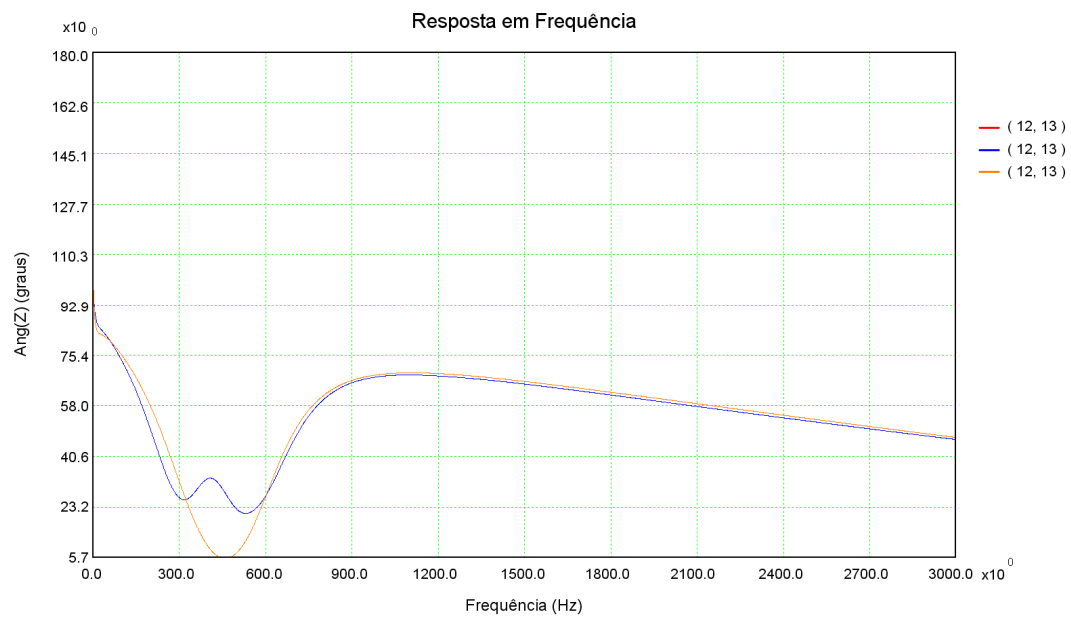


Figura 101: Resposta em frequência do ângulo da impedância de transferência entre as barras 12 e 13 considerando a rede completa (vermelho) e os sistemas reduzidos considerando o equivalente modal (azul) e o equivalente convencional (laranja)

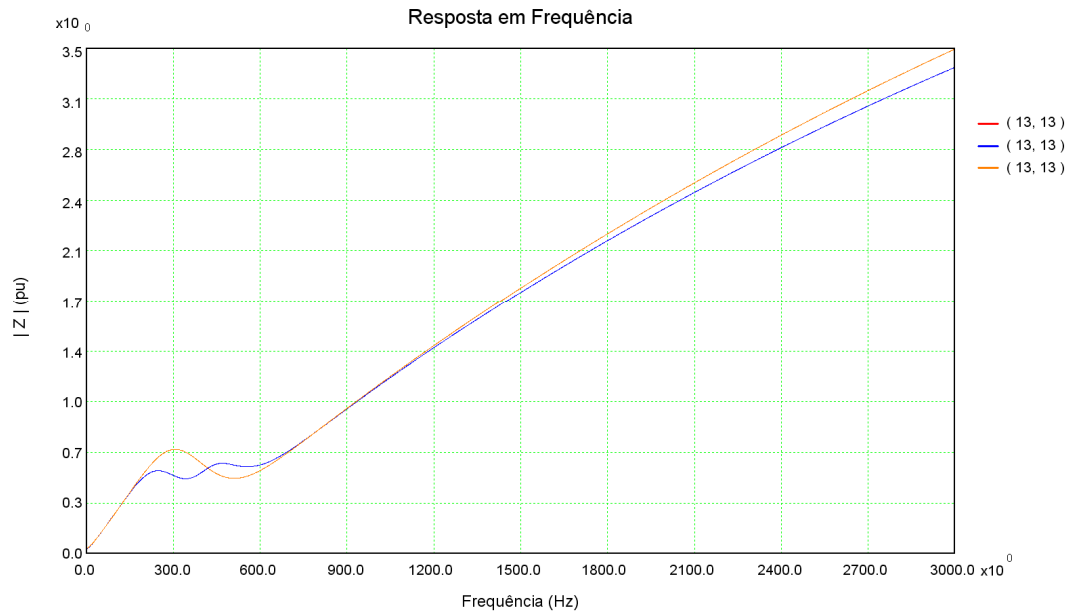


Figura 102: Resposta em frequência do módulo da impedância da barra 13 considerando a rede completa (vermelho) e os sistemas reduzidos considerando o equivalente modal (azul) e o equivalente convencional (laranja)

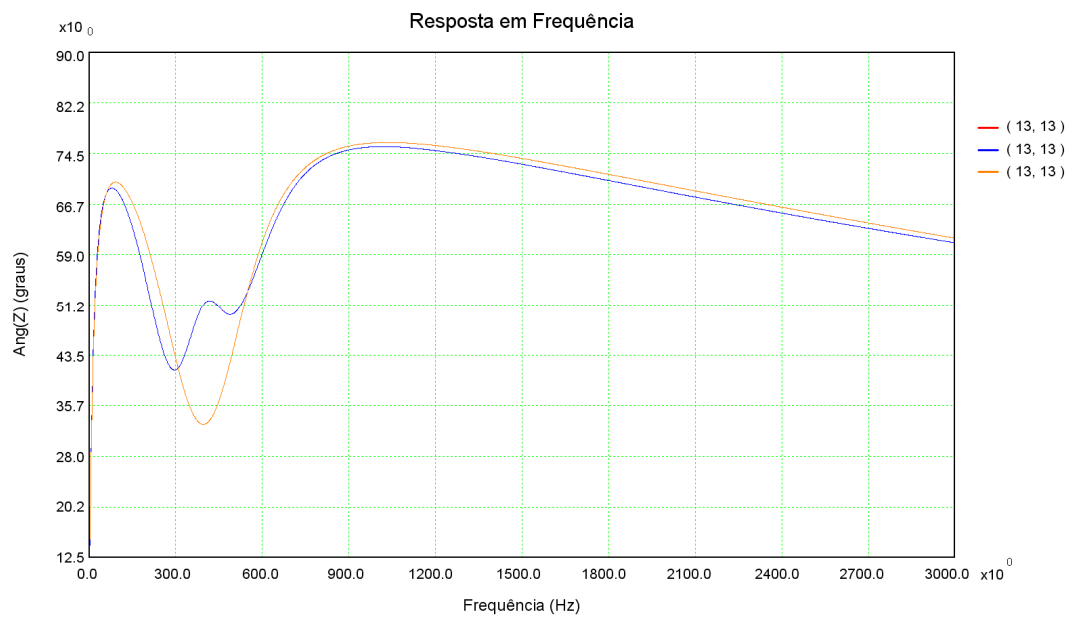


Figura 103: Resposta em frequência do ângulo da impedância da barra 13 considerando a rede completa (vermelho) e os sistemas reduzidos considerando o equivalente modal (azul) e o equivalente convencional (laranja)

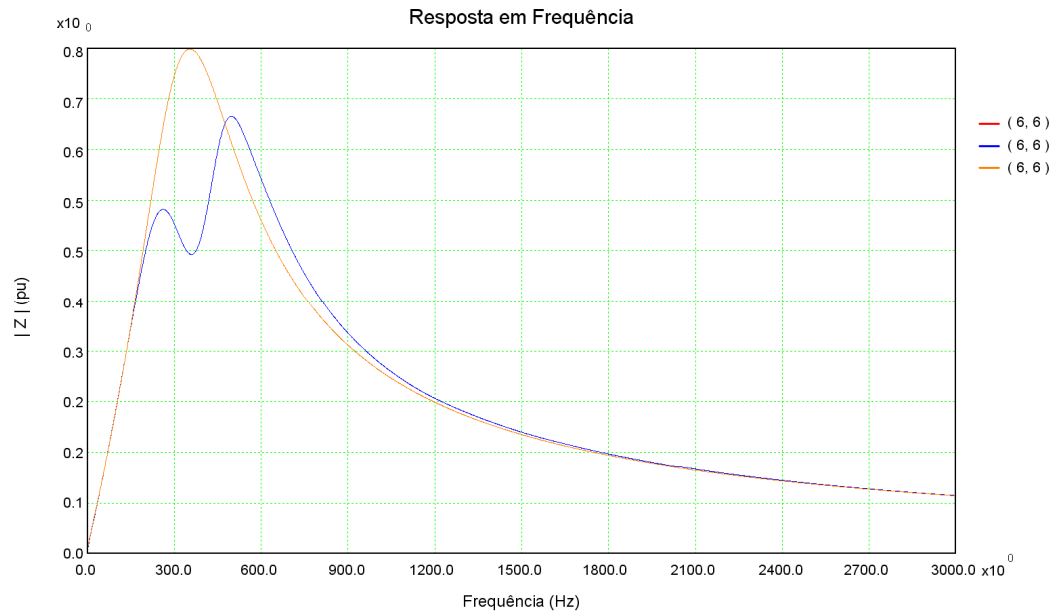


Figura 104: Resposta em frequência do módulo da impedância da barra 6 considerando a rede completa (vermelho) e os sistemas reduzidos considerando o equivalente modal (azul) e o equivalente convencional (laranja)

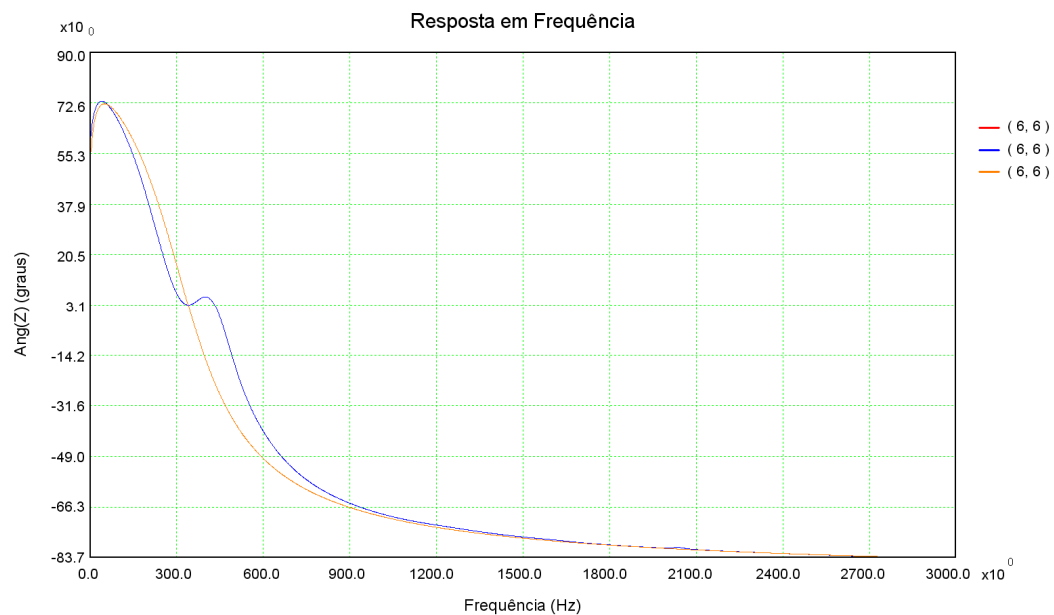


Figura 105: Resposta em frequência do ângulo da impedância da barra 6 considerando a rede completa (vermelho) e os sistemas reduzidos considerando o equivalente modal (azul) e o equivalente convencional (laranja)

De modo análogo ao realizado na comparação entre a rede externa representada por seu modelo completo e representada pelo seu equivalente modal, também serão apresentados os traçados dos gráficos do sistema reduzido extrapolando-se a faixa de frequências que foi utilizada para o ajuste (0 a 3000 Hz). Estes traçados podem ser observados da Figura 106 à Figura 109, onde a faixa de frequências vai até 5000 Hz.

Nota-se uma sobreposição das curvas até um pouco após a faixa do ajuste, mas à medida que a frequência vai crescendo, o erro começa a ficar observável, chegando a erros muito grandes em frequências mais distantes do final da faixa de interesse.

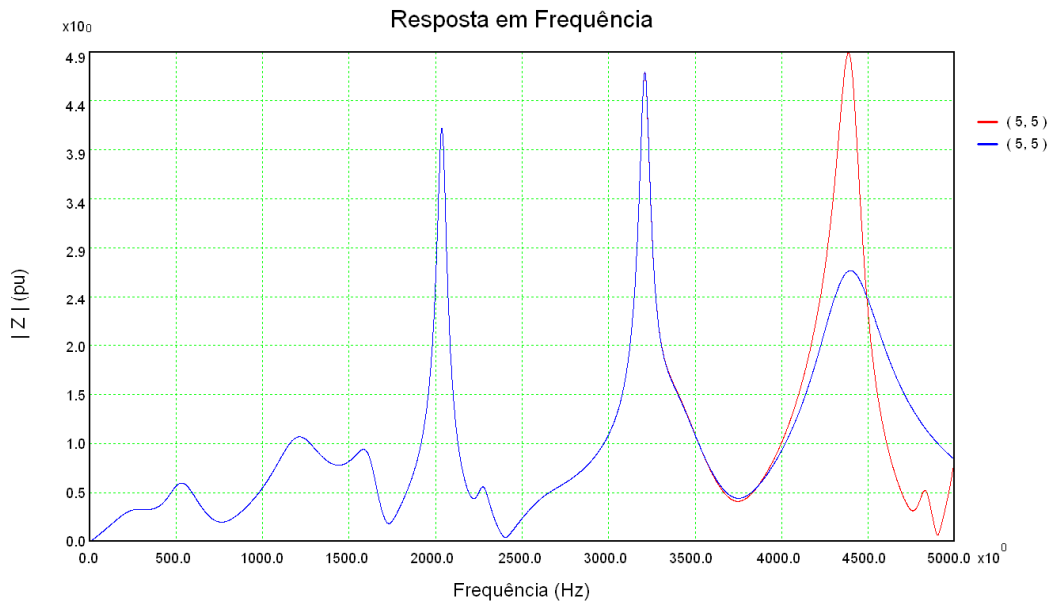


Figura 106: Resposta em frequência extrapolando a faixa de frequências até 5000 Hz do módulo da impedância da barra 5 considerando a rede completa (vermelho) e o sistema reduzido considerando o equivalente modal (azul)

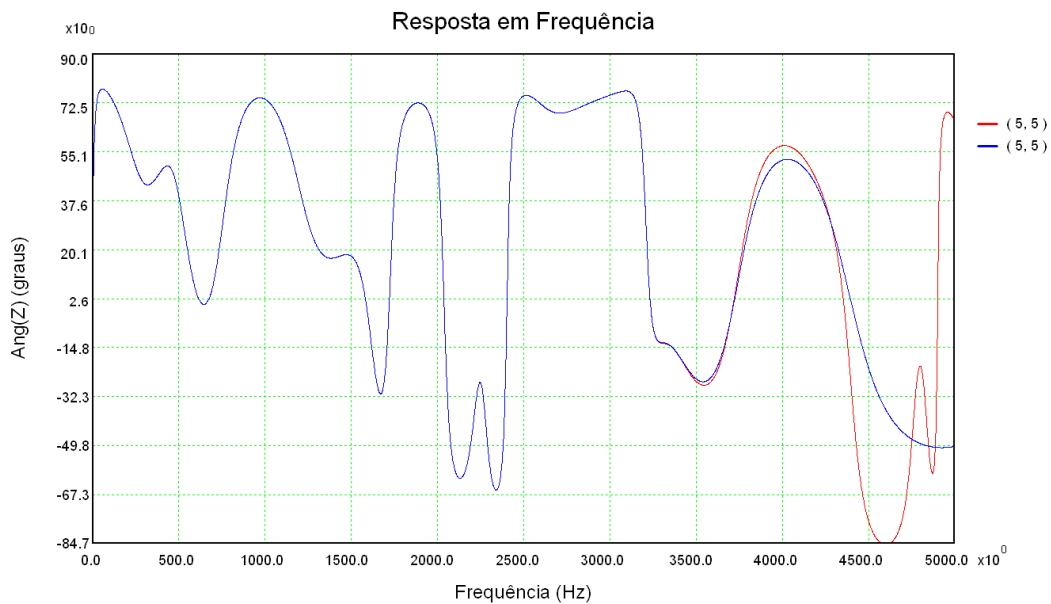


Figura 107: Resposta em frequência extrapolando a faixa de frequências até 5000 Hz do ângulo da impedância da barra 5 considerando a rede completa (vermelho) e o sistema reduzido considerando o equivalente modal (azul)

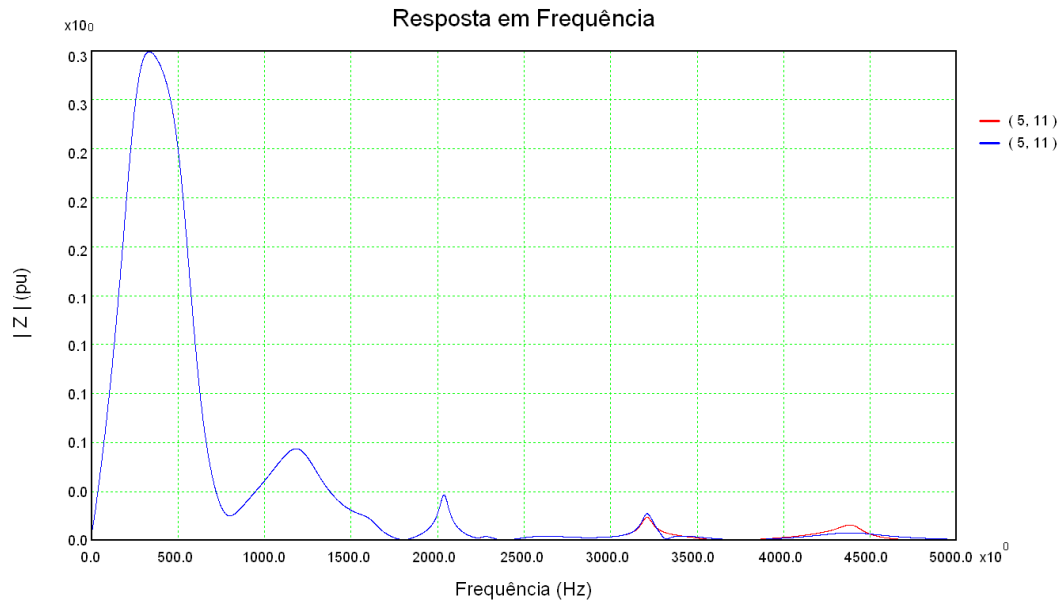


Figura 108: Resposta em frequência extrapolando a faixa de frequências até 5000 Hz do módulo da impedância entre as barras 5 e 11 considerando a rede completa (vermelho) e o sistema reduzido considerando o equivalente modal (azul)

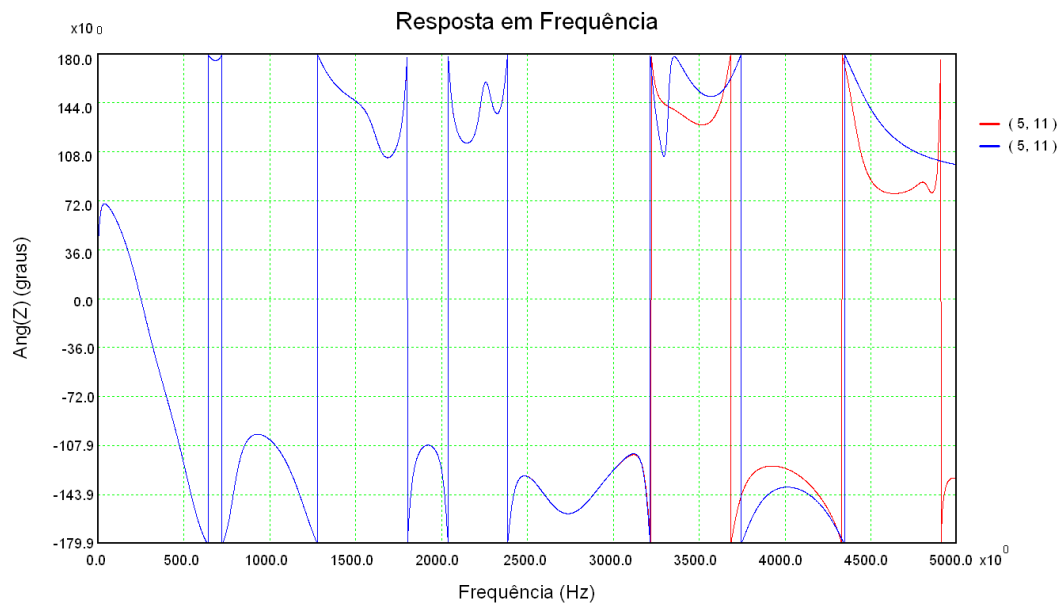


Figura 109: Resposta em frequência extrapolando a faixa de frequências até 5000 Hz do ângulo da impedância entre as barras 5 e 11 considerando a rede completa (vermelho) e o sistema reduzido considerando o equivalente modal (azul)

6.2.2 Testes considerando 2 vizinhanças

A Figura 110 apresenta a rede do Sistema Elétrico IEEE 14 Barras e em evidência as duas redes: a rede interna até a vizinhança 2, apresentada com seus elementos na cor cinza, e a rede externa à vizinhança 2, apresentada na cor preta. As barras marcadas na cor vermelha denotam as barras de fronteira da vizinhança 2.

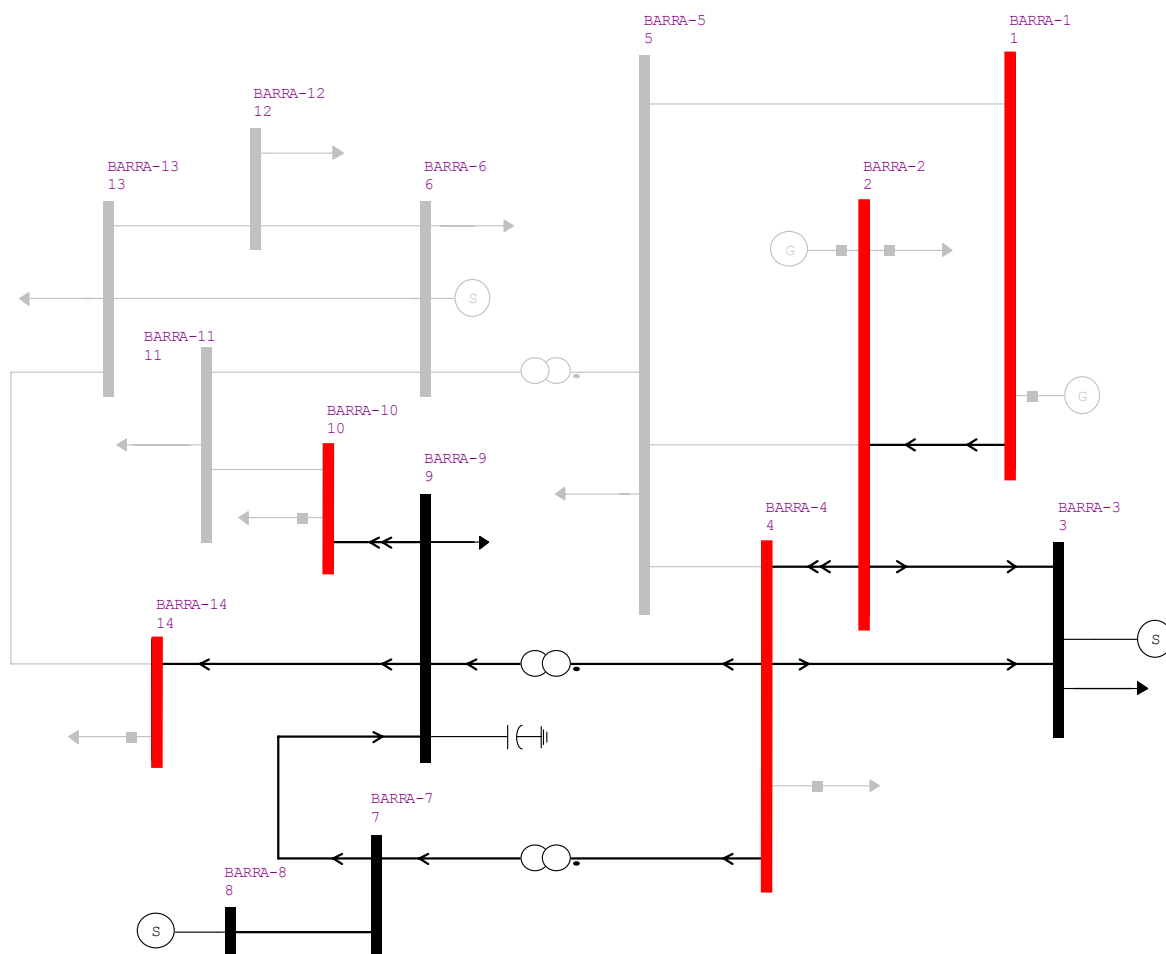


Figura 110: Rede externa para a vizinhança 2 do Sistema Elétrico IEEE 14 Barras considerando a barra 6 como piloto

Considerando as 5 barras de fronteira, tem-se, na Tabela 34, todas as funções de transferência entre elas que serão apresentadas nas comparações. A ordem de aproximação do ajuste e o número de iterações alcançado de cada função de transferência também são apresentados nesta tabela. Quando foi preciso fazer o ajuste da ordem de aproximação (item 5.3.1), o valor da quantidade de incrementos (valor

positivo) ou decrementos (valor negativo) é apresentado entre parênteses na mesma coluna da ordem.

Tabela 34: Funções de transferências para a segunda vizinhança a partir da barra 6 do Sistema Elétrico IEEE 14 Barras

FTs das Barras de Fronteira			
Barra De	Barra Para	Ordem	Iterações
1	1	18 (-1)	1
1	2	18 (-1)	1
1	4	18 (-1)	1
1	10	16 (-2)	2
1	14	16 (-2)	2
2	2	20 (2)	1
2	4	18 (-3)	1
2	10	16 (-2)	2
2	14	16 (-2)	2
4	4	20 (2)	1
4	10	16 (2)	2
4	14	16 (2)	2
10	10	14 (1)	2
10	14	14 (3)	2
14	14	14 (1)	2

A seguir serão apresentadas duas comparações, de modo análogo ao que foi realizado para a vizinhança 1:

- Comparação entre a rede elétrica externa completa e modelada pelo modelo

modal dado pela equação
$$z_{eq-kj}(s) \cong \sum_{i \in \Omega_{kj}} \frac{R_i^{(kj)}}{(s - \lambda_i^{(kj)})} + d^{(kj)} + e^{(kj)}s;$$

- Comparação entre a rede completa e o Modelo Reduzido para a vizinhança 2.

6.2.2.1 Comparação entre a Rede Externa Completa e Modelada por Polos e Resíduos

Da Figura 111 até a Figura 140 tem-se a comparação entre as respostas em frequência dos módulos e ângulos das impedâncias das barras de fronteira da rede externa representada por seu modelo completo (gráficos em vermelho) e a rede externa

representada pelo modelo modal dado por $z_{eq-kj}(s) \cong \sum_{i \in \Omega_{kj}} \frac{R_i^{(kj)}}{(s - \lambda_i^{(kj)})} + d^{(kj)} + e^{(kj)}s$

(gráficos em azul).

Nos gráficos representados pelo modelo modal (gráficos em azul), tem-se na legenda a ordem de aproximação do modelo. Os valores dos polos e resíduos associados para esta ordem estão apresentados da Tabela 35 à Tabela 49. Os polos complexos com parte imaginária negativa não estão apresentados nas tabelas simplesmente para poupar espaço, mas eles foram calculados e estão contabilizados no valor informado para a ordem de aproximação.

Pode-se observar em todos os gráficos que as duas curvas estão sobrepostas, o que indica que o modelo modal representa com fidelidade a rede externa e que a aplicação do Método do Ajuste Vetorial foi realizada com sucesso.

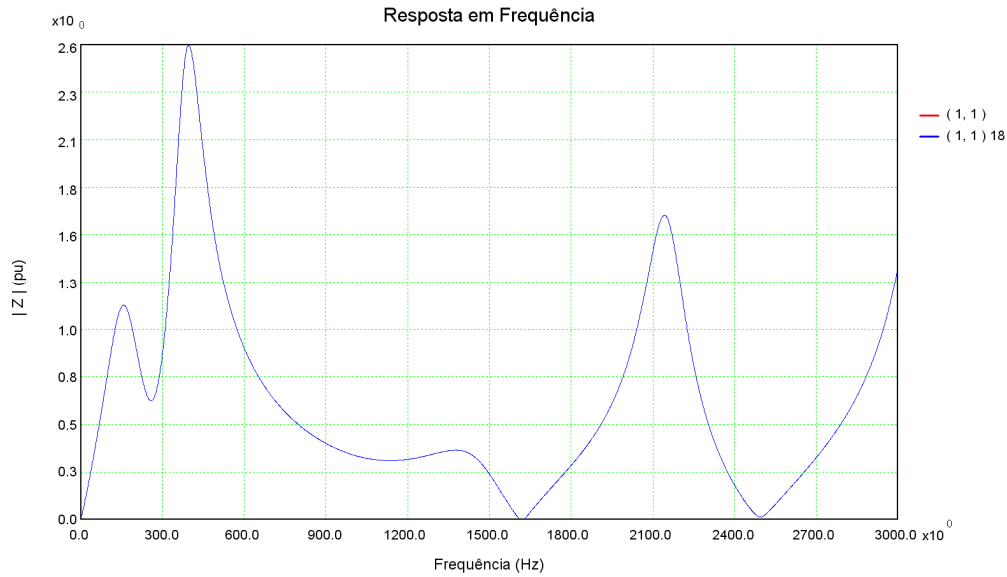


Figura 111: Resposta em frequência do módulo da impedância da barra 1 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)

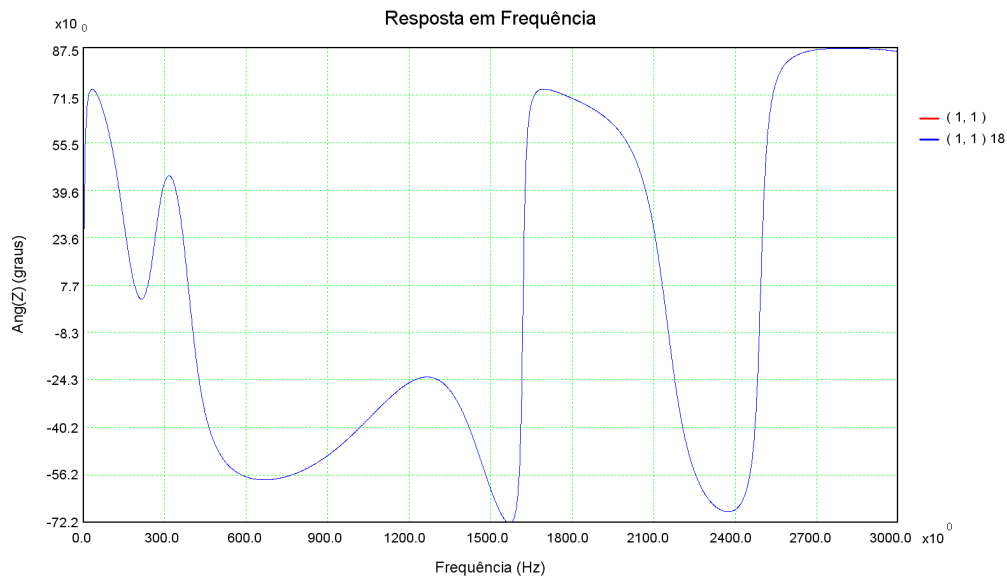


Figura 112: Resposta em frequência do ângulo da impedância da barra 1 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)

Tabela 35: Conjunto de polos e resíduos da função de transferência (1,1)

Freq (Hz)	Polo	Resíduo	
		Mód.	Âng.
0,0	-10,7022	5,74e-4	180
0,0	-117,760	6,53e-2	180
156,3	-470,714 + j 981,854	5,79e+2	19,2
384,7	-355,860 + j 2417,13	8,68e+2	22,8
1470,8	-966,575 + j 9241,21	3,45e+2	-84,7
1437,7	-5044,21 + j 9033,28	2,81e+2	36,0
2149,5	-491,149 + j 13505,6	8,20e+2	-9,81
3188,1	-62,2586 + j 20031,3	1,64e+3	-0,49
4143,4	-1852,45 + j 26033,5	1,87e+3	23,8
13890,9	-25817,3 + j 87279,0	5,16e+4	32,2

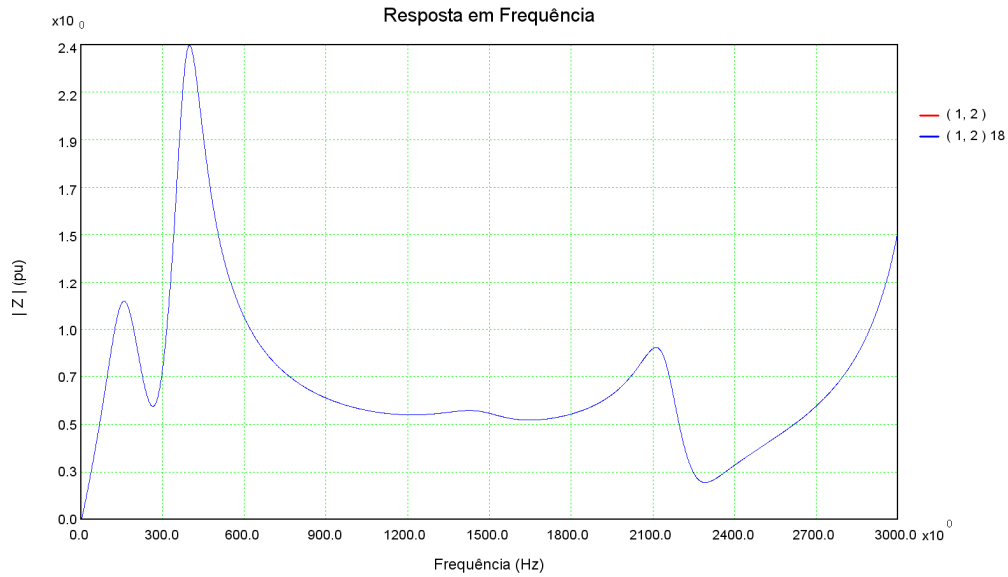


Figura 113: Resposta em frequência do módulo da impedância de transferência entre as barras 1 e 2 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)

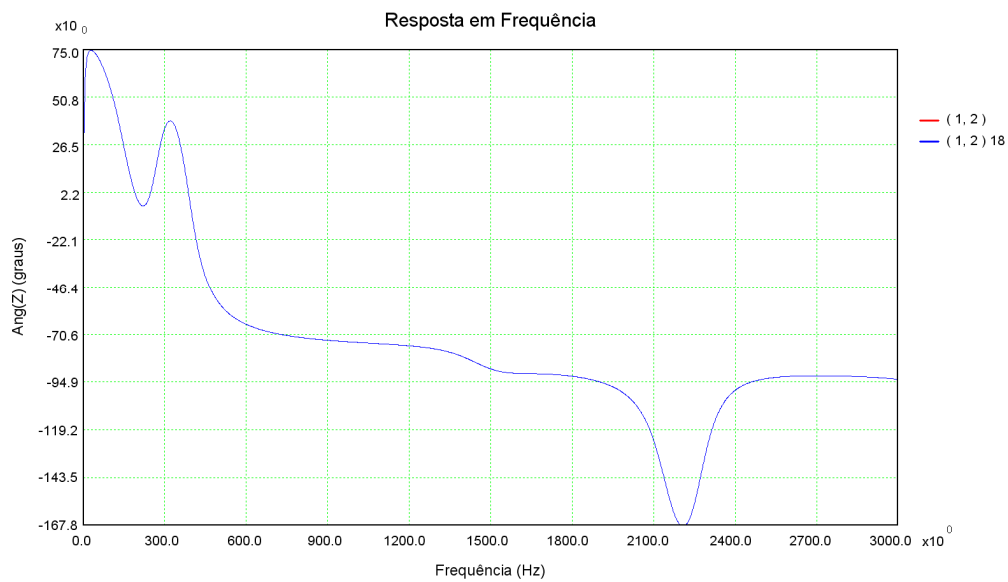


Figura 114: Resposta em frequência do ângulo da impedância de transferência entre as barras 1 e 2 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)

Tabela 36: Conjunto de polos e resíduos da função de transferência (1,2)

Freq (Hz)	Polo	Resíduo	
		Mód.	Âng.
0,0	-11,0913	6,21e-4	180
0,0	-121,894	6,90e-2	180
156,3	-470,706 + j 981,862	5,74e+2	18,7
384,7	-355,860 + j 2417,13	8,13e+2	21,9
1470,8	-966,578 + j 9241,20	8,29e+1	-118
1437,7	-5047,80 + j 9033,55	2,37e+2	-33,5
2149,5	-491,149 + j 13505,6	3,47e+2	178
3188,1	-62,2144 + j 20031,5	1,62e+3	180
4329,7	-5133,75 + j 27204,4	2,62e+3	-50,0
4524,3	-710,804 + j 28426,9	2,88e+3	113

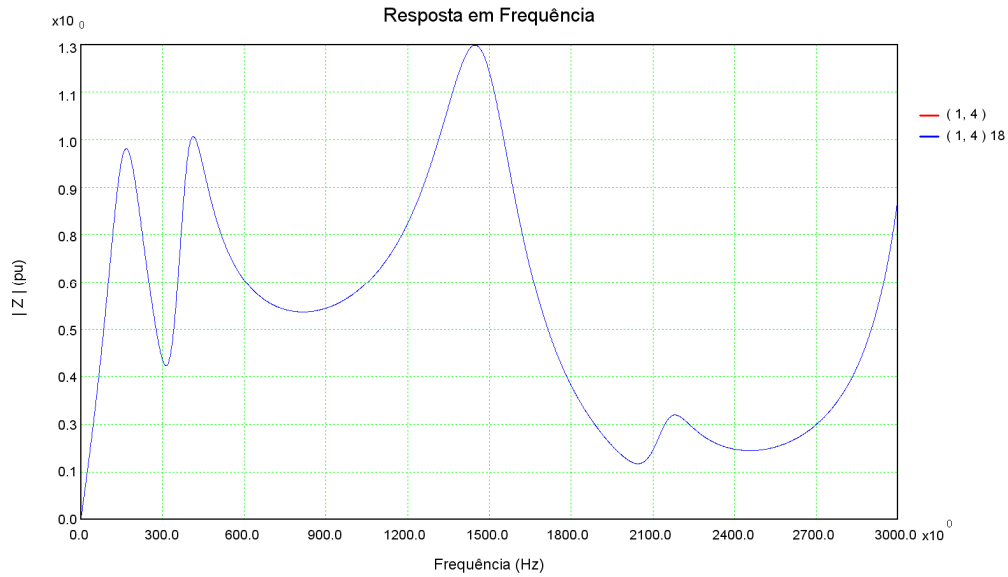


Figura 115: Resposta em frequência do módulo da impedância de transferência entre as barras 1 e 4 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)

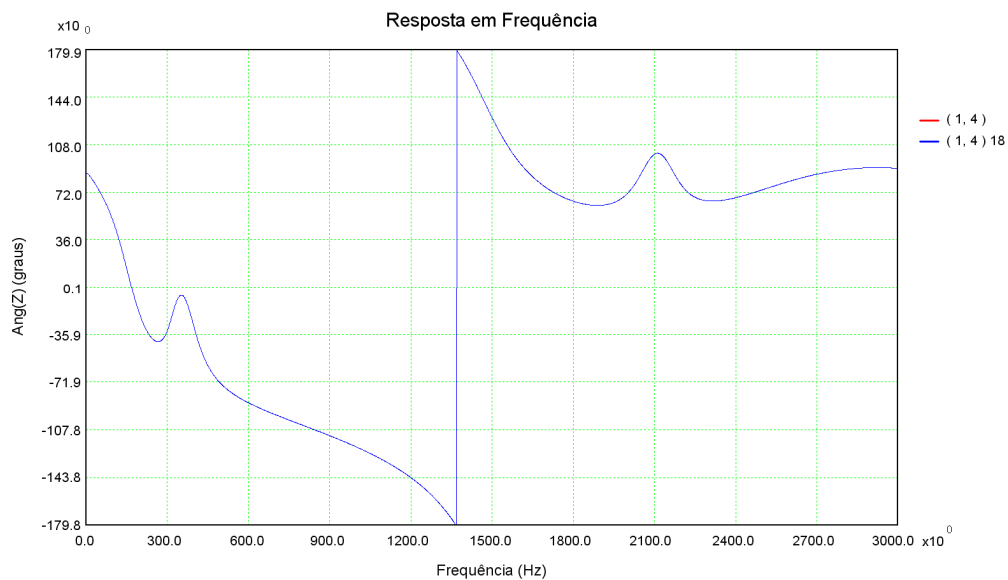


Figura 116: Resposta em frequência do ângulo da impedância de transferência entre as barras 1 e 4 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)

Tabela 37: Conjunto de polos e resíduos da função de transferência (1,4)

Freq (Hz)	Polo	Resíduo	
		Mód.	Âng.
0,0	-10,8267	8,88e-3	180
0,0	-120,094	5,15e-2	180
156,3	-470,709 + j 981,858	5,51e+2	18,0
384,7	-355,860 + j 2417,13	3,03e+2	19,9
1470,8	-966,576 + j 9241,21	1,41e+3	132
1437,9	-5045,53 + j 9034,66	9,62e+2	-86,8
2149,5	-491,149 + j 13505,6	8,37e+1	131
3188,1	-61,9853 + j 20031,3	1,32e+3	1,57
3557,1	-6635,87 + j 22350,0	8,59e+2	-77,0
4108,0	-298,349 + j 25811,3	1,65e+3	143

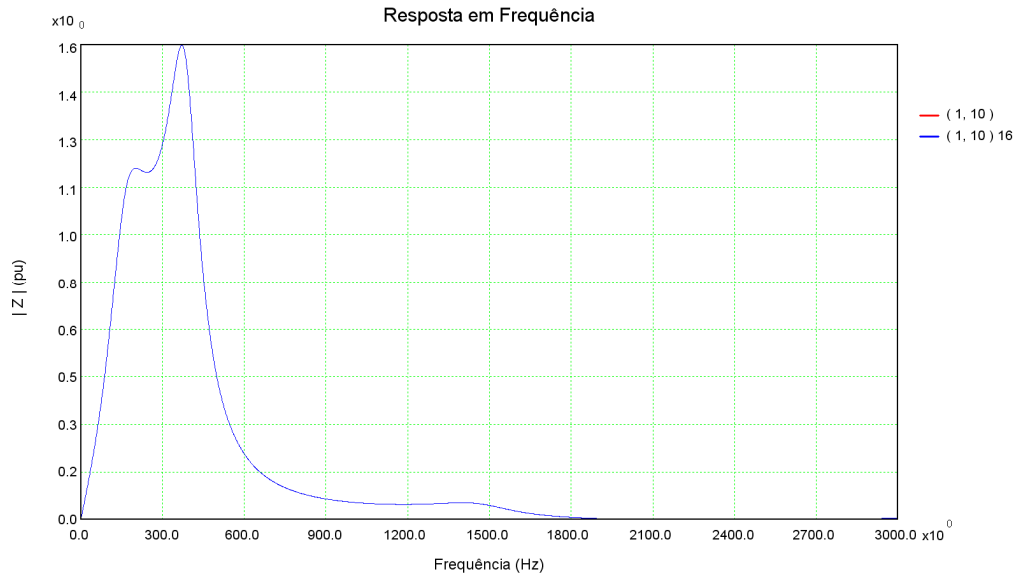


Figura 117: Resposta em frequência do módulo da impedância de transferência entre as barras 1 e 10 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)

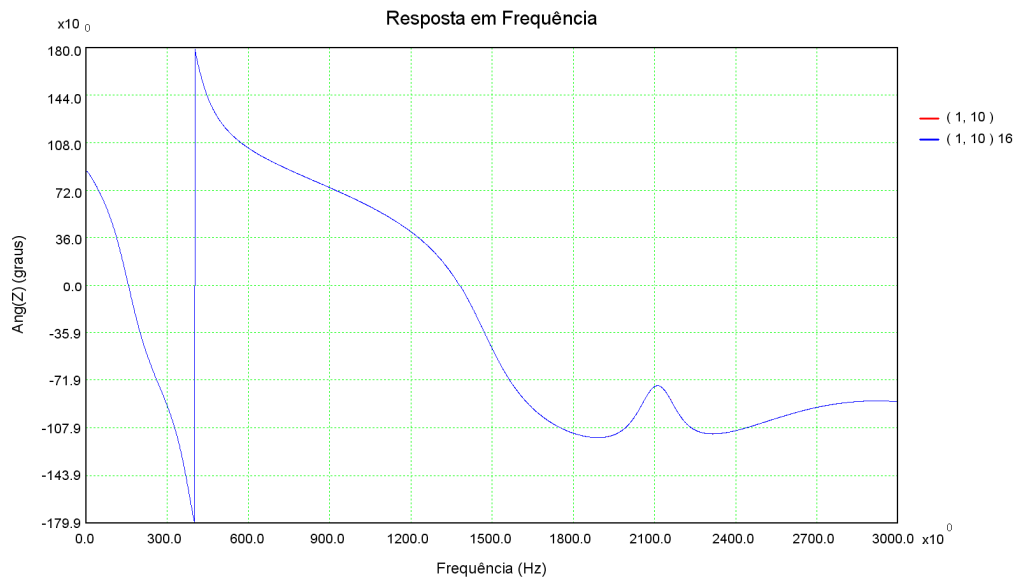


Figura 118: Resposta em frequência do ângulo da impedância de transferência entre as barras 1 e 10 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)

Tabela 38: Conjunto de polos e resíduos da função de transferência (1,10)

Freq (Hz)	Polo	Resíduo	
		Mód.	Âng.
0,0	-10,8182	7,56e-3	180
0,0	-119,130	4,38e-2	180
156,3	-470,711 + j 981,857	6,10e+2	25,1
384,7	-355,860 + j 2417,13	6,15e+2	-174
1470,8	-966,578 + j 9241,22	6,14e+1	-57,2
1438,9	-5039,50 + j 9041,01	3,36e+1	35,3
2149,5	-491,219 + j 13505,6	1,68e+0	-50,6
3188,9	-54,4119 + j 20036,7	1,20e+1	-178
3876,2	-2866,52 + j 24354,8	1,31e+1	2,22

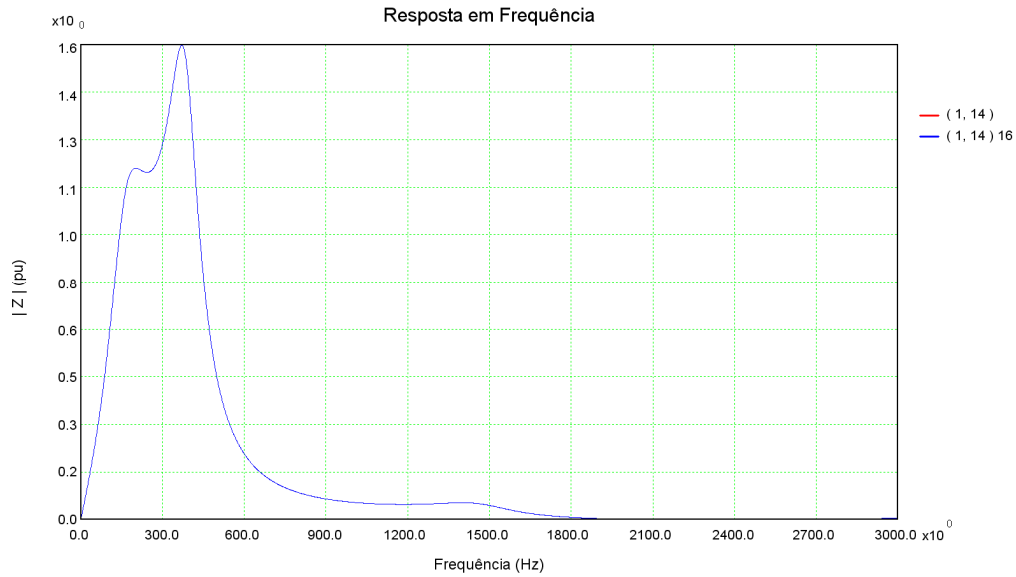


Figura 119: Resposta em frequência do módulo da impedância de transferência entre as barras 1 e 14 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)

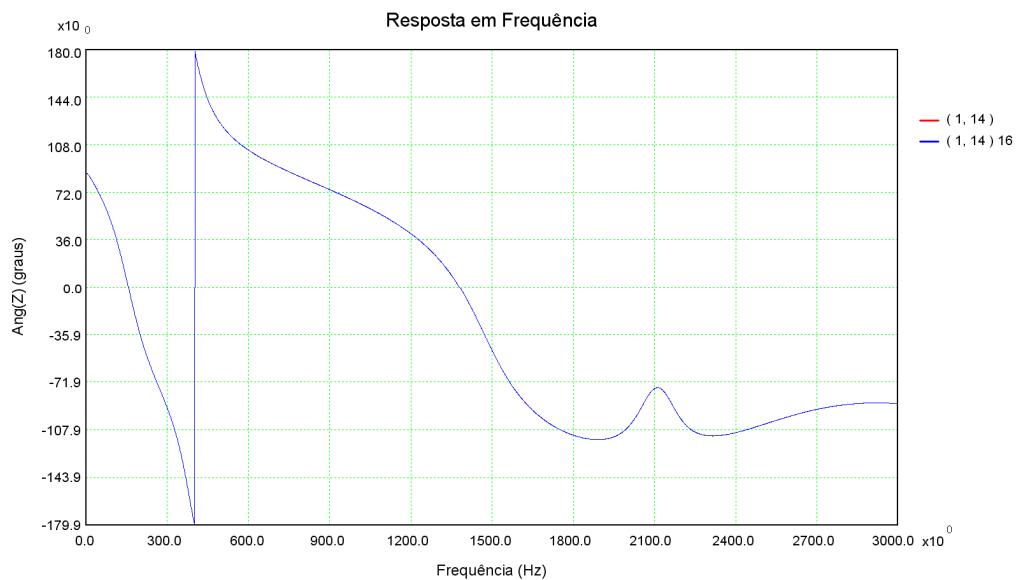


Figura 120: Resposta em frequência do ângulo da impedância de transferência entre as barras 1 e 14 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)

Tabela 39: Conjunto de polos e resíduos da função de transferência (1,14)

Freq (Hz)	Polo	Resíduo	
		Mód.	Âng.
0,0	-10,8182	7,56e-3	180
0,0	-119,130	4,38e-2	180
156,3	-470,711 + j 981,857	6,10e+2	25,1
384,7	-355,860 + j 2417,13	6,15e+2	-174
1470,8	-966,578 + j 9241,22	6,14e+1	-57,2
1438,9	-5039,50 + j 9041,01	3,36e+1	35,3
2149,5	-491,219 + j 13505,6	1,68e+0	-50,6
3188,9	-54,4119 + j 20036,7	1,20e+1	-178
3876,2	-2866,52 + j 24354,8	1,31e+1	2,22

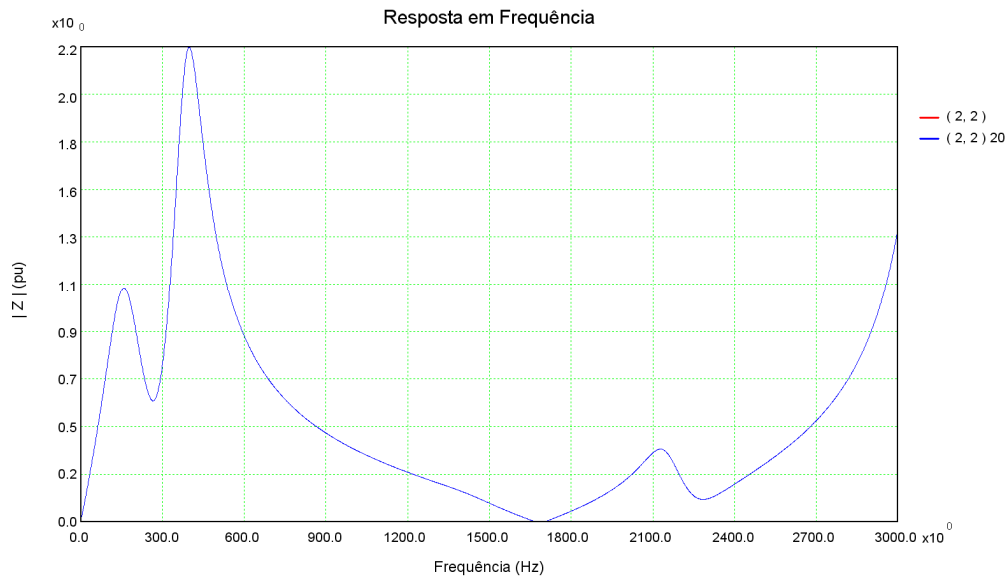


Figura 121: Resposta em frequência do módulo da impedância da barra 2 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)

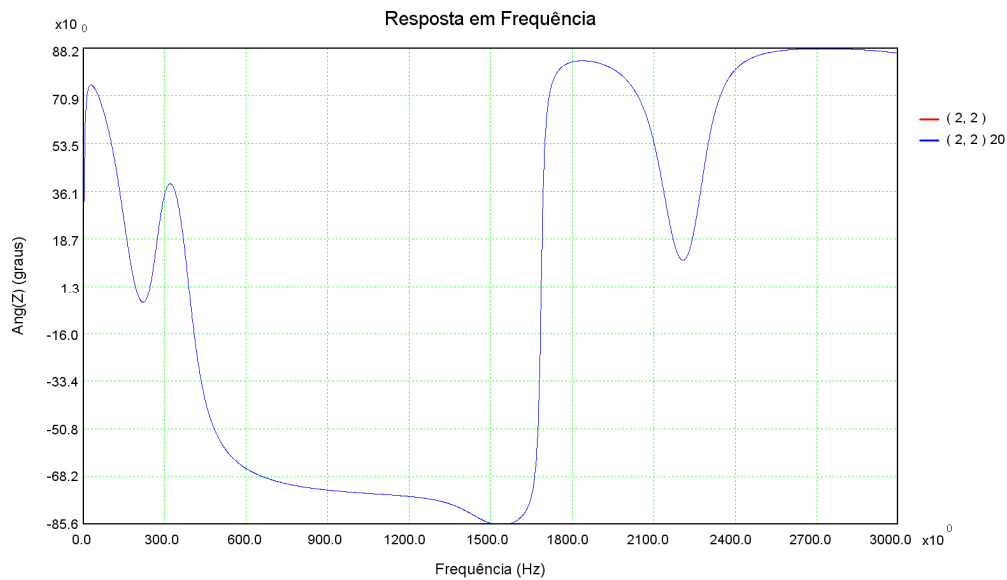


Figura 122: Resposta em frequência do ângulo da impedância da barra 2 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)

Tabela 40: Conjunto de polos e resíduos da função de transferência (2,2)

Freq (Hz)	Polo	Resíduo	
		Mód.	Âng.
0,0	-10,8216	5,90e-4	180
0,0	-119,254	6,66e-2	180
156,3	-470,711 + j 981,857	5,69e+2	18,1
384,7	-355,860 + j 2417,13	7,62e+2	20,9
1470,8	-966,576 + j 9241,21	1,99e+1	-151
1437,9	-5045,43 + j 9034,87	1,99e+2	-103
2149,5	-491,149 + j 13505,6	1,47e+2	5,89
3188,1	-61,9142 + j 20031,5	1,59e+3	-0,55
3492,1	-6388,97 + j 21941,3	2,11e+2	140
4076,1	-858,043 + j 25610,8	7,82e+2	-2,33
7850,5	-5013,81 + j 49326,0	6,12e+3	11,7

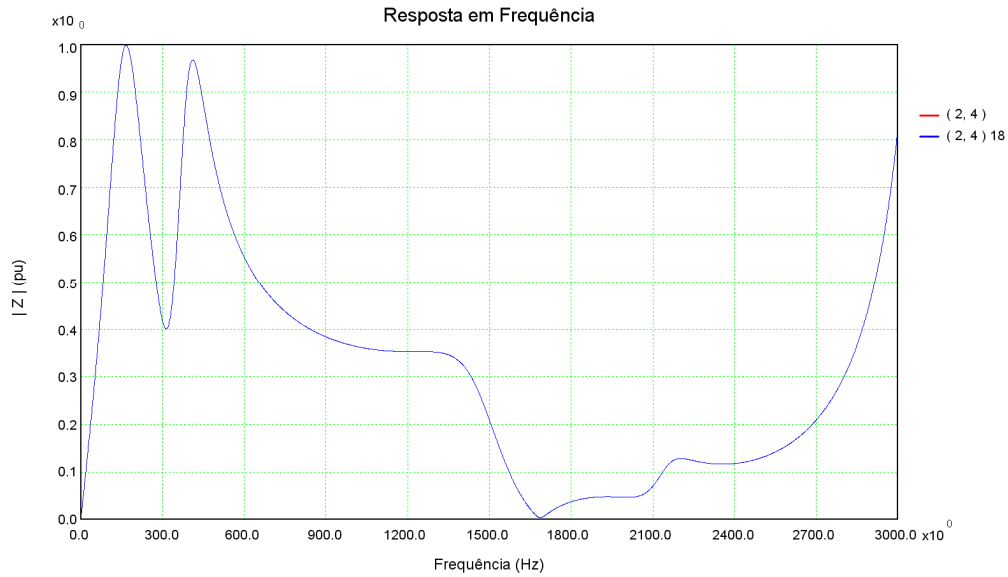


Figura 123: Resposta em frequência do módulo da impedância de transferência entre as barras 2 e 4 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)

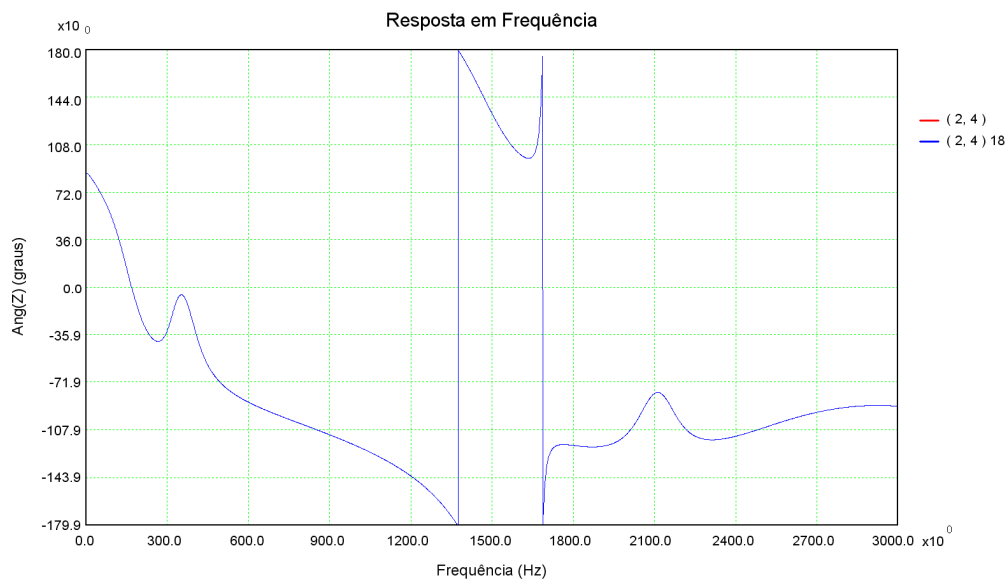


Figura 124: Resposta em frequência do ângulo da impedância de transferência entre as barras 2 e 4 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)

Tabela 41: Conjunto de polos e resíduos da função de transferência (2,4)

Freq (Hz)	Polo	Resíduo	
		Mód.	Âng.
0,0	-10,8194	8,87e-3	180
0,0	-118,792	5,06e-2	180
156,3	-470,711 + j 981,856	5,46e+2	17,5
384,7	-355,860 + j 2417,13	2,84e+2	19,0
1470,8	-966,576 + j 9241,21	3,38e+2	98,6
1438,0	-5045,49 + j 9034,91	8,08e+2	-156
2149,5	-491,149 + j 13505,6	3,55e+1	-40,8
3188,1	-61,8169 + j 20031,5	1,30e+3	-178
3463,3	-6634,48 + j 21760,4	8,85e+2	103
4140,9	-1058,37 + j 26017,8	1,74e+3	-27,0

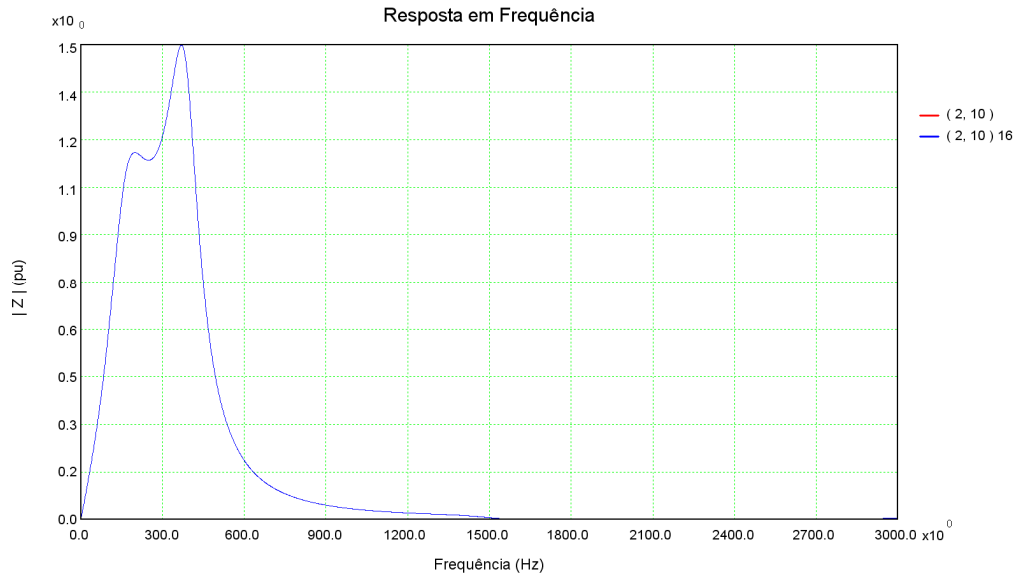


Figura 125: Resposta em frequência do módulo da impedância de transferência entre as barras 2 e 10 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)

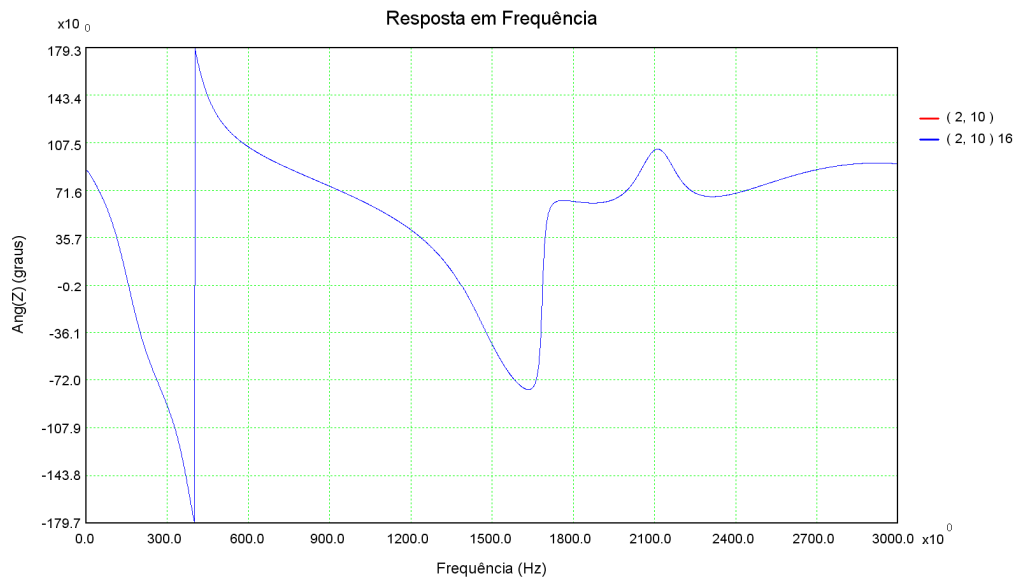


Figura 126: Resposta em frequência do ângulo da impedância de transferência entre as barras 2 e 10 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)

Tabela 42: Conjunto de polos e resíduos da função de transferência (2,10)

Freq (Hz)	Polo	Resíduo	
		Mód.	Âng.
0,0	-10,8243	7,56e-3	180
0,0	-119,369	4,39e-2	180
156,3	-470,710 + j 981,857	6,05e+2	24,5
384,7	-355,860 + j 2417,13	5,77e+2	-175
1470,8	-966,546 + j 9241,16	1,48e+1	-90,5
1436,5	-5041,23 + j 9025,73	2,82e+1	-33,7
2149,5	-491,305 + j 13505,7	7,11e-1	137
3188,6	-53,3830 + j 20034,8	1,18e+1	1,51
3826,7	-3887,58 + j 24043,9	1,43e+1	-167

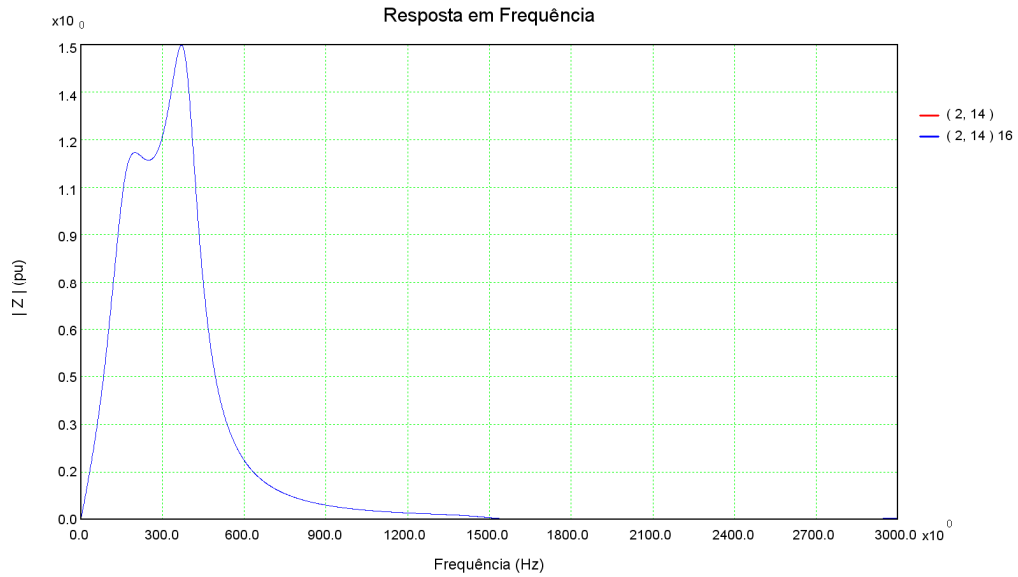


Figura 127: Resposta em frequência do módulo da impedância de transferência entre as barras 2 e 14 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)

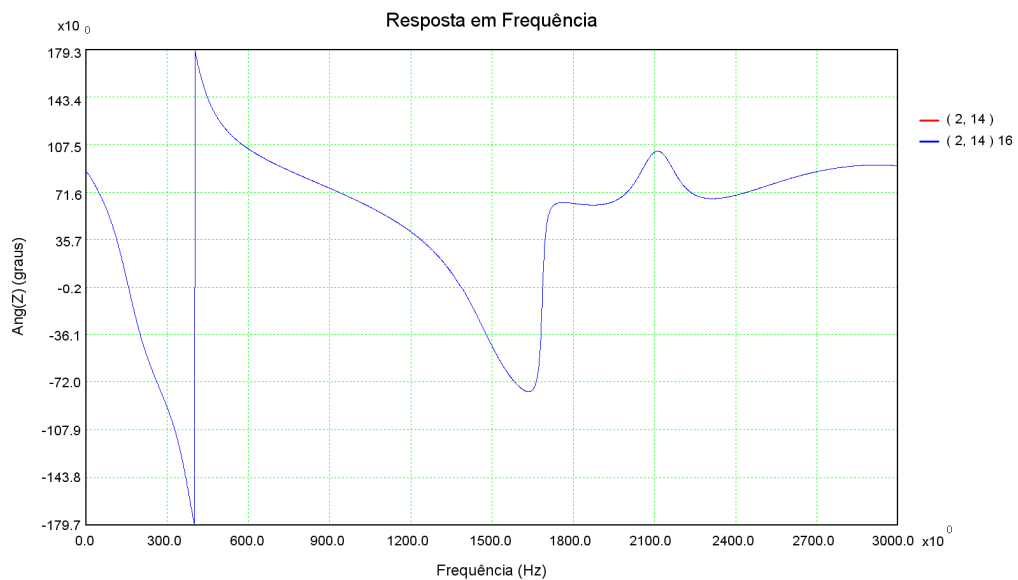


Figura 128: Resposta em frequência do ângulo da impedância de transferência entre as barras 2 e 14 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)

Tabela 43: Conjunto de polos e resíduos da função de transferência (2,14)

Freq(Hz)	Polo	Resíduo	
		Mód.	Âng.
0,0	-10,8243	7,56e-3	180
0,0	-119,369	4,39e-2	180
156,3	-470,710 + j 981,857	6,05e+2	24,5
384,7	-355,860 + j 2417,13	5,77e+2	-175
1470,8	-966,546 + j 9241,16	1,48e+1	-90,5
1436,5	-5041,23 + j 9025,73	2,82e+1	-33,7
2149,5	-491,305 + j 13505,7	7,11e-1	137
3188,6	-53,3830 + j 20034,8	1,18e+1	1,51
3826,7	-3887,58 + j 24043,9	1,43e+1	-167

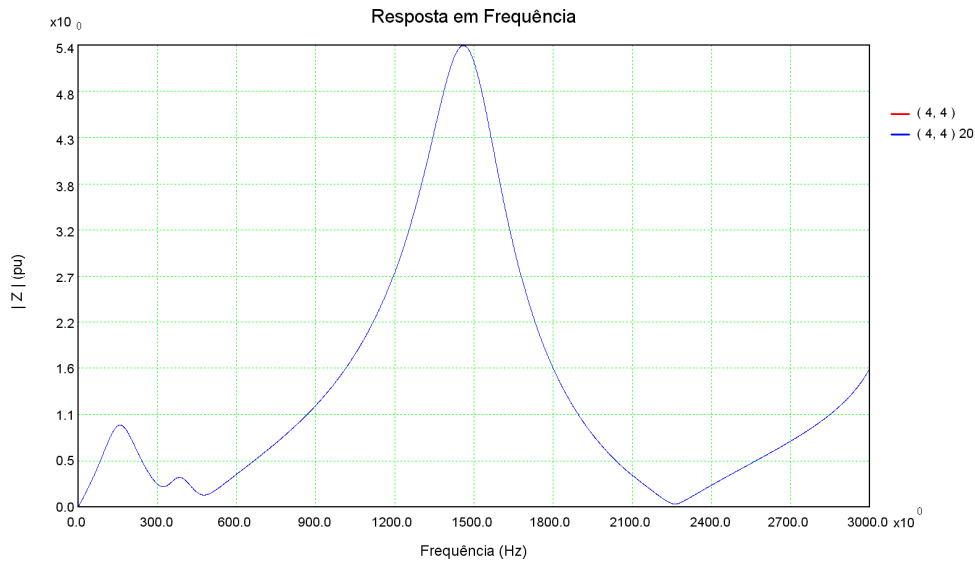


Figura 129: Resposta em frequência do módulo da impedância da barra 4 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)

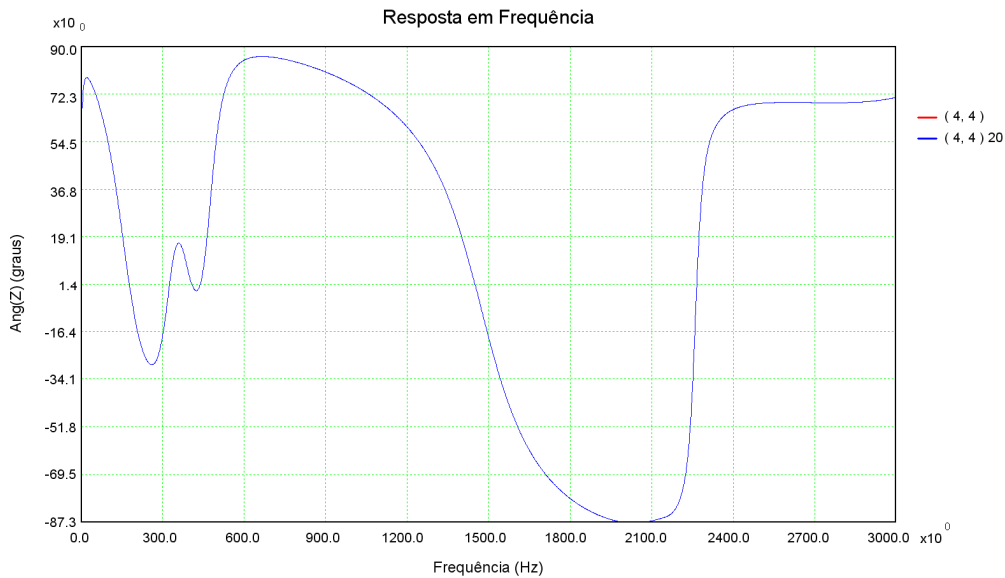


Figura 130: Resposta em frequência do ângulo da impedância da barra 4 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)

Tabela 44: Conjunto de polos e resíduos da função de transferência (4,4)

Freq (Hz)	Polo	Resíduo	
		Mód.	Âng.
0,0	-10,8212	1,33e-1	180
0,0	-119,280	3,90e-2	180
156,3	-470,711 + j 981,857	5,24e+2	16,8
384,7	-355,860 + j 2417,13	1,06e+2	17,0
1470,8	-966,576 + j 9241,21	5,74e+3	-11,5
1437,9	-5045,40 + j 9034,85	3,29e+3	150
2149,5	-491,149 + j 13505,6	8,55e+0	-87,4
3188,1	-61,9003 + j 20031,5	1,07e+3	3,66
3477,5	-6658,67 + j 21849,9	4,46e+3	53,3
4092,7	-703,197 + j 25714,9	2,30e+3	-54,5
7419,4	-13504,5 + j 46617,6	2,17e+4	24,1

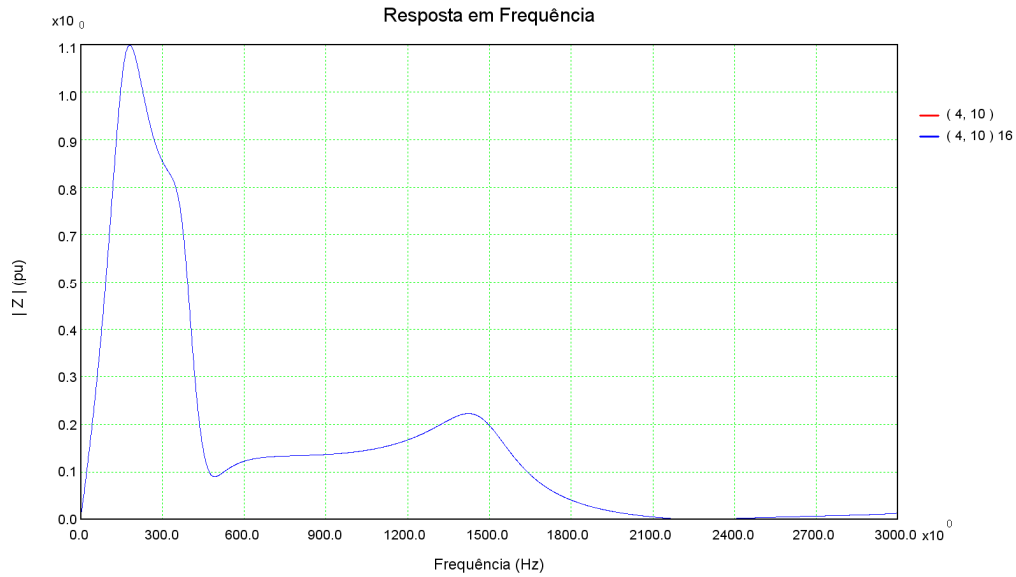


Figura 131: Resposta em frequência do módulo da impedância de transferência entre as barras 4 e 10 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)

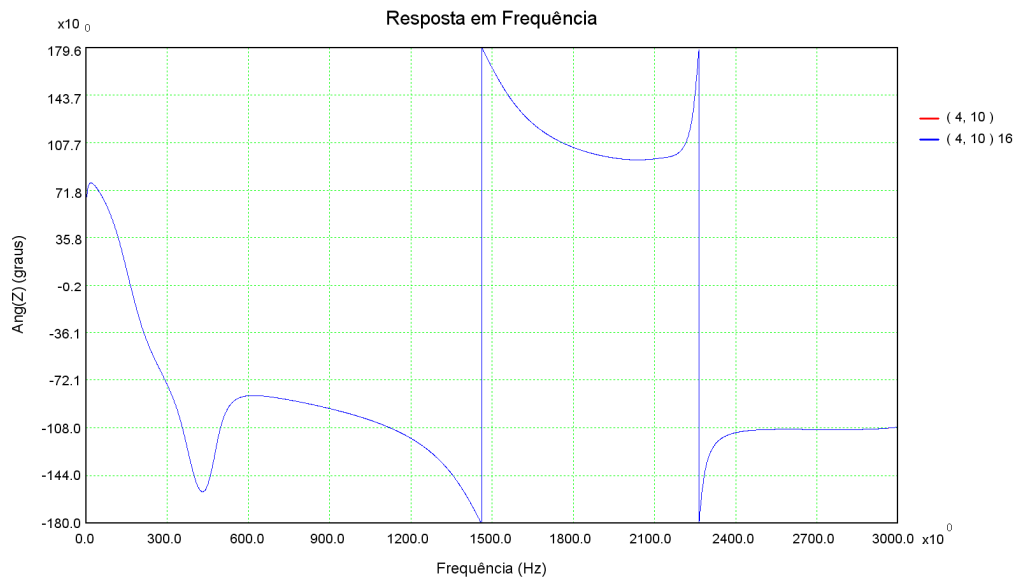


Figura 132: Resposta em frequência do ângulo da impedância de transferência entre as barras 4 e 10 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)

Tabela 45: Conjunto de polos e resíduos da função de transferência (4,10)

Freq (Hz)	Polo	Resíduo	
		Mód.	Âng.
0,0	-10,8216	1,14e-1	180
0,0	-119,546	3,37e-2	180
156,3	-470,710 + j 981,857	5,80e+2	23,9
384,7	-355,861 + j 2417,13	2,15e+2	-177
1470,8	-966,572 + j 9241,21	2,51e+2	159
1437,6	-5040,76 + j 9032,59	1,15e+2	-87,1
2149,5	-492,355 + j 13505,5	1,72e-1	90,7
3189,1	-79,5631 + j 20037,9	9,83e+0	-173
3767,5	-6017,95 + j 23671,8	5,35e+1	-179

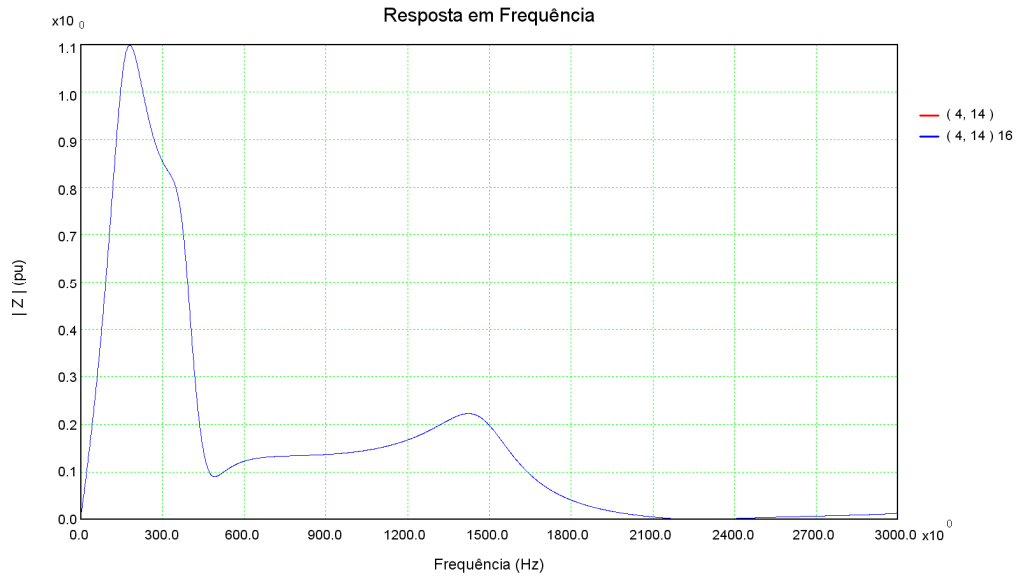


Figura 133: Resposta em frequência do módulo da impedância de transferência entre as barras 4 e 14 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)

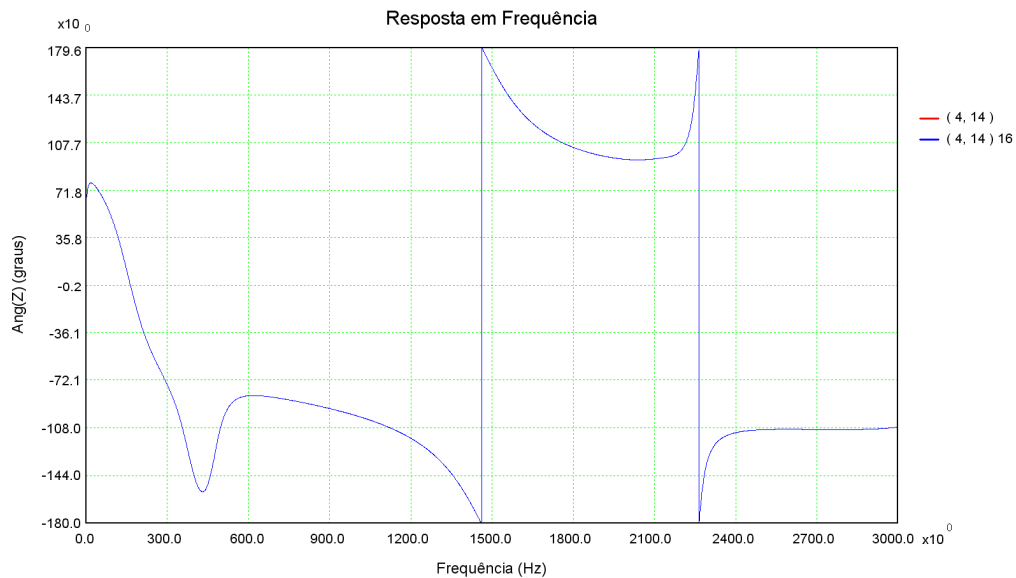


Figura 134: Resposta em frequência do ângulo da impedância de transferência entre as barras 4 e 14 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)

Tabela 46: Conjunto de polos e resíduos da função de transferência (4,14)

Freq (Hz)	Polo	Resíduo	
		Mód.	Âng.
0,0	-10,8216	1,14e-1	180
0,0	-119,546	3,37e-2	180
156,3	-470,710 + j 981,857	5,80e+2	23,9
384,7	-355,861 + j 2417,13	2,15e+2	-177
1470,8	-966,572 + j 9241,21	2,51e+2	159
1437,6	-5040,76 + j 9032,59	1,15e+2	-87,1
2149,5	-492,355 + j 13505,5	1,72e-1	90,7
3189,1	-79,5631 + j 20037,9	9,83e+0	-173
3767,5	-6017,95 + j 23671,8	5,35e+1	-179

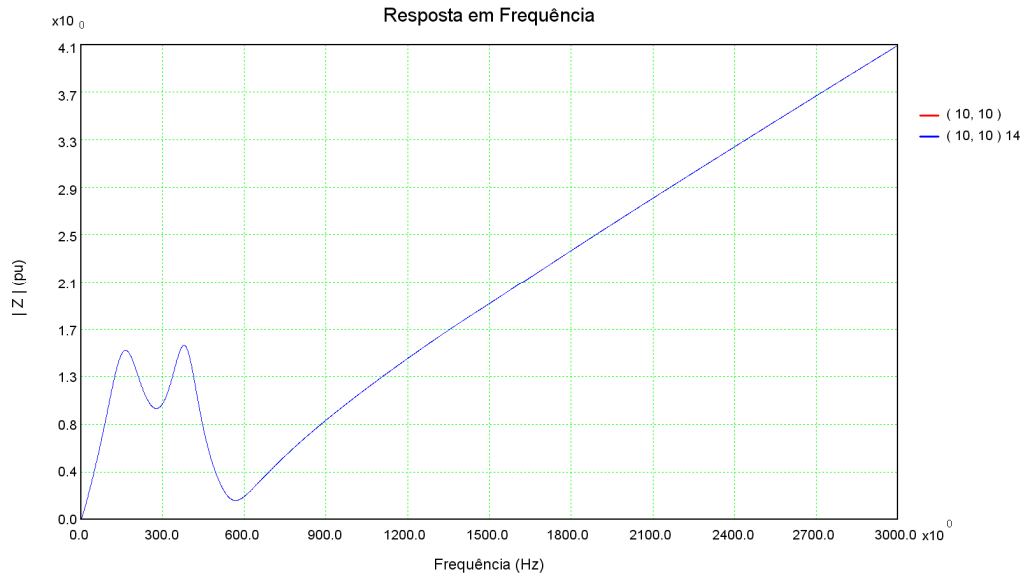


Figura 135: Resposta em frequência do módulo da impedância da barra 10 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)

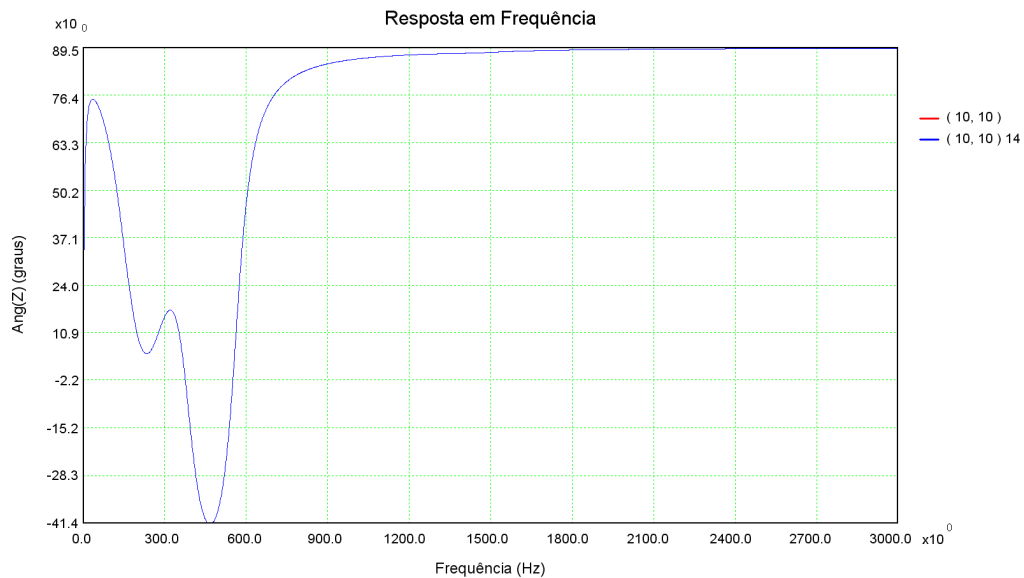


Figura 136: Resposta em frequência do ângulo da impedância da barra 10 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)

Tabela 47: Conjunto de polos e resíduos da função de transferência (10,10)

Freq (Hz)	Polo	Resíduo	
		Mód.	Âng.
0,0	-10,8225	9,70e-2	180
0,0	-119,975	2,91e-2	180
156,3	-470,710 + j 981,857	6,42e+2	31,0
384,7	-355,860 + j 2417,13	4,36e+2	-10,9
1470,8	-966,457 + j 9241,11	1,09e+1	-29,6
1426,1	-5019,94 + j 8960,62	3,96e+0	37,0
2151,4	-566,250 + j 13517,4	4,33e-3	-98,9
3210,4	-152,019 + j 20171,5	1,02e-1	1,21

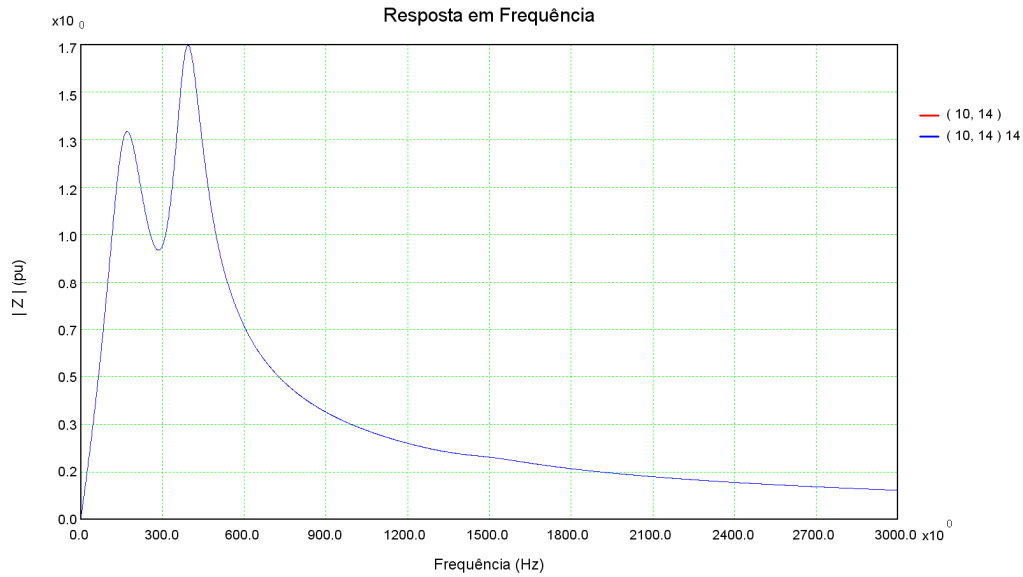


Figura 137: Resposta em frequência do módulo da impedância de transferência entre as barras 10 e 14 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)

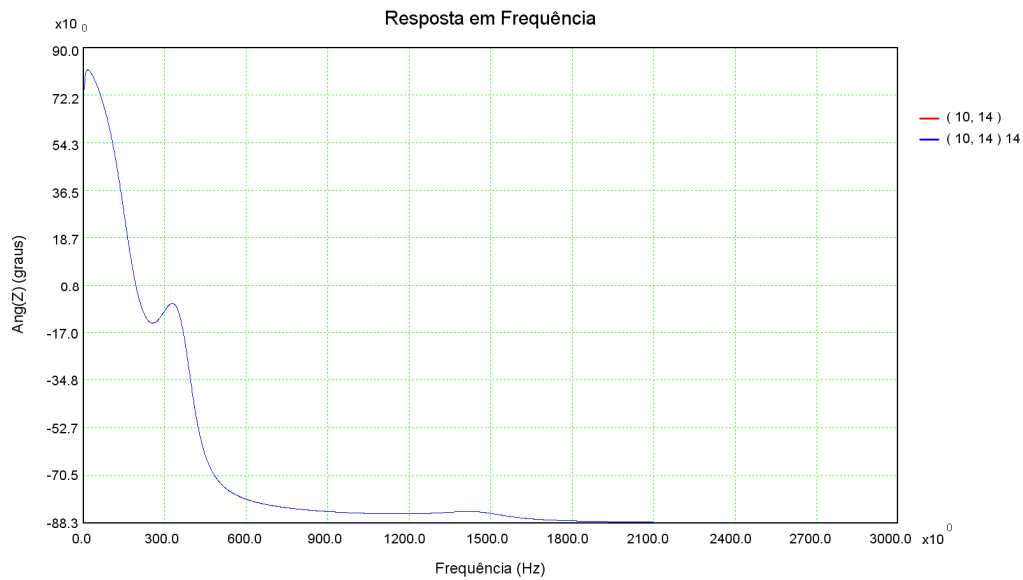


Figura 138: Resposta em frequência do ângulo da impedância de transferência entre as barras 10 e 14 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)

Tabela 48: Conjunto de polos e resíduos da função de transferência (10,14)

Freq (Hz)	Polo	Resíduo	
		Mód.	Âng.
0,0	-10,8225	9,70e-2	180
0,0	-119,975	2,91e-2	180
156,3	-470,710 + j 981,857	6,42e+2	31,0
384,7	-355,860 + j 2417,13	4,36e+2	-10,9
1470,8	-966,457 + j 9241,11	1,09e+1	-29,6
1426,1	-5019,94 + j 8960,62	3,96e+0	37,0
2151,4	-566,250 + j 13517,4	4,33e-3	-98,9
3210,4	-152,019 + j 20171,5	1,02e-1	1,21

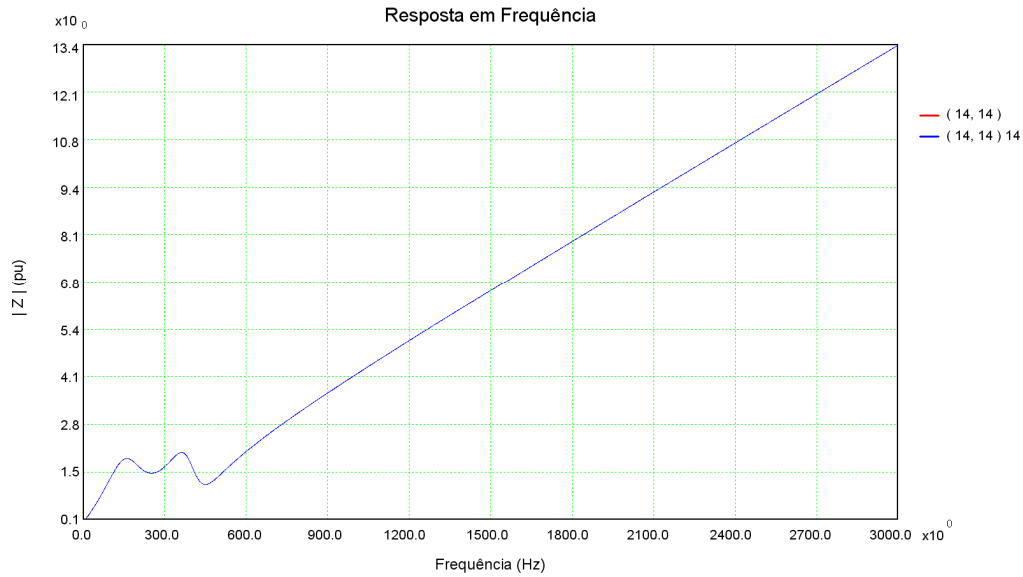


Figura 139: Resposta em frequência do módulo da impedância da barra 14 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)

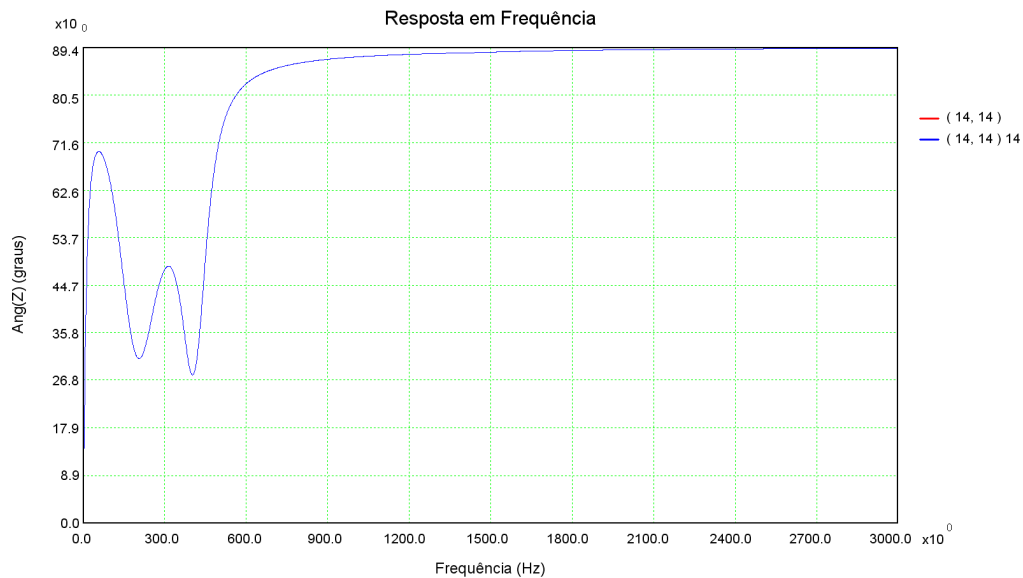


Figura 140: Resposta em frequência do ângulo da impedância da barra 14 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)

Tabela 49: Conjunto de polos e resíduos da função de transferência (14,14)

Freq (Hz)	Polo	Resíduo	
		Mód.	Âng.
0,0	-10,8225	9,70e-2	180
0,0	-119,975	2,91e-2	180
156,3	-470,710 + j 981,857	6,42e+2	31,0
384,7	-355,860 + j 2417,13	4,36e+2	-10,9
1470,8	-966,457 + j 9241,11	1,09e+1	-29,6
1426,1	-5019,94 + j 8960,62	3,96e+0	37,0
2151,4	-566,250 + j 13517,4	4,33e-3	-98,9
3210,4	-152,019 + j 20171,5	1,02e-1	1,21

De modo análogo ao realizado para a vizinhança 1, foram feitos traçados para frequências fora da faixa do ajuste. Em todos os gráficos anteriores, os traçados foram de 0 a 3000 Hz, que é exatamente a faixa de frequência de interesse para a aplicação do Método do Ajuste Vetorial. Com a faixa de frequências para os traçados extrapolada, o erro fora da faixa de interesse torna-se grande. Logo, é importantíssimo que o ajuste seja feito para a faixa de frequências a ser estudada, que deve estar de acordo com o fenômeno transitório em questão. Na Figura 141 e na Figura 142 são apresentados os traçados gráficos do módulo e do ângulo da impedância própria da barra 1 considerando somente a rede externa, para o ajuste feito até 3000 Hz e o traçado feito até 5000 Hz. Observa-se que após 3000 Hz existe diferença entre a curva do sistema completo e a curva ajustada pelo método.

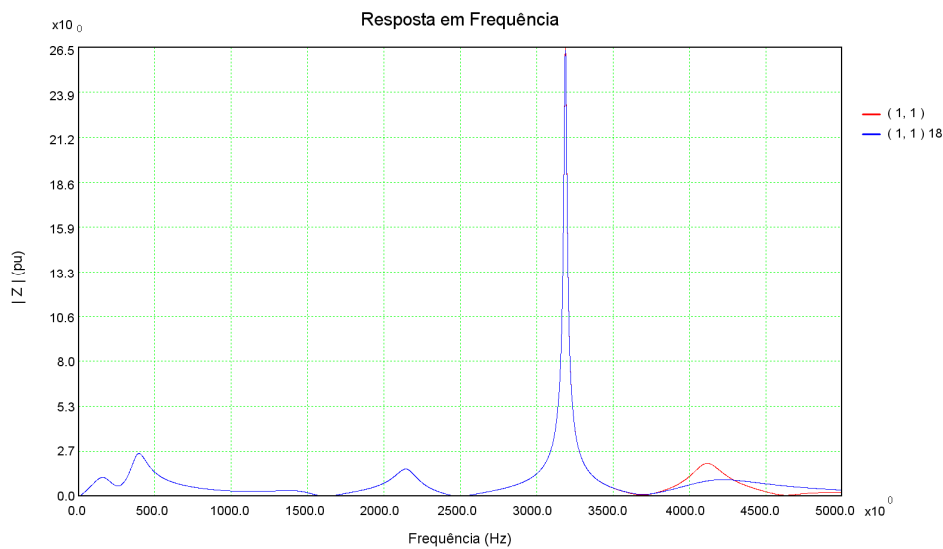


Figura 141: Resposta em frequência extrapolada até 5000 Hz do módulo da impedância da barra 1 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)

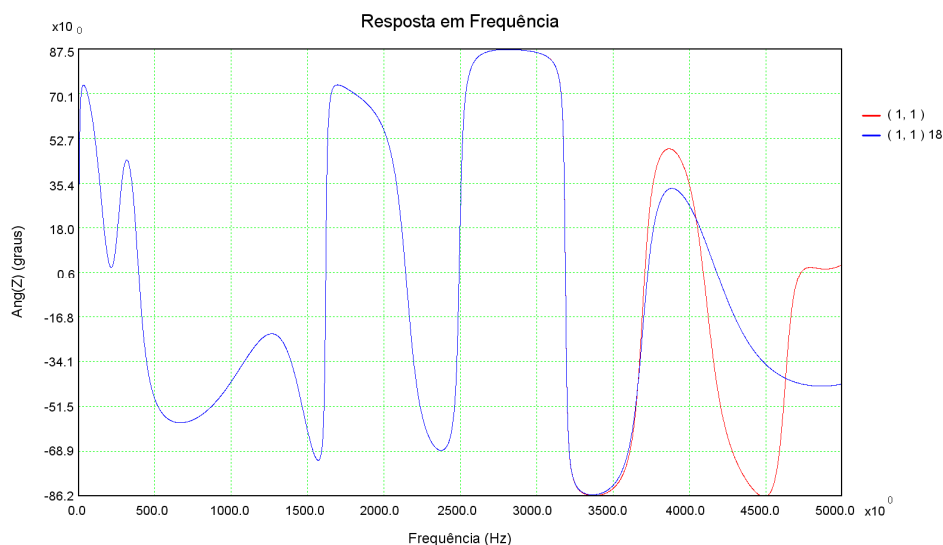


Figura 142: Resposta em frequência extrapolada até 5000 Hz do ângulo da impedância da barra 1 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)

6.2.2.2 Comparação entre a Rede Completa e o Modelo Reduzido

Neste item é realizada a comparação entre a rede completa do sistema IEEE 14 Barras (modelada por todos os seus equipamentos) e os sistemas reduzidos compostos pelo equivalente modal e o equivalente convencional para as vizinhanças 1 e 2. Como nos testes para a primeira vizinhança, o objetivo principal da comparação é avaliar a qualidade do equivalente modal acoplado à rede interna. Como objetivo secundário, tem-se a comparação entre os equivalentes modal e convencional para a vizinhança 2 e também apresentar a comparação entre o equivalente convencional para as vizinhanças 1 e 2.

Para que se possa visualizar a evolução do equivalente convencional com mais vizinhanças frente ao sistema completo, as mesmas barras de fronteira da vizinhança 1 serão utilizadas para se fazer as comparações considerando a rede interna definida até a vizinhança 2.

Estas comparações podem ser visualizadas da Figura 143 à Figura 164. A curva em vermelho é sempre a resposta em frequência do sistema completo. A curva em azul representa a resposta do sistema reduzido composto pelo equivalente modal. A curva em cor laranja representa a resposta do sistema reduzido composto pelo equivalente convencional da vizinhança 1 e finalmente a curva em cor marrom representa a resposta do sistema reduzido composto pelo equivalente convencional da vizinhança 2.

Pode-se observar por estas comparações que, as curvas do sistema completo (vermelho) e as do sistema reduzido composto pelo equivalente modal (azul) são coincidentes, validando que o equivalente modal tem excelente qualidade e representa com total fidelidade o que está além da rede interna.

No teste para a vizinhança 1, já foi visualizado que o equivalente convencional representa com muito pouca fidelidade a rede externa completa. Neste item pode-se observar também que o equivalente convencional, levando-se em consideração a segunda vizinhança (curva marrom), continua ruim, embora tenda a ser melhor em algumas frequências que o equivalente da vizinhança 1. Isto demonstra que para este

caso, seria necessário representar mais vizinhanças para que o equivalente convencional pudesse ser utilizado com maior segurança para a faixa de frequências de interesse.

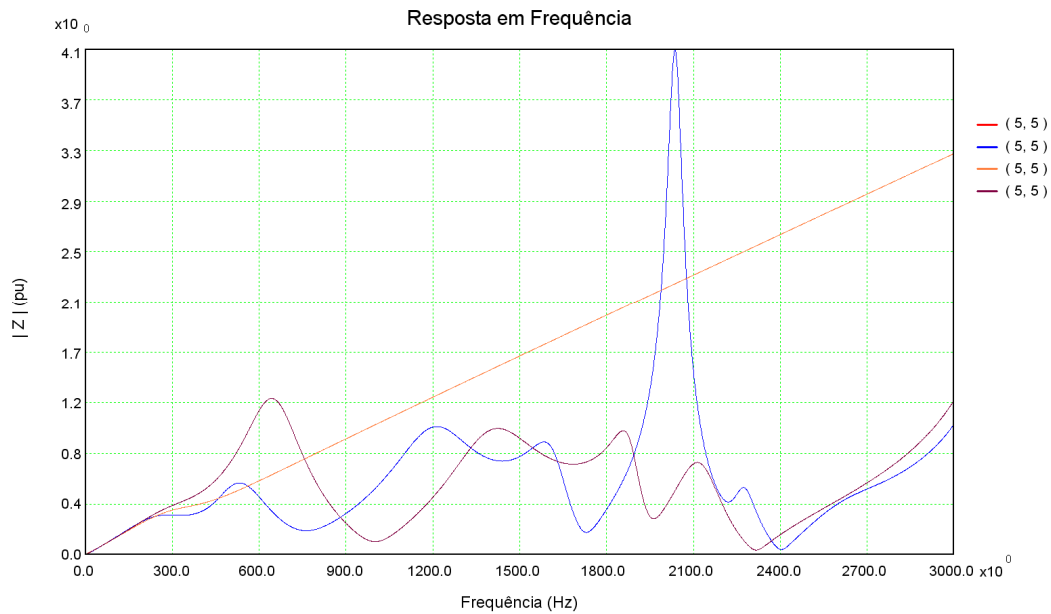


Figura 143: Resposta em frequência do módulo da impedância da barra 5 considerando a rede completa (vermelho) e os sistemas reduzidos considerando o equivalente modal (azul), o equivalente convencional da vizinhança 1 (laranja) e o equivalente convencional da vizinhança 2 (marrom)

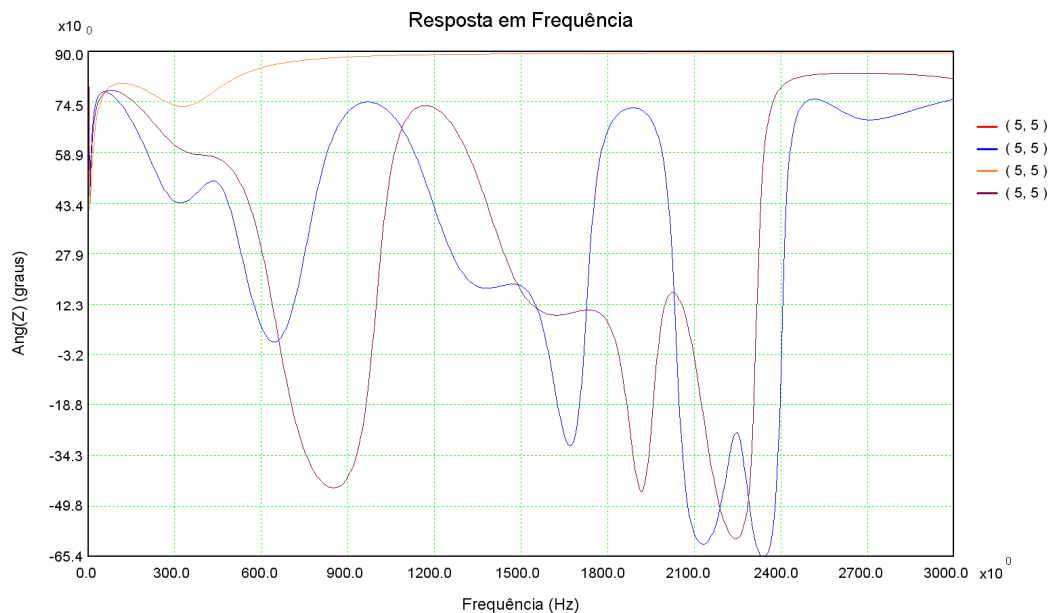


Figura 144: Resposta em frequência do ângulo da impedância da barra 5 considerando a rede completa (vermelho) e os sistemas reduzidos considerando o equivalente modal (azul), o equivalente convencional da vizinhança 1 (laranja) e o equivalente convencional da vizinhança 2 (marrom)

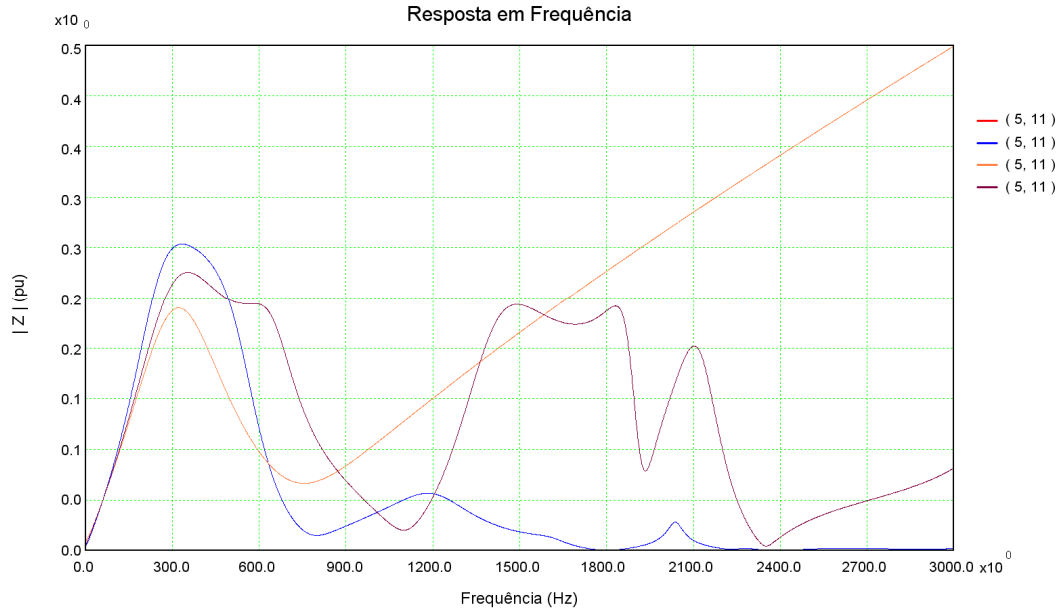


Figura 145: Resposta em frequência do módulo da impedância de transferência entre as barras 5 e 11 considerando a rede completa (vermelho) e os sistemas reduzidos considerando o equivalente modal (azul), o equivalente convencional da vizinhança 1 (laranja) e o equivalente convencional da vizinhança 2 (marrom)

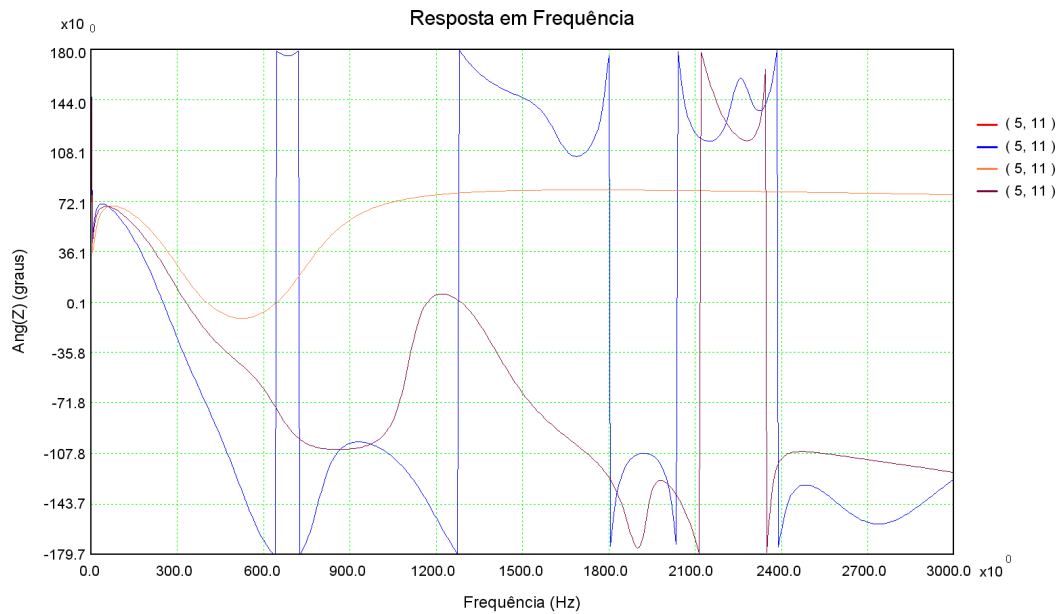


Figura 146: Resposta em frequência do ângulo da impedância de transferência entre as barras 5 e 11 considerando a rede completa (vermelho) e os sistemas reduzidos considerando o equivalente modal (azul), o equivalente convencional da vizinhança 1 (laranja) e o equivalente convencional da vizinhança 2 (marrom)

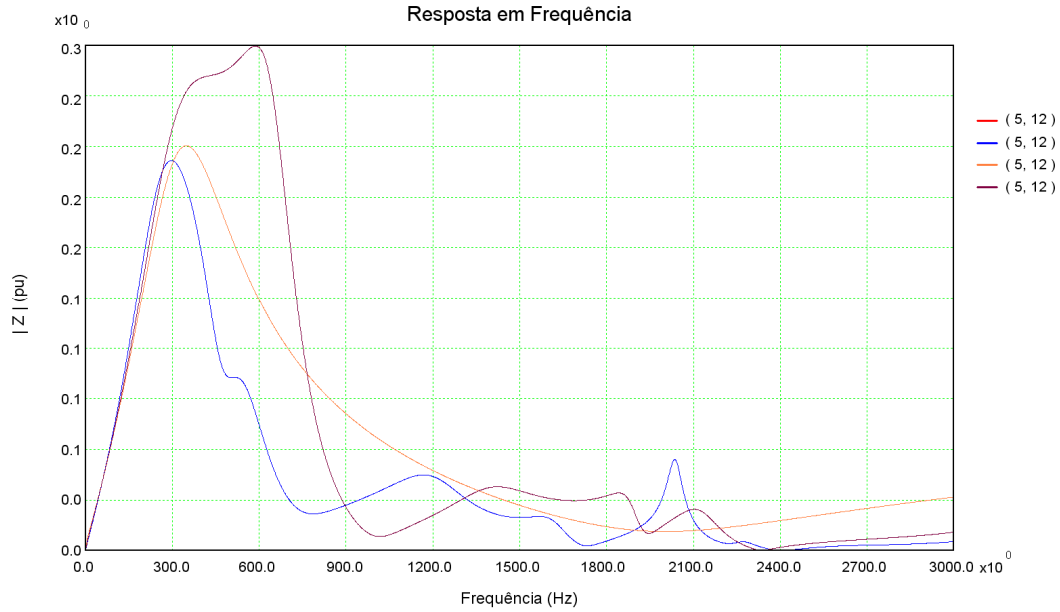


Figura 147: Resposta em frequência do módulo da impedância de transferência entre as barras 5 e 12 considerando a rede completa (vermelho) e os sistemas reduzidos considerando o equivalente modal (azul), o equivalente convencional da vizinhança 1 (laranja) e o equivalente convencional da vizinhança 2 (marrom)

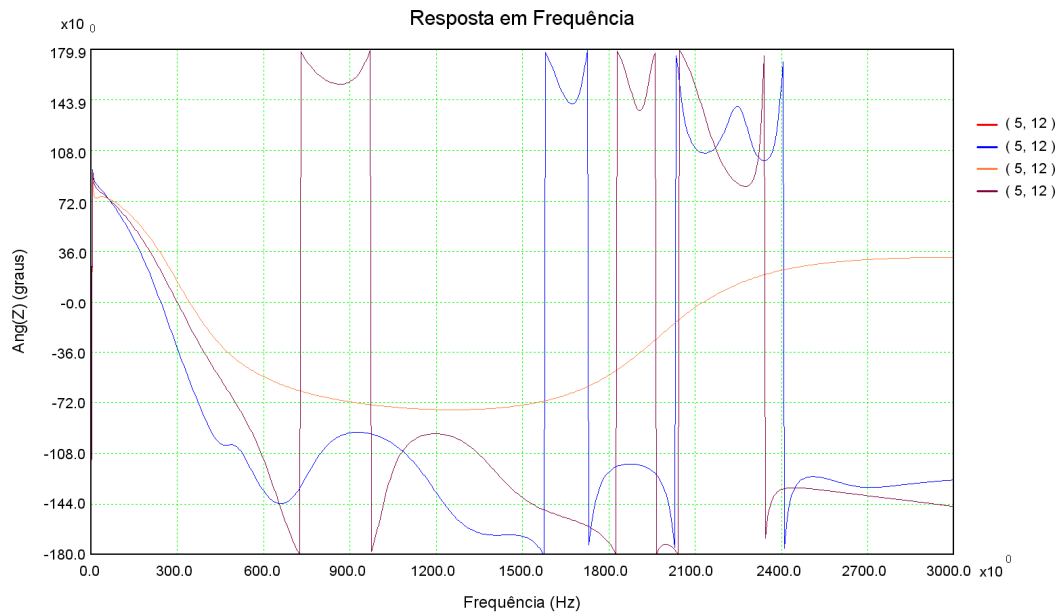


Figura 148: Resposta em frequência do ângulo da impedância de transferência entre as barras 5 e 12 considerando a rede completa (vermelho) e os sistemas reduzidos considerando o equivalente modal (azul), o equivalente convencional da vizinhança 1 (laranja) e o equivalente convencional da vizinhança 2 (marrom)

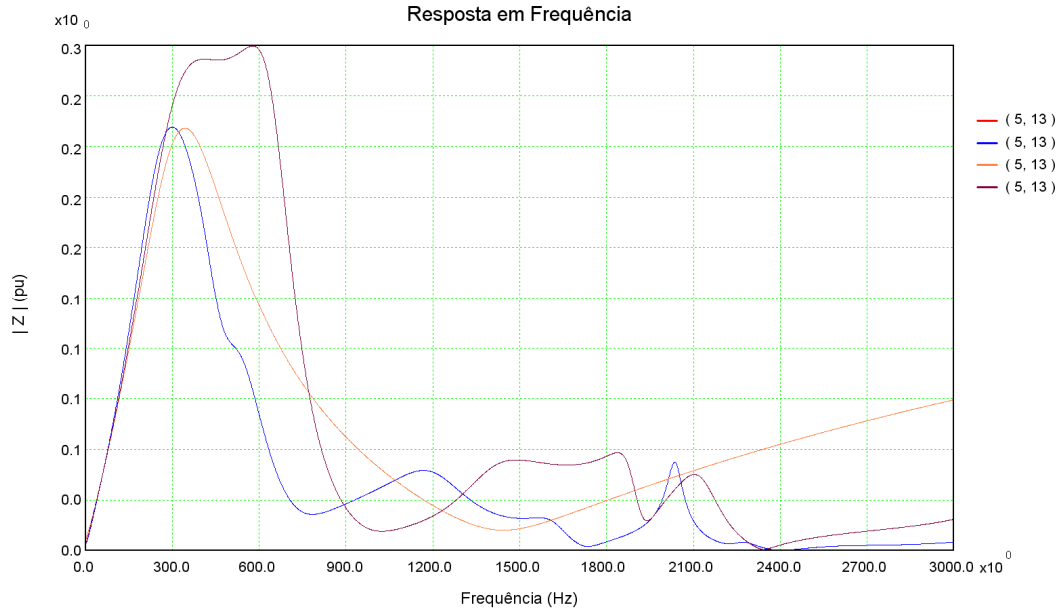


Figura 149: Resposta em frequência do módulo da impedância de transferência entre as barras 5 e 13 considerando a rede completa (vermelho) e os sistemas reduzidos considerando o equivalente modal (azul), o equivalente convencional da vizinhança 1 (laranja) e o equivalente convencional da vizinhança 2 (marrom)

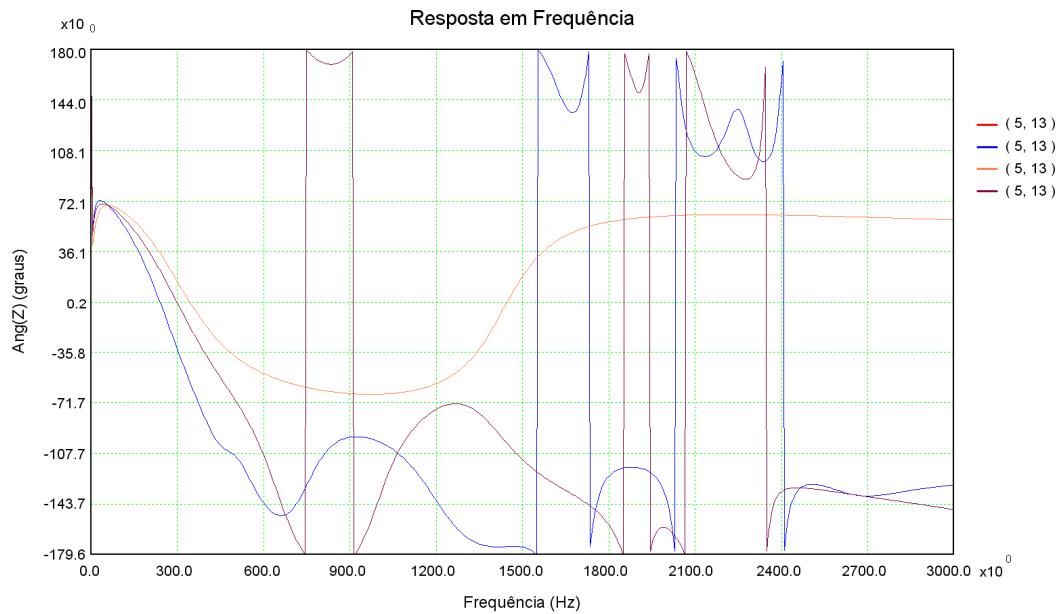


Figura 150: Resposta em frequência do ângulo da impedância de transferência entre as barras 5 e 13 considerando a rede completa (vermelho) e os sistemas reduzidos considerando o equivalente modal (azul), o equivalente convencional da vizinhança 1 (laranja) e o equivalente convencional da vizinhança 2 (marrom)

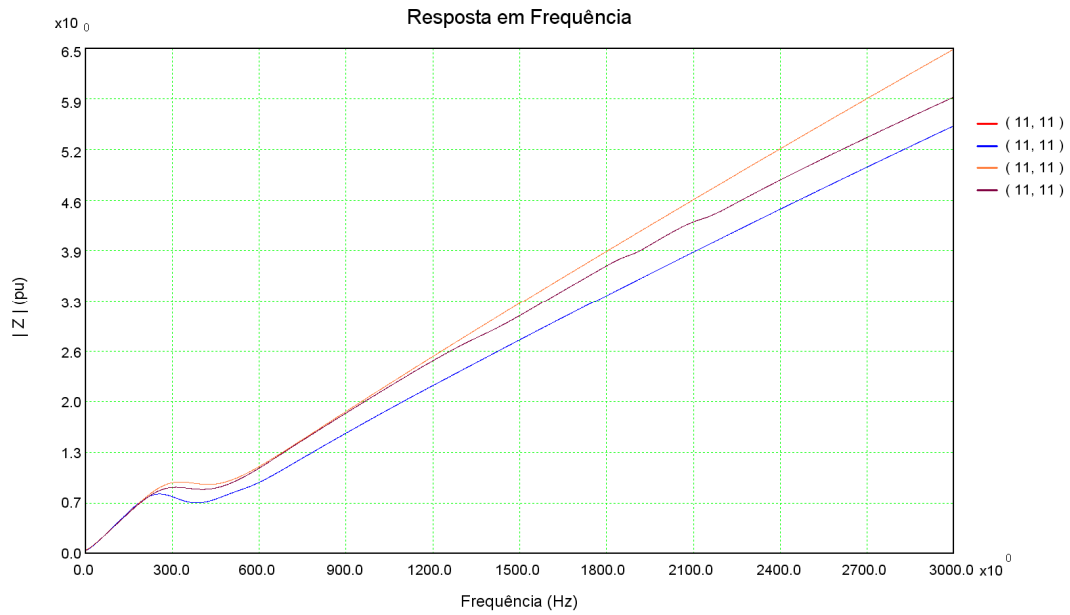


Figura 151: Resposta em frequência do módulo da impedância da barra 11 considerando a rede completa (vermelho) e os sistemas reduzidos considerando o equivalente modal (azul), o equivalente convencional da vizinhança 1 (laranja) e o equivalente convencional da vizinhança 2 (marrom)

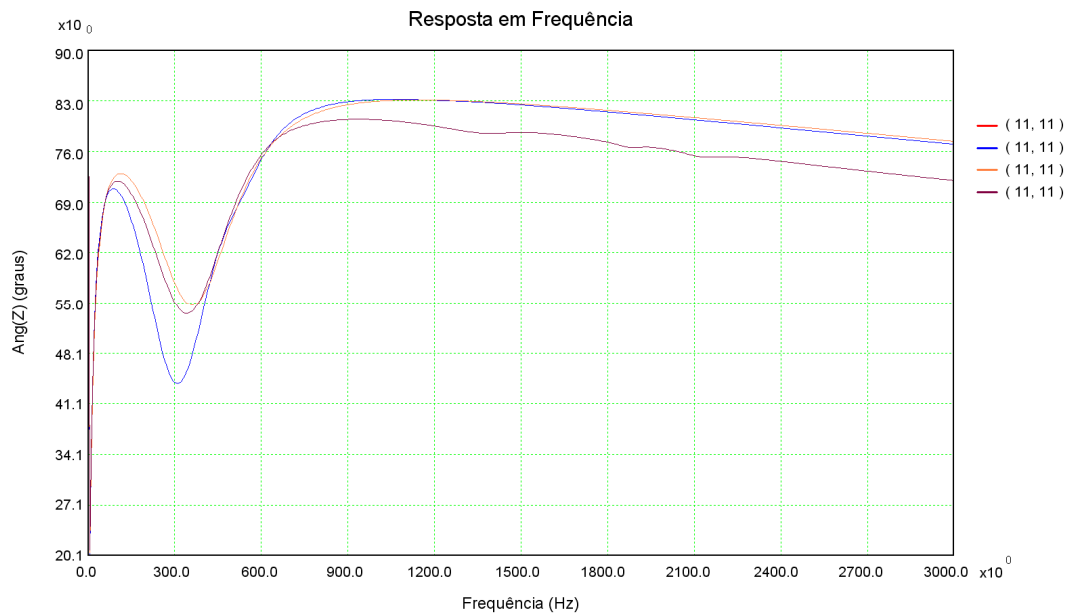


Figura 152: Resposta em frequência do ângulo da impedância da barra 11 considerando a rede completa (vermelho) e os sistemas reduzidos considerando o equivalente modal (azul), o equivalente convencional da vizinhança 1 (laranja) e o equivalente convencional da vizinhança 2 (marrom)

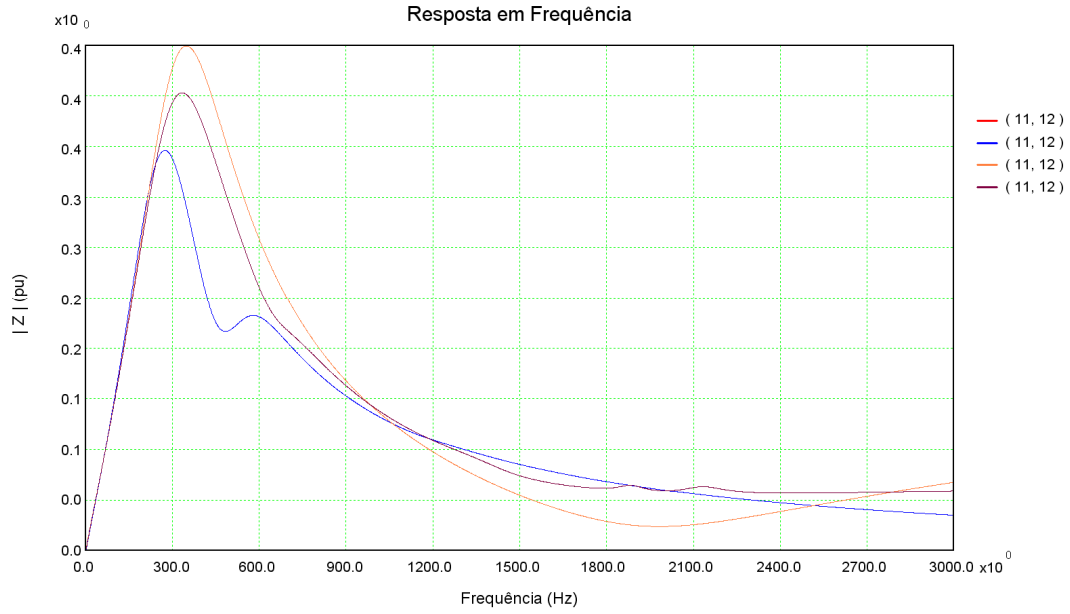


Figura 153: Resposta em frequência do módulo da impedância de transferência entre as barras 11 e 12 considerando a rede completa (vermelho) e os sistemas reduzidos considerando o equivalente modal (azul), o equivalente convencional da vizinhança 1 (laranja) e o equivalente convencional da vizinhança 2 (marrom)

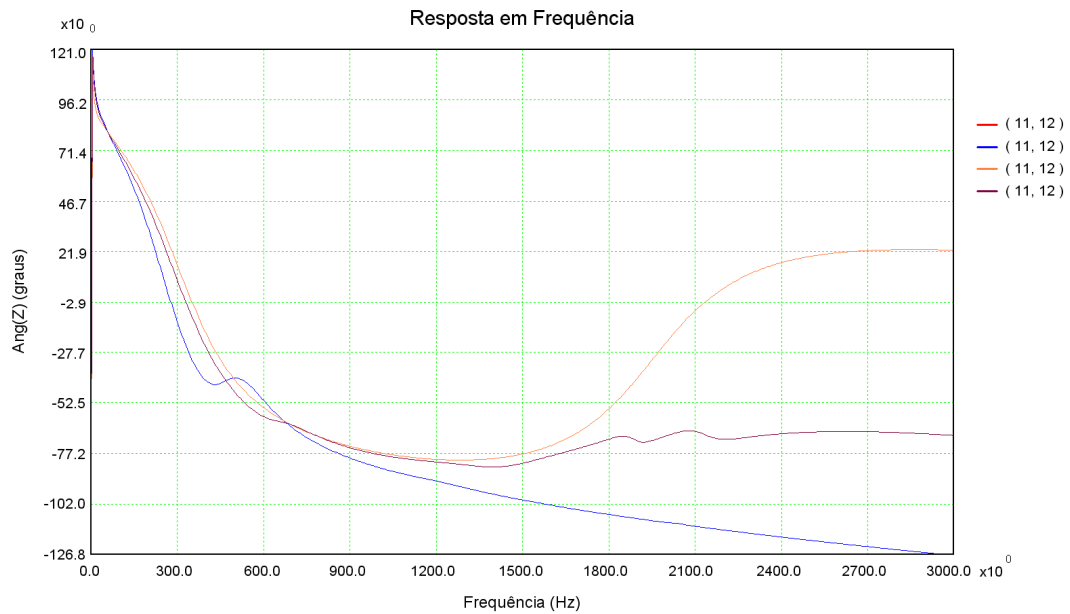


Figura 154: Resposta em frequência do ângulo da impedância de transferência entre as barras 11 e 12 considerando a rede completa (vermelho) e os sistemas reduzidos considerando o equivalente modal (azul), o equivalente convencional da vizinhança 1 (laranja) e o equivalente convencional da vizinhança 2 (marrom)

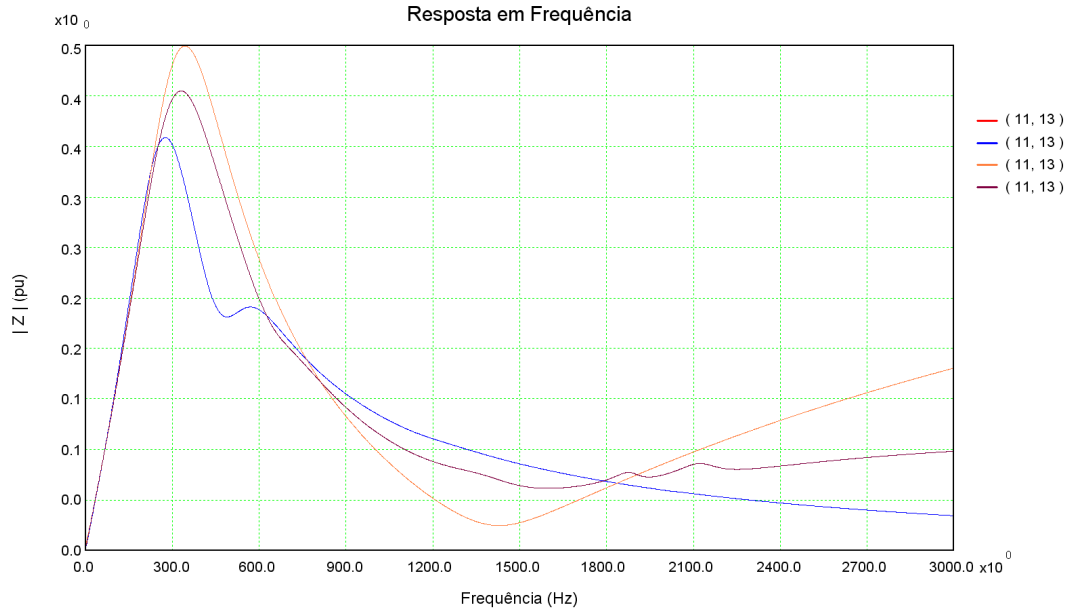


Figura 155: Resposta em frequência do módulo da impedância de transferência entre as barras 11 e 13 considerando a rede completa (vermelho) e os sistemas reduzidos considerando o equivalente modal (azul), o equivalente convencional da vizinhança 1 (laranja) e o equivalente convencional da vizinhança 2 (marrom)

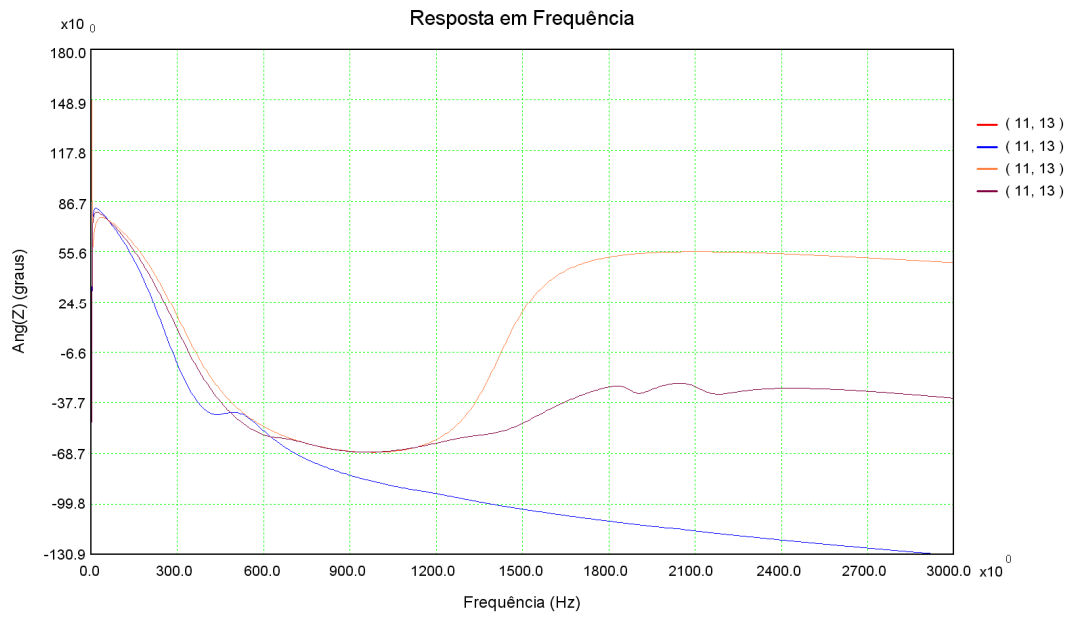


Figura 156: Resposta em frequência do ângulo da impedância de transferência entre as barras 11 e 13 considerando a rede completa (vermelho) e os sistemas reduzidos considerando o equivalente modal (azul), o equivalente convencional da vizinhança 1 (laranja) e o equivalente convencional da vizinhança 2 (marrom)

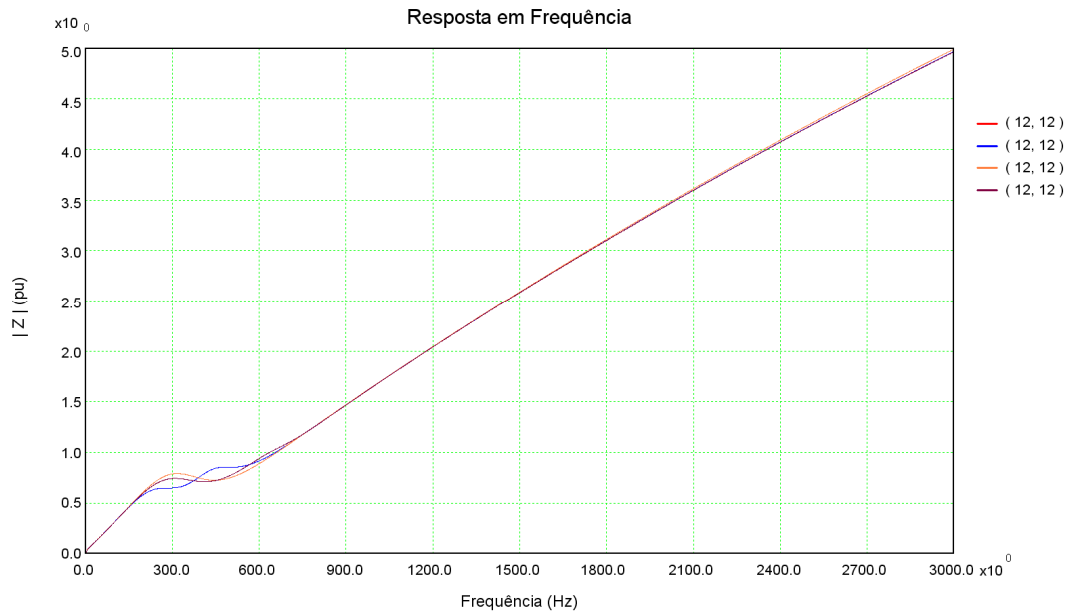


Figura 157: Resposta em frequência do módulo da impedância da barra 12 considerando a rede completa (vermelho) e os sistemas reduzidos considerando o equivalente modal (azul), o equivalente convencional da vizinhança 1 (laranja) e o equivalente convencional da vizinhança 2 (marrom)

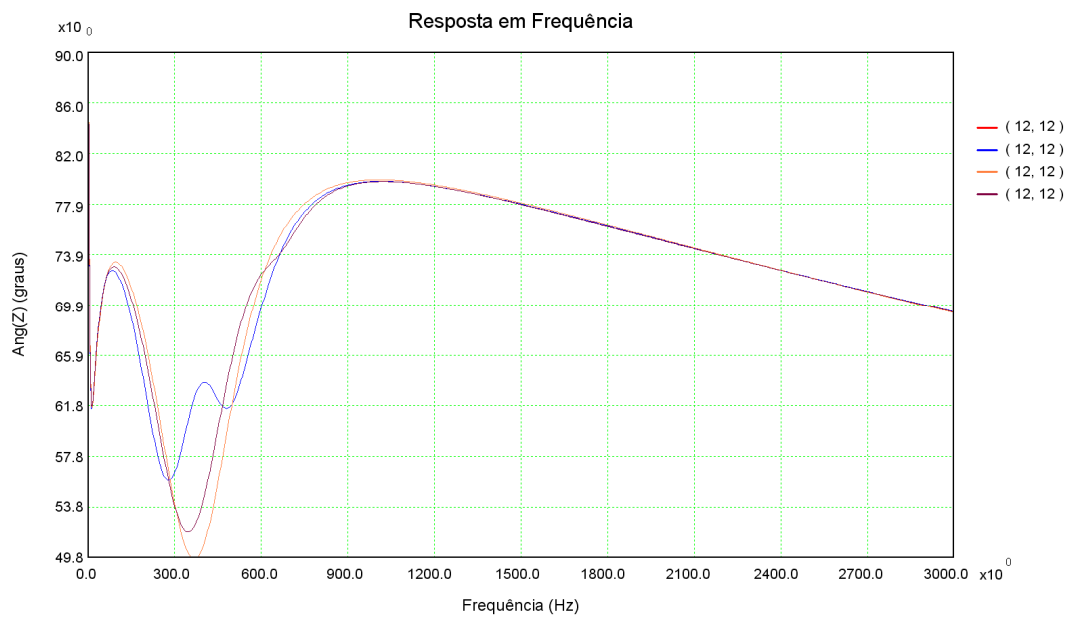


Figura 158: Resposta em frequência do ângulo da impedância da barra 12 considerando a rede completa (vermelho) e os sistemas reduzidos considerando o equivalente modal (azul), o equivalente convencional da vizinhança 1 (laranja) e o equivalente convencional da vizinhança 2 (marrom)

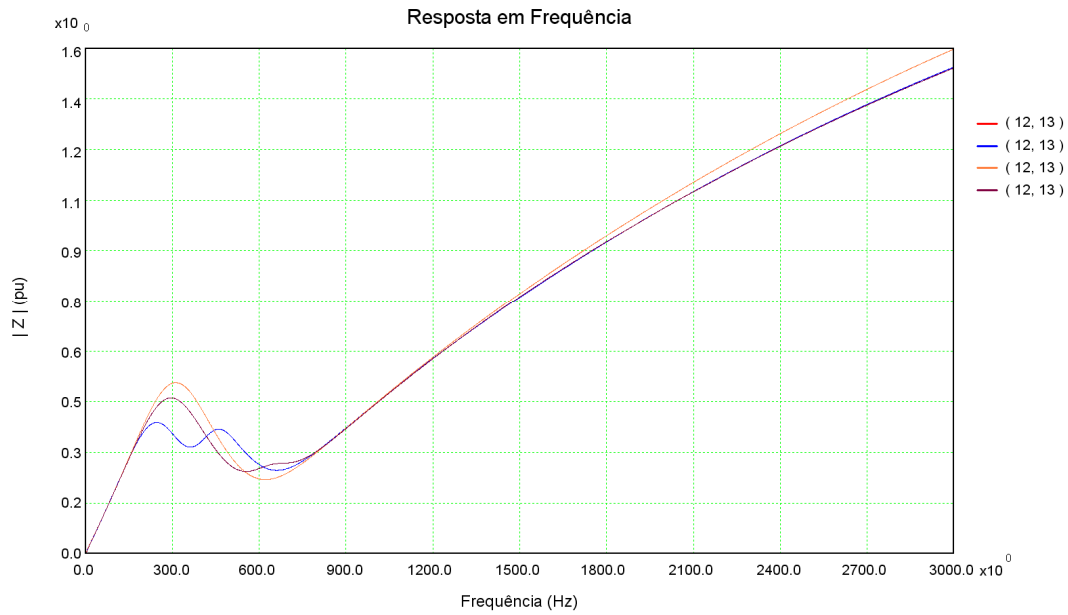


Figura 159: Resposta em frequência do módulo da impedância de transferência entre as barras 12 e 13 considerando a rede completa (vermelho) e os sistemas reduzidos considerando o equivalente modal (azul), o equivalente convencional da vizinhança 1 (laranja) e o equivalente convencional da vizinhança 2 (marrom)

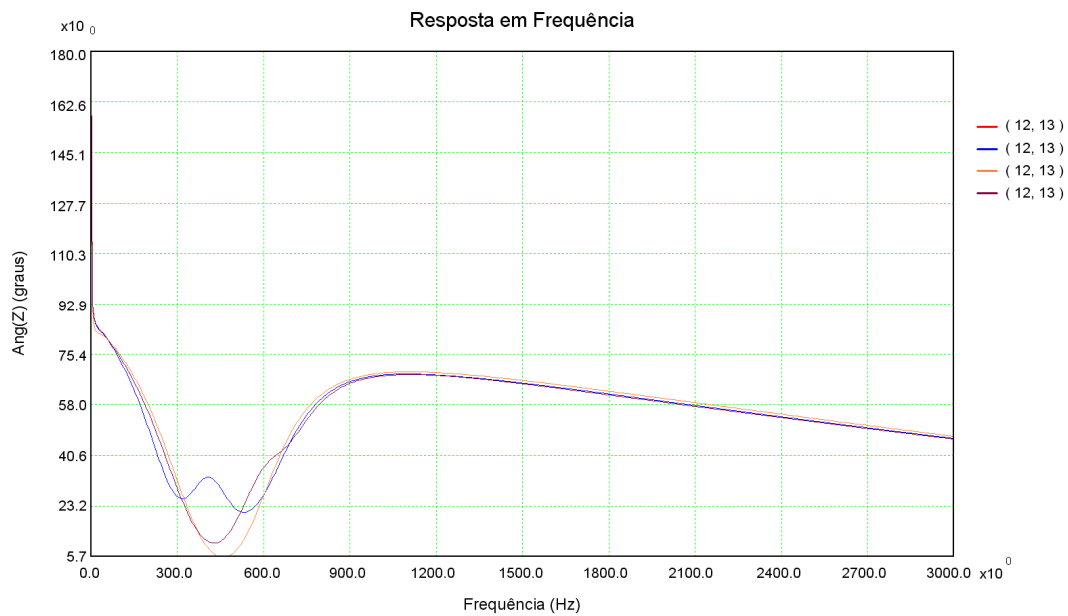


Figura 160: Resposta em frequência do ângulo da impedância de transferência entre as barras 12 e 13 considerando a rede completa (vermelho) e os sistemas reduzidos considerando o equivalente modal (azul), o equivalente convencional da vizinhança 1 (laranja) e o equivalente convencional da vizinhança 2 (marrom)

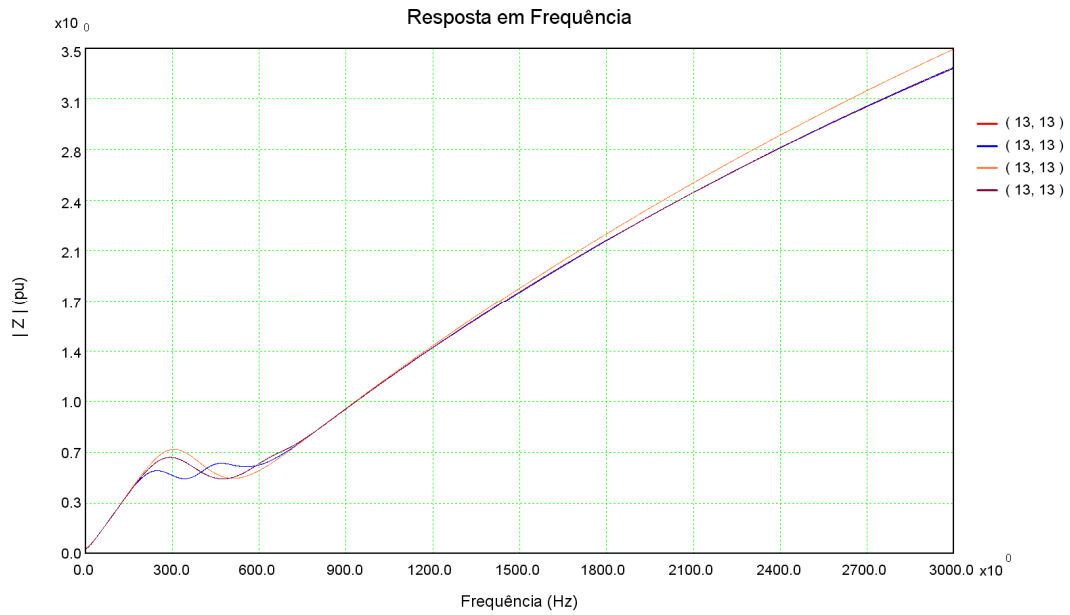


Figura 161: Resposta em frequência do módulo da impedância da barra 13 considerando a rede completa (vermelho) e os sistemas reduzidos considerando o equivalente modal (azul), o equivalente convencional da vizinhança 1 (laranja) e o equivalente convencional da vizinhança 2 (marrom)

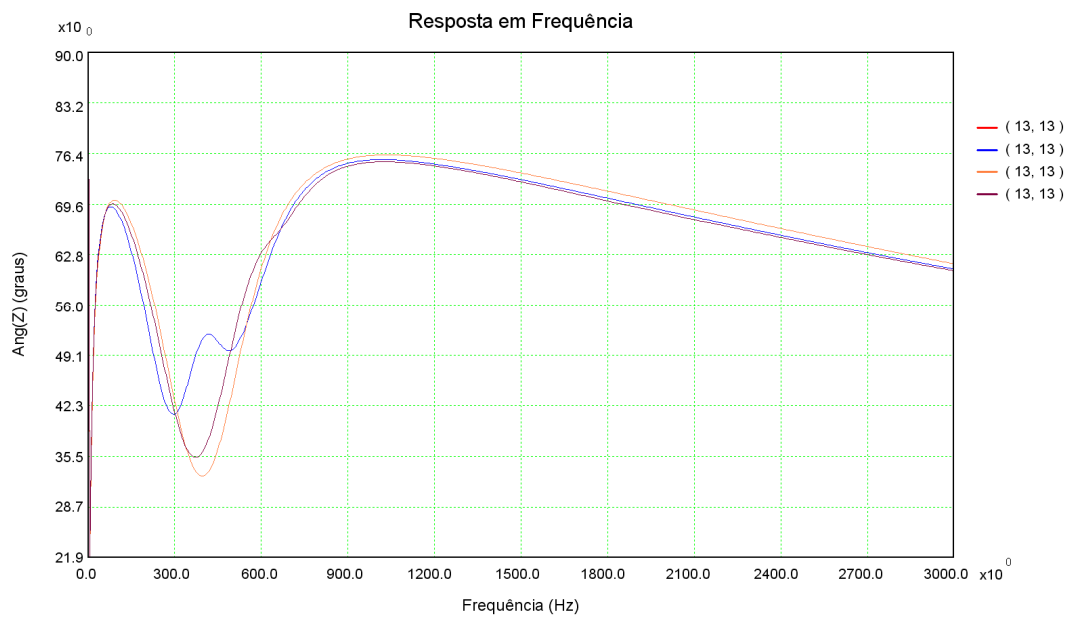


Figura 162: Resposta em frequência do ângulo da impedância da barra 13 considerando a rede completa (vermelho) e os sistemas reduzidos considerando o equivalente modal (azul), o equivalente convencional da vizinhança 1 (laranja) e o equivalente convencional da vizinhança 2 (marrom)

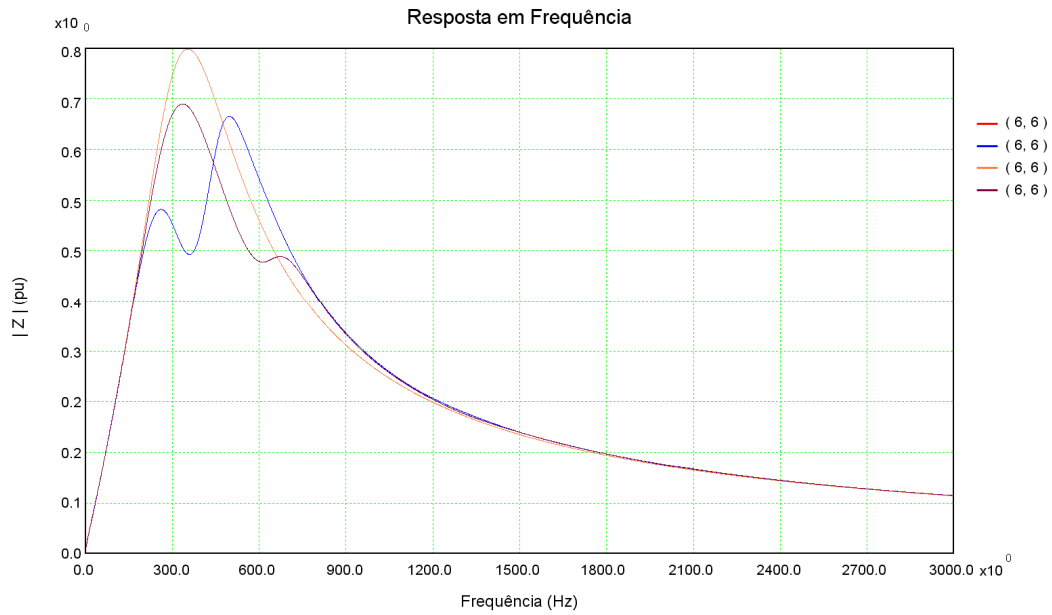


Figura 163: Resposta em frequência do módulo da impedância da barra 6 considerando a rede completa (vermelho) e os sistemas reduzidos considerando o equivalente modal (azul), o equivalente convencional da vizinhança 1 (laranja) e o equivalente convencional da vizinhança 2 (marrom)

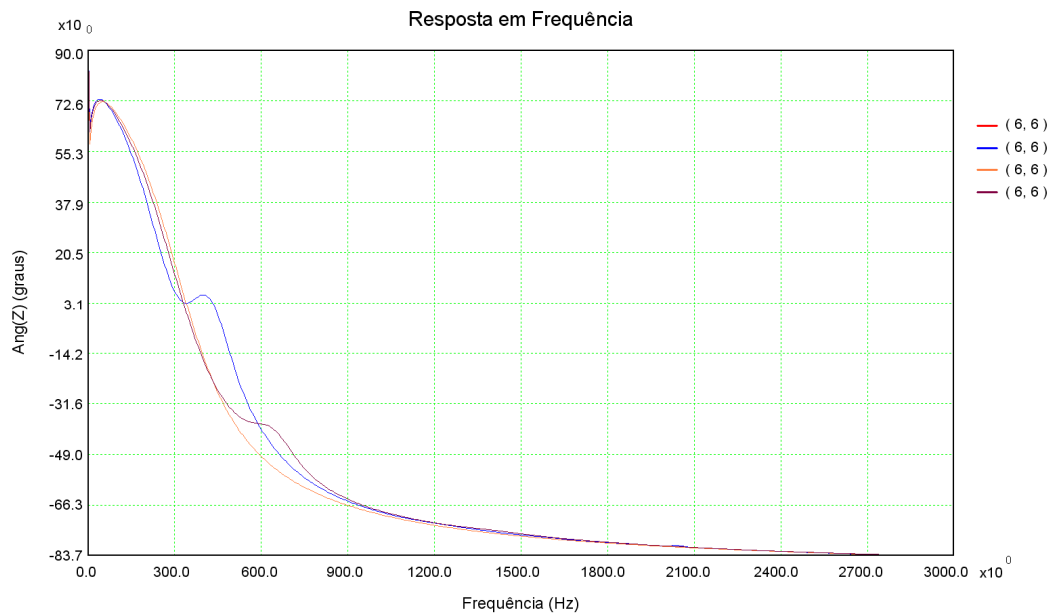


Figura 164: Resposta em frequência do ângulo da impedância da barra 6 considerando a rede completa (vermelho) e os sistemas reduzidos considerando o equivalente modal (azul), o equivalente convencional da vizinhança 1 (laranja) e o equivalente convencional da vizinhança 2 (marrom)

6.3 Sistema Sul-Sudeste + Industrial

Ao contrário dos testes no sistema IEEE 14 barras, onde não se tinha a rede interna definida e, por esse motivo, definiu-se a mesma através do critério de vizinhanças elétricas, neste item será entendido que a rede interna se encontra definida e será o sistema industrial cuja topologia é apresentada na Figura 165. Esta rede industrial é fictícia mas seus parâmetros foram arbitrados de tal modo que seus valores fossem viáveis fisicamente.

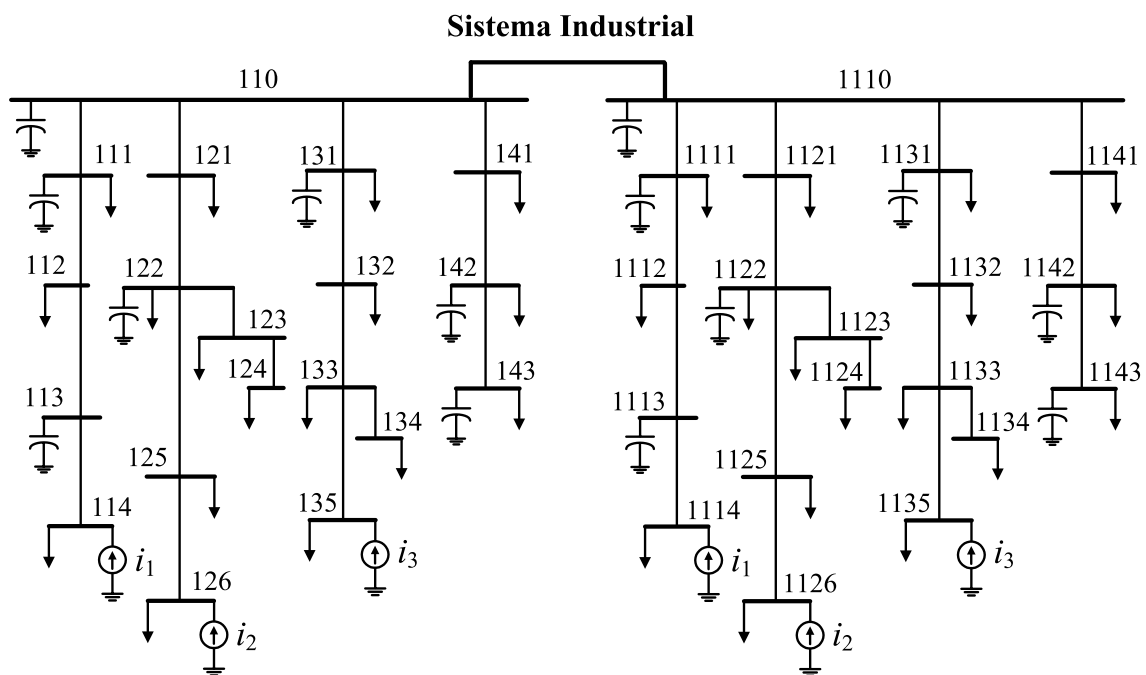


Figura 165: Sistema Industrial Fictício

Esta rede industrial está conectada ao sistema de transmissão Sul-Sudeste simplificado. O diagrama unifilar desse sistema é apresentado na Figura 166. O sistema de transmissão será considerado a rede externa.

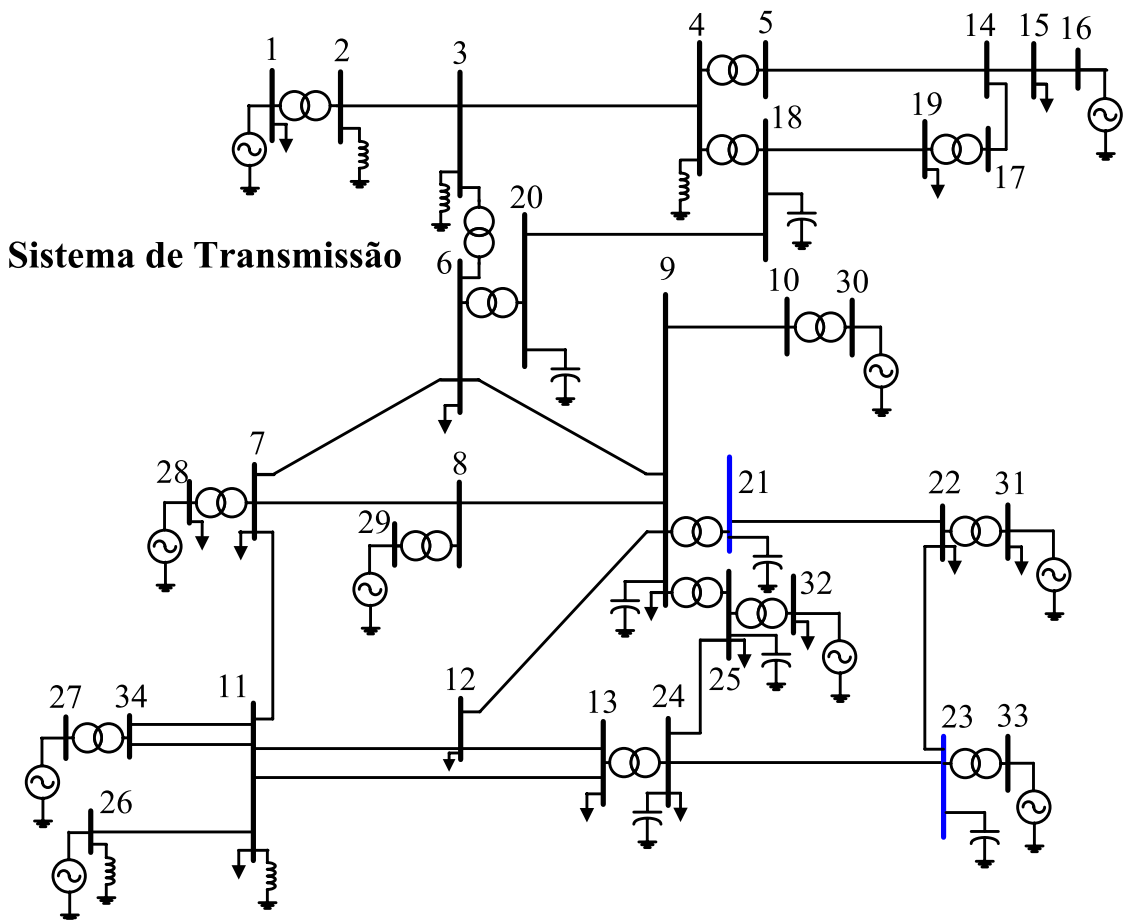


Figura 166: Sistema de Transmissão Simplificado do Sul-Sudeste

O sistema industrial é conectado ao sistema de transmissão através de dois transformadores que conectam as barras 21 à 1110 e 23 à 110. Este mesmo esquema de conexão foi utilizado em [29]. Segundo os autores desta referência, estas barras 21 e 23 do sistema de transmissão foram escolhidas como as melhores candidatas para o acoplamento multi-barra, pois as funções de transferência vistas destas barras, como serão visualizadas no decorrer deste teste, possuem muitos polos e são da mesma ordem de grandeza que a impedância observada da barra de acoplamento do sistema industrial (barras 110 e 1110), evitando-se desta maneira a predominância de uma das impedâncias, que dificultaria a visualização das aplicações dos métodos descritos em [29]. Na Figura 167 é apresentado o diagrama unifilar do acoplamento dos dois sistemas, transmissão e industrial. As duas conexões realizadas pelos dois transformadores, um conectando as barras 21 e 1101 e outro conectando as barras 23 e 101 estão marcadas na cor vermelha. Nota-se que nesta conexão há um fechamento de anel entre as barras 21 e 23 pela média tensão através da conexão das barras 110 e 1110, que pode requerer cuidado especial na análise de viabilidade. No entanto, esta análise de

viabilidade e da coerência física dos parâmetros utilizados não fizeram parte deste trabalho, preocupando-se apenas em manter a integridade do sistema originalmente proposto, para que fosse possível a comparação com os resultados obtidos em [29].

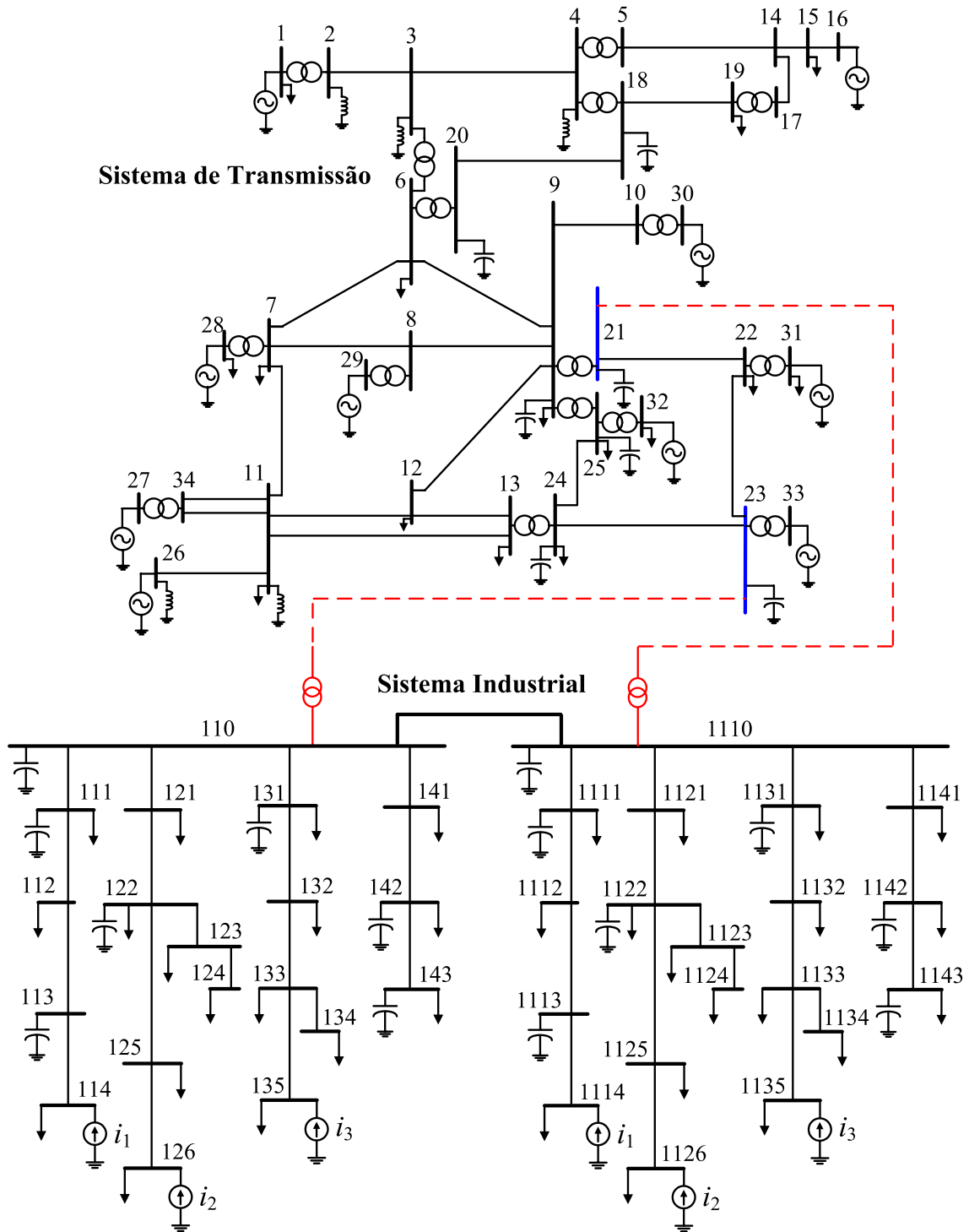


Figura 167: Sistema de Transmissão acoplado ao Sistema Industrial

Primeiramente serão apresentadas as comparações entre o sistema de transmissão completo e o sistema de transmissão representado pelo modelo modal cujos polos e resíduos foram calculados pelo Método do Ajuste Vetorial. Estas comparações serão feitas por 2 traçados em cada gráfico, o primeiro em vermelho do sistema de transmissão completo e o segundo em azul do modelo modal dado pela equação

$$z_{eq-kj}(s) \cong \sum_{i \in \Omega_{kj}} \frac{R_i^{(kj)}}{s - \lambda_i^{(kj)}} + d^{(kj)} + e^{(kj)}s. \text{ Cabe observar que serão realizadas as}$$

comparações do módulo e do ângulo das impedâncias próprias e de transferências das barras de fronteira.

Após validar o modelo reduzido (modal) para representar o sistema de transmissão (rede externa), são apresentadas comparações entre a rede completa (sistema de transmissão e industrial acoplados, ambos representadas por seus modelos matemáticos completos) e o sistema reduzido (sistema industrial com os equivalentes do sistema de transmissão conectados às barras 21 e 23).

Para a aplicação do Método do Ajuste Vetorial, foi considerada a faixa de frequência de 0 a 3000 Hz, com um total de 3001 amostras (passo de 1 Hz). Optou-se por realizar a busca automática da ordem de aproximação e por fazer o ajuste automático da ordem caso fosse possível. Assim, evita-se uma baixa ordem de aproximação ou, no caso oposto, uma ordem muito maior que a necessária. O fator de correção utilizado foi igual a 2 e o fator de incremento/diminuição foi igual a 20 polos.

Considerando as 2 barras de fronteira, tem-se na Tabela 50, as 3 funções de transferência entre elas que serão apresentadas nas comparações. A ordem de aproximação do ajuste e o número de iterações alcançado de cada função de transferência também são apresentados nesta tabela. Quando foi preciso fazer o incremento da ordem de aproximação (item 5.3.1), o valor da quantidade de incrementos é apresentado entre parênteses na mesma coluna da ordem. Com a tolerância do erro que foi utilizada, não foi possível haver o decremento automático da ordem.

Tabela 50: Funções de transferências para a para o Sistema Industrial conectado ao Sistema Elétrico Sul-Sudeste

FTs das Barras de Fronteira			
Barra De	Barra Para	Ordem	Iterações
21	21	168 (2)	2
21	23	152 (0)	6
23	23	168 (1)	2

6.3.1 Comparação entre a Rede Externa Completa (Sistema de Transmissão) e Modelada por Polos e Resíduos

Da Figura 168 até a Figura 173 tem-se a comparação entre as respostas em frequência dos módulos e ângulos das impedâncias entre a rede externa representada por seu modelo completo (gráficos em vermelho) e a rede externa representada pelo modelo

modal dado por $z_{eq-kj}(s) \cong \sum_{i \in \Omega_{kj}} \frac{R_i^{(kj)}}{(s - \lambda_i^{(kj)})} + d^{(kj)} + e^{(kj)}s$ (gráficos em azul).

Nos gráficos representados pelo modelo modal (gráficos em azul), tem-se na legenda a ordem de aproximação do modelo. Esta ordem e os valores dos polos e resíduos associados estão apresentados da Tabela 51 à Tabela 53. Os polos complexos com parte imaginária negativa não estão apresentados nas tabelas simplesmente para poupar espaço, mas eles foram calculados e estão contabilizados no valor informado para a ordem de aproximação.

Pode-se observar em todos os gráficos que as duas curvas estão sobrepostas, o que indica que o modelo modal utilizando o Método do Ajuste Vetorial para encontrar os polos e os resíduos representa com excelente precisão a rede externa completa.

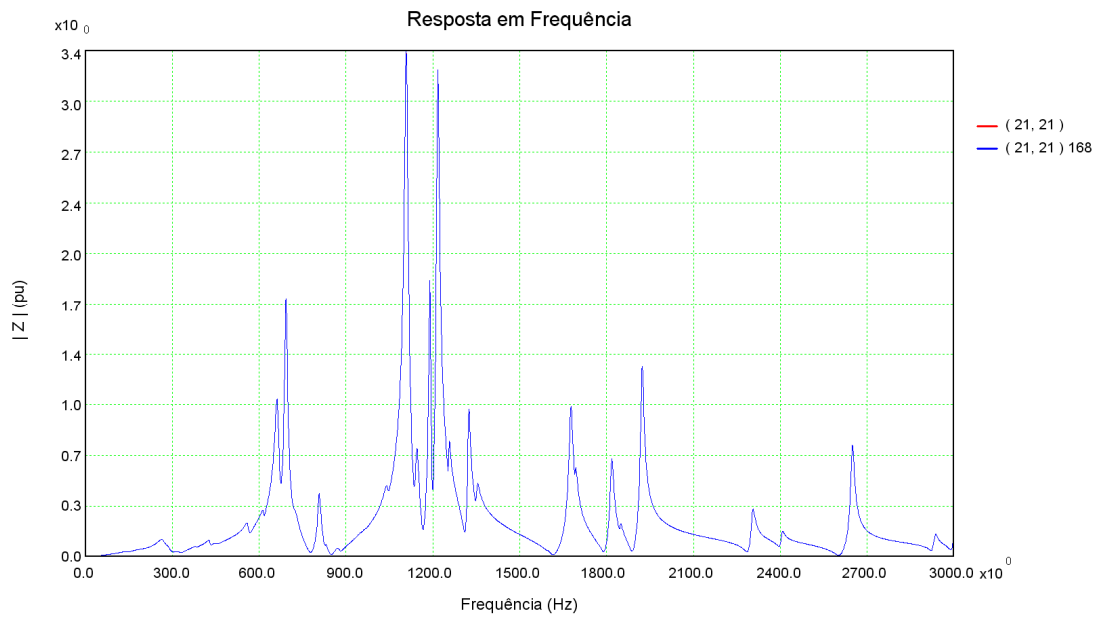


Figura 168: Resposta em frequência do módulo da impedância da barra 21 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)

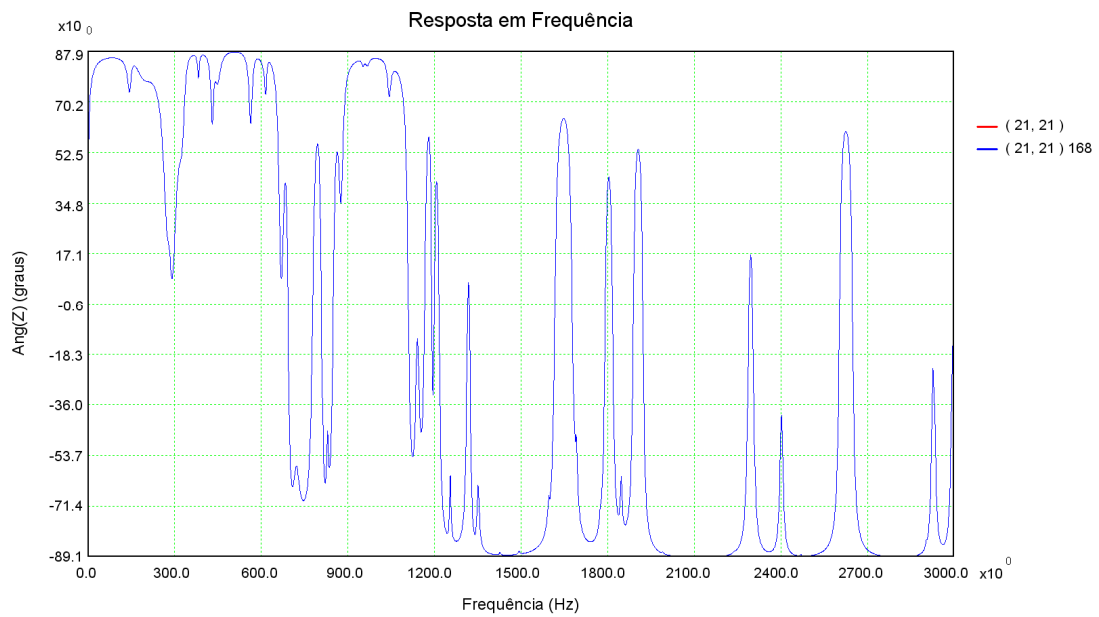


Figura 169: Resposta em frequência do ângulo da impedância da barra 21 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)

Tabela 51: Conjunto de polos e resíduos da função de transferência (21,21)

Freq (Hz)	Polo	Resíduo		Freq (Hz)	Polo	Resíduo	
		Mód.	Âng.			Mód.	Âng.
0,0	-6,00320	2,75e-4	180	1492,7	-22,8460 + j 9378,63	6,99e-2	0,77
0,0	-13,5453	1,12e-3	180	1561,3	-30,3734 + j 9809,92	1,90e-3	-12,0
0,0	-53,9640	1,63e-2	180	1587,0	-26,4714 + j 9971,21	1,36e-2	-6,54
0,0	-203,955	2,91e-3	180	1591,1	-18,0605 + j 9997,37	1,75e-2	40,1
0,0	-503,555	2,70e-1	180	1596,4	-19,0379 + j 10030,7	9,78e-2	-7,55
0,0	-1768,10	1,67e-1	180	1637,9	-24,9496 + j 10291,2	7,25e-4	-41,5
143,5	-46,6319 + j 901,650	3,78e-1	-20,2	1676,9	-42,6876 + j 10536,1	4,13e+1	-2,79
184,0	-207,247 + j 1156,17	1,41e+0	39,8	1687,8	-26,3984 + j 10604,5	5,44e+0	-67,3
268,7	-97,2850 + j 1688,13	8,50e+0	-3,96	1691,1	-28,7897 + j 10625,8	9,99e+0	38,3
284,6	-56,4022 + j 1788,00	1,70e+0	19,4	1698,6	-13,7339 + j 10672,7	9,17e-3	40,2
326,8	-85,6743 + j 2053,25	1,32e+0	-47,6	1774,3	-30,5600 + j 11148,3	1,65e-1	7,65
360,4	-40,1032 + j 2264,16	2,70e-3	-6,07	1817,3	-37,8821 + j 11418,7	2,40e+1	-0,43
381,9	-23,4902 + j 2399,62	2,57e-1	-3,46	1847,4	-25,8436 + j 11607,7	1,81e+0	6,55
417,3	-38,5849 + j 2621,81	3,13e-2	107	1921,8	-14,3550 + j 12075,1	1,32e-2	-117
429,5	-33,2432 + j 2698,76	1,34e+0	-11,3	1922,5	-36,0741 + j 12079,4	4,50e+1	-0,30
446,6	-77,7071 + j 2806,04	1,46e+0	12,2	1991,0	-16,0443 + j 12509,7	4,03e-2	5,86
452,3	-280,136 + j 2841,85	1,31e-1	-95,2	2015,1	-42,7602 + j 12661,4	4,46e-4	-6,22
490,8	-160,749 + j 3083,47	8,07e-2	8,35	2081,3	-15,1199 + j 13077,4	1,05e-5	-8,33
561,6	-41,2536 + j 3528,61	3,59e+0	-2,48	2129,6	-16,4905 + j 13380,8	1,38e-3	-0,21
605,4	-157,088 + j 3803,57	1,13e+0	57,9	2238,2	-36,9036 + j 14063,1	2,35e-2	-1,17
615,5	-28,4085 + j 3867,06	1,91e+0	-24,9	2281,8	-15,7712 + j 14336,7	1,78e-2	-15,8
663,3	-47,4617 + j 4167,50	4,02e+1	8,45	2304,0	-39,2797 + j 14476,4	1,15e+1	-2,75
692,6	-31,8690 + j 4351,67	5,18e+1	-3,10	2310,3	-20,7030 + j 14515,8	5,25e-1	44,2
703,7	-30,7012 + j 4421,77	2,10e-2	78,1	2404,9	-37,9348 + j 15110,5	3,95e+0	-0,28
722,5	-79,9621 + j 4539,69	8,52e+0	0,02	2422,1	-16,4941 + j 15218,3	4,99e-3	26,8
807,6	-28,8593 + j 5074,01	1,16e+1	-2,89	2438,8	-219,940 + j 15323,4	1,12e-4	-59,7
813,7	-21,7157 + j 5112,35	1,23e+0	-6,09	2449,1	-18,4758 + j 15388,3	6,36e-5	22,8
830,2	-24,0478 + j 5216,23	8,21e-1	3,84	2468,7	-14,9394 + j 15511,5	1,60e-2	6,20
873,0	-52,6951 + j 5485,33	1,98e+0	-3,10	2535,6	-15,2845 + j 15931,8	2,47e-3	0,03
951,1	-30,8352 + j 5975,66	1,91e-1	16,4	2562,2	-17,6403 + j 16098,6	7,35e-5	12,1
968,4	-48,6362 + j 6084,39	4,07e-1	-9,26	2606,7	-14,9253 + j 16378,3	3,11e-3	-0,71
1042,3	-42,4442 + j 6548,84	4,19e+0	4,63	2648,5	-39,2415 + j 16641,3	2,89e+1	-0,08
1108,6	-41,3583 + j 6965,54	1,37e+2	0,19	2658,9	-34,8238 + j 16706,2	1,50e-1	6,52
1120,4	-14,2051 + j 7039,50	3,94e-3	-88,8	2702,4	-15,1097 + j 16979,8	1,43e-5	23,2
1144,1	-43,5316 + j 7188,71	2,26e+1	2,25	2792,0	-35,1394 + j 17542,7	3,12e-3	-10,4
1153,5	-37,1659 + j 7247,37	3,27e-1	25,6	2793,4	-16,9188 + j 17551,6	6,04e-4	65,1
1189,9	-20,9150 + j 7476,39	3,55e+1	-3,75	2904,3	-15,2101 + j 18248,1	3,23e-2	-16,2
1216,6	-32,1816 + j 7644,23	1,02e+2	-0,57	2930,5	-22,5543 + j 18412,8	1,74e+0	-71,5
1255,0	-18,1738 + j 7885,43	5,02e+0	8,94	2933,6	-30,5393 + j 18432,1	4,15e+0	23,1
1323,2	-29,2324 + j 8314,15	2,50e+1	-4,28	2950,2	-106,111 + j 18536,8	1,12e-3	-150
1351,8	-31,2388 + j 8493,50	5,44e+0	7,50	3000,4	-37,3858 + j 18852,0	5,67e+0	-0,37
1363,9	-14,6134 + j 8569,49	3,18e-5	-31,5	3420,7	-100,186 + j 21493,1	1,76e+1	3,41
1426,8	-21,3748 + j 8964,54	7,77e-2	-1,50	4502,7	-849,818 + j 28291,3	3,68e+1	2,22
1156,3	-5862,13 + j 7265,02	2,13e-2	-168				

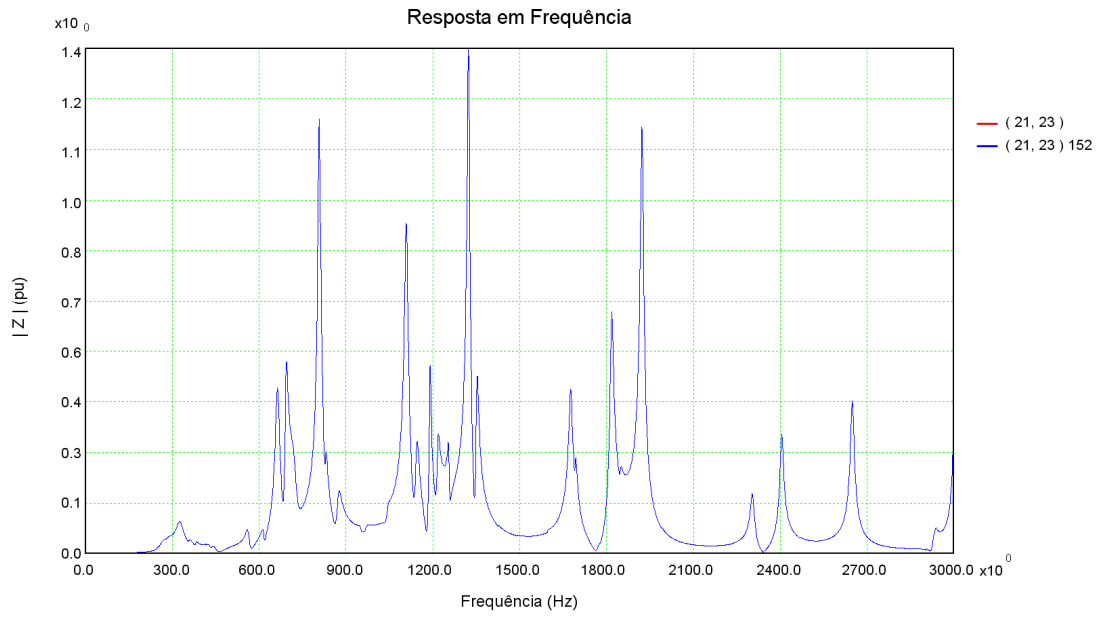


Figura 170: Resposta em frequência do módulo da impedância de transferência entre as barras 21 e 23 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)

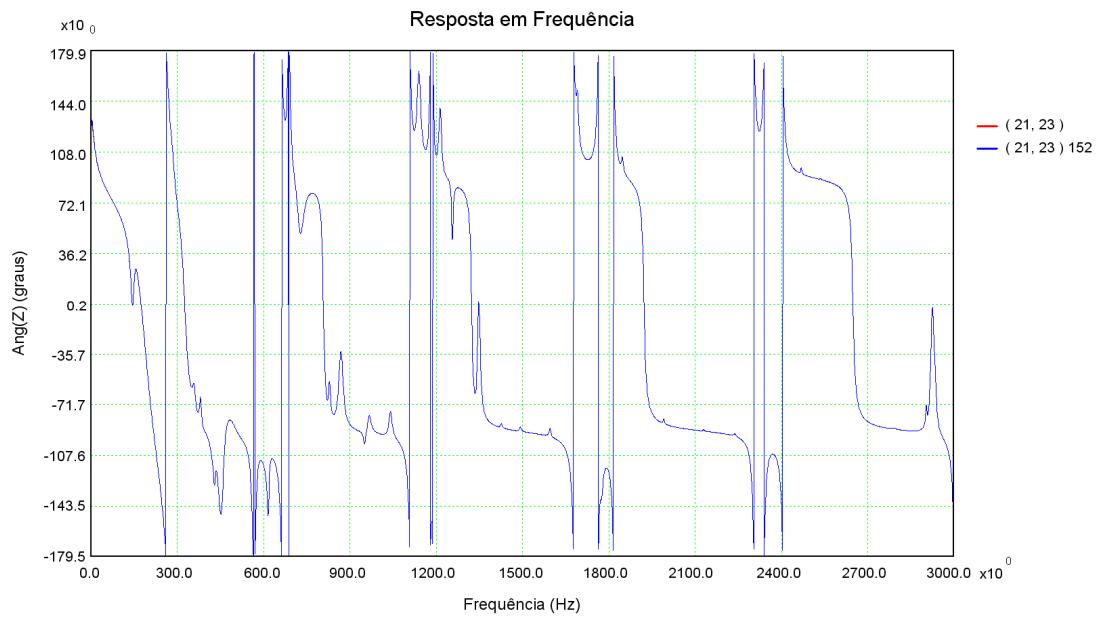


Figura 171: Resposta em frequência do ângulo da impedância de transferência entre as barras 21 e 23 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)

Tabela 52: Conjunto de polos e resíduos da função de transferência (21,23)

Freq (Hz)	Polo	Resíduo		Freq (Hz)	Polo	Resíduo	
		Mód.	Âng.			Mód.	Âng.
0,0	-55,1511	5,35e-3	0,00	1492,7	-22,8545 + j 9378,63	7,18e-2	3,52
0,0	-701,790	2,71e-1	180	1561,3	-30,3972 + j 9810,09	7,97e-3	-4,27
143,5	-46,5948 + j 901,583	1,19e-1	-63,8	1587,0	-26,2606 + j 9971,39	1,90e-2	-4,40
184,0	-206,994 + j 1155,99	1,56e+0	4,22	1591,1	-18,2083 + j 9997,37	2,26e-2	44,1
268,7	-97,2717 + j 1688,15	4,02e+0	166	1596,4	-19,0250 + j 10030,7	1,19e-1	-5,70
284,6	-56,4298 + j 1787,98	7,47e-1	179	1637,9	-24,6297 + j 10291,2	2,91e-3	158
326,8	-85,6688 + j 2053,25	7,66e+0	-8,22	1676,9	-42,6878 + j 10536,1	1,78e+1	177
360,3	-40,0837 + j 2263,94	4,80e-1	-9,45	1687,8	-26,3936 + j 10604,5	3,51e+0	113
381,9	-23,4937 + j 2399,62	2,49e-1	-7,42	1691,1	-28,7922 + j 10625,8	6,33e+0	-142
417,3	-38,7021 + j 2621,87	6,48e-2	-159	1698,6	-13,8300 + j 10672,6	4,34e-3	-134
429,5	-33,2571 + j 2698,74	3,61e-1	139	1774,3	-30,5545 + j 11148,3	2,16e-1	-173
446,6	-77,7851 + j 2806,04	1,41e+0	174	1817,3	-37,8820 + j 11418,7	2,47e+1	179
451,0	-264,360 + j 2833,90	4,39e-1	-8,12	1847,4	-25,8427 + j 11607,7	1,08e+0	-170
490,8	-162,138 + j 3083,82	5,56e-1	-13,8	1921,8	-14,2735 + j 12075,0	1,10e-2	-132
561,6	-41,2551 + j 3528,61	2,38e+0	173	1922,5	-36,0743 + j 12079,4	4,21e+1	-0,25
605,4	-157,222 + j 3803,60	1,31e+0	-132	1991,0	-16,0422 + j 12509,7	7,24e-2	5,40
615,5	-28,4100 + j 3867,06	1,10e+0	142	2016,2	-61,0774 + j 12668,0	3,98e-4	-19,2
663,3	-47,4619 + j 4167,50	2,13e+1	179	2081,2	-14,9266 + j 13076,4	5,14e-4	179
692,6	-31,8692 + j 4351,67	1,42e+1	-178	2129,6	-16,5235 + j 13380,8	7,05e-3	0,53
703,7	-30,6602 + j 4421,78	5,25e-2	3,46	2238,2	-36,8545 + j 14063,1	3,65e-2	-0,31
722,5	-79,9621 + j 4539,70	1,16e+1	6,06	2281,8	-15,6752 + j 14336,7	5,30e-3	6,87
807,6	-28,8594 + j 5074,01	3,28e+1	-2,15	2304,0	-39,2809 + j 14476,4	6,42e+0	177
813,7	-21,7149 + j 5112,35	3,51e+0	-6,07	2310,3	-20,6968 + j 14515,8	3,26e-1	-139
830,2	-24,0472 + j 5216,23	2,62e+0	3,50	2404,9	-37,9350 + j 15110,5	1,24e+1	180
860,1	-14,2456 + j 5404,30	8,88e-4	22,6	2422,1	-16,5154 + j 15218,3	1,94e-2	-155
873,0	-52,6920 + j 5485,33	6,09e+0	-2,03	2468,7	-14,9287 + j 15511,5	5,08e-2	-173
951,1	-30,8342 + j 5975,67	3,77e-1	176	2535,6	-15,3896 + j 15931,8	6,93e-3	-178
968,4	-48,6300 + j 6084,39	7,93e-1	6,19	2566,5	-9,57534 + j 16125,5	1,52e-5	-66,4
1042,3	-42,4441 + j 6548,84	1,64e+0	4,88	2606,7	-15,0138 + j 16378,4	4,26e-3	-179
1108,6	-41,3582 + j 6965,54	3,70e+1	179	2648,5	-39,2415 + j 16641,3	1,64e+1	-0,31
1120,3	-14,3855 + j 7039,28	1,14e-3	57,3	2658,9	-34,8081 + j 16706,3	7,89e-2	6,40
1144,1	-43,5310 + j 7188,71	1,01e+1	-179	2791,6	-36,7603 + j 17540,2	9,66e-3	-7,24
1153,5	-37,1978 + j 7247,35	1,43e-1	-155	2793,9	-18,8085 + j 17554,5	2,36e-3	37,1
1189,9	-20,9150 + j 7476,39	9,83e+0	178	2904,3	-15,2218 + j 18248,1	4,93e-2	-12,1
1216,6	-32,1817 + j 7644,23	6,28e+0	175	2930,5	-22,5476 + j 18412,8	1,07e+0	-63,1
1255,0	-18,1738 + j 7885,43	2,94e+0	5,40	2933,6	-30,5440 + j 18432,1	2,04e+0	28,1
1323,2	-29,2324 + j 8314,15	4,02e+1	-4,27	3000,4	-37,3893 + j 18852,0	1,29e+1	180
1351,8	-31,2388 + j 8493,50	1,33e+1	7,57	3320,1	-5,26219 + j 20860,6	5,20e+0	-1,08
1426,8	-21,3810 + j 8964,54	8,56e-2	2,74				

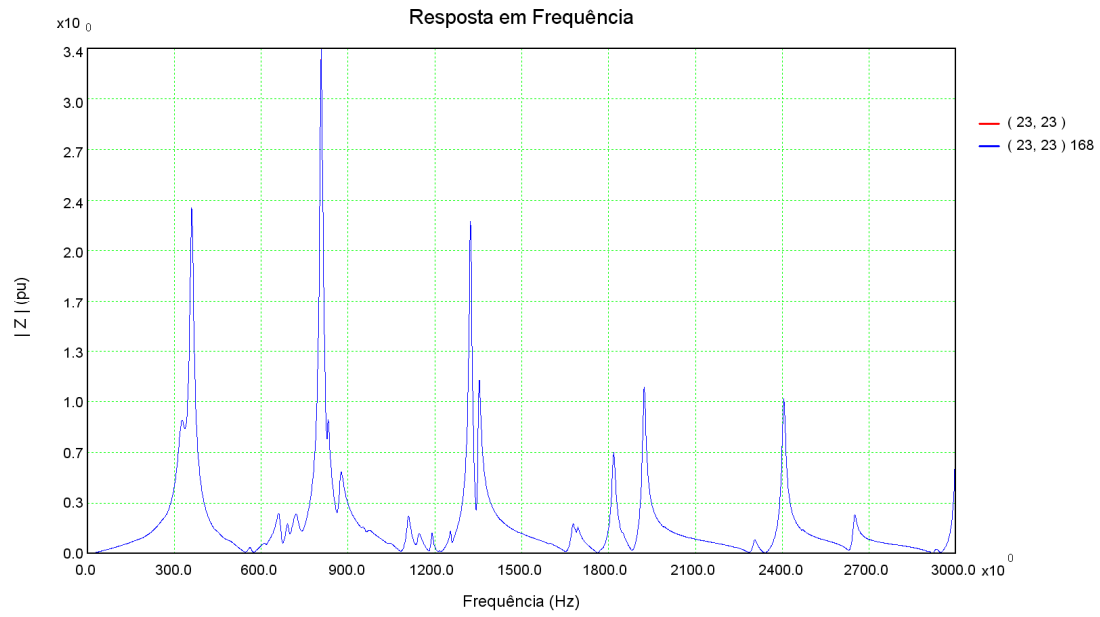


Figura 172: Resposta em frequência do módulo da impedância da barra 23 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)

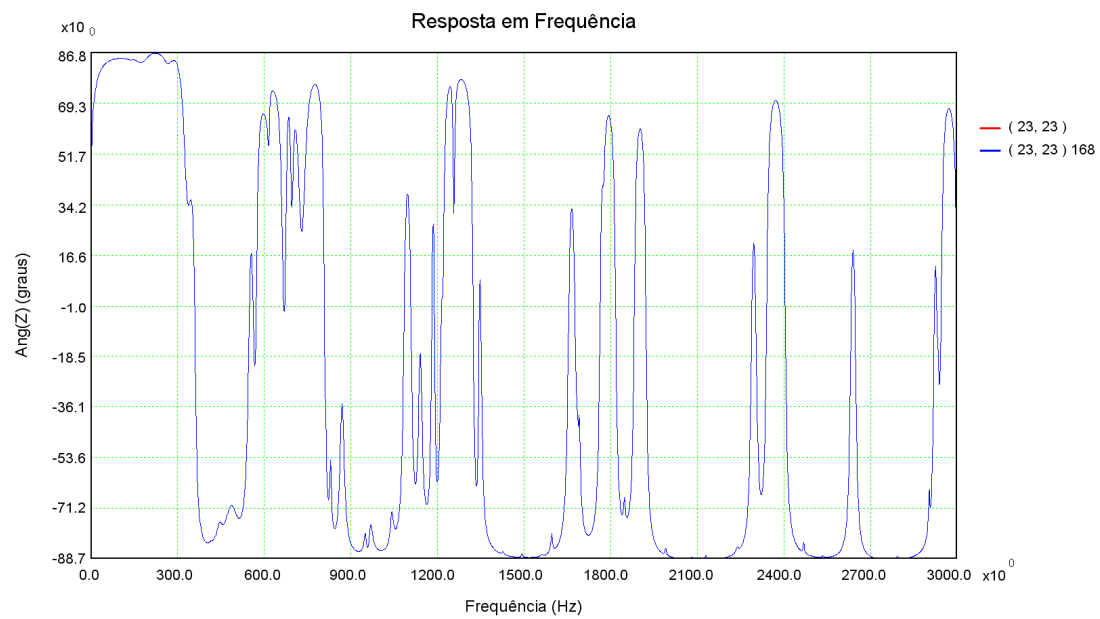


Figura 173: Resposta em frequência do ângulo da impedância da barra 23 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)

Tabela 53: Conjunto de polos e resíduos da função de transferência (23,23)

Freq (Hz)	Polo	Resíduo		Freq (Hz)	Polo	Resíduo	
		Mód.	Âng.			Mód.	Âng.
0,0	-30,6617	4,35e-4	180	1492,7	-22,8456 + j 9378,62	7,38e-2	6,28
0,0	-42,1196	5,77e-2	180	1561,3	-30,3830 + j 9809,91	3,33e-2	4,36
0,0	-66,6196	5,56e-3	180	1587,0	-26,4914 + j 9971,20	2,69e-2	0,72
0,0	-721,824	6,55e-1	180	1591,1	-18,0515 + j 9997,37	2,79e-2	48,4
0,0	-990,373	3,87e-1	180	1596,4	-19,0382 + j 10030,7	1,46e-1	-3,96
0,0	-34661,4	1,57e+1	180	1637,9	-24,9222 + j 10291,2	1,21e-2	-2,59
143,5	-46,6323 + j 901,652	3,75e-2	-108	1676,9	-42,6877 + j 10536,1	7,71e+0	-3,82
184,0	-207,212 + j 1156,17	1,72e+0	-31,6	1687,8	-26,3979 + j 10604,5	2,27e+0	-66,3
268,7	-97,2843 + j 1688,12	1,90e+0	-24,6	1691,1	-28,7898 + j 10625,8	4,02e+0	36,9
284,6	-56,4014 + j 1788,00	3,27e-1	-20,5	1698,6	-13,7632 + j 10672,7	2,00e-3	50,0
326,8	-85,6708 + j 2053,25	4,46e+1	31,2	1774,3	-30,5600 + j 11148,3	2,83e-1	6,27
360,3	-40,0830 + j 2263,95	8,54e+1	-13,5	1817,3	-37,8821 + j 11418,7	2,54e+1	-0,58
381,9	-23,4906 + j 2399,62	2,42e-1	-11,4	1847,4	-25,8435 + j 11607,7	6,42e-1	13,1
417,3	-38,6059 + j 2621,78	1,32e-1	-65,2	1921,8	-14,3524 + j 12075,1	9,51e-3	-149
429,5	-33,2421 + j 2698,76	9,71e-2	-71,0	1922,5	-36,0741 + j 12079,4	3,95e+1	-0,20
446,6	-77,6963 + j 2806,04	1,35e+0	-23,4	1991,0	-16,0445 + j 12509,7	1,30e-1	4,98
452,9	-274,128 + j 2845,53	1,60e+0	76,7	2015,1	-42,9043 + j 12661,1	1,68e-4	-17,4
490,8	-161,282 + j 3083,84	3,67e+0	-34,6	2081,2	-15,4425 + j 13076,8	2,69e-2	1,78
561,6	-41,2535 + j 3528,61	1,58e+0	-11,8	2129,6	-16,4957 + j 13380,8	3,60e-2	1,68
605,4	-157,086 + j 3803,54	1,51e+0	37,2	2238,2	-36,9056 + j 14063,1	5,69e-2	0,72
615,5	-28,4085 + j 3867,06	6,32e-1	-50,8	2281,8	-15,7839 + j 14336,7	1,60e-3	29,6
663,3	-47,4617 + j 4167,50	1,13e+1	-10,8	2304,0	-39,2798 + j 14476,4	3,57e+0	-3,11
692,6	-31,8691 + j 4351,67	3,87e+0	6,92	2310,3	-20,7025 + j 14515,8	2,02e-1	38,3
703,7	-30,7146 + j 4421,74	1,32e-1	-71,1	2404,9	-37,9348 + j 15110,5	3,90e+1	-0,10
722,5	-79,9617 + j 4539,69	1,59e+1	12,1	2422,1	-16,5082 + j 15218,3	7,52e-2	23,3
807,6	-28,8594 + j 5074,01	9,29e+1	-1,42	2449,5	-28,4037 + j 15390,4	3,69e-5	24,0
813,7	-21,7152 + j 5112,35	1,00e+1	-6,06	2453,0	-575,713 + j 15412,6	2,76e-4	-159
830,2	-24,0476 + j 5216,23	8,36e+0	3,16	2468,7	-14,9169 + j 15511,6	1,62e-1	7,41
860,3	-13,2891 + j 5405,45	1,71e-2	-7,44	2535,6	-15,2979 + j 15931,8	1,91e-2	4,21
873,0	-52,6929 + j 5485,33	1,88e+1	-0,97	2562,3	-15,3219 + j 16099,2	2,55e-5	9,76
951,1	-30,8359 + j 5975,66	7,45e-1	-24,2	2606,7	-14,9183 + j 16378,3	5,74e-3	2,80
968,4	-48,6352 + j 6084,39	1,54e+0	21,6	2648,5	-39,2415 + j 16641,3	9,36e+0	-0,55
1042,3	-42,4442 + j 6548,84	6,42e-1	5,12	2658,9	-34,8171 + j 16706,2	4,17e-2	6,71
1108,6	-41,3582 + j 6965,54	9,94e+0	-1,50	2700,7	-10,2425 + j 16969,1	2,79e-6	64,8
1120,4	-14,1663 + j 7039,45	3,16e-4	-159	2792,0	-35,3884 + j 17542,5	3,82e-2	-8,53
1144,1	-43,5316 + j 7188,71	4,55e+0	0,64	2793,5	-16,9272 + j 17552,0	6,04e-3	70,6
1153,5	-37,1677 + j 7247,36	6,23e-2	25,4	2904,3	-15,2038 + j 18248,1	7,50e-2	-7,89
1189,9	-20,9150 + j 7476,39	2,72e+0	0,32	2930,5	-22,5592 + j 18412,8	6,63e-1	-54,5
1216,6	-32,1817 + j 7644,23	3,88e-1	-9,58	2933,6	-30,5322 + j 18432,1	1,00e+0	33,1
1255,0	-18,1738 + j 7885,43	1,72e+0	1,85	2974,0	-13,1691 + j 18686,4	5,17e-5	3,15
1323,2	-29,2324 + j 8314,15	6,46e+1	-4,26	3000,4	-37,3861 + j 18852,0	2,94e+1	-0,10
1351,8	-31,2388 + j 8493,50	3,23e+1	7,63	3483,6	-173,463 + j 21888,1	2,38e+1	8,21
1364,0	-14,0515 + j 8570,31	2,17e-5	103	4559,7	-1875,80 + j 28649,6	6,62e+1	8,60
1426,8	-21,3745 + j 8964,54	9,43e-2	6,95				

6.3.2 Comparação entre a Rede Completa e o Modelo Reduzido

Neste item é feita a comparação entre a rede completa, que é representada pelo sistema industrial conectado ao sistema de transmissão (ambos modelados por todos os seus equipamentos) e o sistema reduzido composto pelo sistema industrial e pelo equivalente modal do sistema de transmissão. Como nas comparações da rede externa isolada, serão comparados os módulos e os ângulos das impedâncias próprias e de transferência entre as barras 21 e 23, que são as barras de fronteira entre os sistemas de transmissão e industrial.

O objetivo principal desta comparação é avaliar a qualidade do equivalente modal acoplado à rede industrial.

Estas comparações podem ser visualizadas da Figura 174 à Figura 179. A curva em vermelho é sempre a resposta em frequência do sistema industrial acoplado ao sistema de transmissão. A curva em azul representa a resposta do sistema reduzido composto pelo sistema industrial e pelo equivalente modal da rede de transmissão.

Pode-se observar por estas comparações que as curvas do sistema completo (vermelho) e as do sistema reduzido composto pelo equivalente modal (azul) são coincidentes, validando que o equivalente modal tem excelente qualidade e representa com total fidelidade a rede de transmissão.

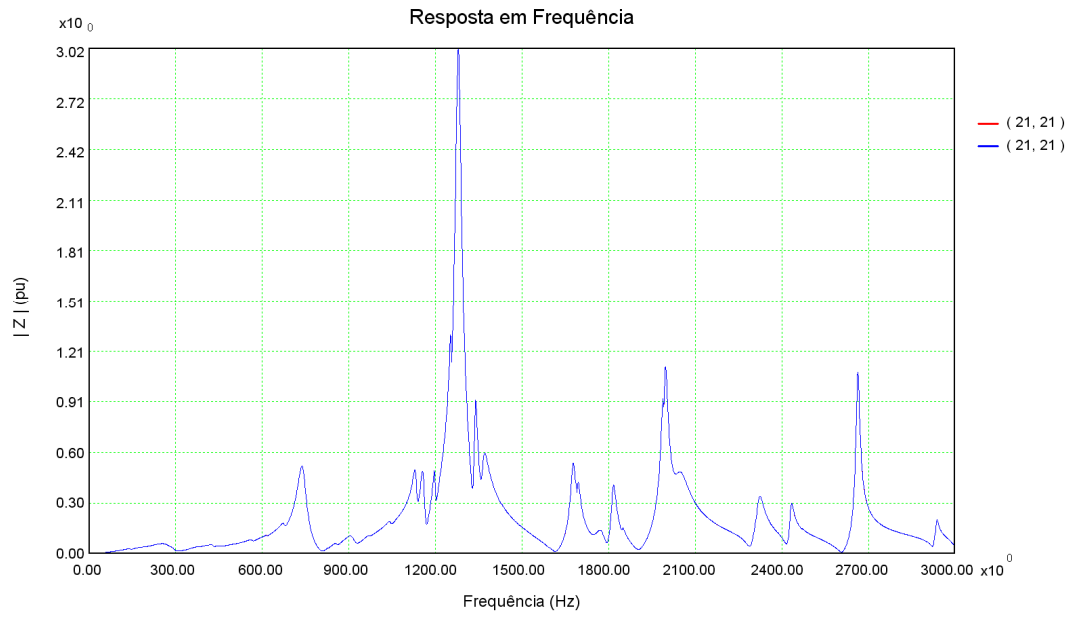


Figura 174: Resposta em frequência do módulo da impedância da barra 21 considerando a rede completa (vermelho) e o sistema reduzido considerando o equivalente modal (azul)

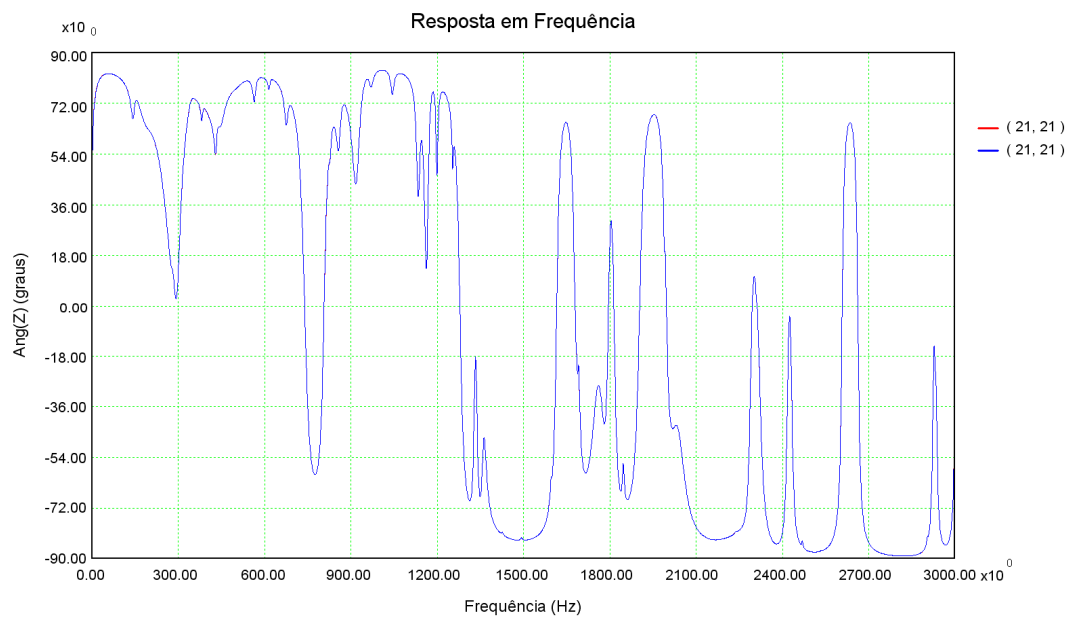


Figura 175: Resposta em frequência do ângulo da impedância da barra 21 considerando a rede completa (vermelho) e o sistema reduzido considerando o equivalente modal (azul)

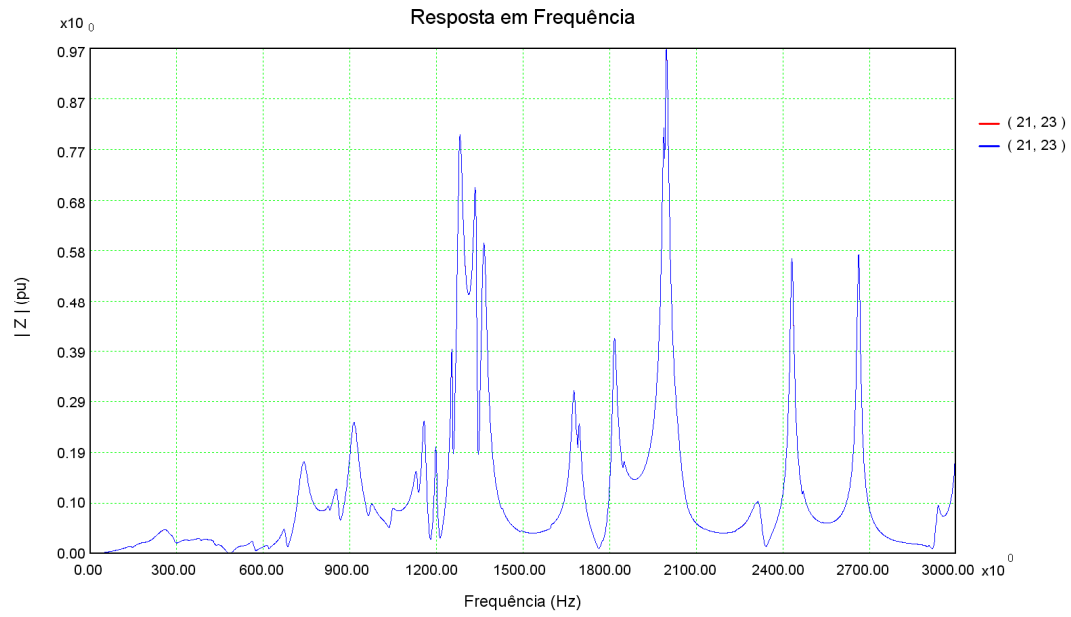


Figura 176: Resposta em frequência do módulo da impedância de transferência entre as barras 21 e 23 considerando a rede completa (vermelho) e o sistema reduzido considerando o equivalente modal (azul)

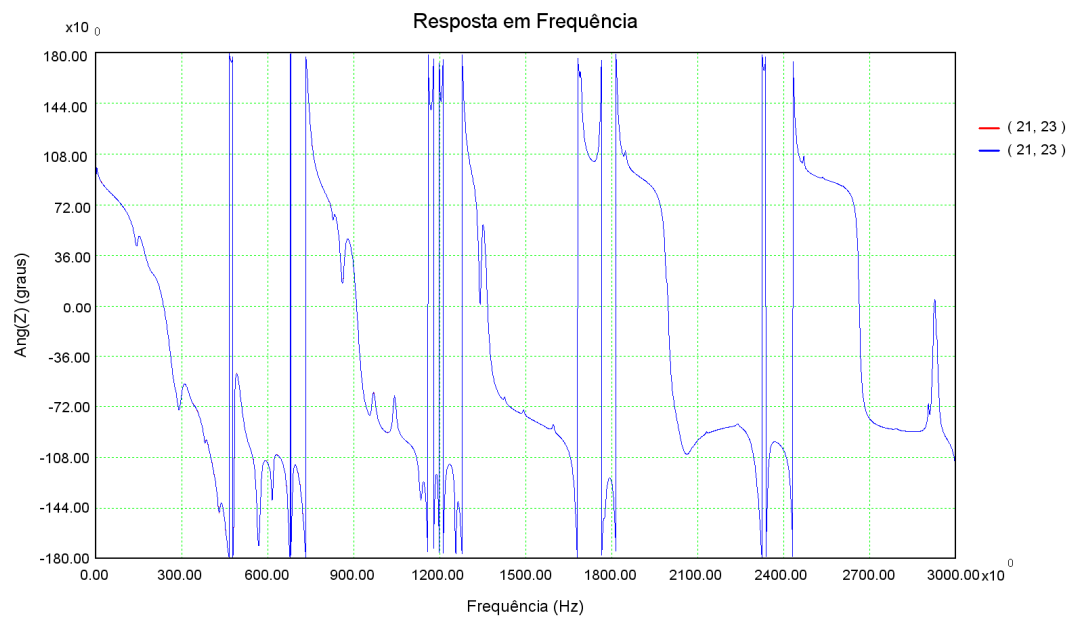


Figura 177: Resposta em frequência do ângulo da impedância de transferência entre as barras 21 e 23 considerando a rede completa (vermelho) e o sistema reduzido considerando o equivalente modal (azul)

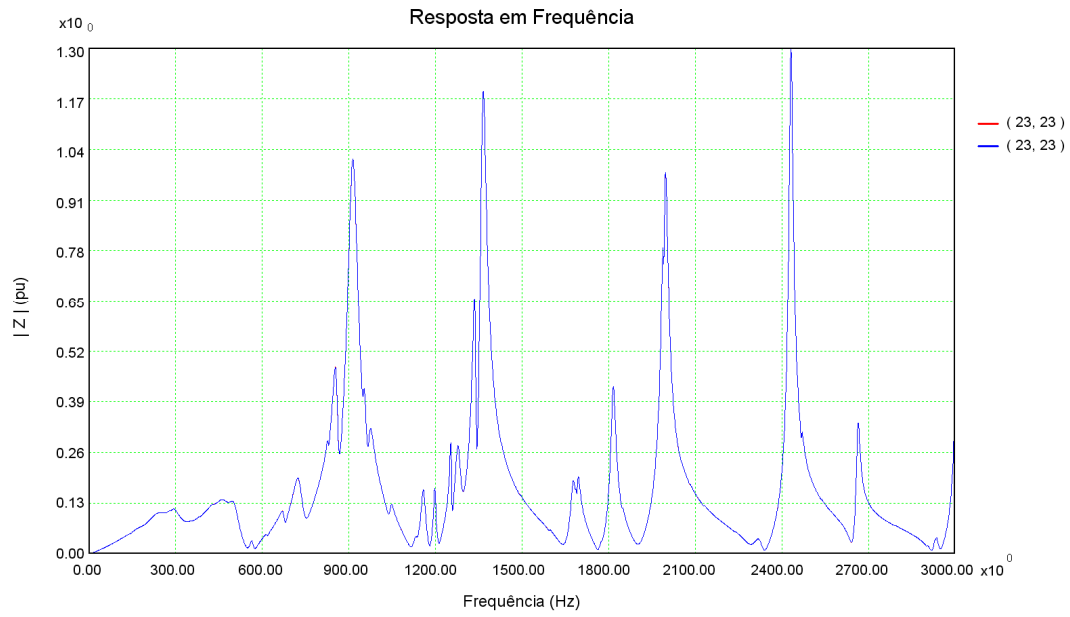


Figura 178: Resposta em frequência do módulo da impedância da barra 23 considerando a rede completa (vermelho) e o sistema reduzido considerando o equivalente modal (azul)

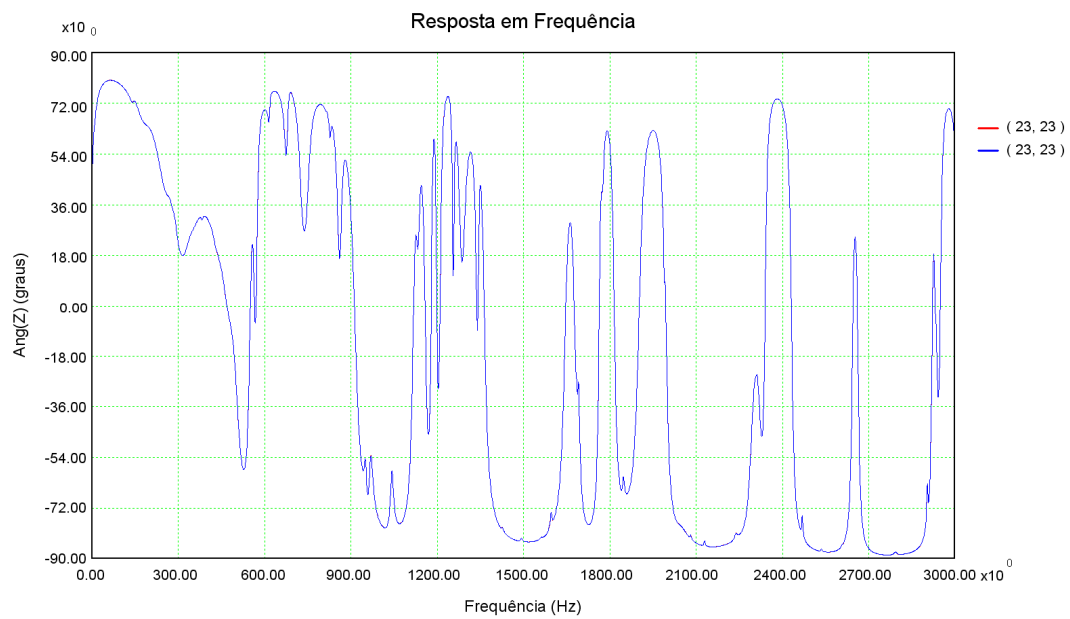


Figura 179: Resposta em frequência do ângulo da impedância da barra 23 considerando a rede completa (vermelho) e o sistema reduzido considerando o equivalente modal (azul)

6.4 Teste em Sistema de Grande Porte – SIN

Neste tópico são apresentadas avaliações dos equivalentes convencionais e dos equivalentes modais para um sistema de grande porte. O sistema escolhido é o Sistema Interligado Nacional, um caso do Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE 2020).

De modo análogo ao primeiro teste apresentado, o do sistema IEEE 14 Barras, neste tópico também será aplicado o critério de vizinhanças elétricas para a definição da rede interna. A barra escolhida como partida do algoritmo é a barra de Araraquara2 (SP) 500 kV (barra 5202). As comparações para a segunda e terceira vizinhanças serão apresentadas.

A escolha desta barra se deve ao fato dessa região receber grandes blocos de energia, transmitidos em corrente contínua. Na região de Ibiúna existe a coletora da Usina Hidrelétrica de Itaipu. A região de Araraquara receberá o elo AC/DC do Complexo do Madeira. Em Estreito e Nova Iguaçu se localizarão as coletores dos elos AC/DC do Complexo de Belo Monte. Logo, a escolha da barra de Araraquara como piloto e a expansão até sua terceira vizinhança é estratégica pois permitiria, por exemplo, estudos de desempenho dos múltiplos elos de corrente contínua a partir dos modelos reduzidos obtidos.

Primeiramente serão apresentados os resultados do equivalente modal alocado na segunda vizinhança da barra de Araraquara2. Após isso, serão apresentados os resultados do equivalente modal alocado na terceira vizinhança. Os traçados relativos ao modelo reduzido também conterão respostas da rede interna acoplada com o equivalente convencional, onde pode-se notar a evolução do equivalente convencional da segunda para a terceira vizinhança e a comparação entre o equivalente modal e o convencional. Como existem muitas barras de fronteira, existindo por esse motivo uma grande quantidade de funções de transferência entre barras de fronteira para serem ajustadas pelo Método do Ajuste Vetorial, somente os traçados de respostas em frequência de algumas funções de transferência serão apresentados.

6.4.1 Testes Considerando a Segunda Vizinhança

Na Figura 180 está apresentado o diagrama unifilar do Sistema Interligado Nacional para a segunda vizinhança da barra 5202, Araraquara2-SP, de 500 kV. Para a segunda vizinhança, a rede interna é composta por 20 barras, sendo que 14 delas são barras de fronteira.

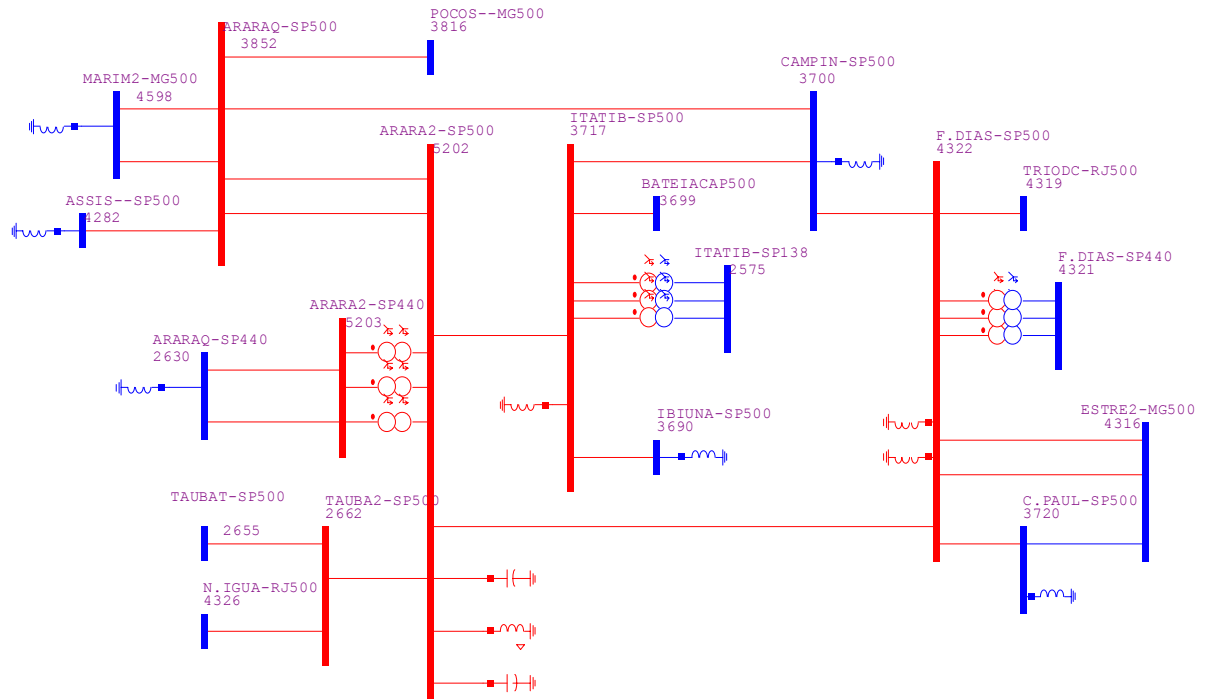


Figura 180: Diagrama Unifilar da segunda vizinhança da barra Araraquara-SP 500 kV (barra 5202)

Observa-se que as barras de fronteira da segunda vizinhança estão marcadas na cor azul. Os elementos em derivação conectados às barras de fronteira são considerados pertencentes à rede interna. Optou-se por não incluir na rede interna os elementos série que conectam barras de fronteira. No caso da segunda vizinhança, existe somente a linha de transmissão que conecta as barras 3720 e 4316 nesta condição. Esta linha de transmissão está marcada em azul.

Considerando as 14 barras de fronteira, serão, então, 105 funções de transferências que serão ajustadas pelo Método do Ajuste Vetorial, sendo 14 próprias e 91 de transferência entre barras de fronteira. Todas essas funções de transferências estão apresentadas na Tabela 54.

Para a aplicação do Método do Ajuste Vetorial, foi considerada a faixa de frequência de 0 a 2000 Hz, com um total de 1001 amostras (passo de 2 Hz). Optou-se por realizar a busca automática da ordem de aproximação e por fazer o ajuste automático da ordem caso fosse possível. Assim, evita-se uma baixa ordem de aproximação ou, no caso oposto, uma ordem muito maior que a necessária. O fator de correção utilizado foi igual a 2 e o fator de incremento/diminuição foi igual a 20.

Tabela 54: Funções de transferências para a segunda vizinhança a partir da barra Araraquara2-SP 500 kV do Sistema Interligado Nacional

FTs das Barras de Fronteira da Vizinhança 2					
Barra DE	Barra PARA	Barra DE	Barra PARA	Barra DE	Barra PARA
2655	2655	2575	4316	3816	4282
2655	4326	2575	4319	3816	4598
2655	2575	2575	4321	3816	3720
2655	3690	2575	2630	3816	4316
2655	3699	3690	3690	3816	4319
2655	3700	3690	3699	3816	4321
2655	3816	3690	3700	3816	2630
2655	4282	3690	3816	4282	4282
2655	4598	3690	4282	4282	4598
2655	3720	3690	4598	4282	3720
2655	4316	3690	3720	4282	4316
2655	4319	3690	4316	4282	4319
2655	4321	3690	4319	4282	4321
2655	2630	3690	4321	4282	2630
4326	4326	3690	2630	4598	4598
4326	2575	3699	3699	4598	3720
4326	3690	3699	3700	4598	4316
4326	3699	3699	3816	4598	4319
4326	3700	3699	4282	4598	4321
4326	3816	3699	4598	4598	2630
4326	4282	3699	3720	3720	3720
4326	4598	3699	4316	3720	4316
4326	3720	3699	4319	3720	4319
4326	4316	3699	4321	3720	4321
4326	4319	3699	2630	3720	2630
4326	4321	3700	3700	4316	4316
4326	2630	3700	3816	4316	4319
2575	2575	3700	4282	4316	4321
2575	3690	3700	4598	4316	2630
2575	3699	3700	3720	4319	4319
2575	3700	3700	4316	4319	4321
2575	3816	3700	4319	4319	2630
2575	4282	3700	4321	4321	4321
2575	4598	3700	2630	4321	2630
2575	3720	3816	3816	2630	2630

6.4.1.1 Comparação entre a Rede Externa Completa e Modelada por Polos e Resíduos

Diante do grande número de funções de transferência que existem para a segunda vizinhança, foram escolhidas para serem apresentados os traçados gráficos das funções de transferência informadas na Tabela 55. A ordem de aproximação do ajuste e o número de iterações alcançado de cada função de transferência também são apresentados nesta tabela. Quando foi preciso fazer o incremento da ordem de aproximação (item 5.3.1), o valor da quantidade de incrementos é apresentado entre parênteses na mesma coluna da ordem. No caso das funções de transferência escolhidas e informadas na Tabela 55, somente podem ser visualizados incrementos mas a opção de decrementos estava habilitada e, das 105 funções de transferência, muitas tiveram decremento automático da ordem de aproximação.

Tabela 55: Funções de transferências para a segunda vizinhança cujos traçados de resposta em frequência serão analisados

FTs das Barras de Fronteira			
Barra De	Barra Para	Ordem	Iterações
2630	2630	116 (3)	15
2630	4321	124 (2)	14
3720	3720	116 (3)	11
3720	4321	128 (2)	10
4282	4321	112 (1)	18
4316	4316	120 (3)	15
4319	4319	92 (2)	16
4321	4321	132 (4)	27
4321	4598	112	16
4598	4598	120 (2)	18

Da Figura 181 até a Figura 201 tem-se a comparação entre as respostas em frequência dos módulos e ângulos das funções de transferências informadas na Tabela 55, considerando a rede externa representada por seu modelo completo (gráficos em vermelho) e a rede externa representada pelo equivalente modal dado pela equação

$$z_{eq-kj}(s) \cong \sum_{i \in \Omega_{kj}} \frac{R_i^{(kj)}}{(s - \lambda_i^{(kj)})} + d^{(kj)} + e^{(kj)}s \text{ (gráficos em azul).}$$

Nos gráficos representados pelo equivalente modal (gráficos em azul), tem-se na legenda a ordem de aproximação do modelo. Esta ordem e os valores dos polos e resíduos associados estão apresentados da Tabela 56 à Tabela 65. Os polos complexos

com parte imaginária negativa não estão apresentados nas tabelas simplesmente para poupar espaço, mas eles foram calculados e estão contabilizados no valor informado para a ordem de aproximação.

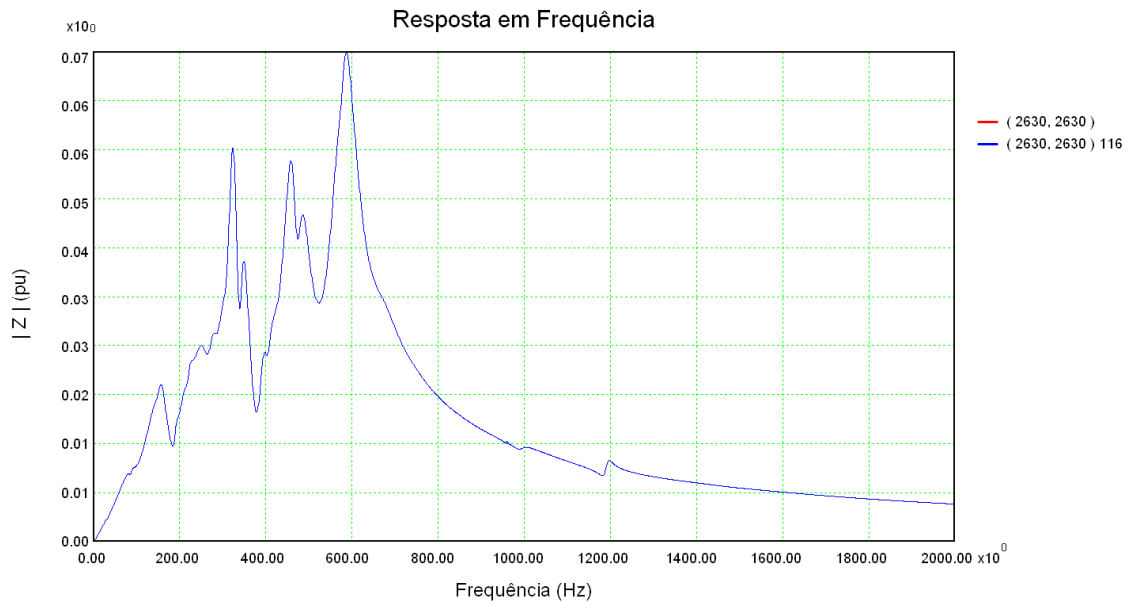


Figura 181: Resposta em frequência do módulo da impedância da barra 2630 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)

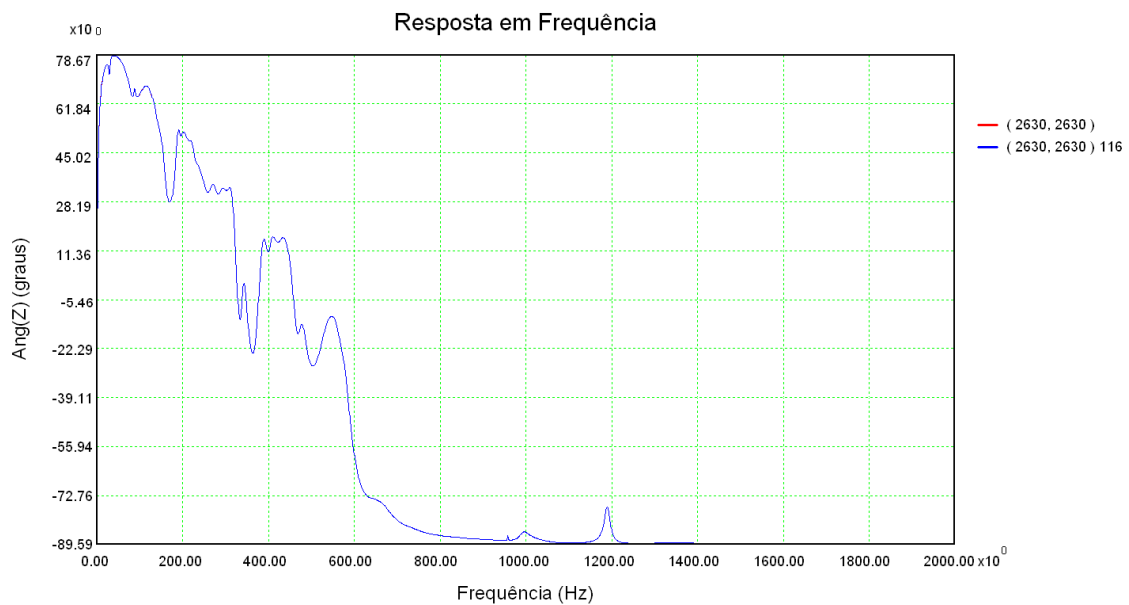


Figura 182: Resposta em frequência do ângulo da impedância da barra 2630 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)

Tabela 56: Conjunto de polos e resíduos da função de transferência (2630,2630)

Freq (Hz)	Polo	Resíduo		Freq (Hz)	Polo	Resíduo	
		Mód.	Âng.			Mód.	Âng.
0,0	-1,46702	3,24e-4	180	425,7	-74,6760 + j 2674,99	9,73e-2	-100
0,0	-73,6086	8,61e-3	180	447,6	-87,0956 + j 2812,66	3,16e-1	-110
10,2	-0,39458 + j 63,9353	6,59e-5	-50,3	461,7	-117,933 + j 2900,72	6,87e+0	-28,3
29,5	-12,5485 + j 185,154	4,08e-3	-17,0	477,4	-109,438 + j 2999,38	4,21e+0	69,0
33,3	-11,0129 + j 209,272	5,16e-4	-93,4	498,1	-23,4522 + j 3129,47	5,77e-3	-153
83,6	-92,5374 + j 525,534	5,88e-2	31,3	551,9	-175,631 + j 3467,96	1,23e+0	-30,8
87,6	-19,3876 + j 550,269	1,77e-2	-173	553,4	-28,3596 + j 3476,95	6,76e-3	156
85,4	-146,618 + j 536,759	3,88e-1	12,1	570,7	-91,8186 + j 3585,91	1,67e+0	-121
126,5	-62,4844 + j 794,536	3,82e-2	17,9	580,1	-145,376 + j 3644,64	9,20e+0	-1,68
141,7	-59,3320 + j 890,372	1,44e-1	-10,8	602,0	-16,8750 + j 3782,49	1,06e-2	74,8
156,8	-11,3817 + j 985,465	7,79e-4	13,1	651,7	-77,5187 + j 4094,47	3,70e-2	-30,5
159,7	-96,3736 + j 1003,25	1,03e+0	17,8	655,8	-234,530 + j 4120,57	1,28e+0	4,49
169,5	-60,9962 + j 1065,03	8,16e-2	171	659,0	-88,0772 + j 4140,83	6,96e-2	120
186,8	-142,827 + j 1173,92	1,95e+0	-127	729,0	-67,1812 + j 4580,57	7,27e-3	-14,8
192,7	-33,1810 + j 1210,83	8,65e-2	57,2	741,8	-50,6128 + j 4660,92	1,69e-3	-55,2
199,9	-284,210 + j 1256,27	5,15e+0	30,7	746,1	-122,185 + j 4688,15	2,23e-2	-12,2
205,0	-37,0201 + j 1288,06	1,86e-2	111	799,0	-58,1140 + j 5020,17	2,01e-3	-68,0
223,8	-35,4401 + j 1406,26	7,82e-2	89,4	846,0	-52,2717 + j 5315,74	2,22e-3	-62,4
248,7	-109,946 + j 1562,76	6,15e-1	-1,48	899,2	-117,801 + j 5649,77	1,25e-3	31,3
253,5	-66,4995 + j 1592,79	1,35e-1	40,7	958,1	-6,08648 + j 6019,67	2,54e-3	3,72
272,5	-44,4319 + j 1711,98	5,21e-2	101	972,0	-870,577 + j 6107,21	2,38e-1	-130
286,3	-79,9550 + j 1799,04	4,76e-1	-93,4	993,2	-89,8398 + j 6240,64	6,48e-2	31,1
288,9	-9,82449 + j 1815,41	6,79e-4	129	1017,0	-301,026 + j 6390,02	7,50e-2	-42,4
305,6	-132,118 + j 1920,04	3,27e+0	-46,2	1061,3	-209,767 + j 6668,19	7,98e-3	-42,7
323,4	-76,1545 + j 2031,84	3,56e+0	8,35	1191,2	-52,0370 + j 7484,64	1,24e-1	-5,91
334,5	-91,2556 + j 2101,76	2,66e+0	-36,0	1401,2	-762,254 + j 8803,98	1,28e-1	-48,3
342,9	-79,0160 + j 2154,49	3,77e+0	77,5	1413,9	-168,231 + j 8883,73	4,99e-4	-68,6
368,5	-110,233 + j 2315,61	2,40e-1	-166	1487,7	-498,061 + j 9347,54	4,81e-2	63,7
397,5	-95,2705 + j 2497,61	2,68e+0	8,16	1731,7	-343,654 + j 10880,4	1,60e-3	-167
404,6	-88,9682 + j 2542,43	1,91e+0	138				

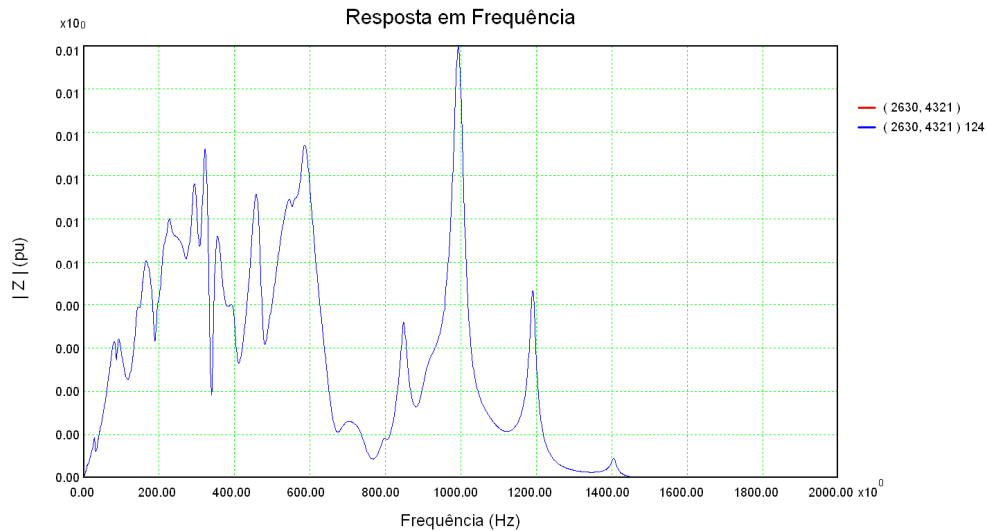


Figura 183: Resposta em frequência do módulo da impedância de transferência entre as barras 2630 e 4321 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)

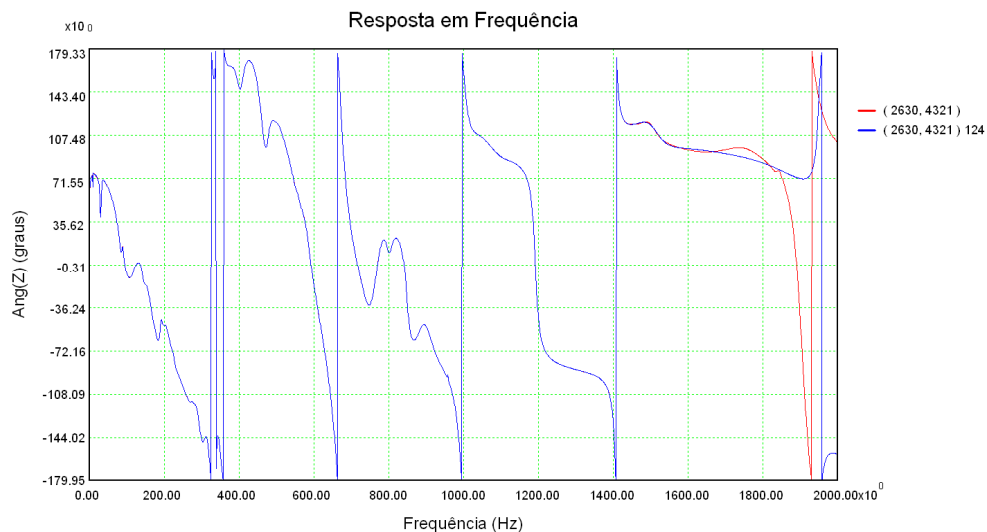


Figura 184: Resposta em frequência do ângulo da impedância de transferência entre as barras 2630 e 4321 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)

Pode-se observar pela Figura 184 uma discrepância na faixa de frequência de 1500 a 2000 Hz entre os traçados do ângulo da impedância entre as barras 2630 e 4321 quando comparada a rede externa completa (vermelho) e a rede externa representada pelo modelo modal (azul). Esta discrepância é justificada pela ordem de grandeza da impedância na faixa de frequência em que ela ocorre. Nota-se que o valor do módulo da impedância apresentado na Figura 183 é muito pequeno (próximo de zero). Logo, a ordem de grandeza da tolerância do erro entre a curva real e a curva ajustada é praticamente da ordem de grandeza do valor da impedância. Neste caso, não é um bom parâmetro analisar o valor do ângulo da impedância. Visto que o Método do Ajuste Vetorial visa minimizar a diferença de uma grandeza complexa (parte real e imaginária

da diferença entre a curva real e a ajustada da impedância variando na frequência), para comprovar que valor complexo da impedância é muito pequeno, na Figura 185 e na Figura 186 são apresentados, respectivamente, os traçados da parte real e da parte imaginária da impedância entre as barras 2630 e 4321. Pode-se observar nestas figuras que a parte real e imaginária da impedância para a faixa de frequências de 1500 a 2000 Hz é muito próxima de zero. Esta discrepância encontrada no traçado do ângulo pode ser bastante diminuída apertando a tolerância para valores ainda menores. Esta ação também amenizaria algumas pequenas diferenças para baixas frequências visualizadas no valor do ângulo em alguns traçados.

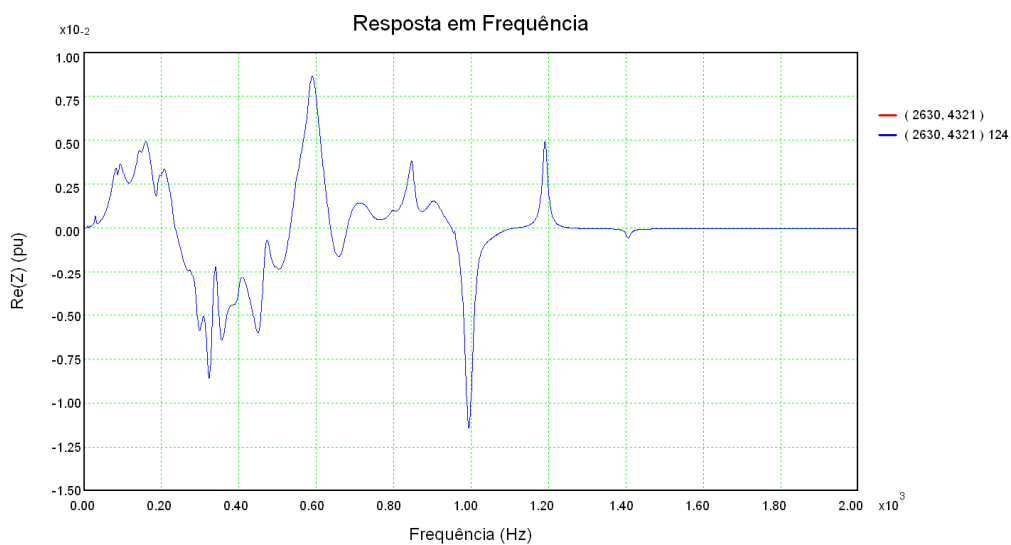


Figura 185: Resposta em frequência da parte real da impedância de transferência entre as barras 2630 e 4321 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)

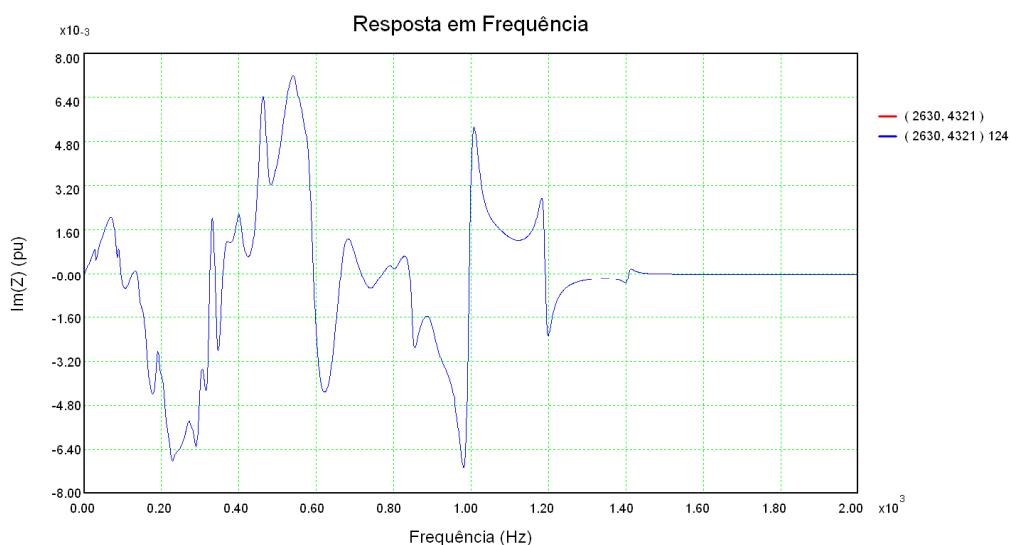


Figura 186: Resposta em frequência da parte imaginária da impedância de transferência entre as barras 2630 e 4321 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)

Tabela 57: Conjunto de polos e resíduos da função de transferência (2630,4321)

Freq (Hz)	Polo	Resíduo		Freq (Hz)	Polo	Resíduo	
		Mód.	Âng.			Mód.	Âng.
0,0	-5,54981	2,22e-4	180	475,9	-100,254 + j 2990,47	2,82e-1	-99,3
0,0	-89,7438	5,44e-3	180	498,1	-25,0271 + j 3129,51	2,13e-3	-20,6
10,1	-0,54695 + j 63,7261	8,67e-5	-38,8	531,4	-202,423 + j 3339,17	9,28e-1	81,0
29,5	-12,7858 + j 185,451	6,30e-3	-15,0	543,3	-86,6110 + j 3413,43	8,33e-2	104
33,4	-10,7461 + j 210,097	9,25e-4	-85,0	553,4	-26,5790 + j 3477,17	7,94e-3	-147
87,5	-19,5181 + j 549,929	1,93e-2	174	573,8	-85,5251 + j 3605,00	1,86e-1	-134
85,8	-116,940 + j 539,258	3,07e-1	8,21	583,2	-154,248 + j 3664,49	1,55e+0	30,1
83,8	-185,848 + j 526,236	2,09e-1	19,5	602,1	-17,5140 + j 3783,21	1,82e-3	109
121,9	-57,6130 + j 765,840	1,04e-2	95,2	655,8	-81,0258 + j 4120,48	3,47e-2	-10,6
142,2	-52,3708 + j 893,333	6,80e-2	-12,1	659,0	-217,565 + j 4140,92	1,34e+0	158
153,2	-69,1964 + j 962,471	6,39e-2	115	709,3	-167,297 + j 4456,81	7,36e-2	-119
168,0	-140,607 + j 1055,85	1,07e+0	-48,3	728,0	-40,2243 + j 4574,38	8,70e-4	-58,2
173,6	-78,9240 + j 1091,02	1,48e-1	70,6	742,9	-247,655 + j 4667,76	4,17e-1	-96,1
192,5	-33,6158 + j 1209,48	5,22e-2	31,1	752,1	-129,521 + j 4725,37	3,55e-2	119
205,5	-126,298 + j 1291,33	6,20e-1	27,1	798,4	-62,5974 + j 5016,36	2,31e-2	-26,1
206,4	-35,6279 + j 1297,05	8,67e-3	13,3	844,0	-87,2759 + j 5303,01	2,35e-1	-37,6
224,6	-35,0447 + j 1410,92	2,22e-2	-16,5	846,2	-44,6906 + j 5316,59	8,64e-2	34,7
242,2	-65,1399 + j 1522,08	2,32e-2	-7,51	895,7	-94,3842 + j 5628,06	3,90e-3	150
254,8	-32,0081 + j 1601,24	2,61e-3	-37,3	903,5	-172,131 + j 5677,12	2,63e-1	1,39
272,5	-34,6050 + j 1712,45	1,19e-2	33,5	958,1	-6,08130 + j 6019,66	1,97e-3	-3,27
288,7	-10,6598 + j 1813,96	9,33e-4	51,2	993,5	-90,5016 + j 6242,45	1,19e+0	-171
288,8	-77,3813 + j 1814,41	2,95e-1	-28,0	1010,7	-152,234 + j 6350,44	3,54e-1	-3,07
298,9	-112,487 + j 1878,18	8,20e-1	138	1033,7	-424,480 + j 6495,12	1,53e-1	113
322,7	-73,9053 + j 2027,84	7,09e-1	-163	1081,6	-218,862 + j 6795,79	3,02e-2	40,6
342,4	-79,8371 + j 2151,09	6,33e-1	-49,8	1112,3	-120,489 + j 6988,97	2,50e-3	-25,8
361,4	-119,025 + j 2270,94	3,80e-1	95,9	1191,2	-52,0467 + j 7484,66	2,59e-1	-2,20
387,8	-66,2227 + j 2436,35	1,37e-2	40,8	1384,6	-173,695 + j 8699,81	1,30e-3	-132
401,2	-75,1742 + j 2520,60	1,74e-1	76,0	1381,6	-1090,87 + j 8680,95	1,17e-2	148
419,2	-70,6282 + j 2633,85	2,51e-2	37,7	1405,9	-45,0886 + j 8833,78	2,33e-2	-178
435,3	-73,9813 + j 2735,23	2,37e-2	30,5	1512,3	-240,033 + j 9502,09	1,04e-3	89,2
461,6	-108,485 + j 2900,29	8,66e-1	104	2043,1	-1607,98 + j 12837,1	2,16e-3	-72,6
287,7	-2289,57 + j 1807,81	3,33e+0	-110				

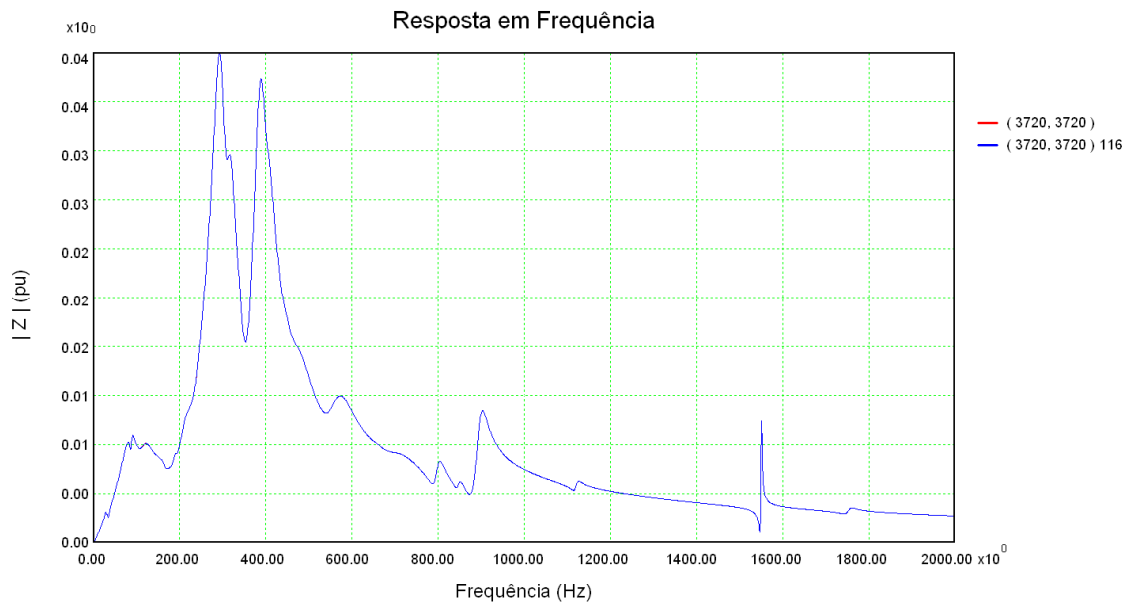


Figura 187: Resposta em frequência do módulo da impedância da barra 3720 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)

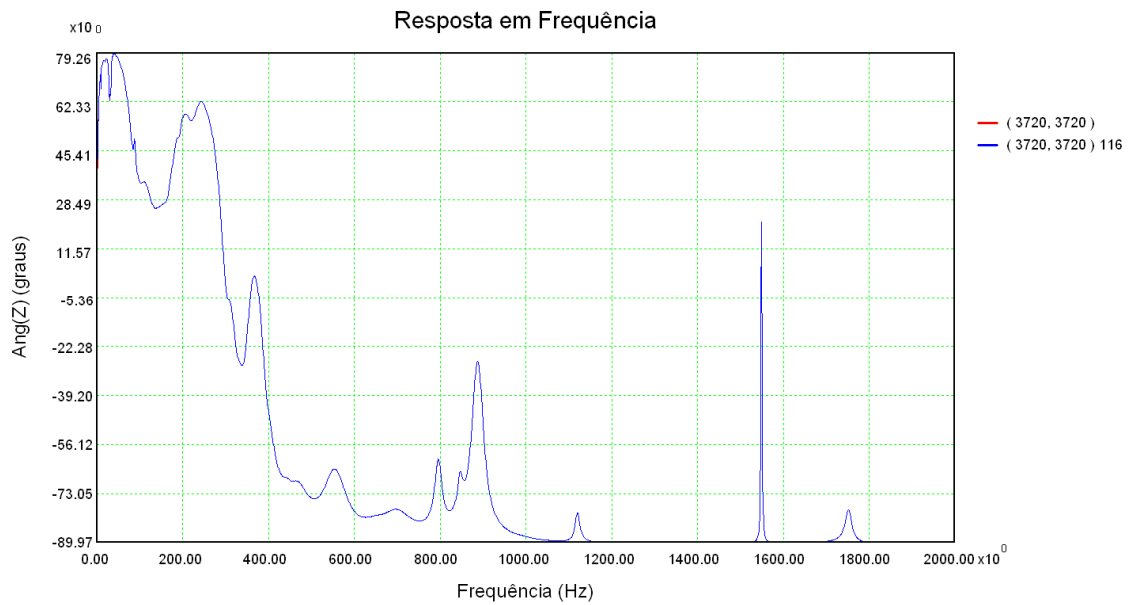


Figura 188: Resposta em frequência do ângulo da impedância da barra 3720 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)

Tabela 58: Conjunto de polos e resíduos da função de transferência (3720,3720)

Freq	Polo	Resíduo		Freq	Polo	Resíduo	
		Mód.	Âng.			Mód.	Âng.
0,0	-5,73303	5,92e-4	180	476,0	-163,381 + j 2990,91	3,67e-1	-28,4
0,0	-91,1104	3,44e-3	180	497,9	-23,6420 + j 3128,18	1,06e-3	-12,0
10,1	-1,09286 + j 63,4854	1,63e-4	-11,3	554,1	-31,2177 + j 3481,24	2,46e-3	-167
20,2	-16,1840 + j 126,795	8,93e-4	-16,4	555,5	-146,922 + j 3490,30	3,12e-1	1,06
29,6	-13,9850 + j 185,672	9,14e-3	-3,92	571,0	-311,493 + j 3587,56	1,95e-1	-97,6
33,3	-8,72288 + j 209,252	3,79e-3	-31,4	572,7	-178,155 + j 3598,51	3,00e-1	-11,6
87,7	-19,8324 + j 550,877	3,64e-2	169	654,7	-75,2719 + j 4113,44	3,71e-3	-22,7
88,0	-119,864 + j 552,831	7,91e-1	8,87	653,6	-259,072 + j 4106,42	8,78e-2	-46,4
95,7	-40,3809 + j 601,400	1,69e-2	146	702,3	-267,447 + j 4412,94	2,90e-1	-10,5
120,3	-166,403 + j 756,096	8,08e-1	44,9	736,0	-75,6123 + j 4624,50	6,03e-4	4,42
125,4	-25,4717 + j 787,898	1,47e-3	-147	798,3	-63,3643 + j 5016,01	1,48e-1	0,50
141,6	-81,5596 + j 889,555	2,91e-2	123	843,7	-88,2239 + j 5301,02	4,53e-2	-30,4
164,7	-48,8787 + j 1035,10	2,81e-2	-79,5	846,2	-44,8356 + j 5316,64	4,10e-2	46,2
181,5	-96,8326 + j 1140,09	9,92e-2	-112	871,9	-664,760 + j 5478,03	2,15e-1	-53,9
192,9	-36,8111 + j 1211,91	2,80e-2	-38,9	896,2	-90,2616 + j 5630,85	6,68e-1	-0,36
220,0	-60,7199 + j 1382,00	6,40e-2	-19,9	905,2	-185,598 + j 5687,63	4,69e-2	80,8
225,6	-26,9662 + j 1417,42	4,80e-3	61,3	958,1	-17,9422 + j 6019,92	2,29e-6	29,4
238,1	-86,4028 + j 1496,00	1,01e-1	-136	992,1	-97,1883 + j 6233,44	1,89e-3	9,86
256,6	-114,679 + j 1612,22	4,21e-2	-164	1007,4	-276,673 + j 6329,45	4,80e-3	-62,1
292,2	-81,2636 + j 1836,23	4,20e-1	-13,4	1120,8	-42,0718 + j 7042,15	3,55e-2	2,59
300,2	-108,782 + j 1885,95	3,92e+0	-49,3	1153,6	-831,444 + j 7248,10	9,99e-3	146
315,3	-114,450 + j 1981,10	3,96e+0	26,9	1358,9	-793,952 + j 8538,14	4,58e-3	169
330,6	-70,4285 + j 2077,49	2,20e-1	102	1375,8	-30,9134 + j 8644,46	8,45e-5	-0,06
323,7	-519,167 + j 2034,00	9,36e-1	114	1405,0	-41,4596 + j 8827,72	2,83e-5	-3,49
340,7	-52,2919 + j 2140,56	3,25e-2	-90,5	1438,4	-48,3277 + j 9037,53	1,42e-4	-0,92
374,9	-77,7220 + j 2355,52	3,70e-1	-96,6	1550,7	-6,02423 + j 9743,37	5,49e-2	0,07
383,9	-125,079 + j 2412,38	4,71e+0	16,5	1636,5	-565,235 + j 10282,3	5,44e-3	99,2
399,2	-101,652 + j 2508,07	1,71e+0	-175	1753,4	-59,8913 + j 11017,2	3,26e-2	-5,30
404,4	-98,2516 + j 2540,97	1,35e+0	-12,9	1768,0	-804,322 + j 11108,8	5,19e-3	-90,3
444,8	-47,0406 + j 2794,65	2,21e-2	-11,3				

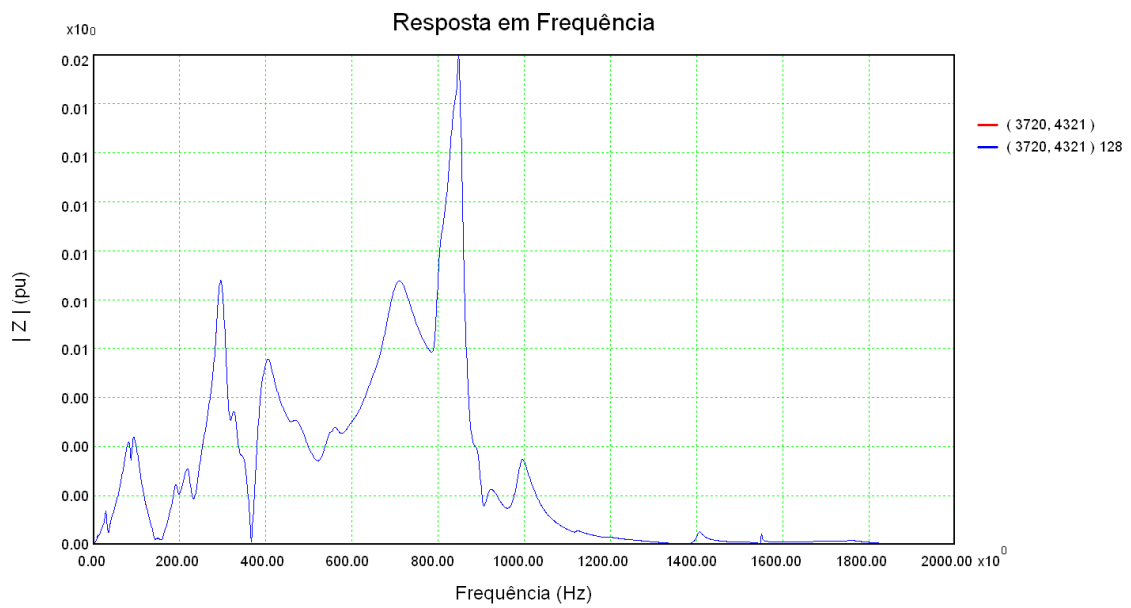


Figura 189: Resposta em frequência do módulo da impedância de transferência entre as barras 3720 e 4321 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)

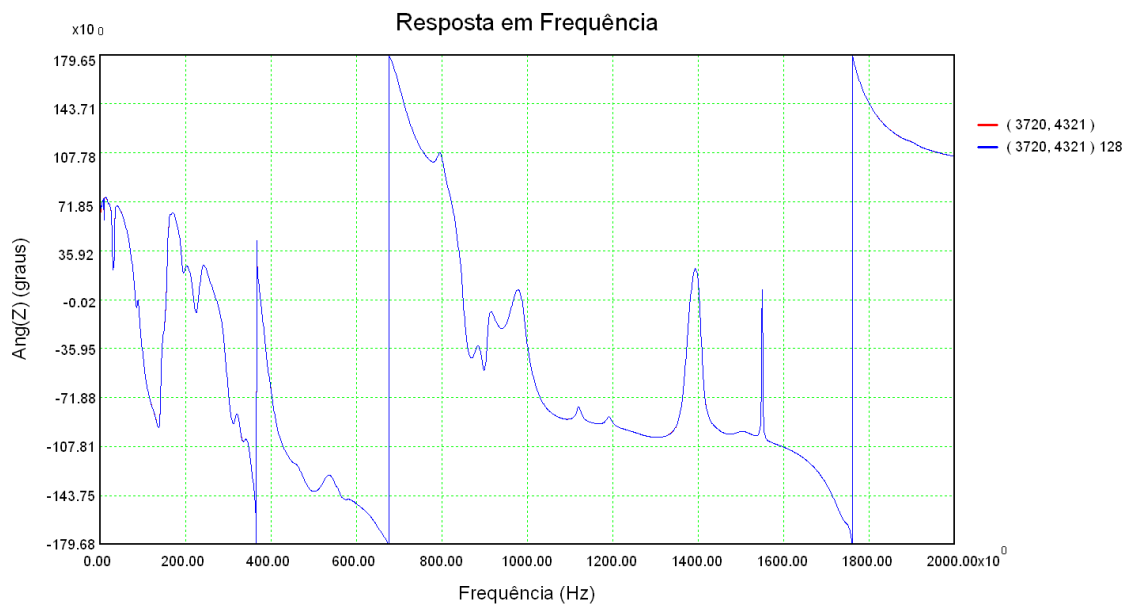


Figura 190: Resposta em frequência do ângulo da impedância de transferência entre as barras 3720 e 4321 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)

Tabela 59: Conjunto de polos e resíduos da função de transferência (3720,4321)

Freq (Hz)	Polo	Resíduo		Freq (Hz)	Polo	Resíduo	
		Mód.	Âng.			Mód.	Âng.
0,0	-10,3880	4,89e-4	180	553,5	-27,9975 + j 3478,01	5,05e-3	58,0
0,0	-19879,1	3,35e-2	0,00	554,3	-128,912 + j 3482,48	1,99e-1	-119
10,1	-0,96380 + j 63,4035	1,41e-4	-10,5	582,9	-141,193 + j 3662,73	8,15e-2	-51,0
19,8	-16,1771 + j 124,548	6,39e-4	-13,9	603,3	-15,5781 + j 3790,73	5,46e-5	51,6
29,6	-13,5016 + j 185,975	9,69e-3	-10,4	656,3	-72,0528 + j 4123,55	6,57e-3	34,9
33,3	-8,86129 + j 209,244	2,29e-3	-45,0	657,6	-225,118 + j 4131,91	3,02e-1	139
87,6	-19,4540 + j 550,638	2,69e-2	162	701,9	-267,186 + j 4410,46	2,04e+0	171
86,3	-126,403 + j 542,239	5,88e-1	20,5	738,7	-81,9068 + j 4641,47	2,76e-3	-56,4
96,8	-47,0145 + j 608,147	1,74e-2	93,5	798,3	-63,4419 + j 5015,91	1,86e-1	-175
97,2	-122,233 + j 610,676	2,76e-1	-109	844,1	-86,3095 + j 5303,35	1,68e+0	-20,7
141,2	-46,5048 + j 887,085	1,36e-2	108	846,1	-44,7185 + j 5316,32	4,55e-1	90,2
162,9	-45,3770 + j 1023,81	1,22e-2	147	855,9	-403,632 + j 5378,00	3,59e-1	-155
168,8	-48,6496 + j 1060,73	1,18e-2	-128	830,8	-1582,64 + j 5220,20	3,82e-1	138
192,4	-36,0678 + j 1209,04	3,14e-2	-11,8	896,2	-89,9642 + j 5631,01	3,84e-1	-94,6
205,8	-15,5339 + j 1293,12	3,31e-4	-28,0	903,9	-173,308 + j 5679,14	8,85e-1	47,7
223,2	-51,5453 + j 1402,39	6,77e-2	-89,0	958,0	-5,94304 + j 6019,43	4,68e-5	10,2
230,9	-97,6123 + j 1450,51	1,67e-1	-76,8	985,5	-27,4201 + j 6192,15	8,88e-5	9,75
254,3	-141,589 + j 1598,07	2,90e-1	-24,7	993,5	-90,6467 + j 6242,39	1,85e-1	-4,88
273,0	-84,2215 + j 1715,13	6,92e-2	-49,3	1011,0	-148,008 + j 6352,23	8,55e-2	-26,4
294,0	-78,4652 + j 1847,27	2,92e-1	-25,8	1105,8	-156,597 + j 6947,93	3,20e-3	49,3
299,7	-120,639 + j 1883,08	1,09e+0	-83,9	1120,8	-42,5366 + j 7042,34	3,63e-3	0,69
293,2	-575,142 + j 1841,98	2,40e+0	116	1191,2	-52,6118 + j 7484,74	1,91e-3	-4,79
323,5	-87,2666 + j 2032,86	4,79e-1	-35,6	1273,5	-439,218 + j 8001,70	7,89e-3	-156
342,2	-89,6088 + j 2150,07	2,81e-1	-2,91	1379,9	-129,284 + j 8670,17	2,29e-3	-9,09
368,9	-87,4890 + j 2317,88	1,42e-1	70,7	1404,6	-31,9774 + j 8825,53	1,49e-4	19,1
385,4	-91,8880 + j 2421,46	3,77e-1	1,72	1406,0	-45,4762 + j 8833,92	1,94e-2	-9,74
403,1	-83,0970 + j 2532,50	1,60e-1	-38,3	1445,0	-139,474 + j 9079,24	8,56e-4	-73,7
435,0	-126,356 + j 2733,23	8,38e-2	165	1501,6	-164,539 + j 9435,03	1,85e-3	5,08
446,2	-55,3743 + j 2803,41	1,11e-2	-145	1550,7	-6,02303 + j 9743,37	2,10e-3	-13,6
462,2	-80,5389 + j 2904,08	2,14e-2	-9,14	1750,0	-371,978 + j 10995,5	5,97e-2	169
475,3	-272,214 + j 2986,36	6,22e-1	-152	1753,5	-60,1077 + j 11017,7	2,33e-3	-97,7
497,9	-27,7319 + j 3128,61	1,11e-3	49,6	1904,4	-89,7545 + j 11965,4	6,85e-5	169
536,2	-88,9128 + j 3368,79	2,45e-2	-83,9				

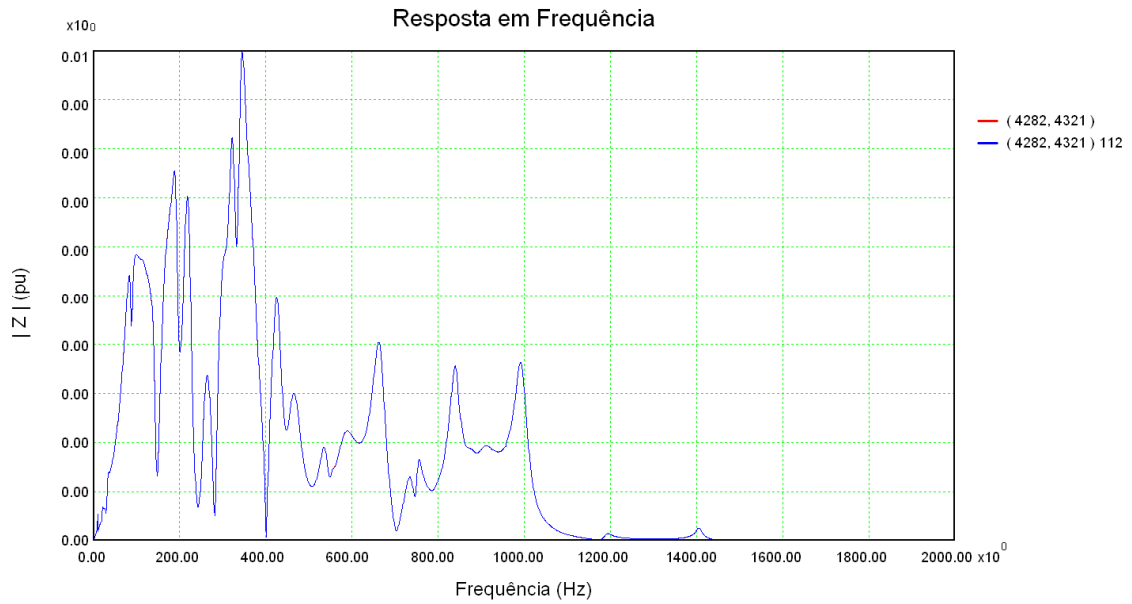


Figura 191: Resposta em frequência do módulo da impedância de transferência entre as barras 4282 e 4321 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)

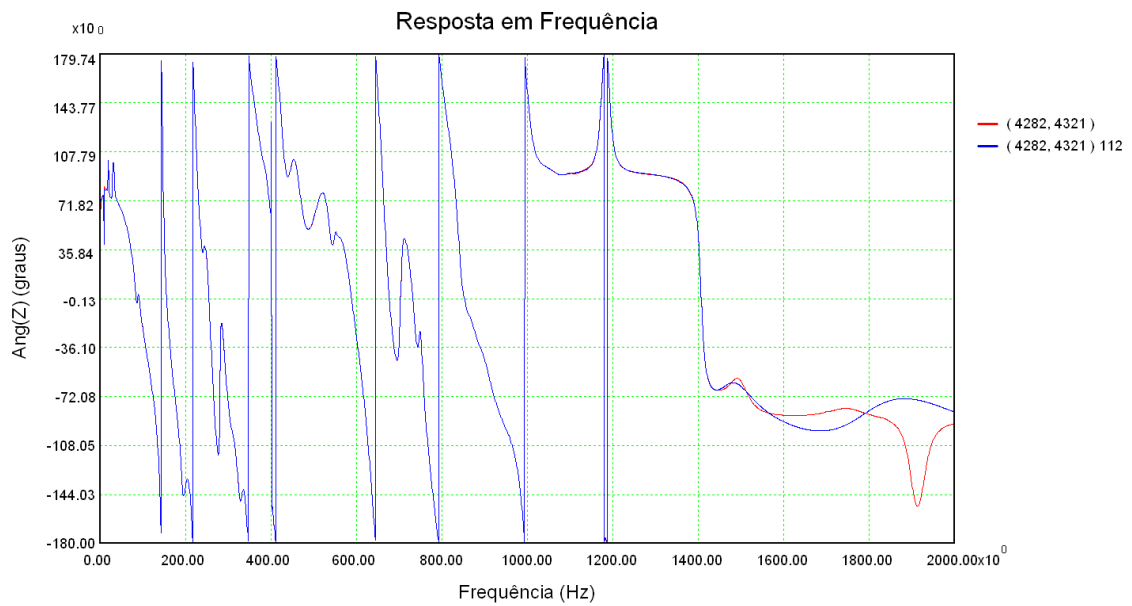


Figura 192: Resposta em frequência do ângulo da impedância de transferência entre as barras 4282 e 4321 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)

Tabela 60: Conjunto de polos e resíduos da função de transferência (4282,4321)

Freq (Hz)	Polo	Resíduo		Freq (Hz)	Polo	Resíduo	
		Mód.	Âng.			Mód.	Âng.
0,0	-14,0819	2,63e-4	180	426,0	-68,4667 + j 2676,70	1,41e-1	120
0,0	-6185,75	9,73e-1	0,00	451,8	-180,365 + j 2838,68	4,03e-1	-101
10,1	-0,68916 + j 63,4345	1,79e-4	-23,9	467,5	-128,863 + j 2937,54	2,66e-1	50,7
20,3	-5,75104 + j 127,705	7,14e-4	157	538,1	-78,3816 + j 3381,05	6,69e-2	20,8
29,7	-10,3673 + j 186,510	1,46e-3	-131	540,8	-231,968 + j 3397,91	2,01e-1	-160
33,3	-10,0031 + j 209,399	1,88e-3	148	553,1	-34,3029 + j 3475,27	4,72e-3	80,7
87,6	-19,5753 + j 550,189	1,95e-2	-158	585,1	-141,822 + j 3676,16	1,04e-1	21,3
85,7	-121,854 + j 538,184	2,97e-1	22,4	649,0	-66,5146 + j 4077,78	9,69e-3	128
111,1	-51,4297 + j 698,276	5,64e-3	39,1	649,7	-294,983 + j 4082,48	1,20e+0	-114
111,0	-227,607 + j 697,565	4,44e-1	-14,3	665,2	-95,0629 + j 4179,71	4,05e-1	49,1
141,9	-50,9449 + j 891,450	1,23e-1	168	735,9	-84,8538 + j 4623,71	6,47e-2	-23,9
156,5	-13,0185 + j 983,265	3,40e-4	62,0	743,3	-406,295 + j 4670,28	7,96e-1	-28,8
156,9	-111,162 + j 986,133	3,60e-1	46,1	752,1	-41,0108 + j 4725,85	3,02e-2	21,2
192,5	-36,3670 + j 1209,41	7,08e-2	166	797,6	-63,2047 + j 5011,34	6,78e-3	-151
202,7	-20,5403 + j 1273,36	2,40e-3	-43,9	807,4	-168,025 + j 5072,83	9,35e-2	-38,2
206,7	-86,3668 + j 1298,96	3,26e-1	62,3	827,2	-588,081 + j 5197,29	8,08e-1	117
215,3	-87,7465 + j 1352,79	5,02e-1	-166	844,1	-91,0441 + j 5303,76	2,32e-1	18,6
223,3	-45,2045 + j 1403,14	1,27e-1	91,4	845,8	-44,5029 + j 5314,57	3,07e-2	-125
243,7	-48,0713 + j 1531,09	1,43e-2	152	872,6	-130,998 + j 5482,44	8,00e-2	3,65
255,1	-57,8266 + j 1602,67	9,51e-2	64,5	903,7	-166,834 + j 5678,42	1,01e-1	-7,94
269,5	-55,6726 + j 1693,48	4,46e-2	-154	926,4	-16,4634 + j 5820,97	1,81e-4	57,9
285,6	-75,4767 + j 1794,77	2,35e-1	77,0	958,0	-6,12594 + j 6019,51	2,33e-4	3,00
290,0	-15,6545 + j 1822,08	1,02e-3	141	993,6	-89,6985 + j 6242,98	1,81e-1	175
314,6	-98,9505 + j 1976,85	5,94e-1	84,7	1012,0	-142,382 + j 6358,38	3,26e-2	-11,9
324,7	-83,6263 + j 2039,97	8,41e-1	-179	1074,8	-141,592 + j 6753,36	1,15e-3	-16,8
342,2	-74,7750 + j 2150,41	5,09e-1	-148	1191,3	-52,2965 + j 7485,44	3,65e-3	178
352,6	-155,369 + j 2215,47	8,14e-1	-119	1406,0	-45,7954 + j 8834,24	6,23e-3	1,48
381,2	-105,847 + j 2395,40	1,59e-1	-48,5	1487,3	-351,803 + j 9345,13	1,22e-3	-26,2
401,3	-81,3241 + j 2521,75	1,80e-1	-45,0				

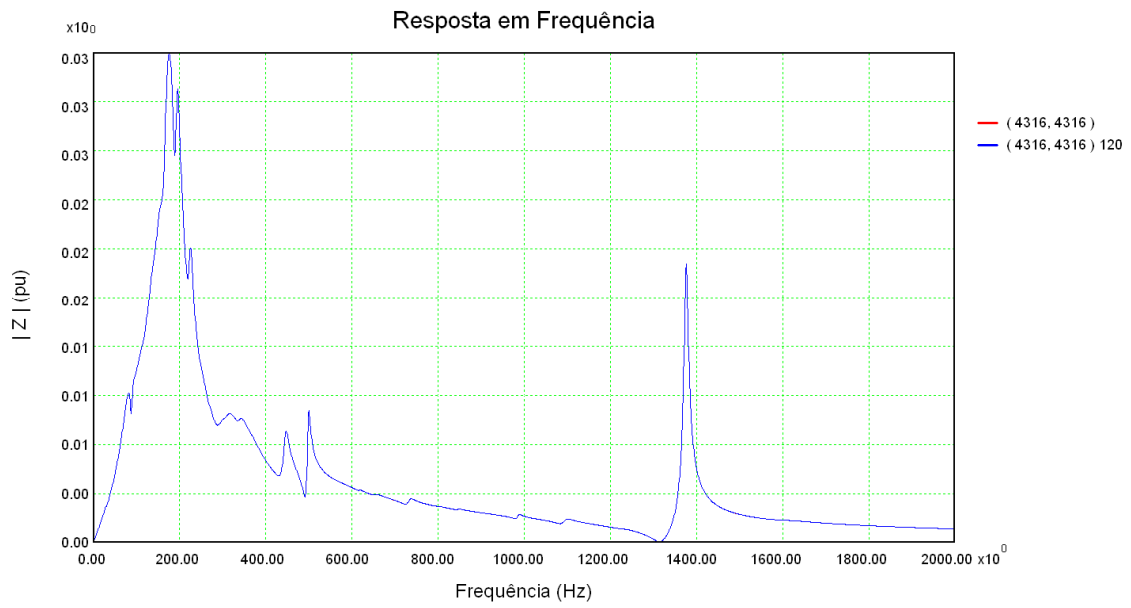


Figura 193: Resposta em frequência do módulo da impedância da barra 4316 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)

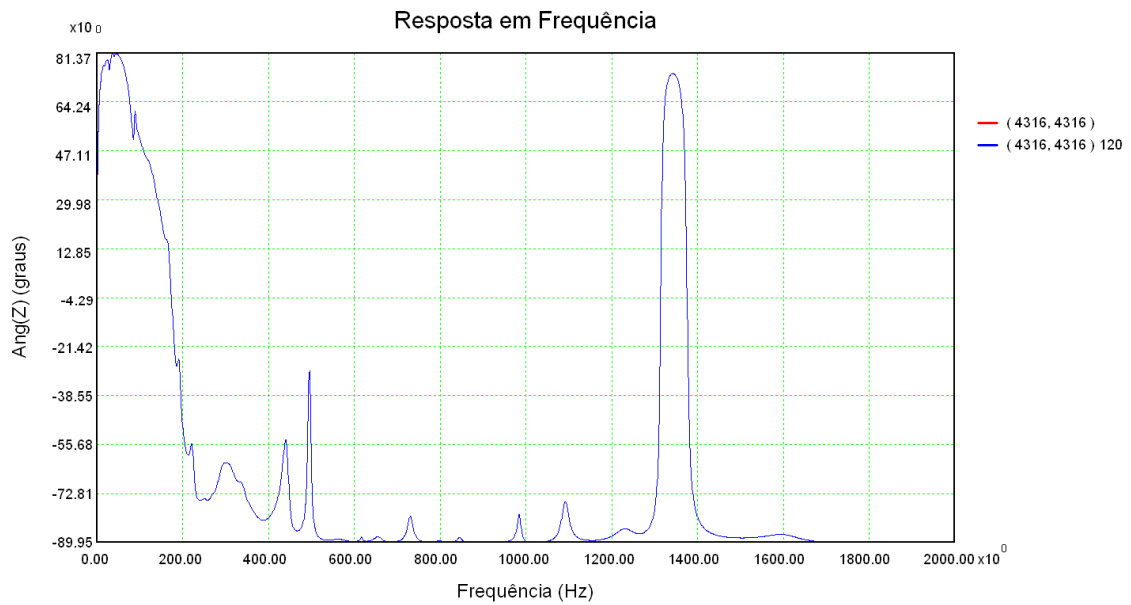


Figura 194: Resposta em frequência do ângulo da impedância da barra 4316 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)

Tabela 61: Conjunto de polos e resíduos da função de transferência (4316,4316)

Freq (Hz)	Polo	Resíduo		Freq (Hz)	Polo	Resíduo	
		Mód.	Âng.			Mód.	Âng.
0,0	-2,28320	4,25e-4	180	350,4	-195,468 + j 2201,88	3,60e-1	-7,32
0,0	-68,5772	3,91e-3	180	407,7	-201,617 + j 2561,67	6,89e-2	37,9
10,4	-1,18862 + j 65,2360	7,78e-5	-37,9	441,9	-180,911 + j 2776,37	6,49e-2	46,2
18,2	-14,9473 + j 114,041	7,19e-4	25,6	444,9	-45,6109 + j 2795,38	1,48e-1	-29,8
29,4	-11,7174 + j 184,980	2,57e-3	-15,7	498,0	-23,5081 + j 3128,84	1,37e-1	-4,01
33,1	-11,3649 + j 208,009	1,09e-3	-31,6	500,4	-200,607 + j 3144,12	4,29e-3	-102
40,2	-15,7208 + j 252,493	1,41e-3	3,42	566,5	-153,340 + j 3559,60	1,32e-2	-17,0
87,7	-19,8513 + j 550,811	5,95e-2	-133	594,1	-40,9475 + j 3732,95	3,86e-4	63,8
88,3	-113,629 + j 554,783	6,22e-1	18,7	600,4	-9,94555 + j 3772,19	1,04e-5	38,3
94,6	-37,8172 + j 594,251	2,44e-2	-82,1	617,1	-20,6092 + j 3877,13	2,07e-3	-4,97
105,3	-140,342 + j 661,684	7,48e-1	71,2	656,8	-70,5090 + j 4127,09	8,57e-3	-15,0
113,5	-24,3035 + j 713,050	3,06e-3	86,9	713,4	-500,629 + j 4482,33	7,09e-3	-36,4
126,6	-58,9139 + j 795,150	1,86e-1	45,2	731,5	-50,5548 + j 4596,20	2,30e-2	-1,38
131,4	-54,6055 + j 825,356	1,61e-1	138	765,4	-143,920 + j 4809,38	1,27e-3	71,6
139,3	-20,0860 + j 875,518	2,22e-3	-50,8	798,3	-62,0165 + j 5015,69	1,90e-3	2,32
149,8	-18,8482 + j 941,111	6,67e-3	-17,6	846,0	-44,6394 + j 5315,58	3,43e-3	-6,51
154,4	-15,4356 + j 969,929	7,54e-3	-46,9	847,6	-291,940 + j 5325,53	8,08e-4	84,8
164,1	-43,9518 + j 1031,05	2,64e-1	177	956,8	-12,1658 + j 6011,47	4,03e-6	99,3
172,6	-29,9531 + j 1084,65	1,10e-2	-122	985,5	-33,2244 + j 6192,28	1,04e-2	-9,60
177,2	-8,24115 + j 1113,54	7,47e-4	60,5	1089,7	-43,3918 + j 6846,68	1,85e-4	-75,2
176,3	-124,353 + j 1107,48	4,11e+0	-16,4	1093,2	-64,7868 + j 6868,82	2,43e-2	1,45
192,4	-34,7461 + j 1208,83	4,03e-1	46,9	1129,8	-521,775 + j 7098,48	2,58e-3	-129
204,1	-19,1061 + j 1282,65	6,04e-3	94,8	1139,6	-82,7218 + j 7160,61	1,64e-4	-9,50
223,5	-52,4791 + j 1403,99	8,59e-2	-166	1231,9	-175,112 + j 7740,55	1,38e-2	-14,2
223,8	-35,7875 + j 1406,24	2,34e-1	-10,2	1276,8	-11,1151 + j 8022,66	2,59e-5	65,3
252,6	-47,1625 + j 1587,39	1,84e-2	-30,6	1375,7	-30,9487 + j 8644,03	5,67e-1	1,17
272,6	-40,3098 + j 1712,52	7,90e-3	-47,6	1385,6	-18,4363 + j 8706,17	5,79e-6	12,3
296,3	-72,7148 + j 1861,76	6,41e-2	-28,9	1551,2	-6,18037 + j 9746,19	2,29e-6	-14,0
312,3	-111,493 + j 1962,50	2,13e-1	-24,4	1606,5	-330,880 + j 10094,2	2,49e-2	-24,6
327,7	-80,9251 + j 2059,11	4,00e-2	-87,1	4620,9	-5165,15 + j 29033,9	2,03e+0	38,7
342,1	-72,4138 + j 2149,46	7,98e-2	-47,5				

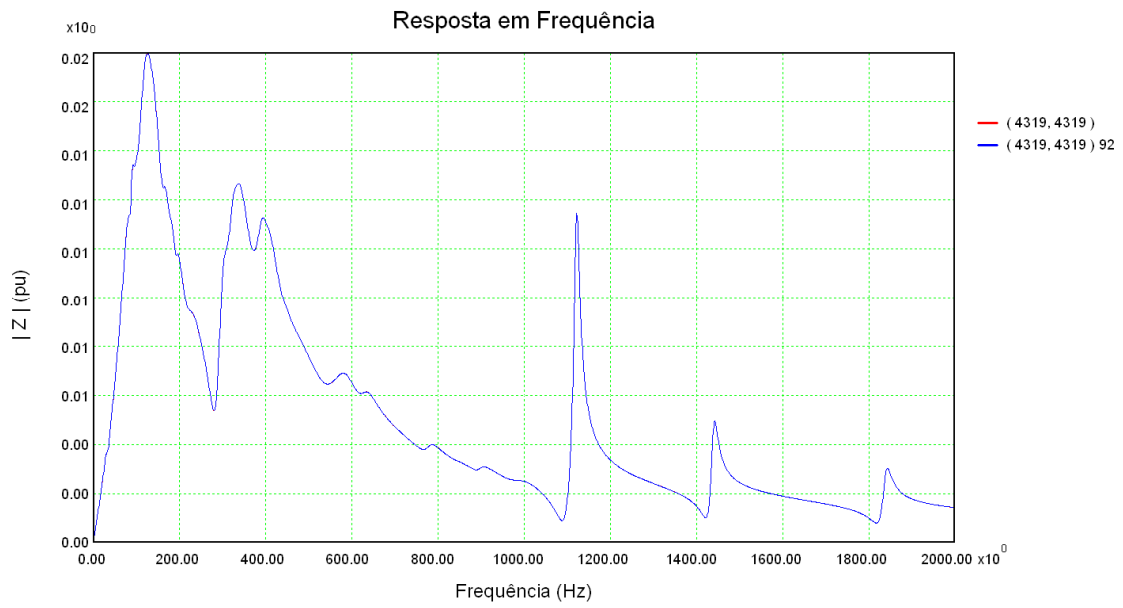


Figura 195: Resposta em frequência do módulo da impedância da barra 4319 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)

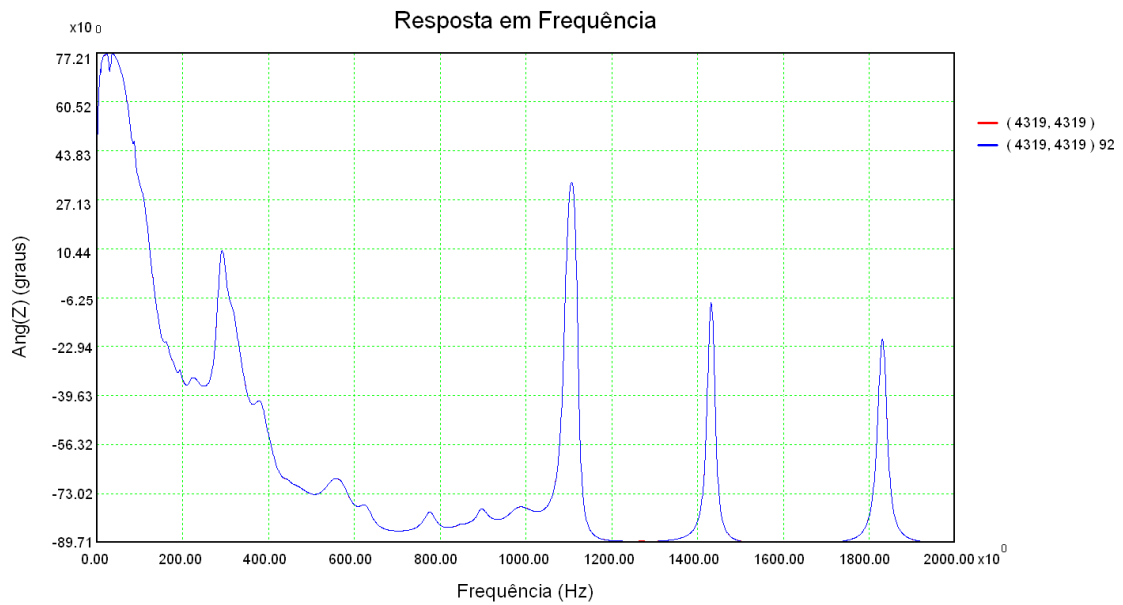


Figura 196: Resposta em frequência do ângulo da impedância da barra 4319 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)

Tabela 62: Conjunto de polos e resíduos da função de transferência (4319,4319)

Freq (Hz)	Polo	Resíduo		Freq (Hz)	Polo	Resíduo	
		Mód.	Âng.			Mód.	Âng.
0,0	-2,49878	3,71e-4	180	317,6	-653,507 + j 1995,39	4,69e+0	-60,0
0,0	-16,7426	1,54e-3	180	334,5	-69,7398 + j 2101,46	5,15e-2	94,9
0,0	-170,928	1,72e-2	180	368,2	-72,3683 + j 2313,44	2,45e-2	75,5
0,0	-3107,87	1,66e-1	180	387,0	-106,458 + j 2431,83	3,28e-1	13,9
10,1	-1,05860 + j 63,6404	7,95e-5	-11,6	406,1	-89,9503 + j 2551,49	8,58e-2	15,6
20,3	-16,0123 + j 127,473	4,03e-4	-23,0	445,2	-52,0737 + j 2797,53	7,51e-3	0,28
29,5	-13,5484 + j 185,584	4,40e-3	-8,46	466,4	-272,173 + j 2930,19	2,19e-1	9,78
33,3	-8,95509 + j 209,369	1,96e-3	-39,4	494,0	-19,7228 + j 3103,84	6,84e-5	76,2
87,7	-19,8289 + j 550,893	3,57e-2	143	558,3	-139,921 + j 3507,82	5,69e-2	-86,0
88,4	-118,686 + j 555,736	8,97e-1	-6,75	572,4	-195,775 + j 3596,51	3,23e-1	-9,53
96,0	-42,6351 + j 603,454	2,51e-2	108	629,3	-131,124 + j 3954,09	8,83e-2	-10,4
120,1	-178,731 + j 754,770	2,85e+0	34,7	662,3	-815,448 + j 4161,36	1,71e-1	33,7
123,8	-27,6280 + j 777,841	4,35e-3	-148	778,8	-109,402 + j 4893,48	4,54e-2	-9,37
137,7	-60,4928 + j 865,025	4,73e-2	84,8	795,1	-38,7421 + j 4996,07	4,48e-4	46,8
164,2	-41,4996 + j 1031,64	4,68e-2	43,7	848,1	-45,3720 + j 5328,68	9,07e-4	-17,7
170,8	-36,4028 + j 1073,07	3,07e-3	16,4	871,0	-499,519 + j 5472,37	1,33e-1	6,18
179,4	-101,392 + j 1126,94	1,62e-1	41,8	896,0	-92,3978 + j 5629,84	2,18e-2	25,1
192,8	-35,3123 + j 1211,59	2,91e-2	94,2	981,9	-249,427 + j 6169,74	7,48e-2	22,0
220,5	-31,9024 + j 1385,47	3,66e-3	19,4	1120,8	-42,0655 + j 7042,16	4,49e-1	-5,58
222,0	-109,320 + j 1395,09	1,21e-1	98,5	1130,0	-536,209 + j 7100,17	2,16e-2	103
245,2	-77,5054 + j 1540,51	1,06e-2	-176	1284,2	-127,493 + j 8068,95	8,08e-4	-88,2
289,1	-78,4312 + j 1816,71	4,59e-2	150	1439,2	-49,1944 + j 9042,86	1,66e-1	-3,01
299,1	-116,558 + j 1879,51	1,04e+0	40,6	1811,6	-137,024 + j 11382,8	3,40e-3	52,6
316,4	-115,498 + j 1988,04	8,26e-1	99,7	1838,6	-64,4735 + j 11552,1	1,22e-1	-2,10

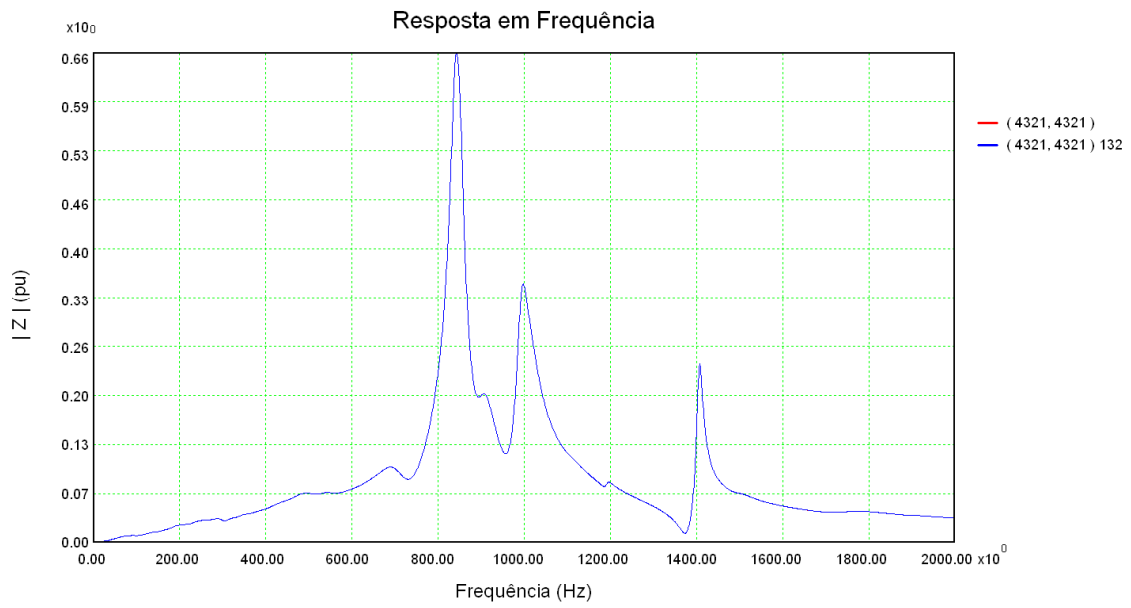


Figura 197: Resposta em frequência do módulo da impedância da barra 4321 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)

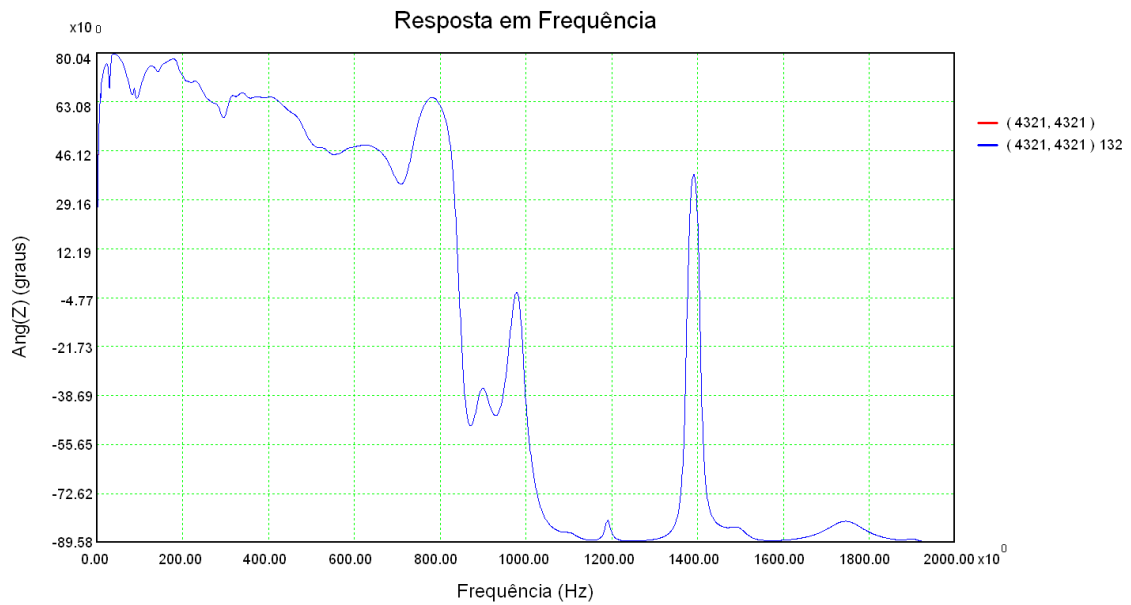


Figura 198: Resposta em frequência do ângulo da impedância da barra 4321 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)

Tabela 63: Conjunto de polos e resíduos da função de transferência (4321,4321)

Freq (Hz)	Polo	Resíduo		Freq (Hz)	Polo	Resíduo	
		Mód.	Âng.			Mód.	Âng.
0,0	-1,42826	2,47e-4	180	537,3	-77,8896 + j 3375,73	9,98e-2	19,9
0,0	-24,3542	1,19e-3	180	553,3	-26,8074 + j 3476,47	1,22e-2	-84,9
10,1	-0,75702 + j 63,4824	1,21e-4	-21,2	578,3	-131,568 + j 3633,78	3,31e-1	175
20,0	-14,6163 + j 125,575	3,95e-4	-24,6	601,6	-23,2410 + j 3780,21	4,72e-4	163
29,6	-13,2797 + j 186,113	1,05e-2	-15,3	653,6	-54,4666 + j 4106,76	3,86e-3	179
33,3	-8,97031 + j 209,308	1,37e-3	-59,3	660,5	-211,023 + j 4149,85	1,08e+0	-57,6
87,6	-19,8411 + j 550,520	2,19e-2	155	702,6	-265,738 + j 4414,34	1,39e+1	-12,4
86,7	-126,252 + j 544,757	5,30e-1	0,49	730,0	-151,113 + j 4586,60	2,30e-1	-69,2
94,0	-29,6711 + j 590,346	3,03e-3	164	748,7	-55,1795 + j 4704,32	2,41e-3	71,8
109,6	-49,7343 + j 688,393	5,57e-3	25,4	798,4	-62,9353 + j 5016,21	2,29e-1	8,77
133,0	-66,7321 + j 835,901	2,30e-2	-47,9	822,8	-347,466 + j 5169,95	7,64e+0	80,1
142,4	-53,7184 + j 894,752	7,13e-2	-6,77	844,1	-86,3753 + j 5303,48	6,14e+1	-9,32
160,8	-95,1231 + j 1010,29	6,14e-2	-18,5	846,1	-44,7437 + j 5316,31	5,09e+0	132
181,6	-40,5049 + j 1141,07	5,16e-3	-174	897,1	-97,5996 + j 5636,89	3,53e-1	156
191,6	-36,2831 + j 1204,11	3,85e-2	29,5	903,5	-173,370 + j 5676,65	1,79e+1	4,56
202,7	-69,5506 + j 1273,34	1,14e-1	35,5	958,1	-6,01700 + j 6019,64	1,51e-3	-10,2
223,3	-51,2096 + j 1403,07	4,72e-2	-63,4	984,0	-22,7791 + j 6182,74	4,07e-4	52,9
240,7	-124,445 + j 1512,35	1,66e-1	76,4	993,5	-90,4104 + j 6242,47	2,09e+1	-9,10
253,0	-49,4522 + j 1589,93	1,24e-2	22,2	1010,9	-149,220 + j 6351,53	1,06e+1	-23,1
271,1	-38,6991 + j 1703,13	1,08e-2	22,4	1064,6	-717,343 + j 6688,92	2,57e+0	-86,6
288,1	-125,981 + j 1810,13	2,68e+0	127	1094,0	-165,384 + j 6873,79	2,75e-1	96,3
288,8	-10,5770 + j 1814,73	1,07e-3	-53,7	1110,5	-154,777 + j 6977,34	5,52e-1	-56,9
294,1	-149,017 + j 1847,82	4,49e+0	-69,4	1191,2	-52,0612 + j 7484,65	5,40e-1	1,56
323,6	-74,9583 + j 2033,38	1,74e-1	-9,20	1295,0	-418,841 + j 8136,71	7,85e-2	-23,9
342,3	-78,9121 + j 2150,58	8,26e-2	157	1378,0	-131,776 + j 8658,07	3,69e-1	53,6
361,0	-115,186 + j 2268,34	2,60e-1	-95,3	1405,9	-45,2229 + j 8833,79	1,03e+1	0,90
360,2	-757,999 + j 2262,99	1,81e+1	10,7	1448,9	-120,658 + j 9103,64	7,77e-2	-10,7
382,2	-47,7928 + j 2401,64	4,38e-3	86,7	1501,5	-169,435 + j 9433,97	7,89e-1	-37,2
404,4	-109,725 + j 2541,17	1,47e-1	-167	1550,5	-5,90693 + j 9742,29	7,62e-5	-17,3
435,9	-74,3838 + j 2738,65	1,42e-2	9,32	1750,4	-372,495 + j 10997,9	2,20e+0	-5,46
463,6	-131,544 + j 2912,83	5,05e-1	-150	1722,0	-2410,11 + j 10819,9	6,76e-1	-149
499,0	-20,9954 + j 3135,25	4,45e-4	82,0	1840,6	-291,676 + j 11564,7	1,12e-2	-8,61
492,4	-520,325 + j 3093,90	2,43e+1	46,0	1900,2	-111,671 + j 11939,1	7,83e-2	7,76
526,6	-225,801 + j 3308,63	2,70e+0	176				

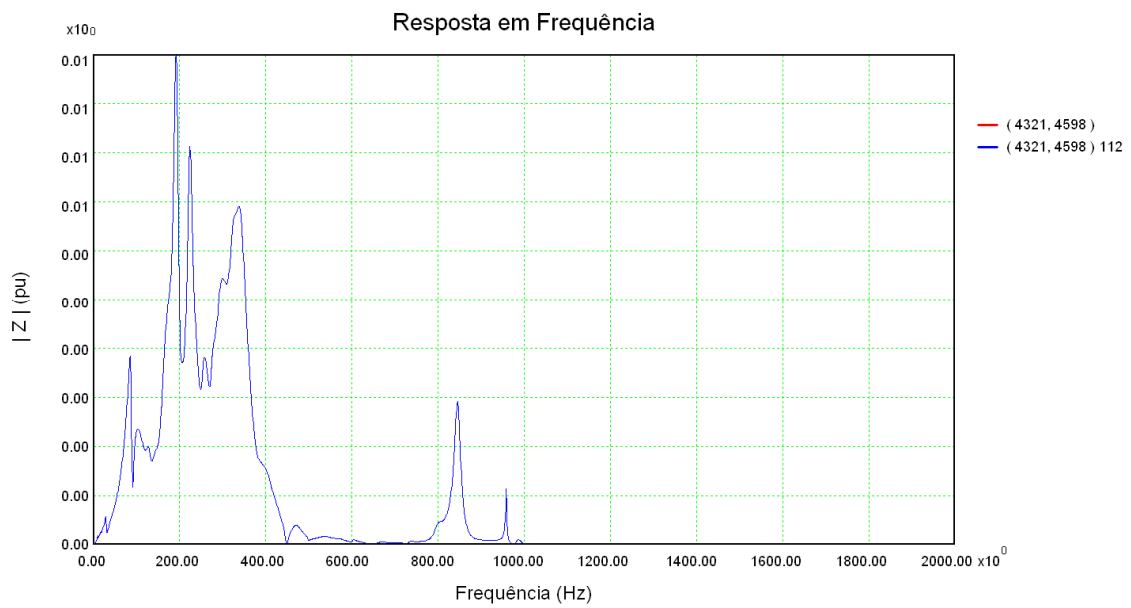


Figura 199: Resposta em frequência do módulo da impedância de transferência entre as barras 4321 e 4598 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)

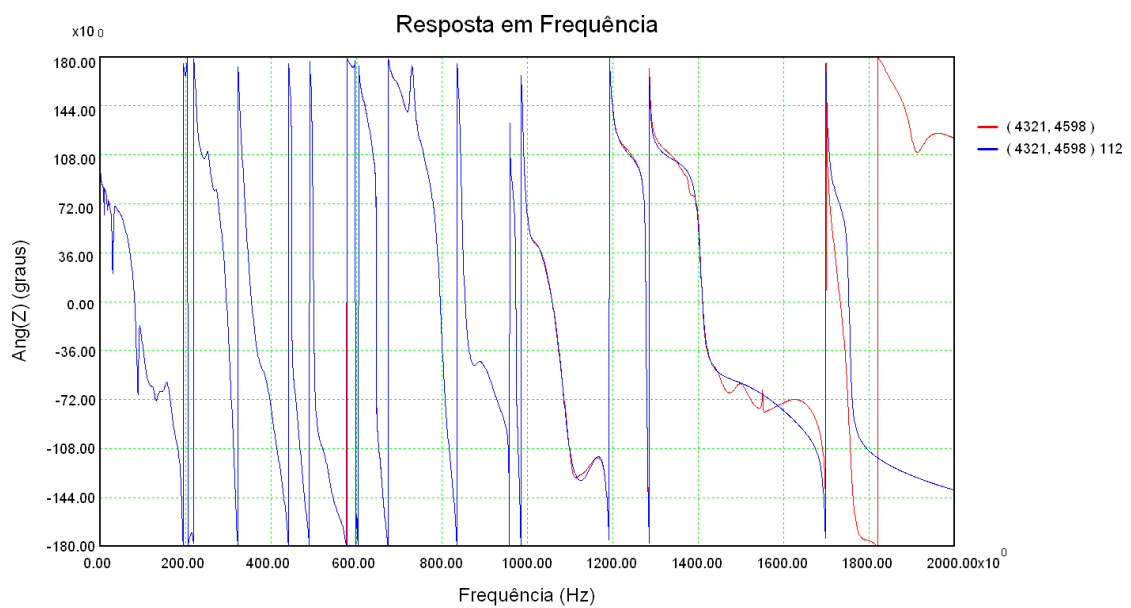


Figura 200: Resposta em frequência do ângulo da impedância de transferência entre as barras 4321 e 4598 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)

Tabela 64: Conjunto de polos e resíduos da função de transferência (4321,4598)

Freq (Hz)	Polo	Resíduo		Freq (Hz)	Polo	Resíduo	
		Mód.	Âng.			Mód.	Âng.
10,2	-0,99258 + j 63,8086	9,06e-5	-21,2	425,7	-107,439 + j 2674,59	3,57e-2	-150
17,5	-7,40313 + j 110,211	3,49e-4	-16,4	444,2	-44,5978 + j 2790,92	9,84e-3	101
29,0	-8,71565 + j 182,301	2,39e-3	-17,2	461,4	-221,906 + j 2899,12	1,73e-1	42,4
31,1	-41,7232 + j 195,306	5,47e-3	-28,2	471,0	-128,841 + j 2959,15	9,78e-2	-141
35,7	-27,0903 + j 224,566	1,96e-3	113	498,0	-23,0248 + j 3129,12	4,91e-3	51,2
87,7	-19,7671 + j 550,903	5,87e-2	-124	386,9	-2024,28 + j 2430,93	2,51e-1	153
89,1	-115,400 + j 559,596	3,98e-1	10,5	538,7	-106,160 + j 3385,00	7,24e-3	-147
99,4	-56,6188 + j 624,682	1,67e-2	95,2	556,1	-29,2808 + j 3494,39	1,81e-4	-155
127,4	-132,211 + j 800,555	1,63e-1	93,7	571,5	-62,5900 + j 3590,96	1,66e-3	-178
129,4	-39,6589 + j 812,965	2,11e-2	-112	602,1	-16,2281 + j 3783,21	9,16e-4	-108
154,9	-61,1379 + j 972,988	5,30e-2	83,0	660,2	-131,695 + j 4148,24	1,97e-2	-99,5
155,9	-11,8021 + j 979,828	8,82e-4	117	687,2	-257,117 + j 4317,83	6,75e-2	-55,7
174,5	-56,3620 + j 1096,25	6,49e-2	-154	692,3	-418,778 + j 4349,90	1,34e-1	96,6
192,5	-34,7735 + j 1209,41	2,50e-1	-171	731,8	-43,5785 + j 4597,91	2,27e-3	-121
197,4	-129,406 + j 1240,54	1,56e-1	-154	749,5	-29,8930 + j 4709,36	2,15e-4	-92,6
203,8	-21,2351 + j 1280,78	8,50e-3	-80,1	798,3	-63,1109 + j 5015,87	2,72e-2	8,67
220,3	-101,459 + j 1384,19	2,05e-1	-142	844,1	-86,6052 + j 5303,67	2,32e-1	-124
223,6	-36,0323 + j 1404,94	1,58e-1	159	846,1	-44,6998 + j 5316,26	2,20e-1	63,2
252,9	-44,9198 + j 1588,76	5,32e-2	-164	888,8	-97,8398 + j 5584,49	1,70e-3	0,19
271,9	-38,6785 + j 1708,23	3,47e-2	-154	912,9	-176,224 + j 5735,70	5,57e-3	-39,7
288,2	-64,6006 + j 1811,02	6,94e-2	133	958,1	-6,08398 + j 6019,65	5,91e-3	175
288,8	-11,5811 + j 1814,33	2,32e-3	-137	985,6	-32,7872 + j 6192,44	4,59e-3	-176
302,7	-114,645 + j 1901,66	9,15e-1	-34,0	994,4	-92,4273 + j 6248,27	3,33e-3	-20,3
323,7	-72,3679 + j 2033,62	4,05e-1	162	1085,0	-126,072 + j 6817,47	8,85e-4	-84,5
341,5	-82,2683 + j 2145,55	4,59e-1	51,0	1190,8	-53,8862 + j 7481,75	3,71e-4	-172
359,2	-99,7167 + j 2256,66	1,18e-1	-50,3	1277,1	-10,6442 + j 8024,28	2,92e-5	-18,6
384,7	-69,8979 + j 2417,00	1,51e-2	31,3	1405,5	-57,9180 + j 8831,01	9,22e-5	19,4
405,6	-88,4974 + j 2548,42	3,96e-2	-113	1698,8	-30,9500 + j 10673,7	9,29e-6	161

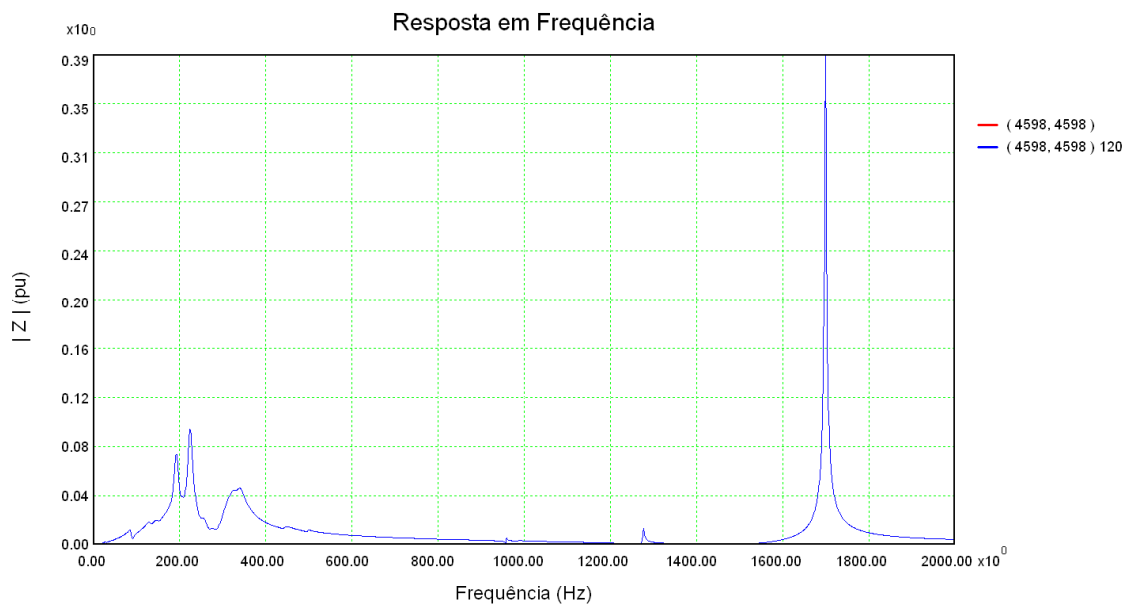


Figura 201: Resposta em frequência do módulo da impedância da barra 4598 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)

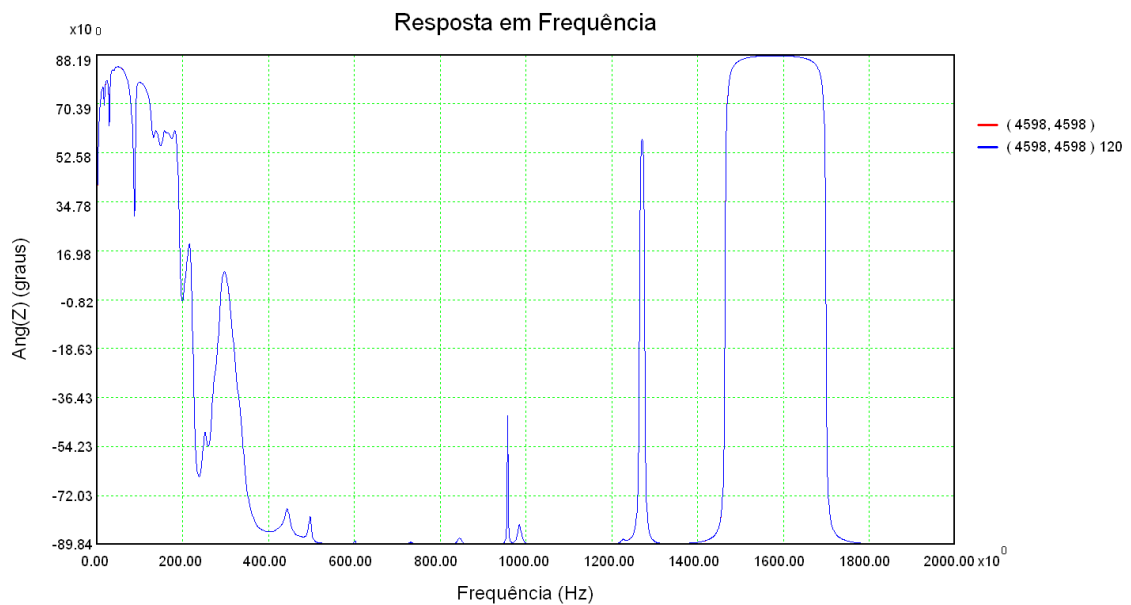


Figura 202: Resposta em frequência do ângulo da impedância da barra 4598 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)

Tabela 65: Conjunto de polos e resíduos da função de transferência (4598,4598)

Freq (Hz)	Polo	Resíduo		Freq (Hz)	Polo	Resíduo	
		Mód.	Âng.			Mód.	Âng.
0,0	-2,34262	5,39e-4	180	323,0	-65,0135 + j 2029,55	7,15e-1	-15,2
0,0	-62,0858	4,57e-3	180	341,6	-79,8470 + j 2146,32	1,83e+0	-73,2
10,2	-0,46043 + j 64,2717	4,13e-5	-39,5	342,2	-133,680 + j 2150,25	2,29e+0	41,7
17,1	-7,58258 + j 107,386	2,21e-3	11,0	365,3	-151,619 + j 2295,04	3,28e-1	-153
27,0	-11,5502 + j 169,599	1,07e-3	-49,3	390,7	-51,5057 + j 2454,64	4,70e-3	-76,1
29,1	-7,58898 + j 183,055	7,87e-3	-2,64	416,4	-61,6352 + j 2616,10	7,97e-3	99,1
40,6	-13,2667 + j 255,128	9,30e-4	-8,25	444,5	-46,3107 + j 2792,87	9,94e-2	10,2
87,7	-19,8903 + j 550,891	1,60e-1	-40,5	447,8	-125,873 + j 2813,55	1,32e-1	-83,9
88,6	-166,399 + j 556,379	3,79e-1	97,8	474,2	-156,950 + j 2979,24	7,75e-2	-31,1
95,8	-78,1643 + j 601,661	7,61e-2	-55,6	498,0	-23,5641 + j 3128,78	4,46e-2	-10,7
116,4	-40,1623 + j 731,127	6,76e-3	58,3	520,8	-297,569 + j 3272,26	4,70e-2	-8,05
130,0	-38,2305 + j 816,943	1,91e-1	10,2	566,7	-68,1248 + j 3560,69	7,08e-4	51,3
136,5	-51,1836 + j 857,612	7,88e-2	124	593,7	-16,5299 + j 3730,26	7,05e-5	-20,4
146,0	-29,4711 + j 917,463	2,57e-2	-45,5	602,0	-16,8303 + j 3782,75	3,41e-3	-3,22
151,5	-28,8263 + j 951,924	8,55e-2	-85,2	617,4	-18,3729 + j 3879,09	3,72e-4	-16,6
154,1	-17,1572 + j 968,214	2,25e-2	-24,4	663,6	-98,3626 + j 4169,60	5,74e-3	-32,5
160,8	-30,9360 + j 1010,42	2,84e-2	-23,1	731,8	-52,4354 + j 4597,81	6,36e-3	-2,31
171,3	-188,337 + j 1076,39	1,91e+0	0,97	754,5	-38,8445 + j 4740,69	1,95e-4	-10,7
175,4	-42,6121 + j 1102,05	1,21e-1	-10,2	774,8	-124,111 + j 4868,35	2,31e-3	-3,37
192,4	-35,0515 + j 1209,15	1,86e+0	20,7	798,5	-61,6139 + j 5016,91	3,03e-3	6,76
202,2	-74,4341 + j 1270,22	5,20e-1	6,82	846,0	-44,5111 + j 5315,32	9,54e-3	-2,87
203,9	-19,7507 + j 1281,43	6,85e-2	94,7	958,1	-6,08071 + j 6019,65	2,28e-2	-0,23
218,9	-36,4395 + j 1375,12	2,22e-2	-115	985,5	-33,2361 + j 6192,32	1,64e-2	-0,17
223,8	-35,2138 + j 1406,42	2,79e+0	-9,72	1091,0	-40,8955 + j 6854,91	5,86e-4	49,6
242,9	-44,0370 + j 1526,23	8,75e-3	36,2	1091,1	-78,2302 + j 6855,57	1,22e-3	-28,1
253,0	-44,6444 + j 1589,51	3,03e-1	6,25	1219,0	-229,397 + j 7658,95	7,75e-4	33,8
272,7	-37,7096 + j 1713,12	1,18e-1	41,4	1226,0	-33,0265 + j 7703,47	1,28e-3	10,6
273,7	-16,2135 + j 1719,50	3,04e-3	-147	1277,1	-10,8457 + j 8024,47	1,47e-1	-0,74
288,9	-11,3205 + j 1815,50	3,92e-3	121	1385,0	-18,1084 + j 8702,19	5,74e-5	-1,71
290,4	-65,5847 + j 1824,54	7,41e-2	147	1699,4	-11,9446 + j 10677,9	4,82e+0	-0,05
311,2	-104,369 + j 1955,33	2,13e+0	-0,15				

6.4.1.2 Comparação entre a Rede Completa e o Modelo Reduzido

Neste item é realizada a comparação entre a rede completa do Sistema Interligado Nacional (modelada por todos os seus equipamentos) e os sistemas reduzidos compostos pelo equivalente modal e o equivalente convencional para a vizinhança 2. De modo análogo aos testes apresentados para o sistema IEEE 14 Barras e para o Sistema Sul-Sudeste + Industrial, o objetivo principal da comparação é avaliar a qualidade do equivalente modal acoplado à rede interna. Como objetivo secundário, a resposta em frequência do sistema reduzido utilizando equivalentes convencionais também é apresentada para que se possa comparar a sua aplicação frente à rede completa e ao sistema reduzido composto pelo equivalente modal. Estas comparações são feitas utilizando as respostas em frequências do módulo e do ângulo das impedâncias vistas das barras de fronteira (impedâncias próprias e de transferência).

As barras escolhidas para a comparação são barras consideradas importantes na área de estudo. Optou-se por monitorar as barras 5202 (ARARA2-SP500) que é a barra piloto, a barra 4316 (ESTRE2-MG500) que é a chegada do elo de corrente contínua vindo de Belo Monte, em Minas Gerais, a barra 4319 (TRIODC-RJ500) que é a chegada do elo de corrente contínua vindo de Belo Monte, no Rio de Janeiro, e por fim a barra 3690 (IBIUNA-SP500) que é próxima da chegada do elo de corrente contínua vindo de Itaipu. Serão analisadas o módulo e o ângulo das funções de transferência próprias e de transferências apresentadas na Tabela 66.

Tabela 66: Funções de transferências para a segunda vizinhança escolhidas para comparação entre o sistema completo e o sistema reduzido

FTs Analisadas	
Barra De	Barra Para
5202	5202
5202	3690
5202	4316
5202	4319
3690	3690
3690	4316
3690	4319
4316	4316
4316	4319
4319	4319

Como apresentado na comparação entre a rede externa completa e a representada pelo modelo modal, em algumas faixas de frequência em que o valor do módulo da impedância era muito pequeno (da ordem de grandeza do erro do Método do Ajuste Vetorial), o valor do ângulo apresentava algumas discrepâncias. Para avaliar este comportamento na comparação do sistema completo com o sistema reduzido formado pela rede interna e pelo equivalente modal, foram escolhidas duas funções de transferência para se realizar a comparação exclusivamente entre o modelo completo e o modelo modal (sem considerar a comparação com o sistema reduzido formado pelo equivalente convencional). Das duas funções de transferência, uma não apresenta a discrepância e outra apresenta. O objetivo é mostrar que as diferenças são explicadas pelo mesmo motivo, valores de impedância muito pequenos, da ordem de grandeza do erro do Método do Ajuste Vetorial.

A primeira comparação realizada foi em relação à barra 4316. Foram analisados o módulo e o ângulo da impedância vista desta barra. As curvas em vermelho são da resposta em frequência do sistema elétrico completo. As curvas em azul são da resposta em frequência do sistema reduzido (rede interna mais equivalente modal). Esta comparação pode ser visualizada na Figura 203 e na Figura 204. Pode-se notar que a perfeita coincidência entre os traçados.

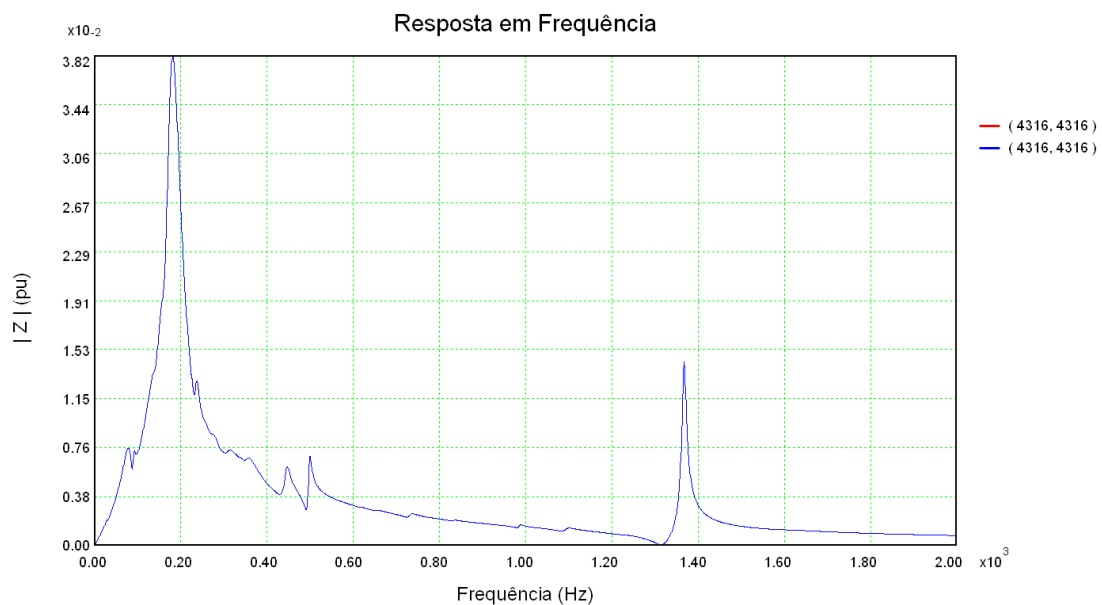


Figura 203: Resposta em frequência do módulo da impedância da barra 4316 considerando a rede completa (vermelho) e o sistema reduzido considerando o equivalente modal (azul)

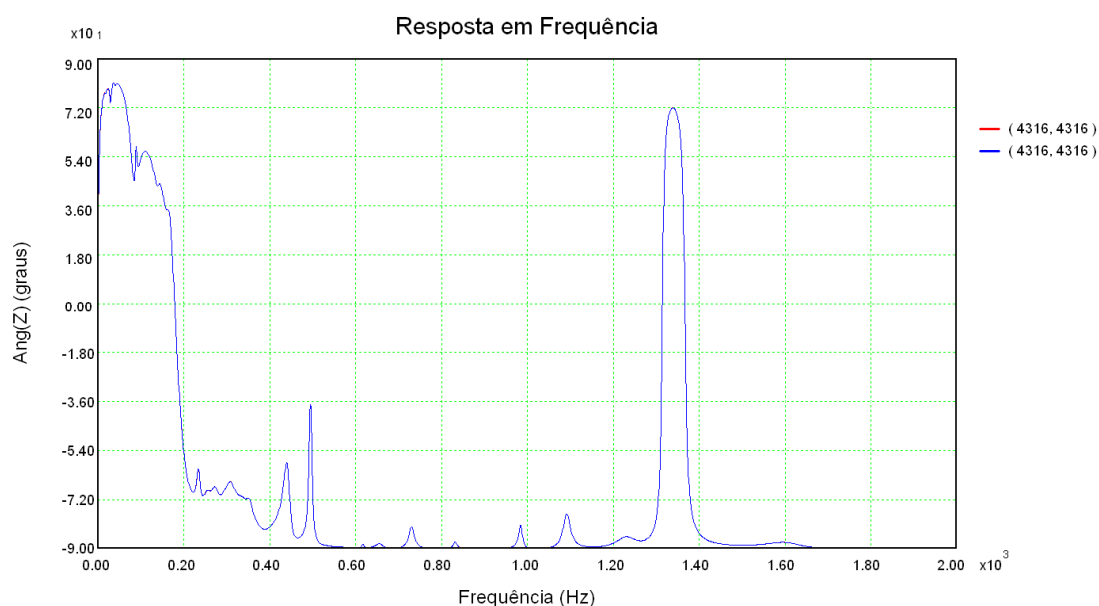


Figura 204: Resposta em frequência do ângulo da impedância da barra 4316 considerando a rede completa (vermelho) e o sistema reduzido considerando o equivalente modal (azul)

Já para a função de transferência entre as barras 3690 e 4319, pode-se visualizar uma grande discrepância na resposta em frequência do ângulo da impedância (Figura 206) a partir de 800 Hz. Mas pelo traçado do módulo (Figura 205), pode-se visualizar que o valor do módulo da impedância é praticamente nulo para frequências a partir de 800 Hz. Para comprovar que as diferenças são devidas a estes valores baixos de impedância, é realizada ainda a comparação entre a resposta em frequência da parte real e da parte imaginária da impedância de transferência entre as barras 3690 e 4319. Estes traçados podem ser visualizados na Figura 207 e na Figura 208. Pode-se observar que não há diferença entre os valores da parte real e imaginária dos traçados da rede completa e do sistema reduzido. Pode-se observar também que os valores da parte real e imaginária da impedância de transferência são praticamente nulos para frequências maiores que 800 Hz.

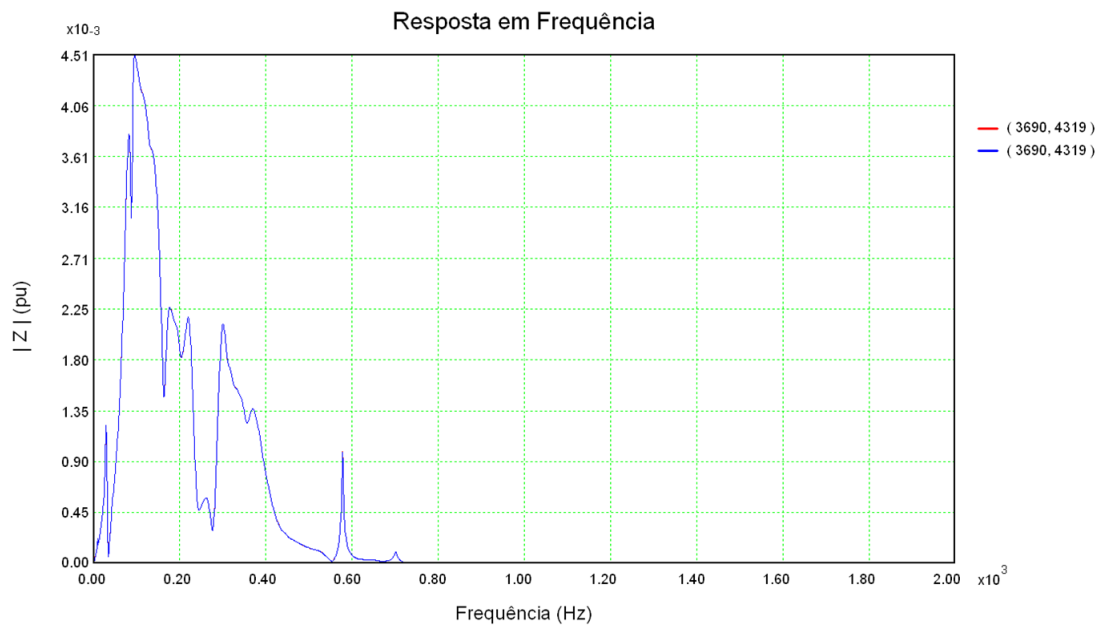


Figura 205: Resposta em frequência do módulo da impedância de transferência entre as barras 3690 e 4319 considerando a rede completa (vermelho) e o sistema reduzido considerando o equivalente modal (azul)

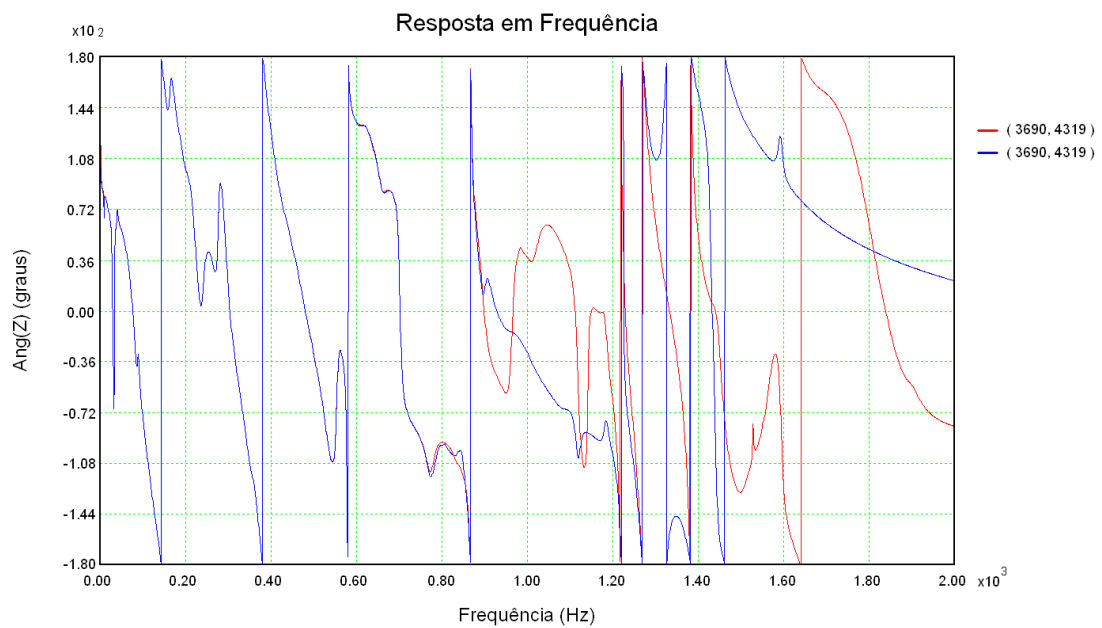


Figura 206: Resposta em frequência do ângulo da impedância de transferência entre as barras 3690 e 4319 considerando a rede completa (vermelho) e o sistema reduzido considerando o equivalente modal (azul)

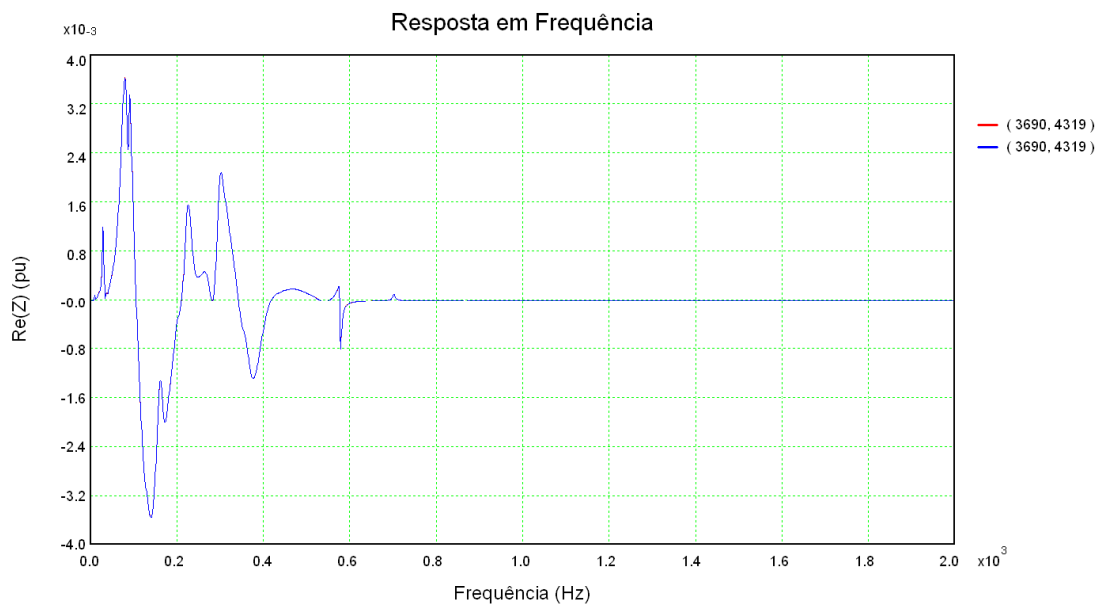


Figura 207: Resposta em frequência da parte real da impedância de transferência entre as barras 3690 e 4319 considerando a rede completa (vermelho) e o sistema reduzido considerando o equivalente modal (azul)



Figura 208: Resposta em frequência da parte imaginária da impedância de transferência entre as barras 3690 e 4319 considerando a rede completa (vermelho) e o sistema reduzido considerando o equivalente modal (azul)

Deste ponto em diante, além da comparação entre os traçados das funções de transferência do sistema completo e do sistema reduzido formado pelo equivalente modal, será incluído o traçado do sistema reduzido formado pelo equivalente convencional. Para cada gráfico, a curva em vermelho é sempre a resposta em frequência do sistema completo. A curva em azul representa a resposta do sistema

reduzido composto pelo equivalente modal e a curva em cor laranja representa a resposta do sistema reduzido composto pelo equivalente convencional. Tanto o sistema reduzido composto pelo equivalente modal quanto pelo equivalente convencional são para a rede interna considerando a segunda vizinhança a partir da barra 5202 (piloto).

Nas comparações dos sistemas completo e reduzidos, será apresentado o traçado do ângulo da impedância somente para a função de transferência da barra piloto (barra 5202). Todos os traçados dos ângulos das outras funções de transferência foram verificados e apresentaram valores muito precisos. Só não serão apresentados no texto devido ao espaço que ocupariam e ao fato de não se conseguir visualizar muito bem a comparação do ângulo quando os traçados para o equivalente convencional também são apresentados nos mesmos gráficos onde já estão apresentados os traçados para o sistema completo e para o sistema reduzido composto pelo equivalente modal.

Logo, na Figura 209 e na Figura 210 são apresentados os traçados do módulo e do ângulo da impedância da barra piloto 5202. Da Figura 211 à Figura 219 são apresentados os traçados do módulo das impedâncias das funções de transferência restantes informadas na Tabela 66.

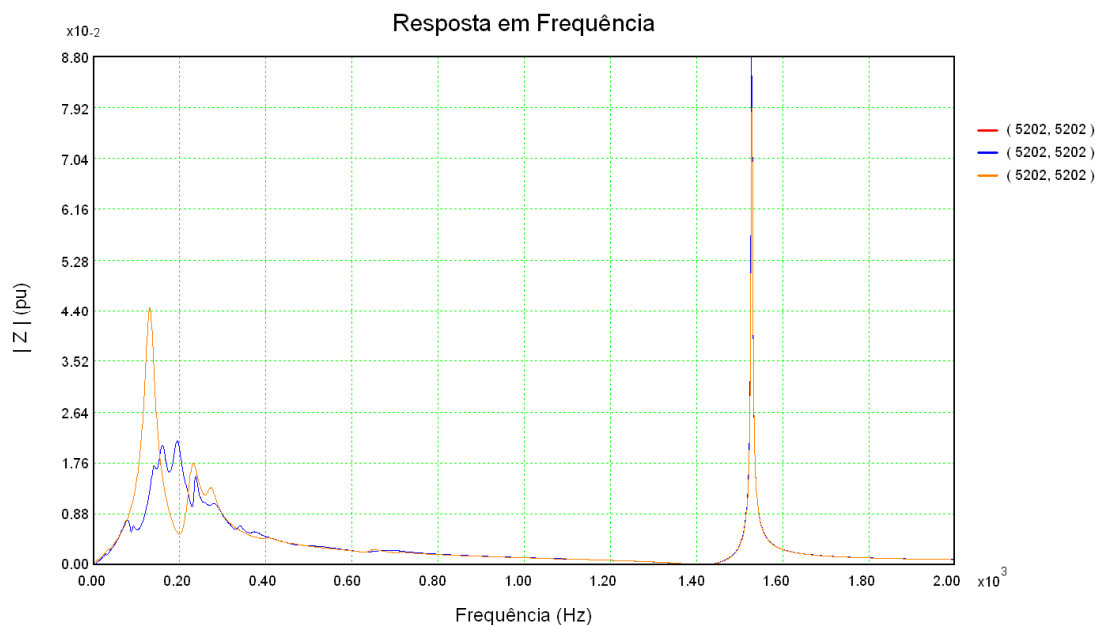


Figura 209: Resposta em frequência do módulo da impedância da barra 5202 considerando a rede completa (vermelho) e os sistemas reduzidos considerando o equivalente modal (azul) e o equivalente convencional (laranja)

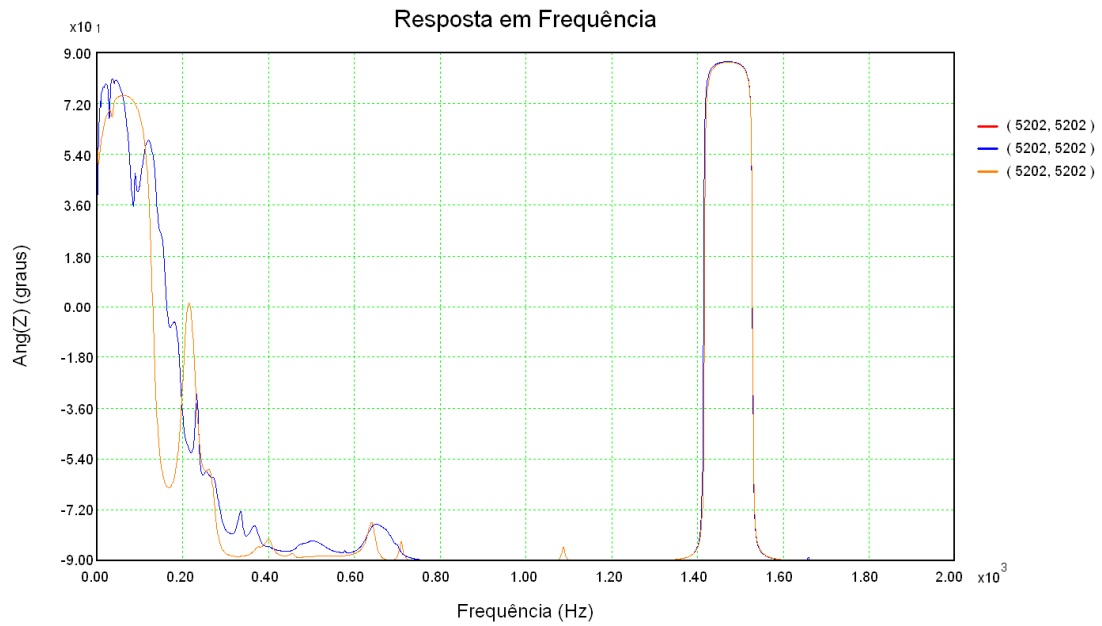


Figura 210: Resposta em frequência do ângulo da impedância da barra 5202 considerando a rede completa (vermelho) e os sistemas reduzidos considerando o equivalente modal (azul) e o equivalente convencional (laranja)

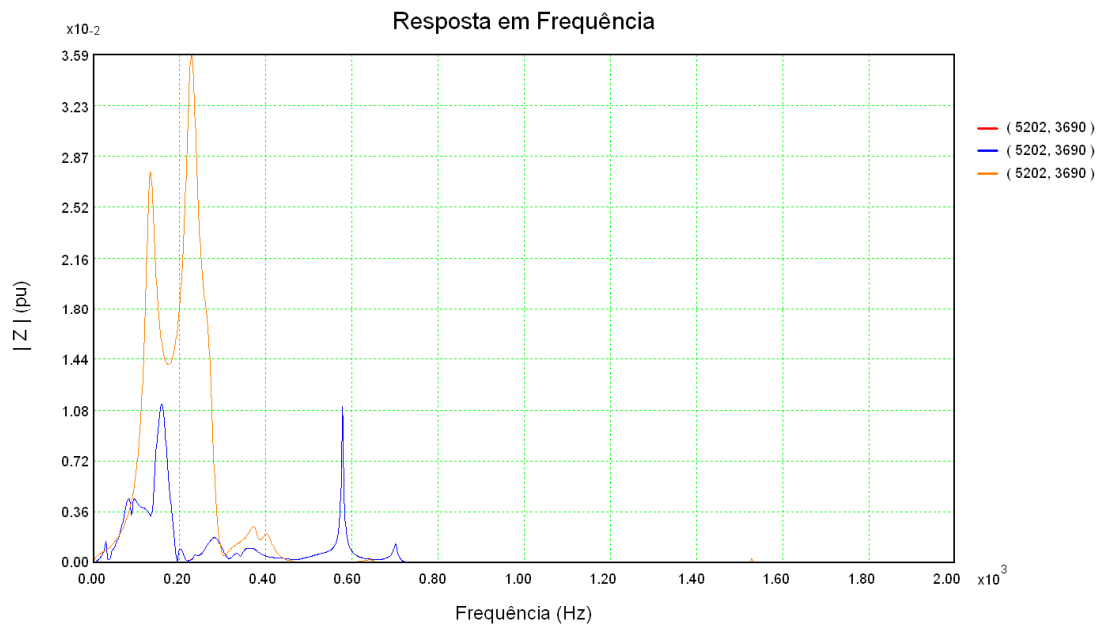


Figura 211: Resposta em frequência do módulo da impedância de transferência entre as barras 5202 e 3690 considerando a rede completa (vermelho) e os sistemas reduzidos considerando o equivalente modal (azul) e o equivalente convencional (laranja)

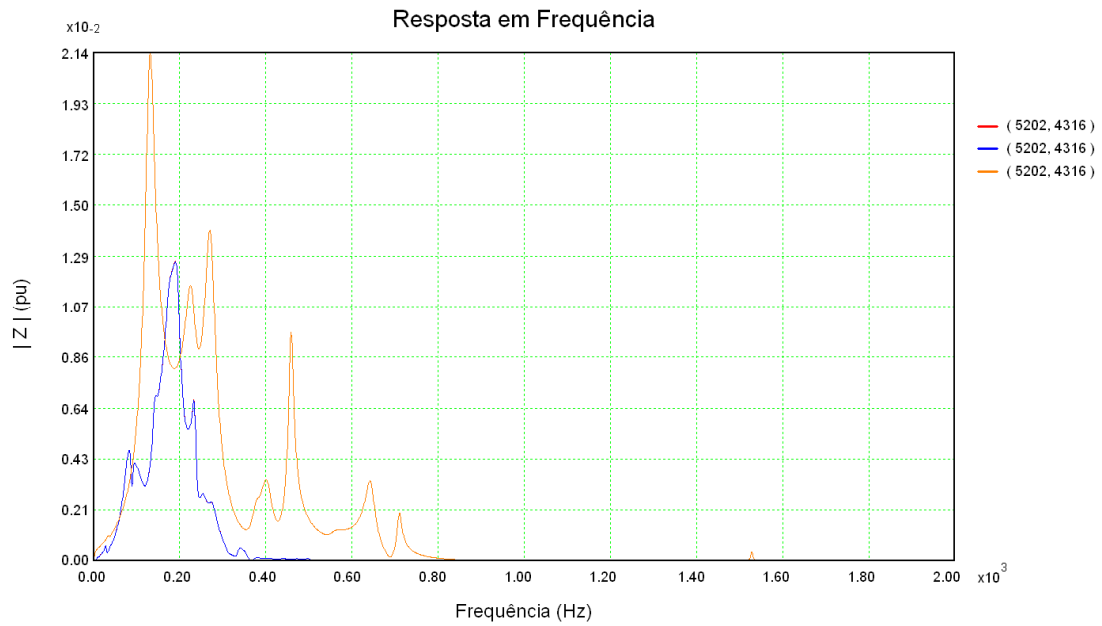


Figura 212: Resposta em frequência do módulo da impedância de transferência entre as barras 5202 e 4316 considerando a rede completa (vermelho) e os sistemas reduzidos considerando o equivalente modal (azul) e o equivalente convencional (laranja)

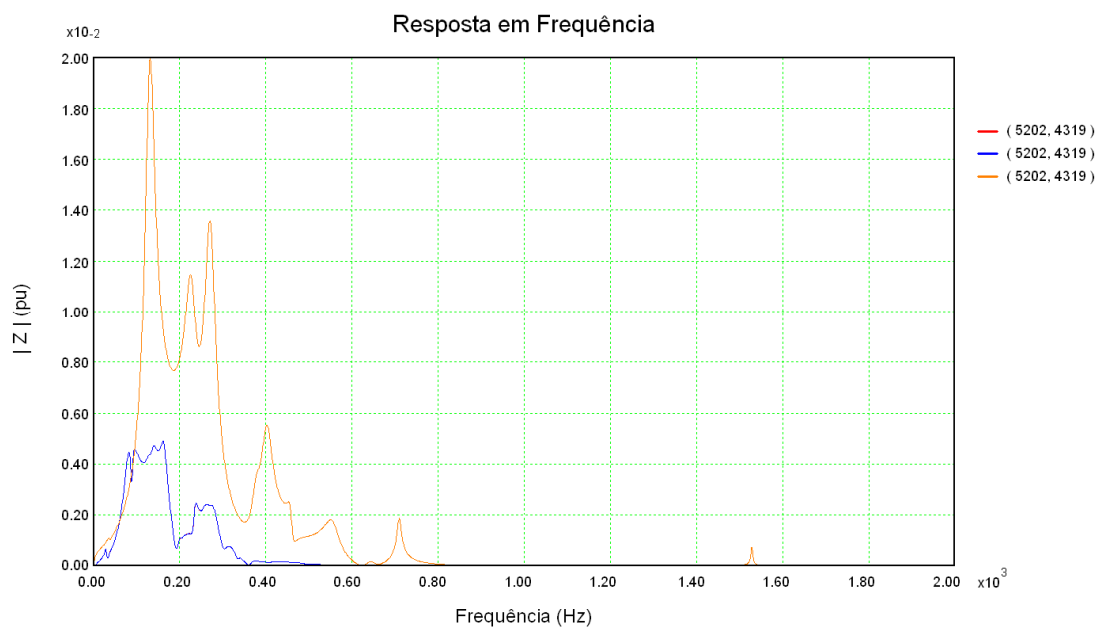


Figura 213: Resposta em frequência do módulo da impedância de transferência entre as barras 5202 e 4319 considerando a rede completa (vermelho) e os sistemas reduzidos considerando o equivalente modal (azul) e o equivalente convencional (laranja)

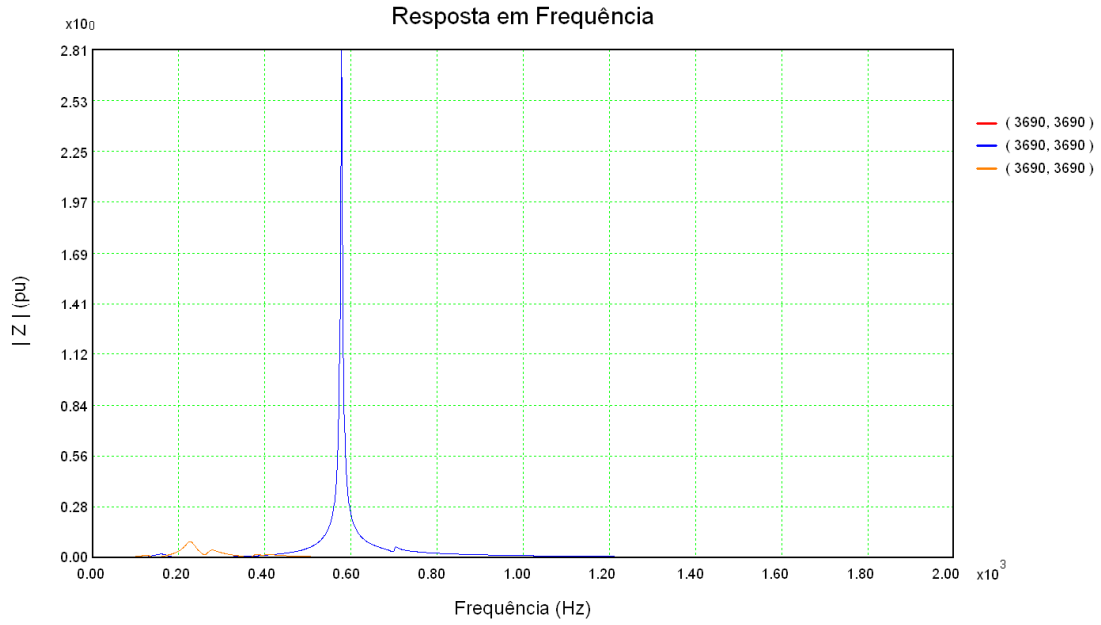


Figura 214: Resposta em frequência do módulo da impedância da barra 3690 considerando a rede completa (vermelho) e os sistemas reduzidos considerando o equivalente modal (azul) e o equivalente convencional (laranja)

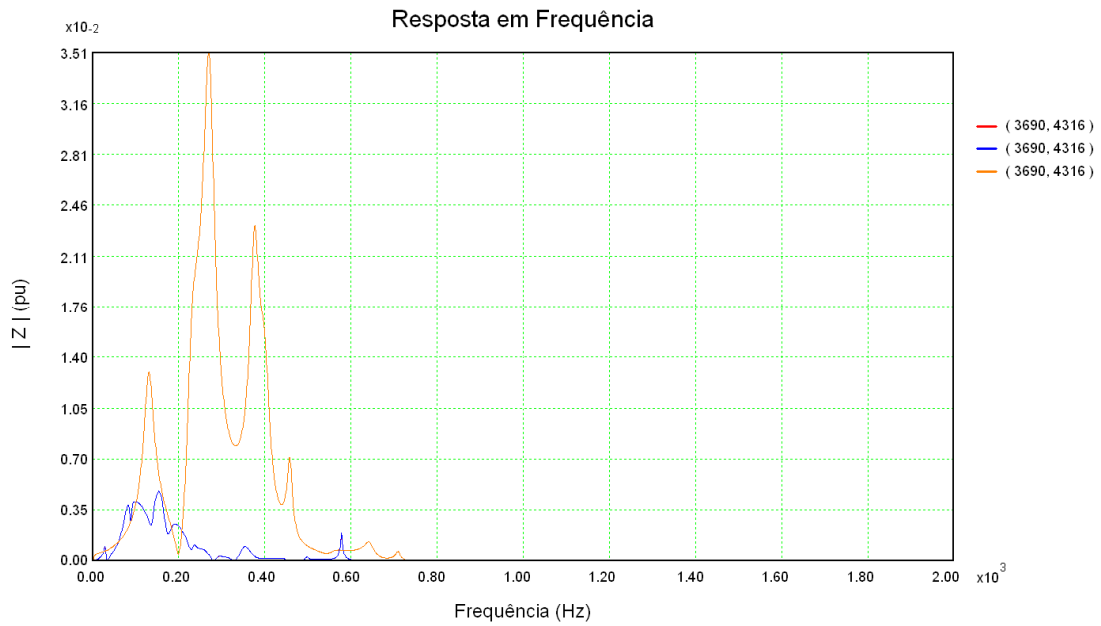


Figura 215: Resposta em frequência do módulo da impedância de transferência entre as barras 3690 e 4316 considerando a rede completa (vermelho) e os sistemas reduzidos considerando o equivalente modal (azul) e o equivalente convencional (laranja)

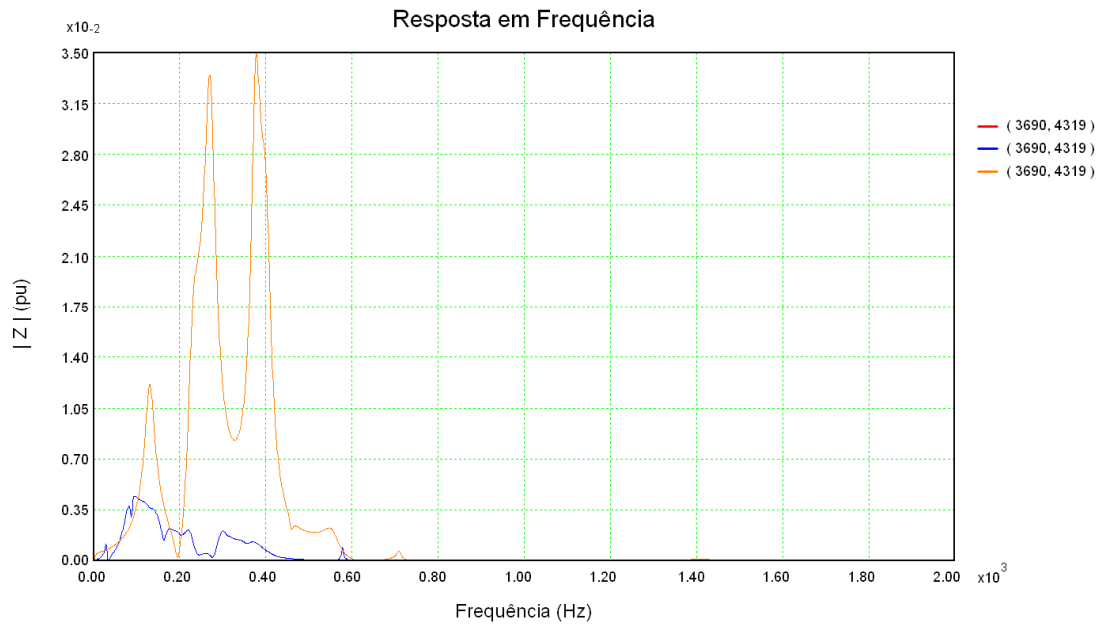


Figura 216: Resposta em frequência do módulo da impedância de transferência entre as barras 3690 e 4319 considerando a rede completa (vermelho) e os sistemas reduzidos considerando o equivalente modal (azul) e o equivalente convencional (laranja)

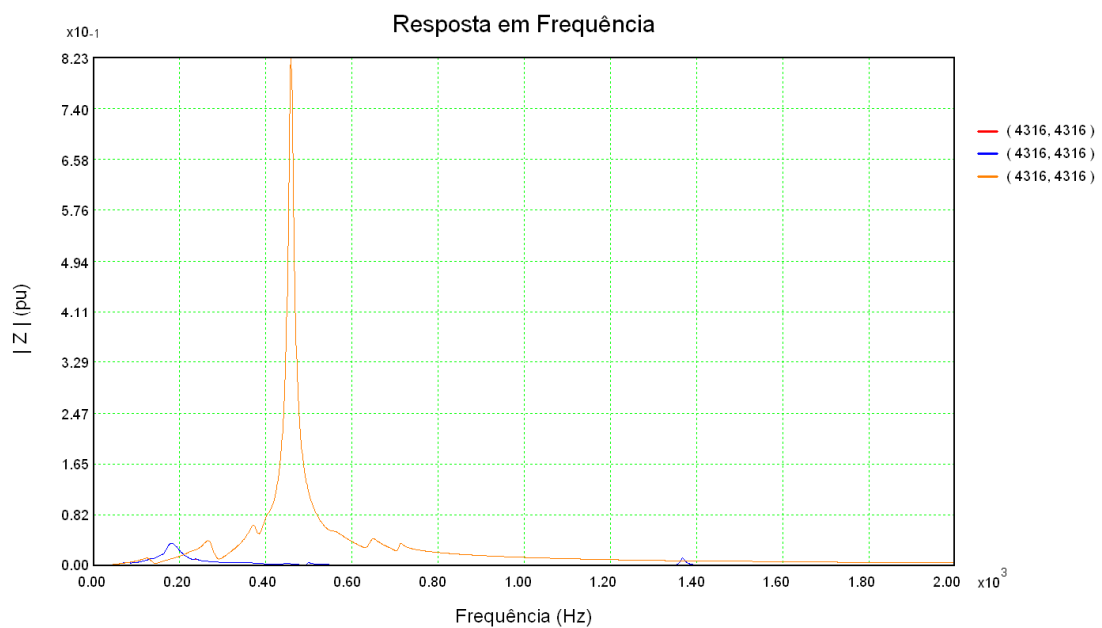


Figura 217: Resposta em frequência do módulo da impedância da barra 4316 considerando a rede completa (vermelho) e os sistemas reduzidos considerando o equivalente modal (azul) e o equivalente convencional (laranja)

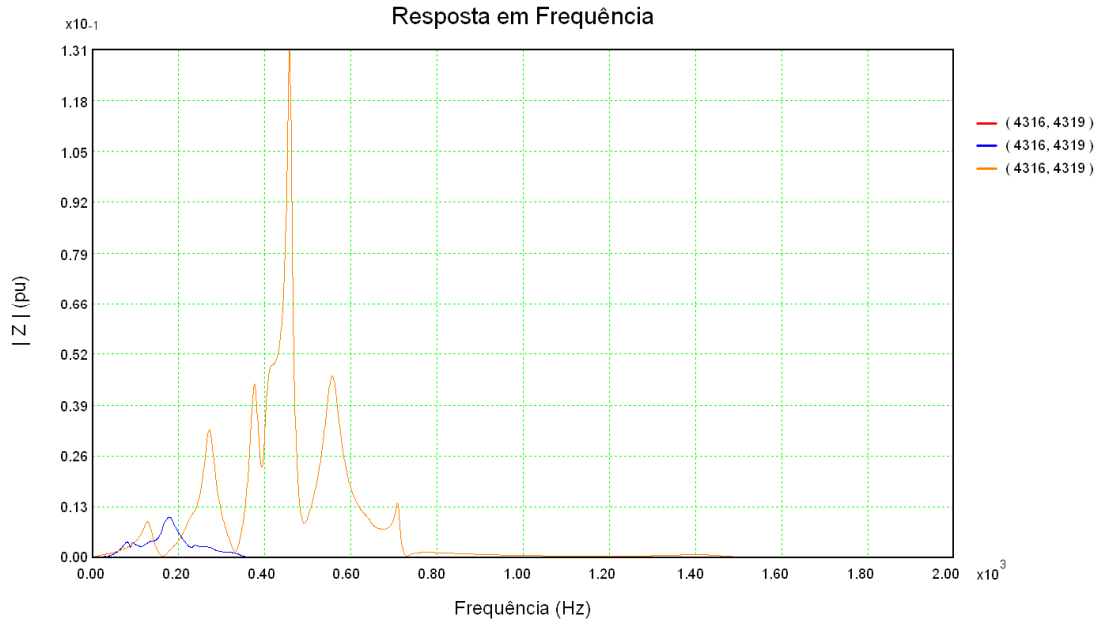


Figura 218: Resposta em frequência do módulo da impedância de transferência entre as barras 4316 e 4319 considerando a rede completa (vermelho) e os sistemas reduzidos considerando o equivalente modal (azul) e o equivalente convencional (laranja)

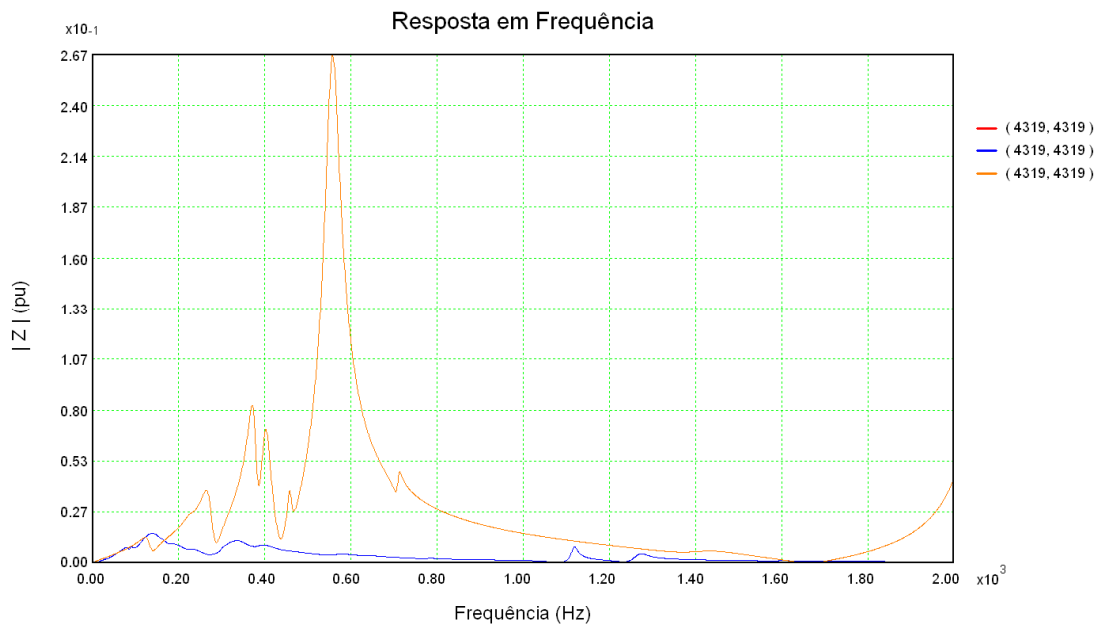


Figura 219: Resposta em frequência do módulo da impedância da barra 4319 considerando a rede completa (vermelho) e os sistemas reduzidos considerando o equivalente modal (azul) e o equivalente convencional (laranja)

Pode-se observar pelas comparações apresentadas que as curvas do sistema completo (vermelho) e as do sistema reduzido composto pelo equivalente modal (azul) são coincidentes, validando que o equivalente modal tem excelente qualidade e representa com total fidelidade o que está além da rede interna.

Pode-se observar também que o equivalente convencional levando-se em consideração apenas a segunda vizinhança como rede interna é ruim e difere em muitas frequências da resposta da rede completa. Se esta configuração de rede interna fosse utilizada com o equivalente convencional, os resultados dos estudos seriam em grande parte errados.

Vale frisar que, com exceção da resposta em frequência da barra 5202 (Figura 209 e Figura 210), todas as respostas em frequências são vistas de barras de fronteira. Realmente era de se esperar que essas respostas não fossem de muita qualidade quando o equivalente em questão fosse o convencional.

Para que se possa visualizar a evolução do equivalente convencional com mais vizinhanças frente ao sistema completo, as mesmas funções de transferência estudadas para os testes considerando a segunda vizinhança serão utilizadas para se fazer as comparações dos testes na terceira vizinhança.

6.4.2 Testes Considerando a Terceira Vizinhança

Na Figura 220 está apresentado o diagrama unifilar do Sistema Interligado Nacional para a terceira vizinhança da barra 5202, Araraquara2-SP, de 500 kV. Para esta terceira vizinhança, a rede interna é composta por 69 barras, sendo que 47 delas são barras de fronteira.

Observa-se que as barras de fronteira da terceira vizinhança estão marcadas na cor verde. Os elementos em derivação conectados às barras de fronteira são considerados pertencentes à rede interna. De modo análogo e para tornar os testes do equivalente convencional para a terceira vizinhança compatíveis com os da segunda vizinhança, optou-se por não incluir na rede interna os elementos série que conectam barras de fronteira. Esses elementos, embora não pertencentes à rede interna, são apresentados no diagrama do SIN para a terceira vizinhança.

Considerando as 47 barras de fronteira, serão ajustadas pelo Método do Ajuste Vetorial, 1128 funções de transferências, sendo 47 próprias e 1081 de transferência entre barras

de fronteira. Devido ao grande número de funções de transferências, a análise de somente algumas poucas funções de transferência será apresentada.

Para a aplicação do Método do Ajuste Vetorial, foi considerada a faixa de frequência de 0 a 2000 Hz, com um total de 1001 amostras (passo de 2 Hz). Optou-se por realizar a busca automática da ordem de aproximação e por fazer o ajuste automático da ordem caso fosse possível. Assim, evita-se uma baixa ordem de aproximação ou, no caso oposto, uma ordem muito maior que a necessária. O fator de correção utilizado foi igual a 2 e o fator de incremento/diminuição foi igual a 20.

Para as comparações entre a rede completa e o sistema reduzido para a terceira vizinhança, serão analisadas as mesmas funções de transferência analisadas para a segunda vizinhança. Com isso, pode-se também comparar a evolução do equivalente convencional, da segunda para a terceira vizinhança. Para analisar o desempenho do equivalente convencional para a terceira vizinhança vista de uma barra de fronteira, será apresentada também a resposta em frequência de uma barra de fronteira da vizinhança 3. Como esta barra de fronteira não existe na vizinhança 2, esta comparação será entre o sistema completo, o sistema reduzido composto pelo equivalente modal da vizinhança 3 e o sistema reduzido composto pelo equivalente convencional para a vizinhança 3.

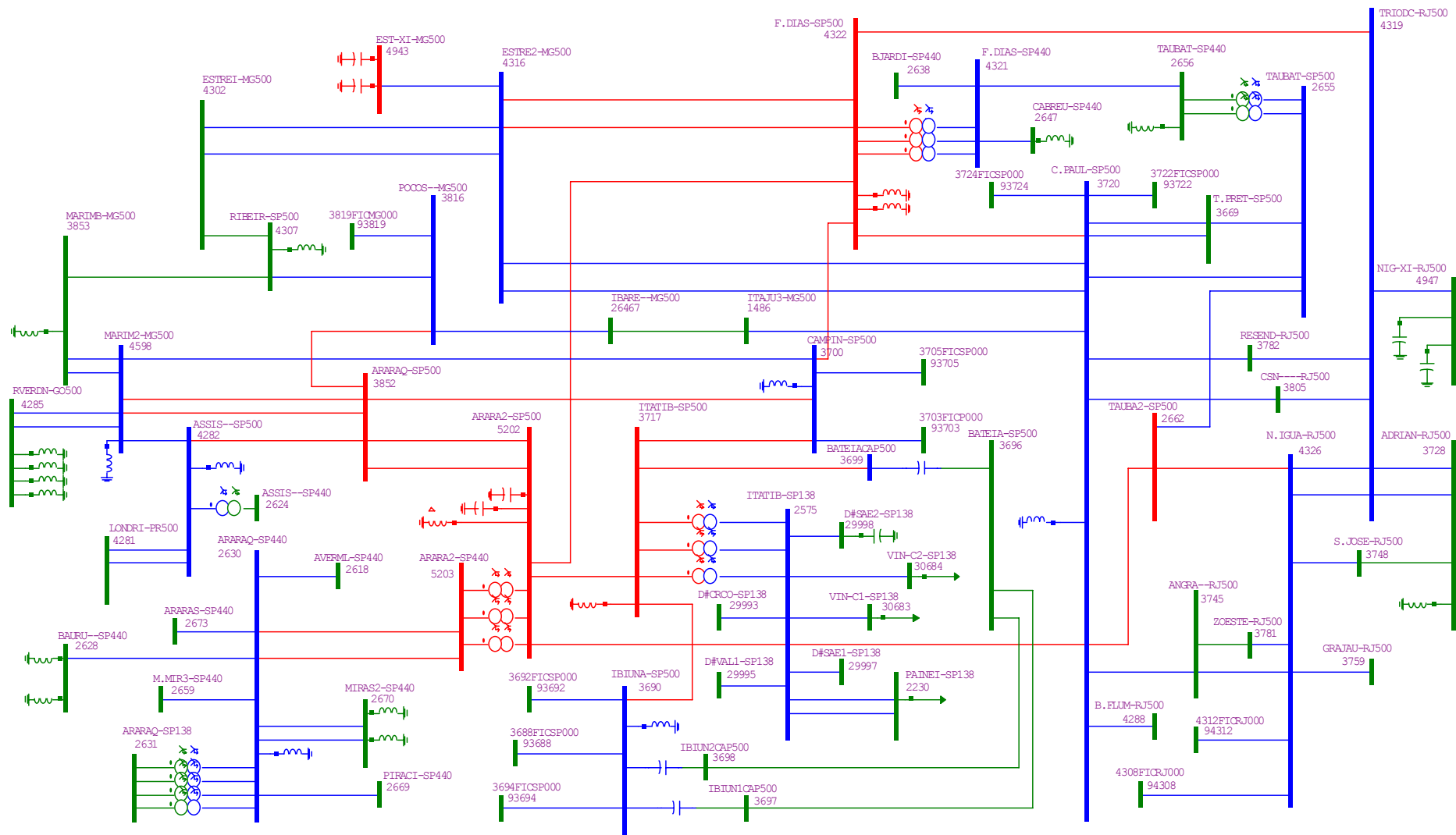


Figura 220: Diagrama Unifilar da terceira vizinhança da barra Araraquara-SP 500 kV (barra 5202)

6.4.2.1 Comparação entre a Rede Externa Completa e Modelada por Polos e Resíduos

Diante do grande número de funções de transferência que existem para a terceira vizinhança, foram escolhidas para serem apresentados os traçados gráficos das funções de transferência informadas na Tabela 67. A ordem de aproximação do ajuste e o número de iterações alcançado de cada função de transferência também são apresentados nesta tabela. Quando foi preciso fazer o incremento da ordem de aproximação (item 5.3.1), o valor da quantidade de incrementos é apresentado entre parênteses na mesma coluna da ordem. No caso das funções de transferência escolhidas e informadas na Tabela 67, somente podem ser visualizados incrementos mas a opção de decrementos estava habilitada e, das 1128 funções de transferência, muitas tiveram decremento automático da ordem de aproximação.

Tabela 67: Funções de transferências para a segunda vizinhança escolhidas para terem os traçados de resposta em frequência analisados

FTs das Barras de Fronteira			
Barra De	Barra Para	Ordem	Iterações
2631	29993	124(2)	10
2638	2673	104(1)	11
2638	29993	104(2)	9
2656	4203	84(3)	5
2656	4288	64	10
3669	29998	104 (1)	8
3696	3696	84 (2)	9
4288	4288	88 (3)	6
29998	29998	124 (5)	10

Da Figura 221 até a Figura 242 tem-se a comparação entre as respostas em frequência dos módulos e ângulos das funções de transferências informadas na Tabela 67 considerando a rede externa representada por seu modelo completo (gráficos em vermelho) e a rede externa representada pelo equivalente modal dado pela equação

$$z_{eq-kj}(s) \cong \sum_{i \in \Omega_{kj}} \frac{R_i^{(kj)}}{s - \lambda_i^{(kj)}} + d^{(kj)} + e^{(kj)}s \text{ (gráficos em azul).}$$

Nos gráficos representados pelo equivalente modal (gráficos em azul), tem-se na legenda a ordem de aproximação do modelo. Esta ordem e os valores dos polos e resíduos associados estão apresentados da Tabela 68 à Tabela 76. Os polos complexos

com parte imaginária negativa não estão apresentados nas tabelas simplesmente para poupar espaço, mas eles foram calculados e estão contabilizados no valor informado para a ordem de aproximação.

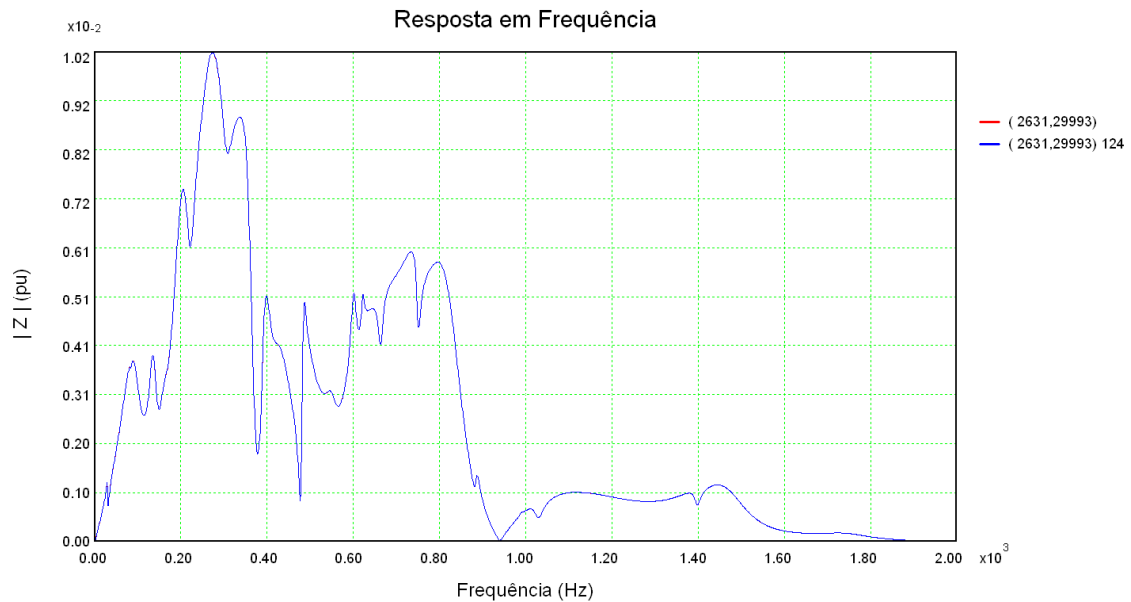


Figura 221: Resposta em frequência do módulo da impedância de transferência entre as barras 2631 e 29993 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)

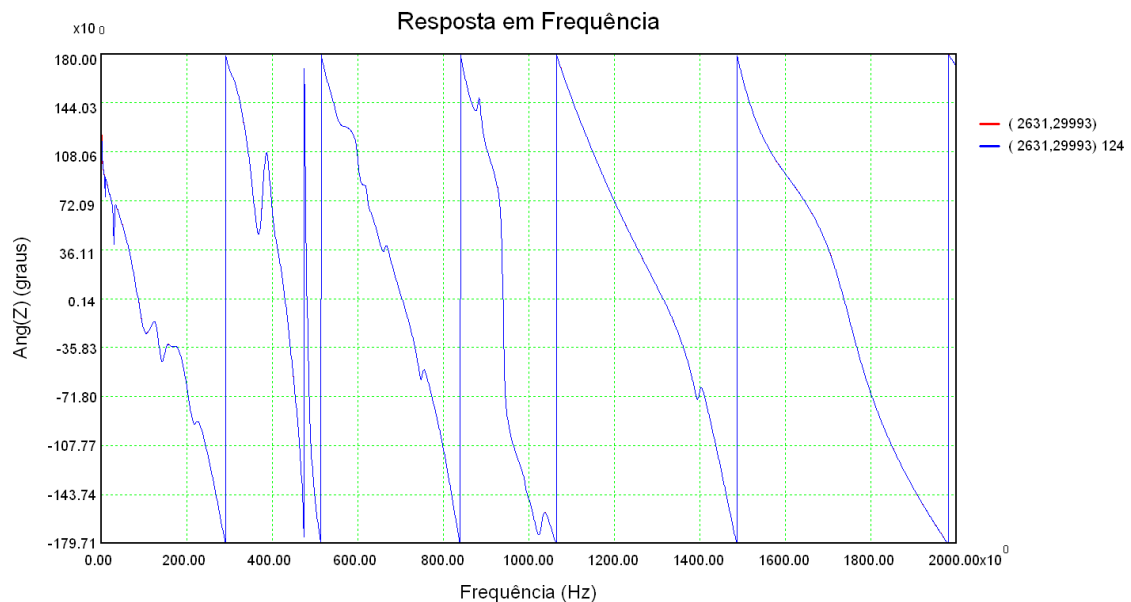


Figura 222: Resposta em frequência do ângulo da impedância de transferência entre as barras 2631 e 29993 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)

Tabela 68: Conjunto de polos e resíduos da função de transferência (2631,29993)

Freq (Hz)	Polo	Resíduo		Freq (Hz)	Polo	Resíduo	
		Mód.	Âng.			Mód.	Âng.
0,0	-8,50586	2,73e-4	0,00	546,6	-287,417 + j 3434,09	1,54e+0	2,05
0,0	-12986,7	5,54e+0	180	594,4	-33,6605 + j 3734,70	7,30e-3	124
10,1	-0,49189 + j 63,7119	8,52e-5	-68,6	601,5	-34,0773 + j 3779,32	5,42e-2	75,9
19,3	-7,53074 + j 121,504	2,45e-4	-14,4	603,5	-25,7243 + j 3792,11	1,22e-2	157
21,8	-92,9239 + j 137,244	3,89e-3	-163	621,5	-25,3672 + j 3905,00	2,02e-2	96,0
30,3	-9,68928 + j 190,160	6,14e-3	-40,0	623,1	-962,256 + j 3915,35	1,91e+1	93,4
84,1	-14,6570 + j 528,161	2,49e-3	-164	663,7	-51,1147 + j 4169,91	6,97e-2	-146
92,7	-159,676 + j 582,486	7,38e-1	-37,7	664,8	-214,933 + j 4176,90	7,65e-2	-10,3
113,3	-76,3351 + j 711,978	3,15e-2	18,6	730,2	-137,939 + j 4588,22	5,30e-2	-33,2
136,1	-68,6590 + j 854,861	1,87e-1	-47,7	748,9	-41,5172 + j 4705,30	7,60e-2	173
151,3	-19,6045 + j 950,860	2,48e-4	26,6	773,0	-113,578 + j 4856,81	8,77e-3	171
160,8	-88,4710 + j 1010,30	1,01e-1	-48,1	809,5	-892,533 + j 5086,31	6,16e+0	-131
201,7	-42,0386 + j 1267,55	1,80e-3	23,1	824,5	-271,205 + j 5180,42	2,12e+0	171
207,7	-141,275 + j 1305,30	1,15e+0	-114	853,2	-83,9851 + j 5360,58	2,26e-4	-93,2
219,6	-47,2430 + j 1379,96	3,29e-2	129	885,4	-32,1409 + j 5563,28	1,80e-2	-154
236,1	-243,624 + j 1483,51	3,85e+0	-50,7	968,7	-173,396 + j 6086,80	5,04e-3	153
257,5	-134,026 + j 1617,75	3,50e-1	-10,8	991,0	-28,1218 + j 6226,34	1,51e-3	-149
282,2	-47,4806 + j 1772,80	6,82e-3	171	1007,6	-8,50791 + j 6330,64	2,85e-5	-17,2
288,4	-16,2514 + j 1812,34	1,73e-3	-130	1026,8	-89,9300 + j 6451,44	4,17e-2	51,5
305,8	-104,795 + j 1921,54	2,55e-1	-2,33	1040,5	-855,297 + j 6537,78	3,03e+0	-146
325,1	-40,3655 + j 2042,85	1,83e-3	-76,0	1105,5	-55,2882 + j 6946,31	3,31e-4	137
347,6	-89,5238 + j 2184,17	7,53e-2	167	1139,4	-334,980 + j 7159,15	1,44e-2	178
363,7	-130,051 + j 2285,41	1,68e+0	-32,5	1234,0	-1051,03 + j 7753,70	8,68e-1	-30,1
390,6	-74,3791 + j 2453,92	4,87e-1	-177	1378,8	-118,616 + j 8662,95	3,49e-3	-115
394,0	-163,969 + j 2475,53	2,63e+0	-2,87	1397,1	-54,6455 + j 8778,23	2,08e-2	136
424,8	-254,362 + j 2669,18	4,23e+0	37,9	1416,3	-624,287 + j 8898,68	7,28e-1	-53,3
443,3	-11,4407 + j 2785,52	7,32e-5	97,8	1447,2	-141,004 + j 9092,91	7,67e-3	166
463,0	-62,3471 + j 2909,13	1,35e-2	-33,2	1470,5	-332,728 + j 9239,25	4,91e-1	176
483,2	-32,4911 + j 3036,15	2,38e-1	2,69	1534,8	-510,861 + j 9643,61	7,57e-2	17,1
486,7	-192,683 + j 3058,19	3,96e-1	116	1743,6	-360,040 + j 10955,6	6,83e-2	-15,1
502,0	-65,6680 + j 3154,09	2,18e-2	-141	1777,9	-701,329 + j 11170,8	7,42e-2	-97,0
547,4	-111,917 + j 3439,12	1,42e-1	149				

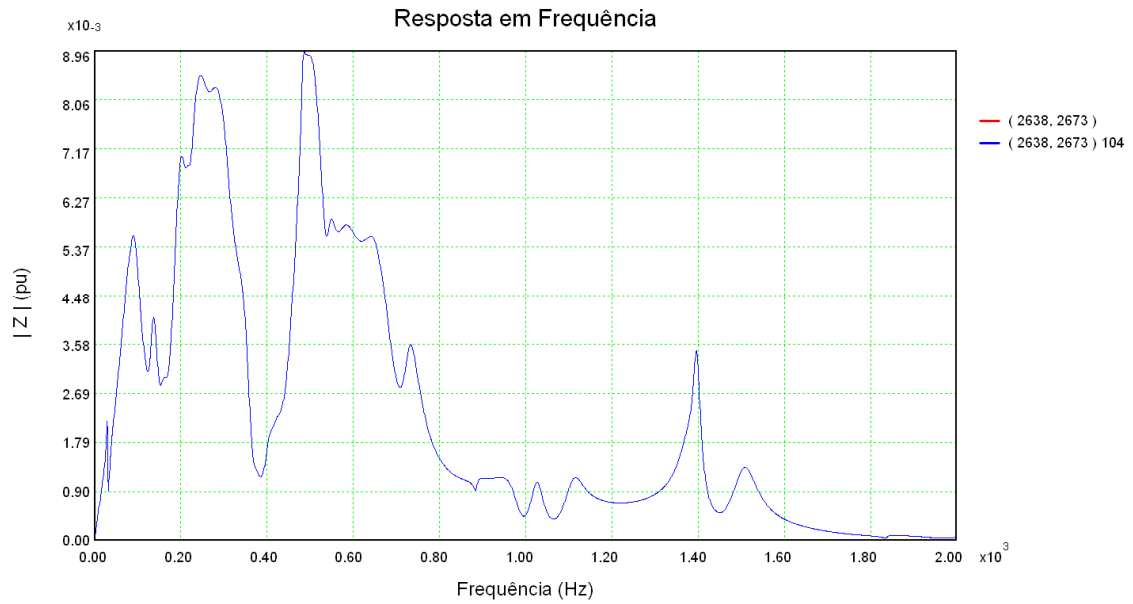


Figura 223: Resposta em frequência do módulo da impedância de transferência entre as barras 2638 e 2673 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)

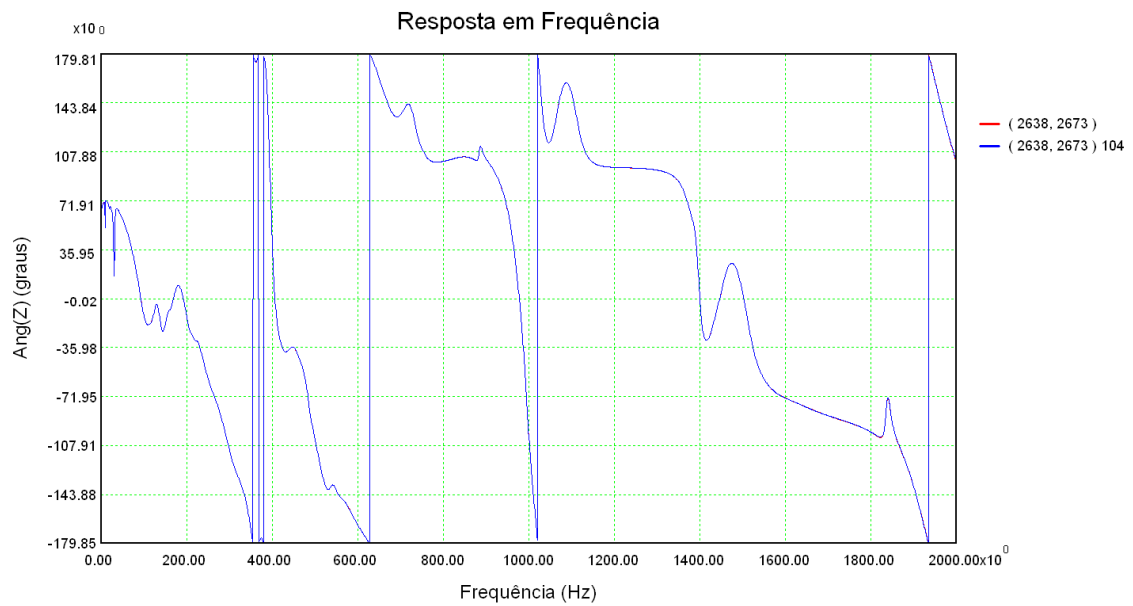


Figura 224: Resposta em frequência do ângulo da impedância de transferência entre as barras 2638 e 2673 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)

Tabela 69: Conjunto de polos e resíduos da função de transferência (2638,2673)

Freq (Hz)	Polo	Resíduo		Freq (Hz)	Polo	Resíduo	
		Mód.	Âng.			Mód.	Âng.
0,0	-7,89706	6,52e-4	180	506,5	-50,1848 + j 3182,21	5,21e-3	-99,4
0,0	-68,3398	7,71e-3	180	523,4	-237,782 + j 3288,85	2,50e+0	172
0,0	-2330,43	1,11e+0	180	543,7	-94,9529 + j 3416,08	2,42e-1	-77,1
0,0	-15923,4	9,77e-1	180	568,6	-267,872 + j 3572,43	1,37e+0	-96,4
10,0	-0,90265 + j 63,1409	2,06e-4	-34,3	599,2	-58,4990 + j 3764,89	1,94e-3	66,2
19,8	-7,05887 + j 124,321	5,40e-4	-39,6	622,1	-25,8885 + j 3908,58	4,20e-4	-55,0
30,3	-9,55289 + j 190,146	1,38e-2	-32,5	657,5	-230,521 + j 4131,49	7,96e-1	143
83,7	-14,6315 + j 526,053	1,66e-3	-172	663,5	-49,3328 + j 4168,63	8,20e-3	-74,5
95,2	-167,472 + j 598,420	1,25e+0	-22,7	729,8	-126,847 + j 4585,72	2,69e-1	167
113,4	-93,2752 + j 712,322	1,24e-1	55,8	748,5	-40,4871 + j 4703,13	3,24e-3	-91,0
136,0	-69,9196 + j 854,309	2,06e-1	5,65	772,0	-278,125 + j 4850,77	8,05e-2	-77,7
160,3	-87,5457 + j 1007,20	1,28e-1	-9,88	823,9	-397,076 + j 5176,94	9,75e-2	-76,9
203,4	-113,645 + j 1277,80	7,26e-1	-71,1	885,5	-32,7318 + j 5563,51	7,34e-3	-116
220,2	-48,9228 + j 1383,37	4,48e-2	-131	971,9	-186,599 + j 6106,76	2,52e-1	-4,46
219,4	-236,769 + j 1378,37	3,14e+0	32,8	1007,8	-6,36674 + j 6331,98	1,89e-5	87,2
265,9	-122,337 + j 1670,78	1,34e-1	75,2	1026,9	-89,7647 + j 6452,03	9,92e-2	147
289,1	-20,9202 + j 1816,65	1,04e-3	-171	1108,1	-252,144 + j 6962,66	5,81e-2	-110
304,9	-93,0830 + j 1915,66	8,05e-2	165	1110,7	-149,120 + j 6978,49	1,29e-1	142
320,5	-248,634 + j 2013,92	1,08e+0	145	1377,9	-132,783 + j 8657,33	9,09e-2	30,1
352,9	-125,885 + j 2217,26	5,39e-1	140	1397,1	-54,4463 + j 8778,30	1,54e-1	8,01
378,6	-108,210 + j 2378,93	1,99e-1	165	1435,5	-284,580 + j 9019,25	3,12e-3	56,4
392,7	-68,8209 + j 2467,52	1,76e-1	162	1447,6	-131,748 + j 9095,57	9,23e-3	-61,5
403,9	-82,5652 + j 2537,63	1,11e-1	-29,8	1507,0	-175,627 + j 9468,62	2,23e-1	-1,36
422,3	-66,7050 + j 2653,50	1,38e-2	-43,1	1628,2	-335,926 + j 10230,1	5,21e-3	-34,5
459,9	-57,9945 + j 2889,34	3,06e-2	-96,4	1839,5	-52,4265 + j 11557,8	2,86e-3	18,6
470,7	-166,501 + j 2957,38	8,94e-1	17,4	1913,0	-340,763 + j 12019,7	2,62e-2	-167
483,0	-32,4367 + j 3034,76	3,52e-2	-43,5	2071,1	-105,604 + j 13013,2	4,51e-2	-6,66

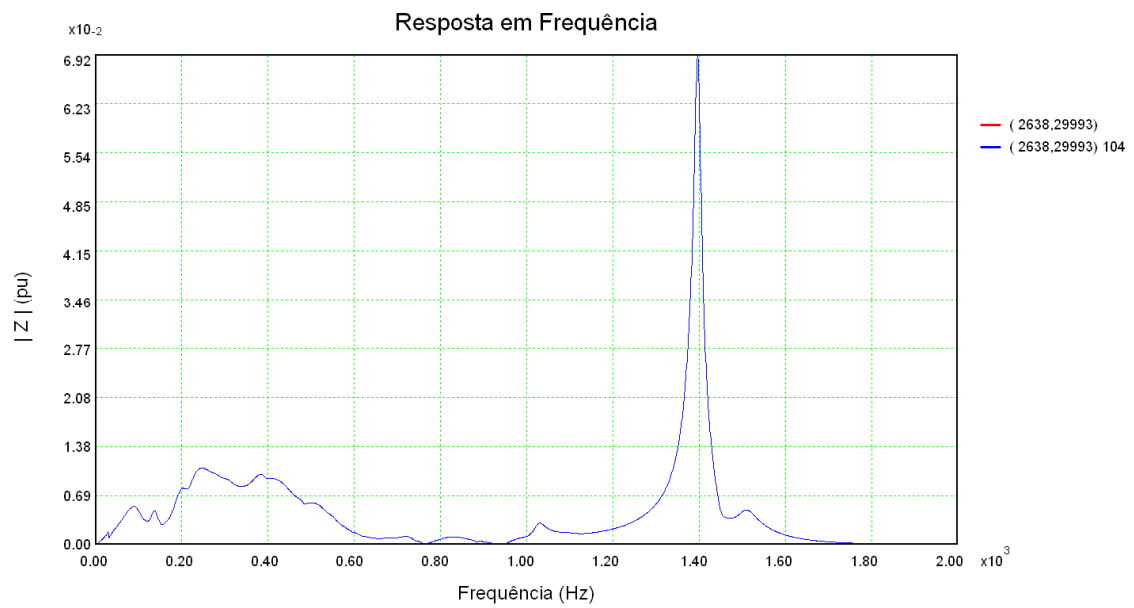


Figura 225: Resposta em frequência do módulo da impedância de transferência entre as barras 2638 e 29993 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)

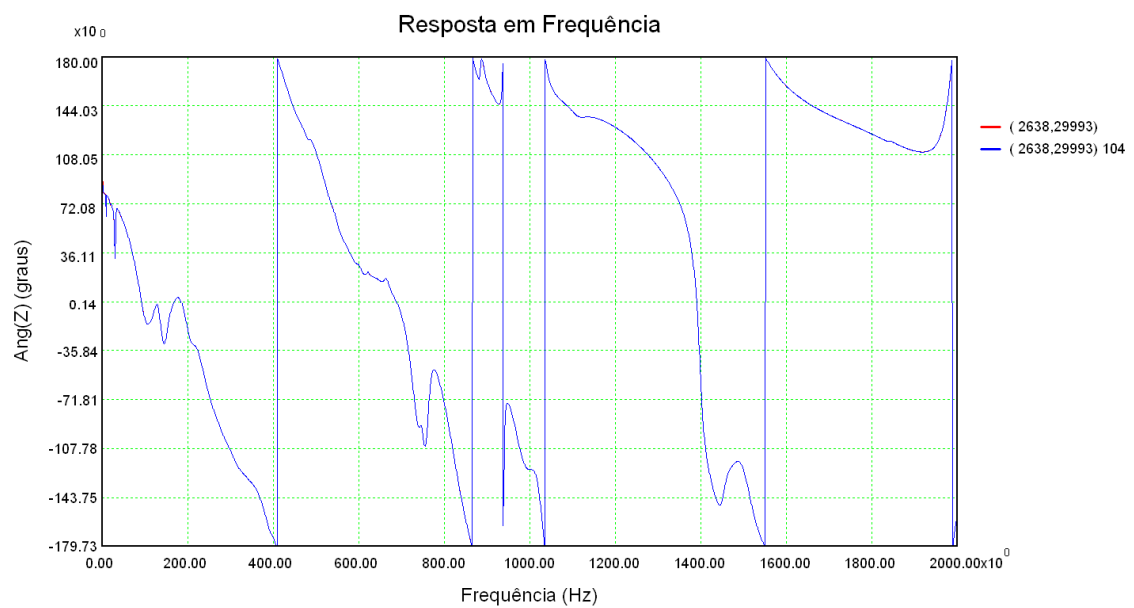


Figura 226: Resposta em frequência do ângulo da impedância de transferência entre as barras 2638 e 29993 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)

Tabela 70: Conjunto de polos e resíduos da função de transferência (2638,29993)

Freq (Hz)	Polo	Resíduo		Freq (Hz)	Polo	Resíduo	
		Mód.	Âng.			Mód.	Âng.
0,0	-23,2170	1,41e-3	180	573,6	-171,058 + j 3604,19	1,91e-1	107
0,0	-470,168	1,24e-1	180	590,3	-517,307 + j 3708,83	2,01e+0	-149
10,0	-0,61921 + j 63,1064	1,07e-4	-31,6	601,9	-49,8187 + j 3781,98	8,94e-3	83,9
19,6	-7,39119 + j 123,031	4,43e-4	-25,9	621,8	-25,6674 + j 3906,94	1,83e-3	104
30,3	-9,57910 + j 190,102	1,09e-2	-34,0	663,7	-49,1593 + j 4170,20	6,91e-3	127
83,8	-14,7308 + j 526,250	1,77e-3	-172	679,2	-383,549 + j 4267,61	3,43e-1	-114
95,1	-166,626 + j 597,306	1,25e+0	-29,0	730,3	-128,217 + j 4588,84	2,00e-1	-106
113,7	-97,1338 + j 714,393	1,49e-1	42,5	748,9	-41,7410 + j 4705,78	1,20e-2	-66,8
135,9	-70,9199 + j 853,612	2,75e-1	-2,35	823,4	-266,185 + j 5173,86	5,17e-1	-109
160,0	-83,7027 + j 1005,43	6,96e-2	7,33	885,4	-32,4045 + j 5563,34	7,58e-3	-39,3
203,6	-111,692 + j 1279,51	5,68e-1	-85,8	971,9	-185,258 + j 6106,72	1,63e-1	-73,7
220,1	-43,8259 + j 1382,97	1,54e-2	122	991,0	-29,5134 + j 6226,47	3,61e-4	167
224,8	-296,036 + j 1412,31	5,71e+0	6,07	1007,4	-9,28877 + j 6329,93	7,78e-5	68,9
270,4	-113,156 + j 1698,93	1,13e-1	8,34	1026,8	-90,1874 + j 6451,71	2,20e-1	-138
273,7	-491,957 + j 1719,56	4,45e+0	146	1054,6	-815,503 + j 6625,94	6,71e-2	14,3
289,2	-9,70628 + j 1817,09	3,80e-4	-170	1109,6	-146,560 + j 6971,86	3,02e-2	72,5
307,1	-105,705 + j 1929,51	1,14e-1	-108	1377,7	-130,558 + j 8656,35	7,75e-1	75,6
347,9	-71,3411 + j 2185,95	1,57e-2	93,2	1397,1	-54,5370 + j 8778,37	4,09e+0	-46,8
375,1	-85,3986 + j 2357,00	1,97e-2	-169	1405,8	-791,336 + j 8832,67	5,54e+0	128
391,7	-72,0451 + j 2461,24	1,01e-1	92,2	1448,8	-121,279 + j 9103,19	3,99e-1	43,0
417,5	-146,036 + j 2623,20	2,01e-1	-9,97	1506,8	-174,035 + j 9467,67	6,84e-1	-109
416,0	-308,866 + j 2613,85	3,55e+0	164	1568,2	-152,790 + j 9853,38	4,29e-3	-126
461,6	-36,5868 + j 2900,42	2,40e-3	-52,4	1770,6	-1499,53 + j 11124,9	2,58e-1	153
483,5	-33,0126 + j 3037,64	1,61e-2	-30,4	1839,6	-48,4990 + j 11558,6	2,14e-4	-76,3
504,3	-40,5799 + j 3168,89	9,52e-4	-143	1123,0	-10136,6 + j 7056,19	1,78e+1	-104
522,2	-273,375 + j 3281,33	1,64e+0	79,4	2046,7	-50,8264 + j 12859,8	3,12e-2	151
545,1	-92,1259 + j 3424,87	7,57e-2	131				

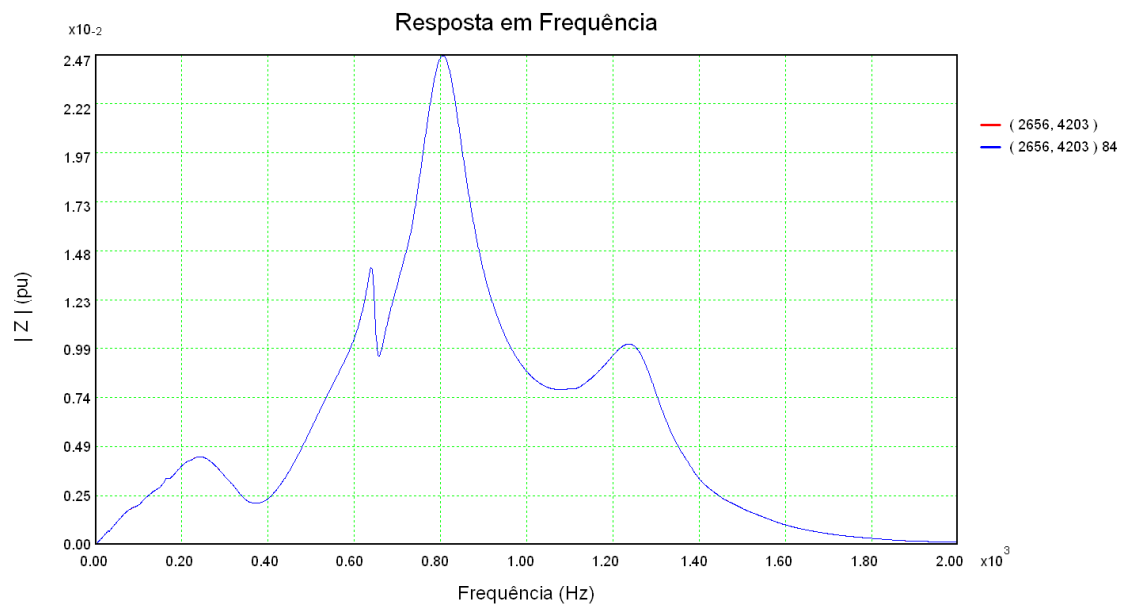


Figura 227: Resposta em frequência do módulo da impedância de transferência entre as barras 2656 e 4203 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)

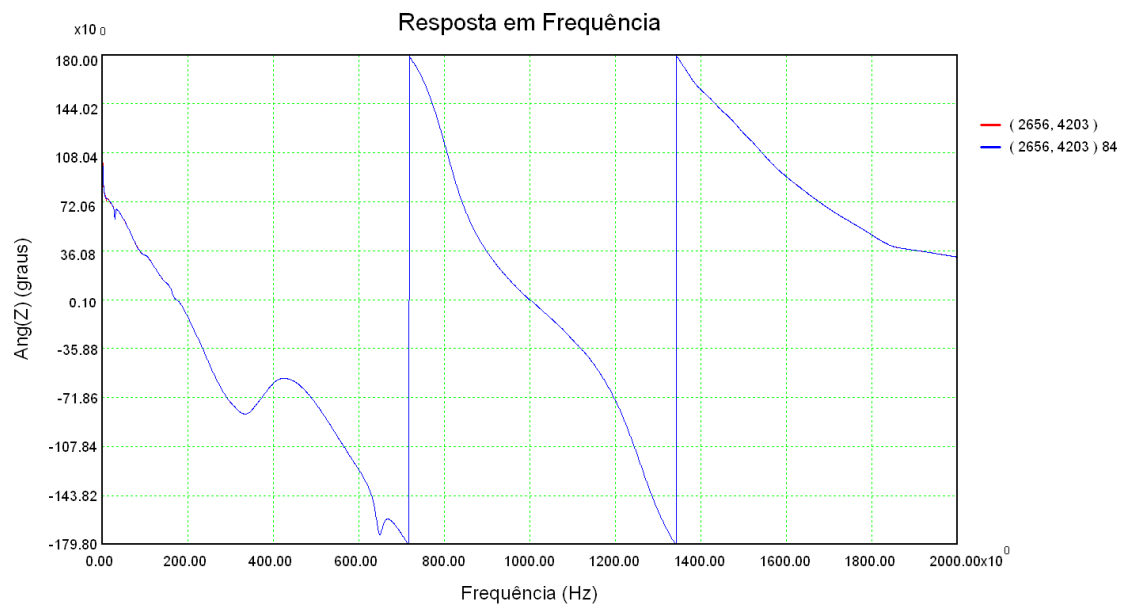


Figura 228: Resposta em frequência do ângulo da impedância de transferência entre as barras 2656 e 4203 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)

Tabela 71: Conjunto de polos e resíduos da função de transferência (2656,4203)

Freq (Hz)	Polo	Resíduo		Freq (Hz)	Polo	Resíduo	
		Mód.	Âng.			Mód.	Âng.
0,0	-0,20228	2,67e-6	0,00	731,2	-141,445 + j 4594,27	1,22e-1	10,3
0,0	-39,8035	4,07e-3	180	750,3	-39,8930 + j 4714,46	8,10e-4	33,9
11,3	-104,738 + j 70,8791	6,30e-3	-162	756,3	-600,309 + j 4752,01	2,45e+0	168
30,4	-9,09432 + j 190,832	1,14e-3	-36,7	806,9	-362,359 + j 5069,81	9,40e+0	108
79,3	-270,162 + j 498,465	2,33e-1	35,3	909,2	-134,197 + j 5712,86	5,12e-3	34,0
104,3	-93,3828 + j 655,427	2,18e-2	150	947,2	-1040,09 + j 5951,13	1,24e+0	-36,9
145,7	-101,000 + j 915,263	1,94e-2	-84,3	1023,5	-77,4380 + j 6431,05	5,49e-5	-15,7
164,8	-44,3821 + j 1035,57	1,23e-2	-26,3	1091,2	-529,046 + j 6855,94	3,11e-1	58,6
220,1	-43,1438 + j 1383,17	3,29e-3	-170	1110,0	-140,891 + j 6974,10	2,77e-2	-163
230,8	-610,922 + j 1449,91	3,88e+0	-22,9	1258,9	-484,063 + j 7909,85	5,64e+0	-135
249,9	-123,417 + j 1570,41	8,76e-3	-74,6	1285,3	-195,014 + j 8075,68	2,75e-3	-86,0
306,3	-91,6749 + j 1924,53	7,82e-3	45,2	1377,4	-127,446 + j 8654,71	2,60e-2	124
359,9	-127,122 + j 2261,32	1,52e-2	-2,66	1398,7	-48,1741 + j 8788,43	3,92e-4	138
356,0	-494,218 + j 2236,73	5,79e-1	113	1447,9	-116,590 + j 9097,47	7,54e-3	35,9
395,1	-51,4718 + j 2482,24	7,93e-4	-152	1504,3	-181,490 + j 9451,94	1,99e-2	-26,2
424,4	-137,897 + j 2666,59	2,31e-3	-90,2	1519,1	-548,588 + j 9545,09	3,36e-1	92,5
520,3	-869,252 + j 3269,34	8,22e+0	-29,2	1685,5	-520,957 + j 10590,2	2,89e-2	-24,0
587,5	-110,153 + j 3691,14	3,12e-3	57,8	1768,8	-750,174 + j 11113,8	6,38e-2	-40,8
617,0	-102,540 + j 3876,93	2,69e-3	-89,0	1818,6	-374,885 + j 11426,4	1,40e-2	0,57
645,5	-64,0813 + j 4056,01	3,77e-1	131	1837,5	-110,148 + j 11545,4	2,46e-4	31,6
666,7	-293,827 + j 4189,09	1,56e-1	-130	2072,6	-546,431 + j 13022,6	2,66e-2	69,3
675,5	-1725,49 + j 4244,39	7,68e+0	86,5				

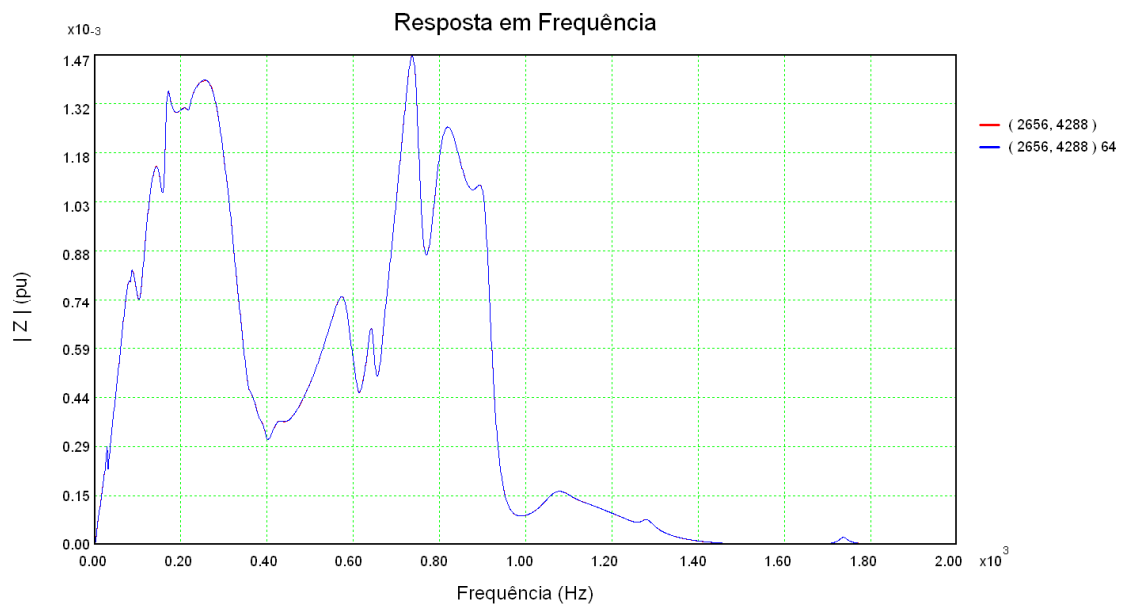


Figura 229: Resposta em frequência do módulo da impedância de transferência entre as barras 2656 e 4288 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)

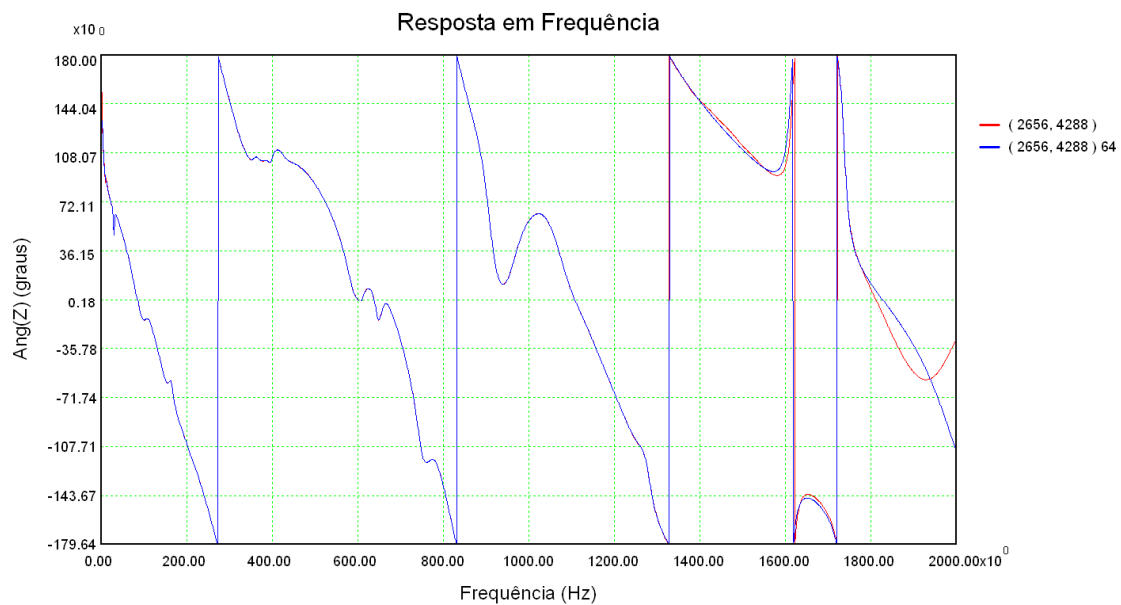


Figura 230: Resposta em frequência do ângulo da impedância de transferência entre as barras 2656 e 4288 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)

Tabela 72: Conjunto de polos e resíduos da função de transferência (2656,4288)

Freq (Hz)	Polo	Resíduo		Freq (Hz)	Polo	Resíduo	
		Mód.	Âng.			Mód.	Âng.
0,0	-47077,5	1,43e+1	180	562,9	-365,902 + j 3536,61	1,15e-1	28,1
0,0	-421824	2,96e+3	0,00	584,7	-142,137 + j 3673,53	4,72e-2	-30,5
3,5	-18,5863 + j 22,1826	3,92e-4	-125	608,6	-55,9713 + j 3823,96	3,13e-3	-108
30,3	-9,62250 + j 190,160	9,69e-4	-34,8	644,9	-59,3560 + j 4052,04	1,45e-2	-56,1
84,4	-14,3558 + j 530,386	6,01e-4	120	662,7	-73,0966 + j 4163,84	3,85e-3	144
87,3	-114,083 + j 548,736	4,34e-2	-75,6	726,5	-320,363 + j 4564,86	6,69e-1	-87,4
101,4	-72,9161 + j 636,893	1,25e-2	-128	741,1	-137,209 + j 4656,26	1,37e-1	-106
119,8	-447,118 + j 752,684	9,43e-1	15,9	748,1	-55,1126 + j 4700,43	5,47e-3	-154
160,2	-110,705 + j 1006,62	4,30e-2	176	759,4	-477,084 + j 4771,37	1,85e+0	61,3
165,3	-50,7744 + j 1038,34	2,36e-2	-3,70	806,2	-378,825 + j 5065,48	1,18e+0	-145
218,9	-38,4940 + j 1375,30	1,55e-3	48,3	908,7	-129,328 + j 5709,73	1,25e-1	24,8
289,8	-419,006 + j 1820,56	8,80e-1	134	1068,1	-281,933 + j 6711,21	3,53e-2	60,8
309,8	-47,0758 + j 1946,35	9,10e-4	-175	1149,2	-249,080 + j 7220,92	3,54e-3	-7,46
361,4	-73,1300 + j 2270,73	5,31e-3	-153	1238,7	-568,381 + j 7783,16	5,80e-2	-148
395,1	-50,4107 + j 2482,29	2,19e-3	30,2	1279,2	-105,535 + j 8037,56	3,88e-3	-108
395,1	-630,105 + j 2482,35	3,61e-1	-125	1737,0	-58,9967 + j 10913,7	1,53e-3	115
424,0	-153,699 + j 2663,79	1,44e-2	96,6				

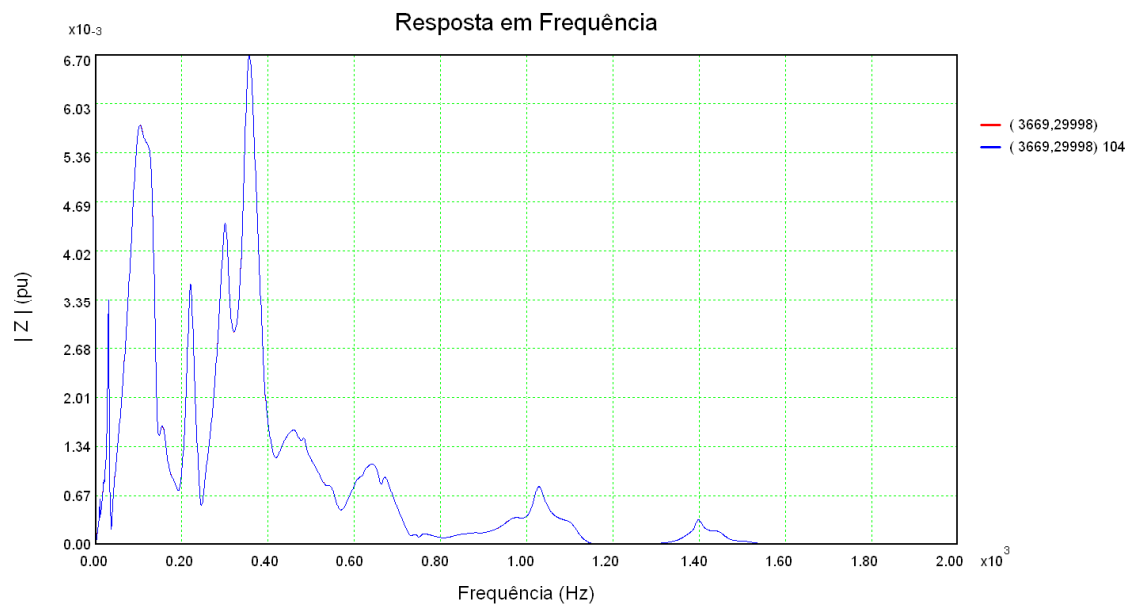


Figura 231: Resposta em frequência do módulo da impedância de transferência entre as barras 36696 e 29998 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)

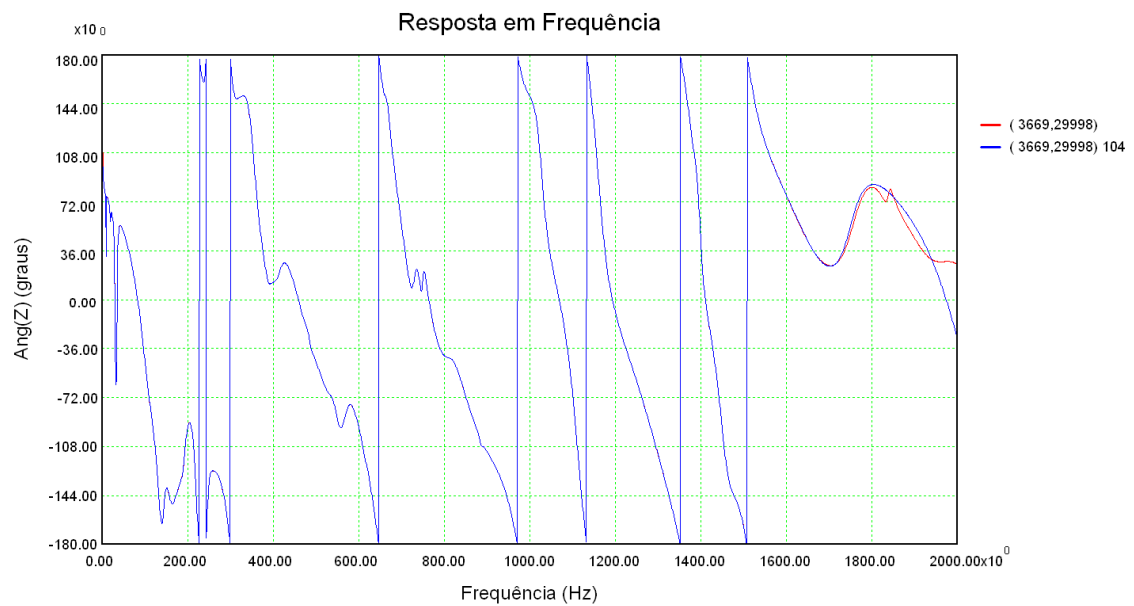


Figura 232: Resposta em frequência do ângulo da impedância de transferência entre as barras 3669 e 29998 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)

Tabela 73: Conjunto de polos e resíduos da função de transferência (3669,29998)

Freq (Hz)	Polo	Resíduo		Freq (Hz)	Polo	Resíduo	
		Mód.	Âng.			Mód.	Âng.
3,2	-32,6075 + j 19,8288	1,23e-3	153	545,3	-116,109 + j 3426,29	1,12e-1	-39,4
10,0	-0,79746 + j 63,0760	3,77e-4	-24,1	548,4	-184,605 + j 3445,84	2,92e-1	140
19,7	-7,34799 + j 124,002	1,38e-3	-25,7	583,2	-88,4210 + j 3664,56	5,79e-3	36,5
30,3	-9,57808 + j 190,143	3,16e-2	-23,4	603,0	-46,0746 + j 3789,02	2,64e-3	-51,4
83,9	-16,0378 + j 527,201	1,79e-3	171	621,5	-24,3664 + j 3905,01	1,14e-3	-7,49
94,7	-154,444 + j 595,035	1,00e+0	-17,6	657,9	-226,550 + j 4133,73	5,35e-1	143
100,3	-62,4884 + j 630,369	1,96e-2	-10,8	663,6	-50,8642 + j 4169,77	2,21e-2	-71,6
125,0	-115,315 + j 785,187	2,28e-1	-39,9	729,7	-126,105 + j 4584,68	4,57e-2	-177
136,1	-71,5382 + j 855,228	3,38e-1	125	748,9	-40,6914 + j 4705,71	3,80e-3	-151
159,4	-86,0980 + j 1001,63	8,40e-2	152	764,4	-716,201 + j 4802,86	5,62e-1	-116
192,0	-50,9172 + j 1206,16	5,19e-3	96,0	826,2	-281,879 + j 5191,13	5,21e-2	31,4
220,5	-53,4968 + j 1385,60	2,09e-1	-149	885,3	-32,0012 + j 5562,79	5,15e-4	-176
223,6	-230,271 + j 1404,84	7,44e-1	25,1	972,1	-185,240 + j 6107,65	5,59e-2	171
236,1	-72,1975 + j 1483,21	5,81e-2	131	988,8	-79,5371 + j 6213,02	9,63e-5	-5,26
268,7	-132,760 + j 1688,58	8,65e-2	45,2	1007,4	-13,9937 + j 6329,74	1,30e-5	18,2
289,2	-12,9112 + j 1817,30	4,59e-4	164	1026,8	-90,2033 + j 6451,75	7,00e-2	106
302,5	-69,9114 + j 1900,85	2,11e-1	144	1106,3	-549,207 + j 6950,93	8,19e-2	-29,3
323,8	-43,3616 + j 2034,60	1,01e-3	80,5	1109,6	-141,383 + j 6971,60	6,05e-2	-139
338,2	-149,002 + j 2125,04	4,01e-1	16,2	1237,6	-404,253 + j 7775,76	1,73e-3	55,6
354,1	-107,498 + j 2225,08	9,95e-1	116	1377,6	-128,862 + j 8655,75	1,71e-2	115
388,6	-72,5864 + j 2441,96	5,39e-2	-111	1397,1	-54,7149 + j 8778,40	1,63e-2	70,9
419,8	-133,962 + j 2637,38	7,41e-2	148	1448,8	-122,233 + j 9103,11	2,21e-2	-120
445,4	-220,943 + j 2798,34	1,93e-1	78,7	1506,4	-175,749 + j 9464,99	9,44e-3	179
463,1	-59,7210 + j 2909,48	5,37e-3	-31,8	1585,2	-1539,42 + j 9959,83	2,39e-2	-134
483,3	-31,5810 + j 3036,44	4,95e-3	-14,5	1650,8	-430,521 + j 10372,3	4,76e-4	-63,6
498,3	-91,8160 + j 3130,61	3,12e-3	125	923,2	-28880,1 + j 5800,56	3,71e+0	86,0

De modo análogo ao observado na comparação entre a rede externa completa e representada pelo equivalente modal da vizinhança 2, pode-se observar pela Figura 230 e pela Figura 232, uma certa discrepância no final da faixa de frequência de interesse entre os traçados do ângulo das impedâncias respectivamente entre as barras 2656-4288 e 3669-29998. A justificativa é a mesma dada anteriormente. Nota-se que o valor do módulo da impedância, apresentado na Figura 229 e na Figura 231, na faixa final das frequências de interesse é muito pequeno (próximo a zero). Logo, a ordem de grandeza da tolerância do erro (10^{-6}) entre as curvas reais e as curvas ajustadas é praticamente da ordem de grandeza do valor da impedância. Visto que o Método do Ajuste Vetorial visa minimizar a diferença de uma grandeza complexa (parte real e imaginária da diferença entre a curva real e a ajustada da impedância variando na frequência), para comprovar que o valor complexo da impedância é muito pequeno, na Figura 233 e na Figura 234 são apresentados, respectivamente, os traçados da parte real e da parte imaginária da impedância entre as barras 3669 e 29998. Pode-se observar nestas figuras que a parte

real e imaginária da impedância para o final da faixa de frequências de interesse é muito próxima de zero. Procedimento análogo poderia ser feito para a função de transferência entre as barras 2656 e 4288, onde as mesmas conclusões podem ser tiradas.

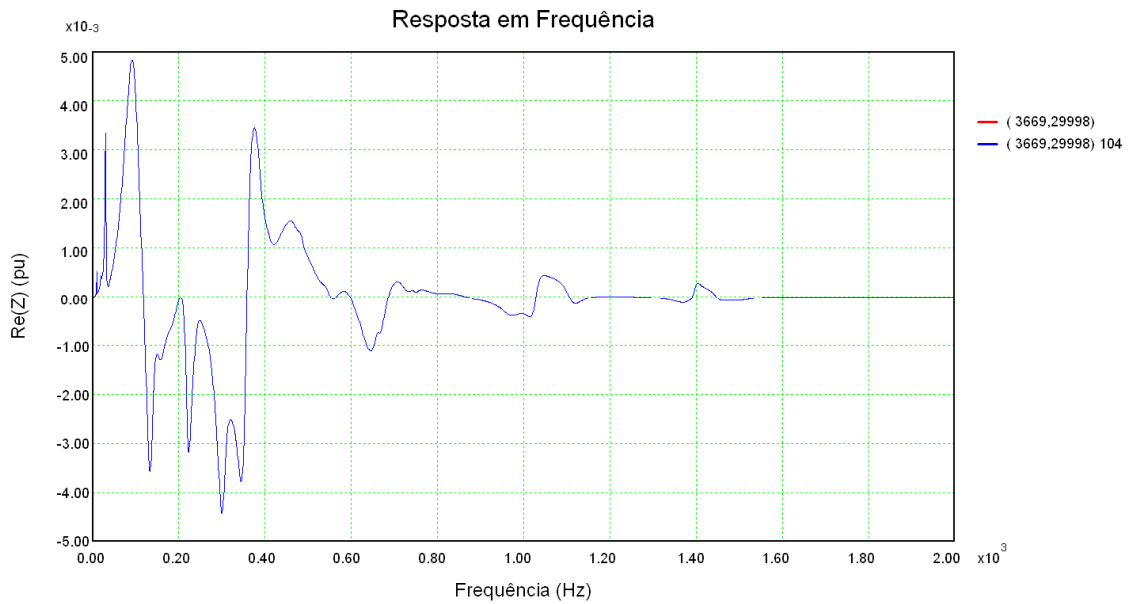


Figura 233: Resposta em frequência da parte real da impedância de transferência entre as barras 3669 e 29998 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)

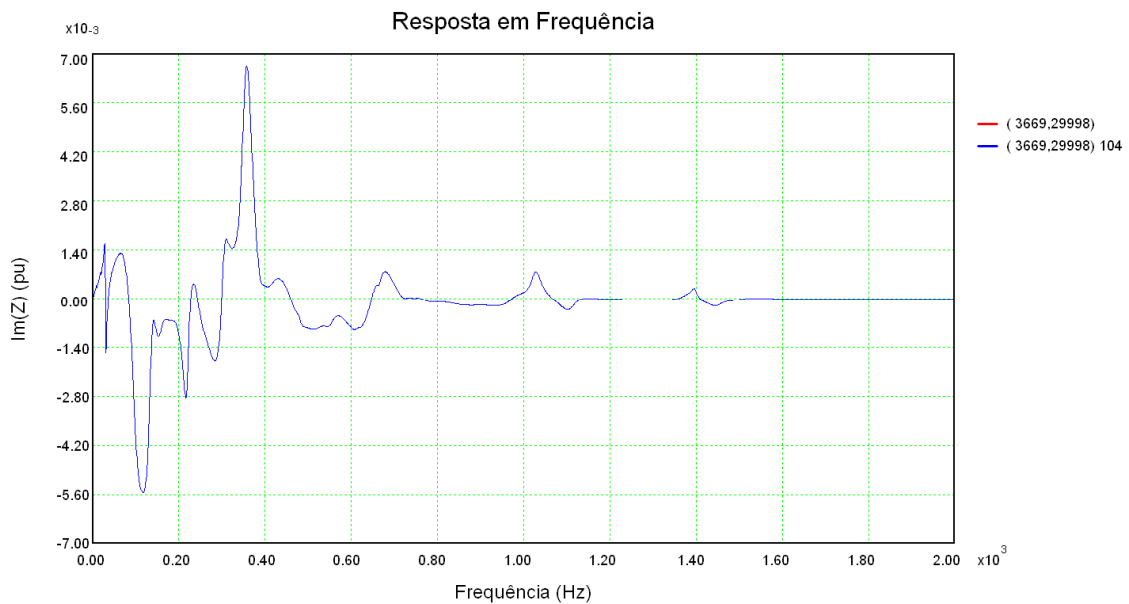


Figura 234: Resposta em frequência da parte imaginária da impedância de transferência entre as barras 3669 e 29998 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)

Esta discrepância encontrada no traçado do ângulo pode ser bastante diminuída apertando a tolerância para valores ainda menores. Na Figura 235 e na Figura 236 são

reapresentados os gráficos do módulo e do ângulo da impedância entre as barras 3669 e 29998 com uma tolerância de 10^{-8} , bem menor que a tolerância anteriormente utilizada que foi 10^{-6} . Nota-se, pela Figura 236, que as discrepâncias no traçado do ângulo praticamente desapareceram. A ordem cresceu automaticamente de 104 para 184 para que fosse obtida a convergência para a tolerância de 10^{-8} .

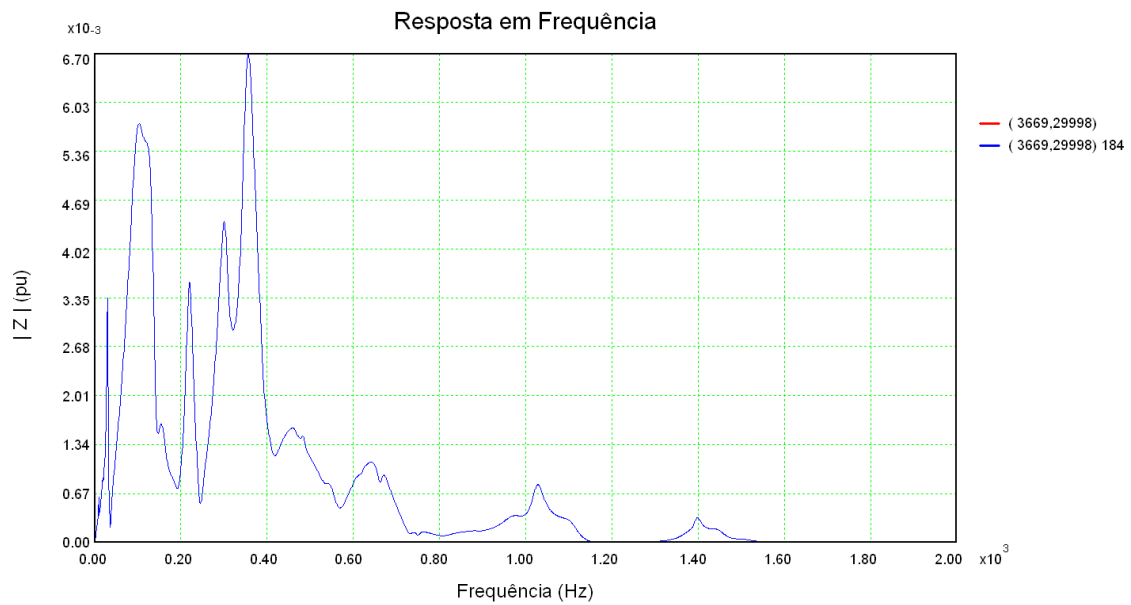


Figura 235: Resposta em frequência do módulo da impedância de transferência entre as barras 3669 e 29998 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul) para a tolerância de 10^{-8}

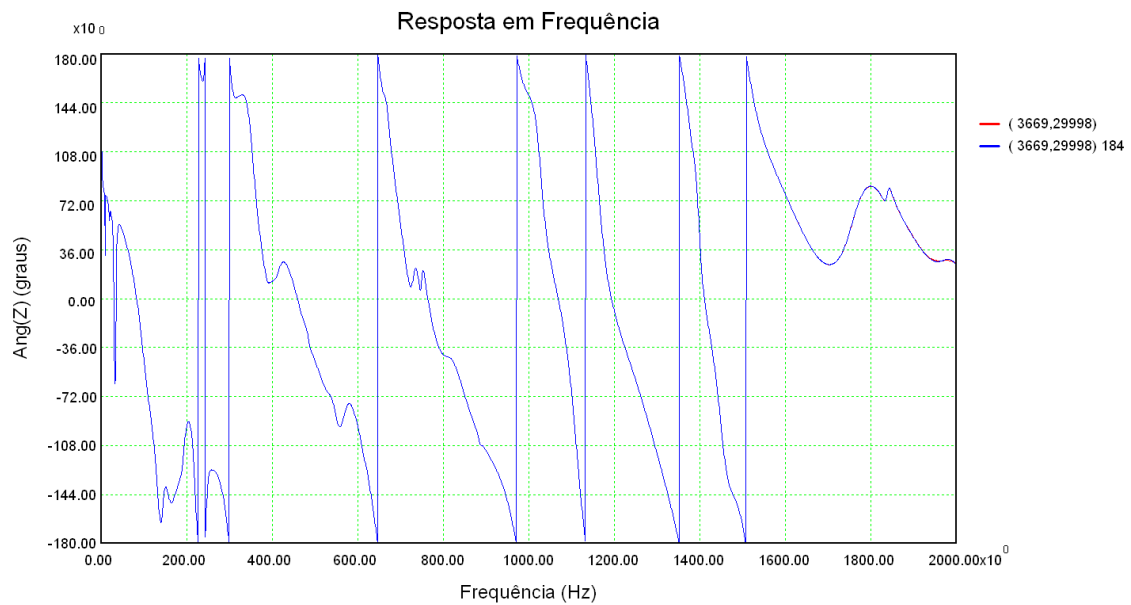


Figura 236: Resposta em frequência do ângulo da impedância de transferência entre as barras 3669 e 29998 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul) para a tolerância de 10^{-8}

Os traçados das outras funções de transferência descritas na Tabela 67 continuam a ser apresentadas a seguir:

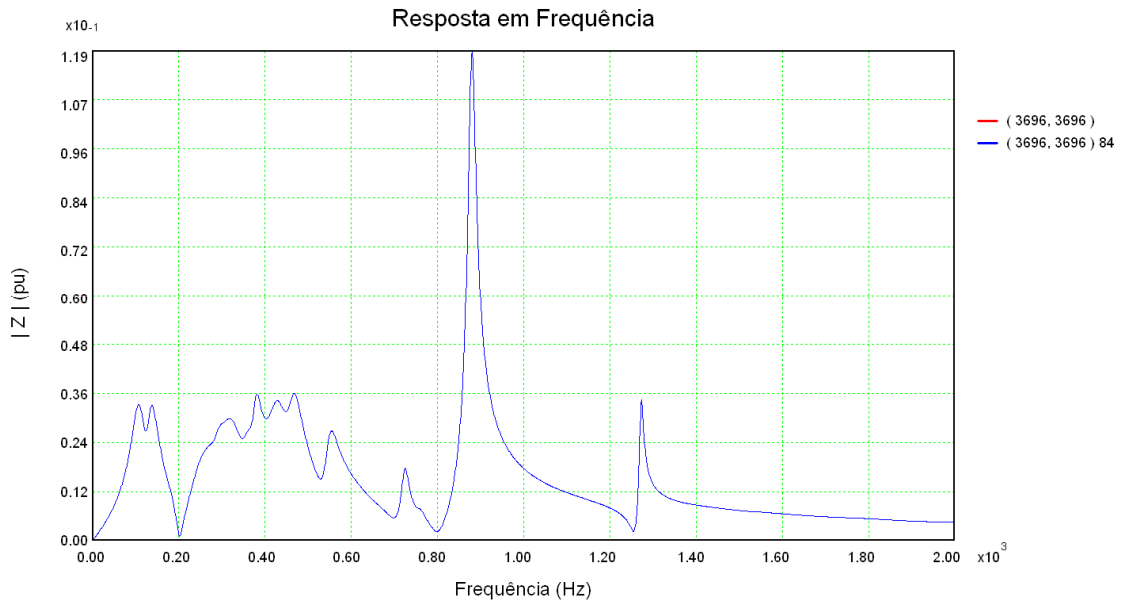


Figura 237: Resposta em frequência do módulo da impedância da barra 3696 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)

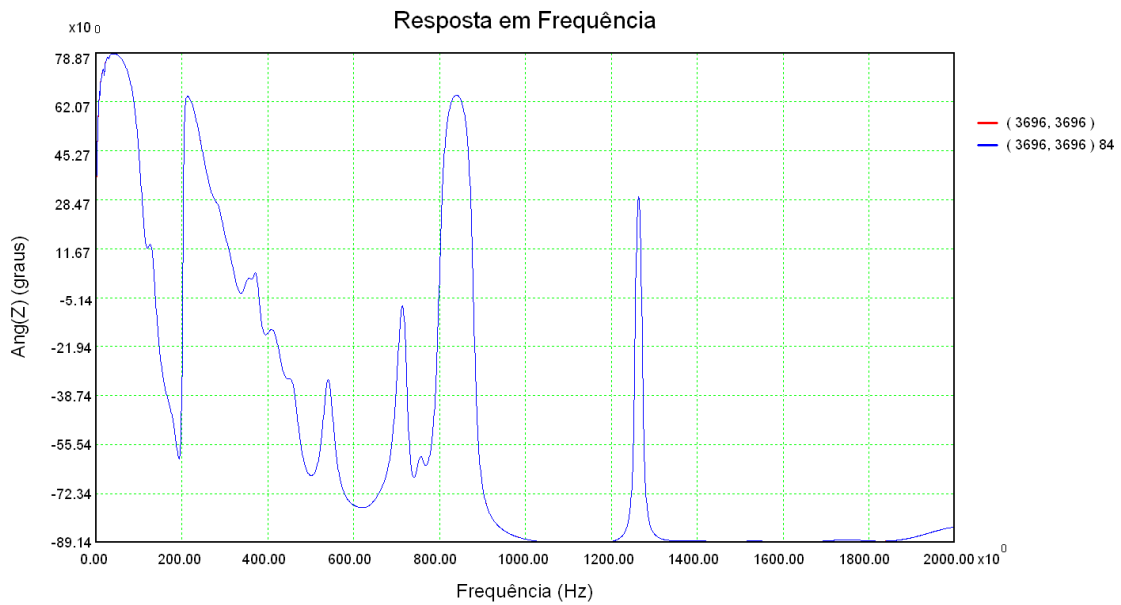


Figura 238: Resposta em frequência do ângulo da impedância da barra 3696 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)

Tabela 74: Conjunto de polos e resíduos da função de transferência (3696,3696)

Freq (Hz)	Polo	Resíduo		Freq (Hz)	Polo	Resíduo	
		Mód.	Âng.			Mód.	Âng.
0,0	-2,95983	1,13e-3	180	427,8	-165,427 + j 2687,83	3,02e+0	-17,4
0,0	-44,7268	8,22e-3	180	463,8	-51,4435 + j 2914,05	3,79e-2	34,9
0,0	-7075,93	1,01e+1	0,00	464,1	-125,492 + j 2916,10	2,21e+0	-5,26
0,0	-21695,8	5,06e+1	180	547,0	-96,1304 + j 3437,10	1,50e+0	9,25
10,0	-0,13144 + j 62,5481	2,76e-5	60,8	550,5	-351,632 + j 3459,18	5,86e-1	-67,3
19,8	-7,04378 + j 124,312	1,68e-3	-6,67	608,5	-203,484 + j 3823,16	6,47e-2	-26,1
30,2	-9,13972 + j 189,482	9,75e-4	13,9	663,9	-198,474 + j 4171,33	8,71e-2	4,46
94,5	-103,972 + j 593,470	5,75e-2	36,4	723,3	-58,3885 + j 4544,57	7,95e-1	-15,8
109,4	-107,574 + j 687,612	2,90e+0	3,30	757,5	-180,575 + j 4759,57	2,63e-1	20,7
135,0	-72,3930 + j 848,429	1,09e+0	23,4	759,4	-70,7981 + j 4771,28	1,02e-1	-36,0
142,3	-124,513 + j 894,072	1,33e+0	16,7	801,3	-284,513 + j 5034,85	4,13e-2	-145
191,4	-32,1353 + j 1202,43	5,86e-3	-152	879,2	-59,1886 + j 5524,42	6,98e+0	0,26
191,9	-134,178 + j 1205,89	1,02e+0	-116	936,8	-522,656 + j 5885,92	3,08e-1	-82,3
220,8	-54,8723 + j 1387,49	2,57e-2	-118	1114,5	-101,080 + j 7002,74	1,89e-3	-38,1
229,9	-92,3058 + j 1444,75	6,82e-2	-86,5	1161,1	-15,9826 + j 7295,26	7,50e-4	0,72
246,1	-305,809 + j 1546,30	4,45e+0	69,2	1208,9	-29,9501 + j 7595,56	3,19e-5	-39,7
284,6	-84,8171 + j 1788,04	2,46e-1	151	1271,9	-29,8077 + j 7991,55	9,54e-1	0,38
302,0	-72,1564 + j 1897,71	1,07e-1	-112	1382,1	-487,064 + j 8684,01	9,77e-2	10,9
330,8	-236,981 + j 2078,41	5,45e+0	-40,7	1535,1	-192,342 + j 9645,13	2,48e-2	-0,31
362,7	-121,048 + j 2278,97	2,14e+0	4,37	1763,0	-537,381 + j 11077,3	9,73e-2	-30,7
376,0	-75,0102 + j 2362,34	1,40e+0	60,3	1956,8	-620,147 + j 12294,9	2,18e-1	20,6
403,3	-160,386 + j 2533,80	3,11e-1	78,1	1996,4	-293,762 + j 12543,6	5,31e-2	26,0

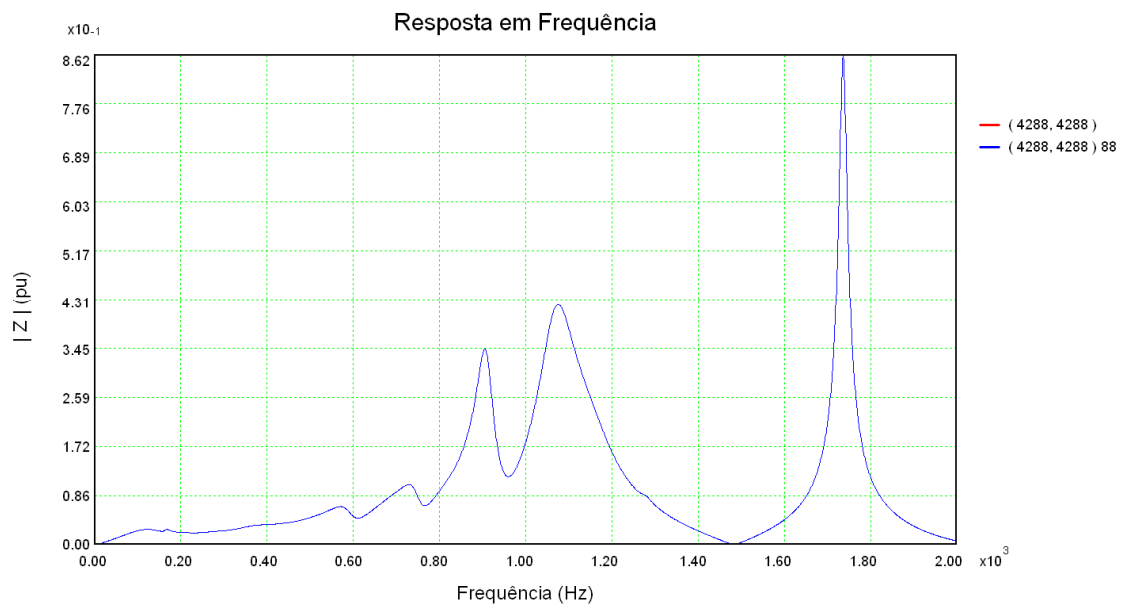


Figura 239: Resposta em frequência do módulo da impedância da barra 4288 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)

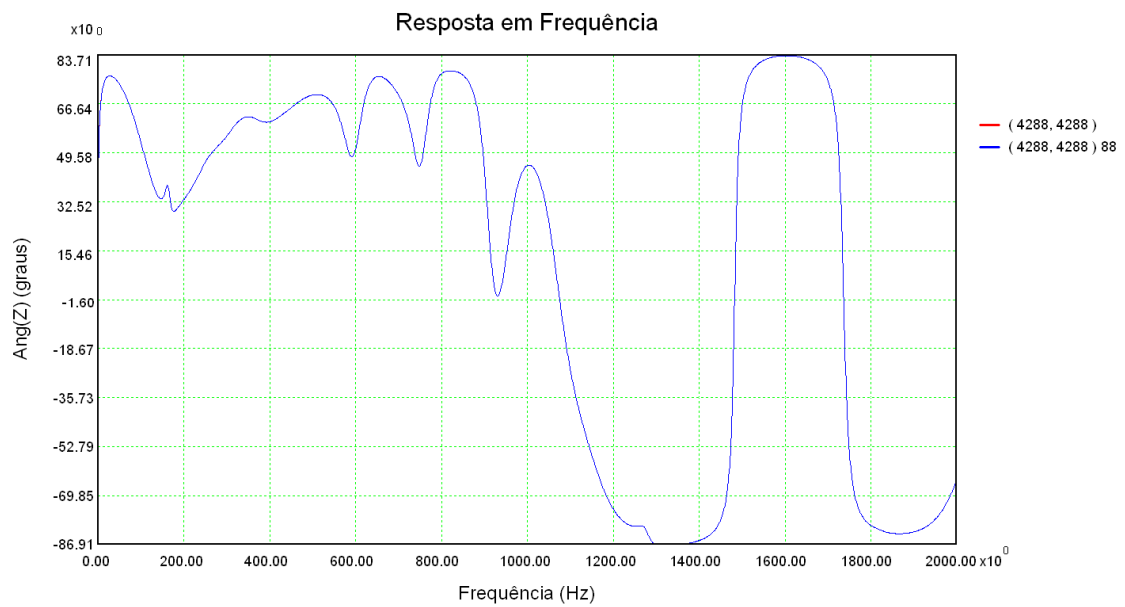


Figura 240: Resposta em frequência do ângulo da impedância da barra 4288 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)

Tabela 75: Conjunto de polos e resíduos da função de transferência (4288,4288)

Freq (Hz)	Polo	Resíduo		Freq (Hz)	Polo	Resíduo	
		Mód.	Âng.			Mód.	Âng.
0,0	-2,46624	7,42e-4	180	646,8	-215,006 + j 4063,67	1,06e-1	-90,4
0,0	-25,0152	9,20e-3	180	664,3	-68,4723 + j 4174,06	7,74e-3	15,1
0,0	-168,122	3,37e-2	180	693,7	-378,707 + j 4358,83	4,62e+0	54,2
0,0	-4430,01	6,01e+0	180	744,1	-151,075 + j 4675,05	7,75e+0	-15,4
84,9	-13,4544 + j 533,170	3,76e-4	136	772,5	-121,027 + j 4853,67	9,05e-2	17,5
99,0	-42,0402 + j 622,236	1,35e-3	42,7	779,9	-37,9405 + j 4900,17	3,59e-4	-137
117,6	-65,3871 + j 738,986	1,03e-2	21,2	797,1	-227,958 + j 5008,22	1,00e+0	124
111,7	-386,716 + j 701,758	7,95e+0	39,9	884,8	-466,757 + j 5559,63	9,20e-1	57,2
133,8	-180,575 + j 840,784	4,04e-1	45,4	908,8	-128,912 + j 5710,07	3,56e+1	11,6
165,2	-45,4103 + j 1038,12	2,30e-1	78,8	977,9	-109,687 + j 6144,04	3,76e-4	-179
195,8	-249,823 + j 1230,40	4,54e-1	61,3	1069,5	-276,325 + j 6720,03	1,01e+2	13,6
244,5	-116,116 + j 1536,55	3,75e-2	-138	1108,1	-428,976 + j 6962,55	9,23e-1	-20,4
295,5	-299,653 + j 1856,93	8,21e-1	-29,9	1154,6	-435,781 + j 7254,27	3,57e+1	-81,1
382,0	-101,191 + j 2400,06	3,48e-2	-80,6	1277,3	-99,9077 + j 8025,37	7,97e-1	-58,4
388,3	-380,576 + j 2439,67	3,27e+0	22,4	1288,3	-348,146 + j 8094,32	4,73e-2	-52,8
395,3	-52,9811 + j 2483,72	5,62e-3	-57,0	1414,1	-135,646 + j 8885,01	2,27e-3	-152
432,5	-207,130 + j 2717,20	1,63e-1	81,3	1415,3	-429,842 + j 8892,91	3,77e-2	-37,0
499,4	-170,270 + j 3137,79	6,93e-3	-80,7	1736,4	-59,6708 + j 10910,2	5,14e+1	0,11
536,4	-37,5560 + j 3370,05	2,50e-3	164	1811,7	-158,428 + j 11383,3	1,58e-1	-2,26
588,8	-180,622 + j 3699,33	5,90e+0	-21,6	1870,3	-484,935 + j 11751,4	6,82e-2	-45,6
593,8	-27,0752 + j 3730,68	1,86e-3	127	2014,1	-397,800 + j 12655,3	9,10e-1	-44,5
602,0	-49,1204 + j 3782,45	1,40e-2	60,9	2668,9	-1642,56 + j 16769,4	1,07e+2	76,9
622,0	-24,7869 + j 3907,86	2,19e-3	43,7	1089,2	-26703,0 + j 6843,59	1,40e+4	-130

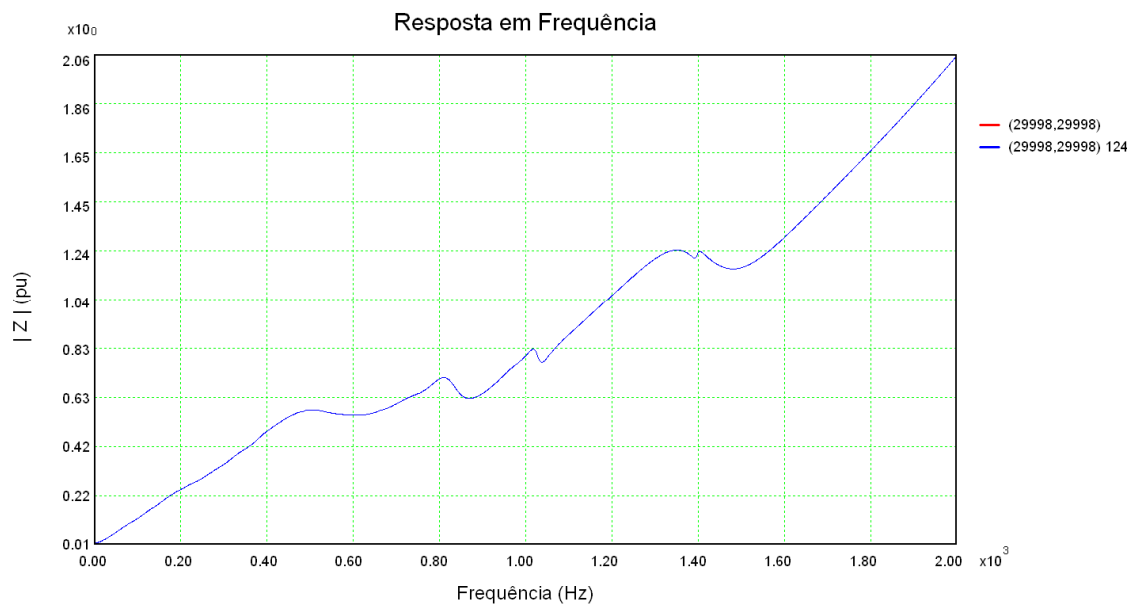


Figura 241: Resposta em frequência do módulo da impedância da barra 29998 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)

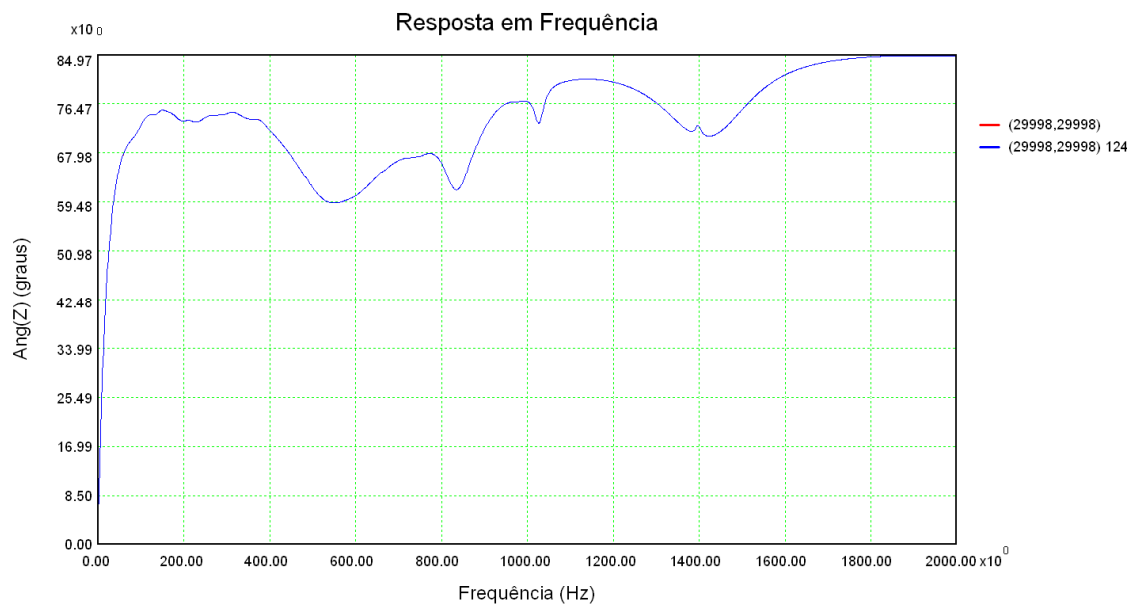


Figura 242: Resposta em frequência do ângulo da impedância da barra 29998 considerando a rede externa completa (vermelho) e a rede externa modelada por polos e resíduos (azul)

Tabela 76: Conjunto de polos e resíduos da função de transferência (29998,29998)

Freq (Hz)	Polo	Resíduo		Freq (Hz)	Polo	Resíduo	
		Mód.	Âng.			Mód.	Âng.
0,0	-0,23348	1,32e-3	180	545,0	-101,501 + j 3424,31	2,24e-1	-146
0,0	-1,71507	8,00e-3	180	519,0	-1087,20 + j 3260,92	3,00e+2	14,8
0,0	-39,1416	1,29e-2	180	566,5	-116,182 + j 3559,54	1,79e-1	-139
0,0	-125,083	8,21e-2	180	586,0	-155,948 + j 3681,65	4,23e-1	108
0,0	-6840,90	2,04e-1	0,00	602,1	-36,3760 + j 3783,21	9,45e-3	12,2
0,0	-48352,8	6,84e+4	180	603,0	-18,6828 + j 3789,03	1,08e-3	127
10,0	-0,86222 + j 62,9789	1,20e-4	-15,3	621,5	-25,2517 + j 3905,22	6,25e-3	56,6
19,8	-8,57248 + j 124,655	4,48e-4	-44,9	656,9	-209,358 + j 4127,18	4,54e-1	-30,7
30,3	-9,55684 + j 190,232	9,23e-3	-39,5	663,7	-51,2124 + j 4169,90	1,45e-1	49,7
83,9	-14,1866 + j 527,248	1,97e-3	-178	729,9	-128,415 + j 4586,37	7,37e-1	44,6
94,7	-170,193 + j 594,958	1,35e+0	-38,7	734,5	-582,614 + j 4615,28	4,05e+1	19,5
112,6	-97,1013 + j 707,345	1,47e-1	40,3	748,9	-41,3824 + j 4705,52	9,33e-2	21,3
135,8	-70,3198 + j 853,535	2,84e-1	-26,8	777,2	-103,285 + j 4883,41	7,29e-3	-51,0
148,6	-6,25560 + j 933,478	2,99e-5	173	824,3	-268,327 + j 5179,32	4,19e+1	17,7
160,4	-91,7648 + j 1008,10	1,41e-1	-34,8	853,6	-175,221 + j 5363,34	1,08e-2	-155
204,3	-116,550 + j 1283,77	8,47e-1	-118	885,4	-32,1247 + j 5563,37	5,34e-2	28,1
220,0	-43,4498 + j 1382,36	2,14e-2	99,3	926,0	-16,2406 + j 5818,50	9,32e-6	43,3
221,9	-359,334 + j 1394,03	1,45e+1	-5,70	972,0	-185,125 + j 6107,37	2,87e+0	37,5
267,8	-138,463 + j 1682,94	6,31e-1	57,2	991,1	-27,9386 + j 6227,47	2,95e-4	-40,9
286,3	-27,0101 + j 1798,94	1,31e-2	64,9	1007,5	-9,05817 + j 6330,00	8,18e-4	-97,4
289,6	-24,3473 + j 1819,37	1,66e-2	174	1026,8	-90,1837 + j 6451,70	7,91e+0	-11,6
298,1	-121,867 + j 1872,96	7,01e-1	-51,0	1047,6	-214,262 + j 6582,13	5,15e-3	26,1
323,7	-56,4324 + j 2033,83	1,42e-2	-83,3	1103,7	-105,434 + j 6935,05	1,31e-2	-145
336,4	-104,246 + j 2113,77	2,42e-1	-61,4	1108,6	-138,784 + j 6965,68	1,26e-1	-47,7
352,7	-156,354 + j 2216,29	1,61e+0	-40,0	1377,7	-130,371 + j 8656,13	3,42e-1	-114
370,2	-82,6081 + j 2326,01	9,08e-2	-140	1397,1	-54,5407 + j 8778,37	2,36e+0	172
391,2	-74,2823 + j 2458,12	2,34e-1	67,3	1404,1	-793,179 + j 8822,13	2,56e+2	-0,45
413,9	-115,612 + j 2600,45	2,74e-1	89,5	1448,8	-120,884 + j 9102,82	1,32e-1	113
439,3	-187,062 + j 2760,13	8,18e-1	157	1506,6	-174,822 + j 9466,49	1,51e-1	33,7
463,3	-51,2820 + j 2910,73	4,53e-2	-99,0	1528,8	-2044,37 + j 9605,54	2,13e+1	-130
483,2	-32,4209 + j 3036,19	1,05e-1	-120	1773,1	-1115,14 + j 11140,8	1,92e+0	-96,5
491,3	-245,253 + j 3086,99	2,30e+0	67,9	3579,8	-1687,47 + j 22492,8	2,84e+4	13,0
505,5	-10,1669 + j 3176,43	2,89e-5	-41,9				

6.4.2.2 Comparação entre a Rede Completa e o Modelo Reduzido

Neste item é feita a comparação entre a rede completa do Sistema Interligado Nacional (modelada por todos os seus equipamentos) e os sistemas reduzidos compostos pelo equivalente modal e o equivalente convencional para a vizinhança 3. De modo análogo aos testes apresentados para o sistema IEEE 14 Barras, para o Sistema Sul-Sudeste + Industrial e para a vizinhança 2 do SIN, o objetivo principal da comparação é avaliar a qualidade do equivalente modal acoplado à rede interna. Como objetivo secundário, a resposta em frequência do sistema reduzido utilizando equivalentes convencionais também é apresentada para que se possa comparar a sua aplicação frente à rede completa e o sistema reduzido composto pelo equivalente modal. Estas comparações são feitas utilizando as respostas em frequências do módulo e do ângulo das impedâncias vistas das barras de fronteira (impedâncias próprias e de transferência).

Para ser possível visualizar a evolução do equivalente convencional com mais vizinhanças frente ao sistema completo, as mesmas barras de fronteira da vizinhança 2 serão utilizadas para se fazer as comparações da vizinhança 3. Logo, serão escolhidas funções de transferência entre as barras 5202 (ARARA2-SP500), 4316 (ESTRE2-MG500), 4319 (TRIODC-RJ500) e 3690 (IBIUNA-SP500) que são consideradas barras importantes na área de estudo. Para completar a comparação, será analisada também uma barra de fronteira da terceira vizinhança para analisar o comportamento do sistema reduzido, considerando o equivalente modal e o equivalente convencional em uma fronteira. A barra de fronteira escolhida é a barra 3781 (ZOESTE-RJ500). Serão analisadas o módulo e o ângulo das funções de transferência próprias e de transferências apresentadas na Tabela 77.

Tabela 77: Funções de transferências para a terceira vizinhança escolhidas para comparação entre o sistema completo e o sistema reduzido

FTs Analisadas	
Barra De	Barra Para
5202	5202
5202	3690
5202	4316
5202	4319
3690	3690
3690	4316
3690	4319
4316	4316
4316	4319
4319	4319
3781	3781

Como apresentado na comparação entre a rede externa completa e formada pelo modelo modal, tanto para a vizinhança 2 quanto para a vizinhança 3, em algumas faixas de frequência em que o valor do módulo da impedância era muito pequeno (da ordem de grandeza do erro do Método do Ajuste Vetorial), o valor do ângulo apresentava algumas discrepâncias. De modo análogo ao da vizinhança 2, para avaliar este comportamento na comparação do sistema completo com o sistema reduzido formado pela rede interna e pelo equivalente modal, foram escolhidas duas funções de transferência para se realizar a comparação exclusivamente entre o modelo completo e o modelo modal (sem considerar a comparação com o sistema reduzido formado pelo equivalente convencional). Das duas funções de transferência, uma não apresenta a discrepância e outra apresenta. O objetivo é mostrar que as diferenças são explicadas pelo mesmo motivo, valores de impedância muito pequenos (da ordem de grandeza do erro do Método do Ajuste Vetorial). As duas funções de transferências são as mesmas que foram escolhidas para a vizinhança 2.

A primeira comparação realizada foi em relação à barra 4316. Foram analisados o módulo e o ângulo da impedância vista desta barra. As curvas em vermelho são da resposta em frequência do sistema elétrico completo. As curvas em azul são da resposta em frequência do sistema reduzido (rede interna mais equivalente modal). Esta comparação pode ser visualizada na Figura 243 e na Figura 244. Pode-se notar que a perfeita coincidência entre os traçados.

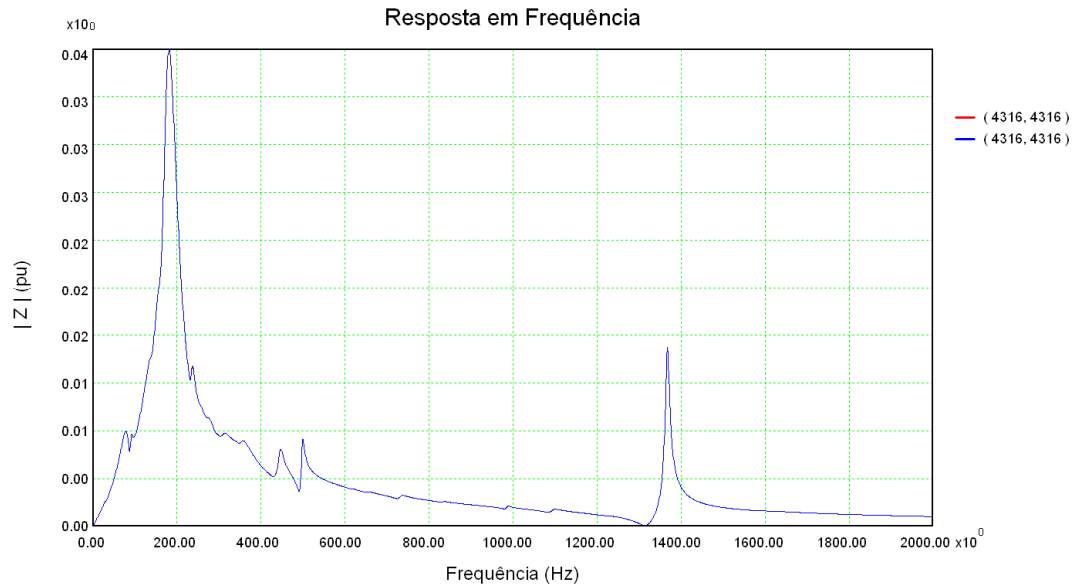


Figura 243: Resposta em frequência do módulo da impedância da barra 4316 considerando a rede completa (vermelho) e o sistema reduzido considerando o equivalente modal (azul)

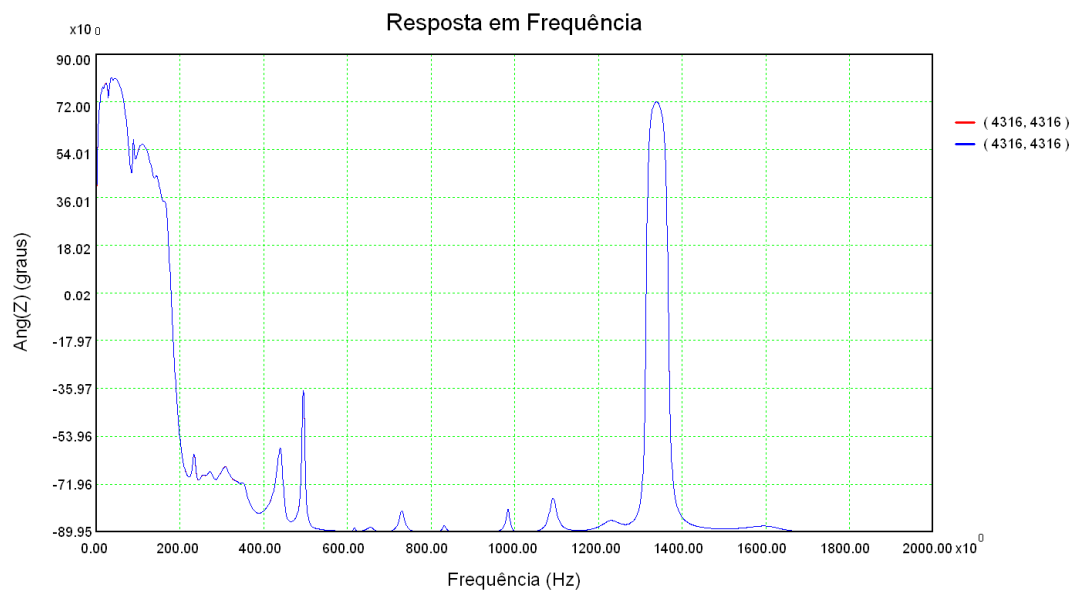


Figura 244: Resposta em frequência do ângulo da impedância da barra 4316 considerando a rede completa (vermelho) e o sistema reduzido considerando o equivalente modal (azul)

Já para a função de transferência entre as barras 3690 e 4319, pode-se visualizar uma grande discrepância na resposta em frequência do ângulo da impedância (Figura 246) a partir de 800 Hz. Mas pelo traçado do módulo (Figura 245), pode-se visualizar que o valor do módulo da impedância é nulo para frequências a partir de 800 Hz. Para comprovar que as diferenças são devido a estes valores baixos de impedância, é realizada ainda a comparação entre a resposta em frequência da parte real e da parte imaginária da impedância entre as barras 3690 e 4319. Estes traçados podem ser

visualizados na Figura 247 e na Figura 248. Pode-se observar que não há diferença entre os valores da parte real e imaginária dos traçados para a rede completa e para o sistema reduzido. Pode-se observar também que os valores da parte real e imaginária da impedância de transferência são praticamente nulos para frequências maiores que 800 Hz.

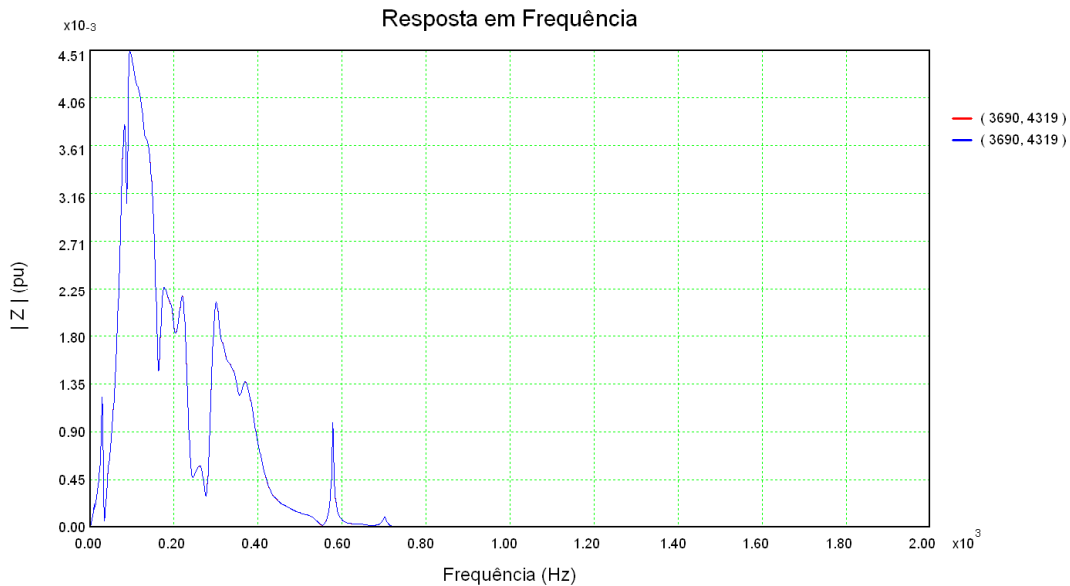


Figura 245: Resposta em frequência do módulo da impedância de transferência entre as barras 3690 e 4319 considerando a rede completa (vermelho) e o sistema reduzido considerando o equivalente modal (azul)

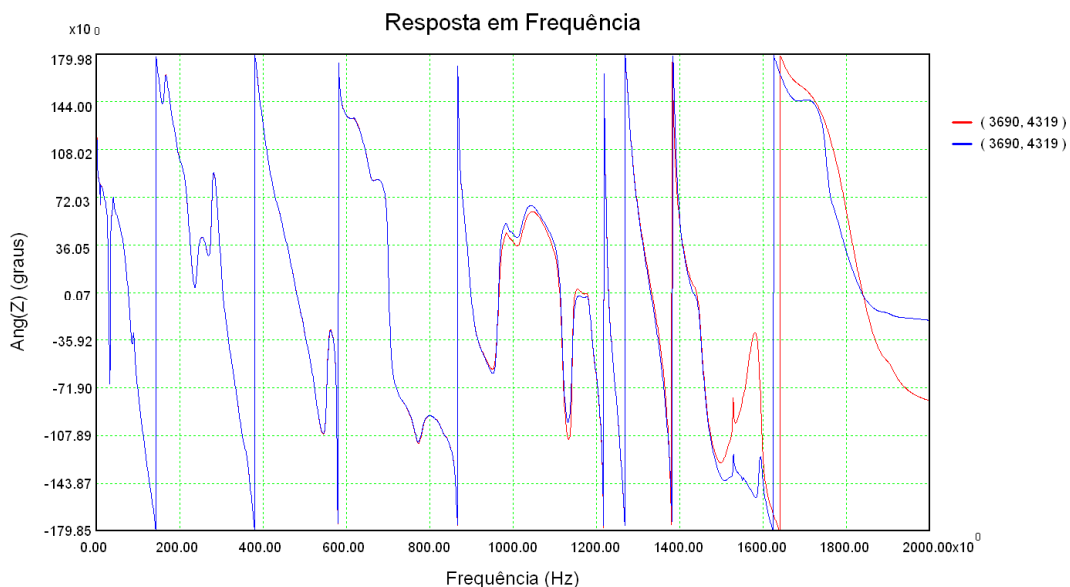


Figura 246: Resposta em frequência do ângulo da impedância de transferência entre as barras 3690 e 4319 considerando a rede completa (vermelho) e o sistema reduzido considerando o equivalente modal (azul)



Figura 247: Resposta em frequência da parte real da impedância de transferência entre as barras 3690 e 4319 considerando a rede completa (vermelho) e o sistema reduzido considerando o equivalente modal (azul)



Figura 248: Resposta em frequência da parte imaginária da impedância de transferência entre as barras 3690 e 4319 considerando a rede completa (vermelho) e o sistema reduzido considerando o equivalente modal (azul)

Deste ponto em diante, além da comparação entre os traçados das funções de transferência do sistema completo e do sistema reduzido formado pelo equivalente modal, serão incluídos os traçados do sistema reduzido formado pelos equivalentes convencionais da segunda e da terceira vizinhança. Para cada gráfico, a curva em vermelho é sempre a resposta em frequência do sistema completo. A curva em azul

representa a resposta do sistema reduzido composto pelo equivalente modal para a terceira vizinhança. A curva em cor laranja representa a resposta do sistema reduzido composto pelo equivalente convencional da vizinhança 2 que é apresentado para se observar a evolução do equivalente convencional da segunda para a terceira vizinhança. Finalmente, a curva em cor marrom representa a resposta do sistema reduzido composto pelo equivalente convencional da vizinhança 3. Tanto o sistema reduzido composto pelo equivalente modal quanto pelos equivalentes convencionais são para a rede interna considerando a barra 5202 como piloto.

Nas comparações dos sistemas completo e reduzidos, será apresentado o traçado do ângulo da impedância somente para a função de transferência da barra piloto (barra 5202). Todos os traçados dos ângulos das outras funções de transferência foram verificados e apresentaram valores muito precisos entre o sistema completo e reduzido utilizando equivalente modal e resultados muito destoantes quando comparados com os equivalentes convencionais de 2^a ou 3^a vizinhança. Só não serão apresentados no texto devido ao espaço que ocupariam e ao fato de não se conseguir visualizar muito bem a comparação do ângulo quando os traçados para os equivalentes convencionais também são apresentados nos mesmos gráficos onde já estão apresentados os traçados para o sistema completo e para o sistema reduzido composto pelo equivalente modal.

Logo, na Figura 249 e na Figura 250 são apresentados os traçados do módulo e do ângulo da impedância da barra piloto 5202. Da Figura 251 à Figura 260 são apresentados os traçados do módulo das impedâncias das funções de transferência restantes informadas na Tabela 77.

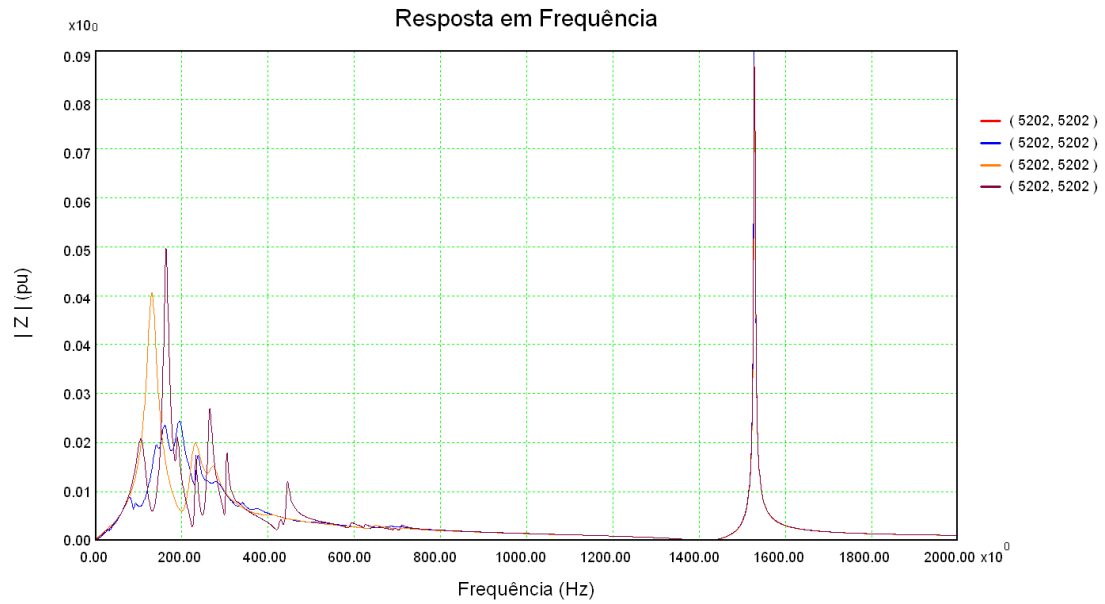


Figura 249: Resposta em frequência do módulo da impedância da barra 5202 considerando a rede completa (vermelho) e os sistemas reduzidos considerando o equivalente modal (azul), o equivalente convencional para a vizinhança 2 (laranja) e o equivalente convencional para a vizinhança 3 (marrom)

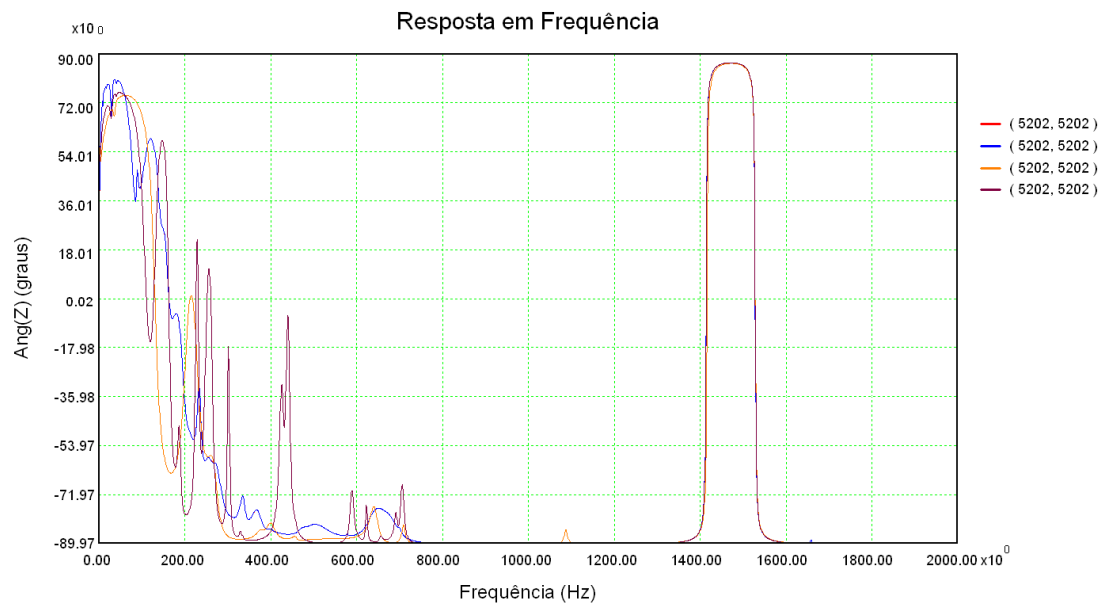


Figura 250: Resposta em frequência do ângulo da impedância da barra 5202 considerando a rede completa (vermelho) e os sistemas reduzidos considerando o equivalente modal (azul), o equivalente convencional para a vizinhança 2 (laranja) e o equivalente convencional para a vizinhança 3 (marrom)

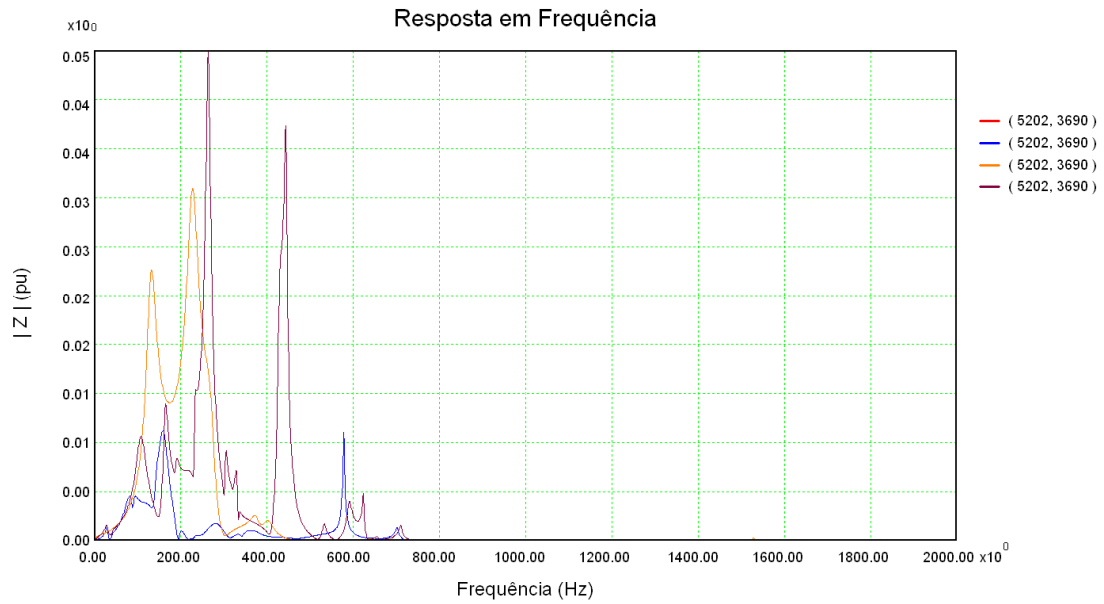


Figura 251: Resposta em frequência do módulo da impedância de transferência entre as barras 5202 e 3690 considerando a rede completa (vermelho) e os sistemas reduzidos considerando o equivalente modal (azul), o equivalente convencional para a vizinhança 2 (laranja) e o equivalente convencional para a vizinhança 3 (marrom)

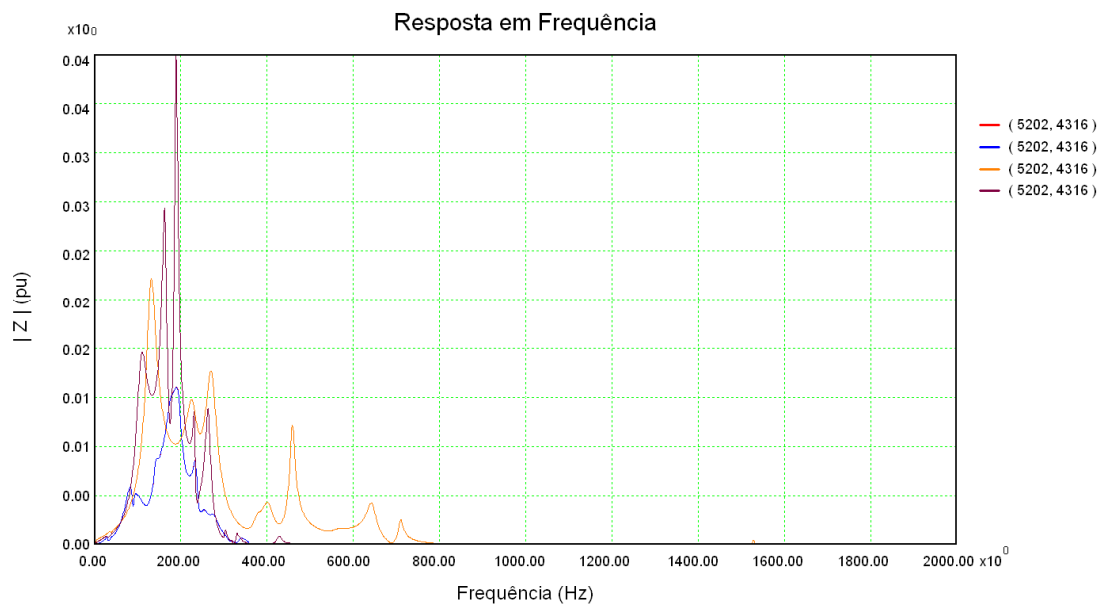


Figura 252: Resposta em frequência do módulo da impedância de transferência entre as barras 5202 e 4316 considerando a rede completa (vermelho) e os sistemas reduzidos considerando o equivalente modal (azul), o equivalente convencional para a vizinhança 2 (laranja) e o equivalente convencional para a vizinhança 3 (marrom)

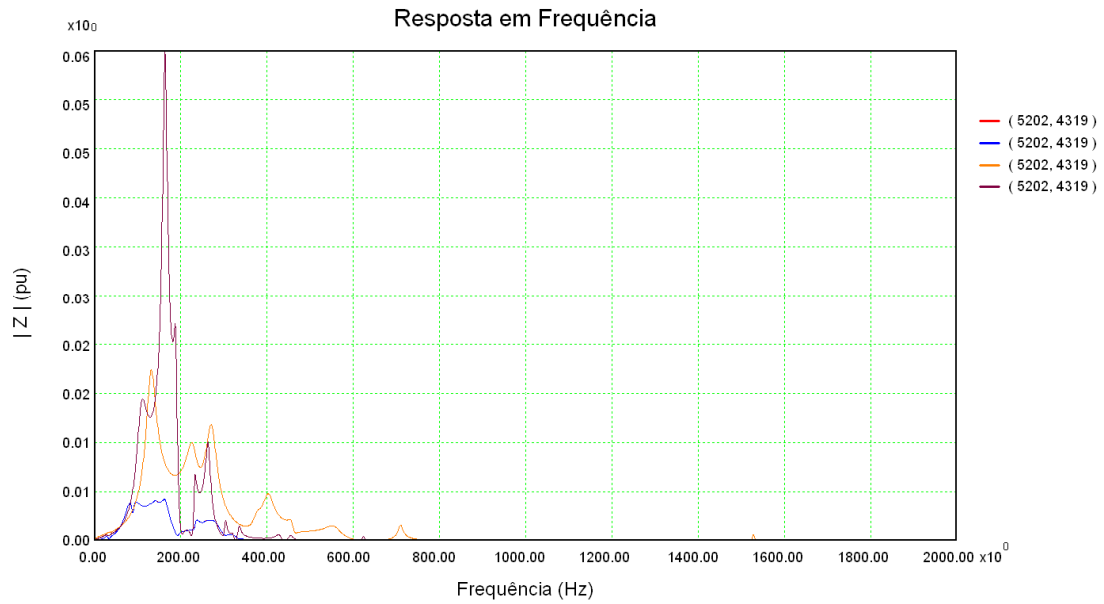


Figura 253: Resposta em frequência do módulo da impedância de transferência entre as barras 5202 e 4319 considerando a rede completa (vermelho) e os sistemas reduzidos considerando o equivalente modal (azul), o equivalente convencional para a vizinhança 2 (laranja) e o equivalente convencional para a vizinhança 3 (marrom)

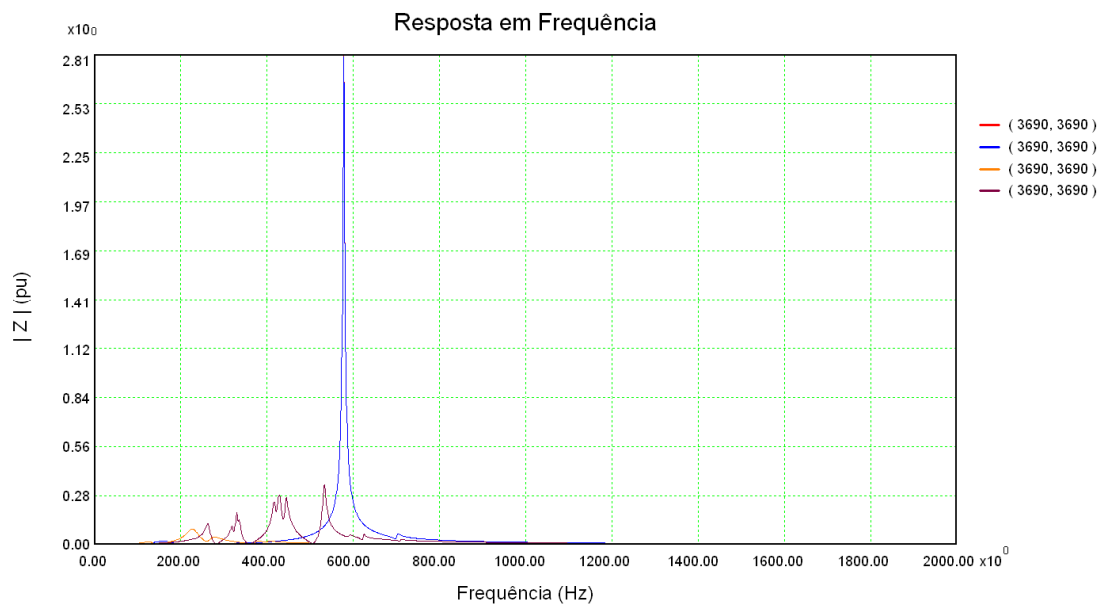


Figura 254: Resposta em frequência do módulo da impedância da barra 3690 considerando a rede completa (vermelho) e os sistemas reduzidos considerando o equivalente modal (azul), o equivalente convencional para a vizinhança 2 (laranja) e o equivalente convencional para a vizinhança 3 (marrom)

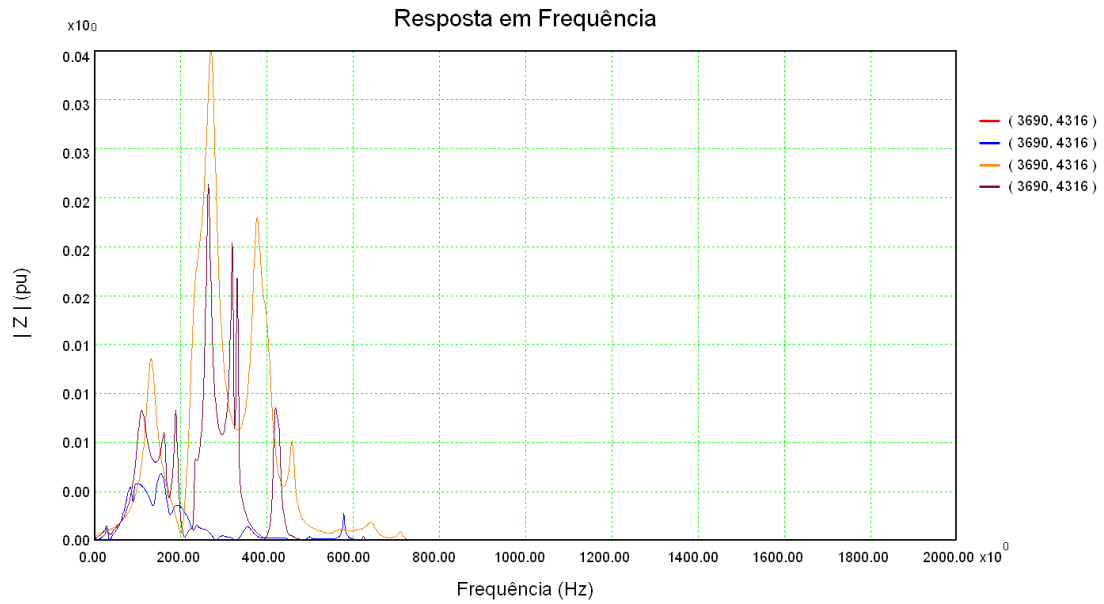


Figura 255: Resposta em frequência do módulo da impedância de transferência entre as barras 3690 e 4316 considerando a rede completa (vermelho) e os sistemas reduzidos considerando o equivalente modal (azul), o equivalente convencional para a vizinhança 2 (laranja) e o equivalente convencional para a vizinhança 3 (marrom)

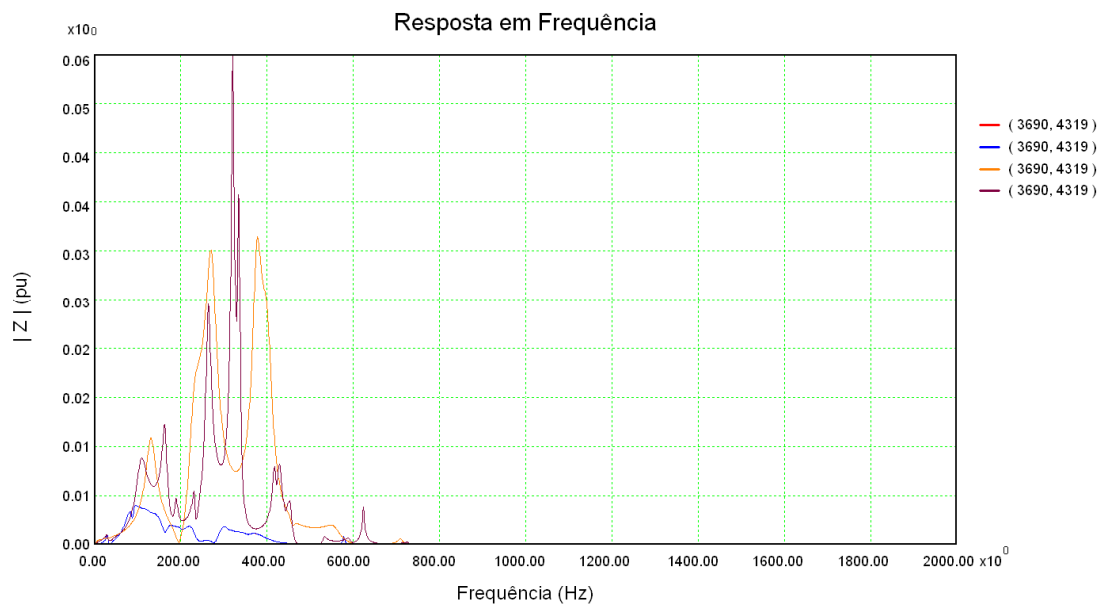


Figura 256: Resposta em frequência do módulo da impedância de transferência entre as barras 3690 e 4319 considerando a rede completa (vermelho) e os sistemas reduzidos considerando o equivalente modal (azul), o equivalente convencional para a vizinhança 2 (laranja) e o equivalente convencional para a vizinhança 3 (marrom)

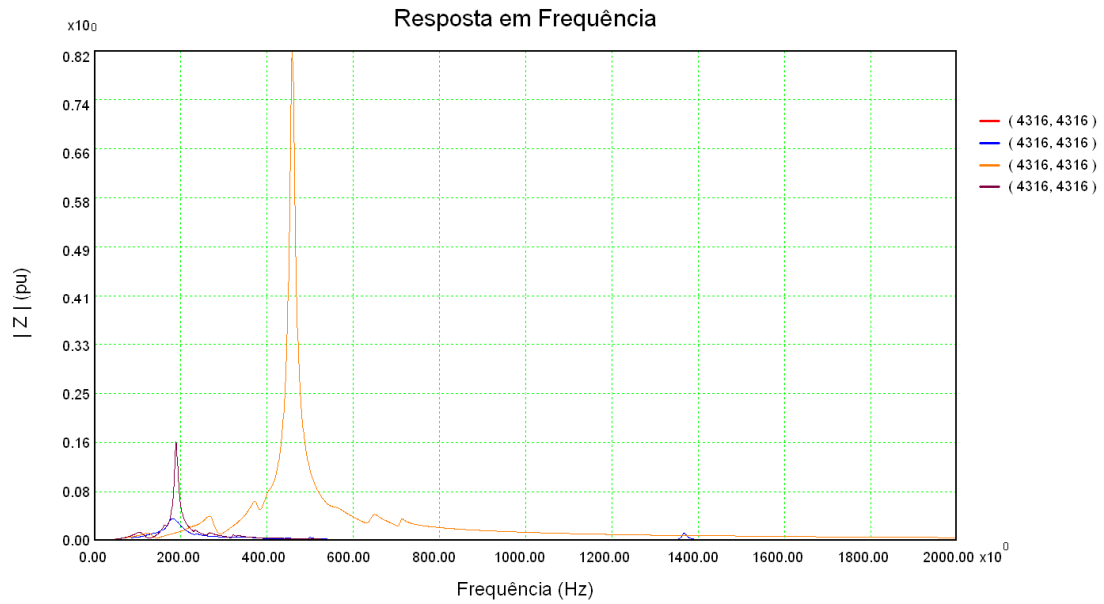


Figura 257: Resposta em frequência do módulo da impedância da barra 4316 considerando a rede completa (vermelho) e os sistemas reduzidos considerando o equivalente modal (azul), o equivalente convencional para a vizinhança 2 (laranja) e o equivalente convencional para a vizinhança 3 (marrom)

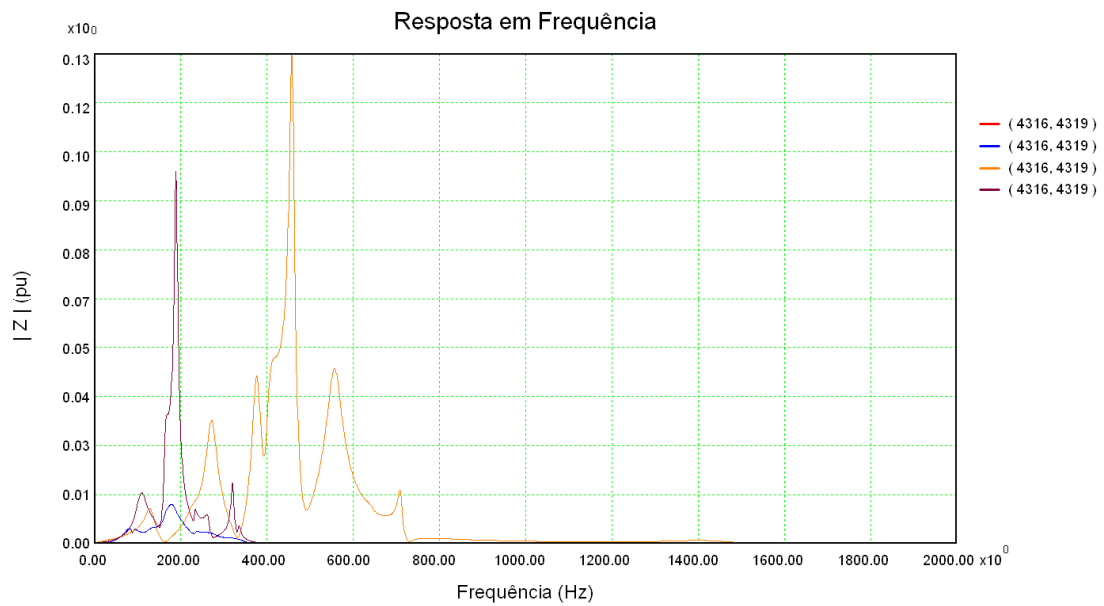


Figura 258: Resposta em frequência do módulo da impedância de transferência entre as barras 4316 e 4319 considerando a rede completa (vermelho) e os sistemas reduzidos considerando o equivalente modal (azul), o equivalente convencional para a vizinhança 2 (laranja) e o equivalente convencional para a vizinhança 3 (marrom)

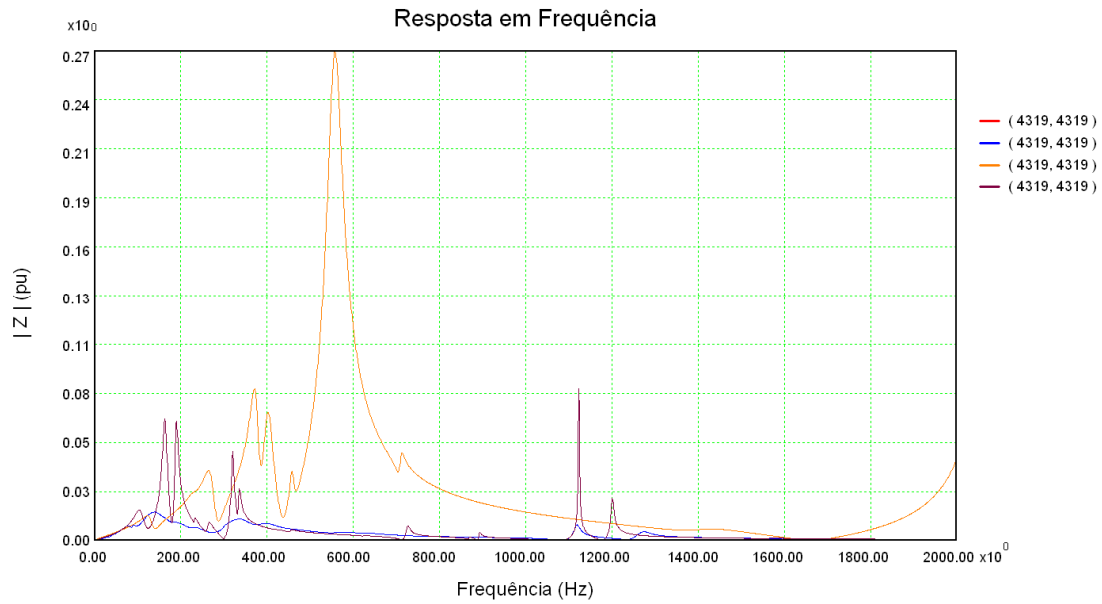


Figura 259: Resposta em frequência do módulo da impedância da barra 4319 considerando a rede completa (vermelho) e os sistemas reduzidos considerando o equivalente modal (azul), o equivalente convencional para a vizinhança 2 (laranja) e o equivalente convencional para a vizinhança 3 (marrom)

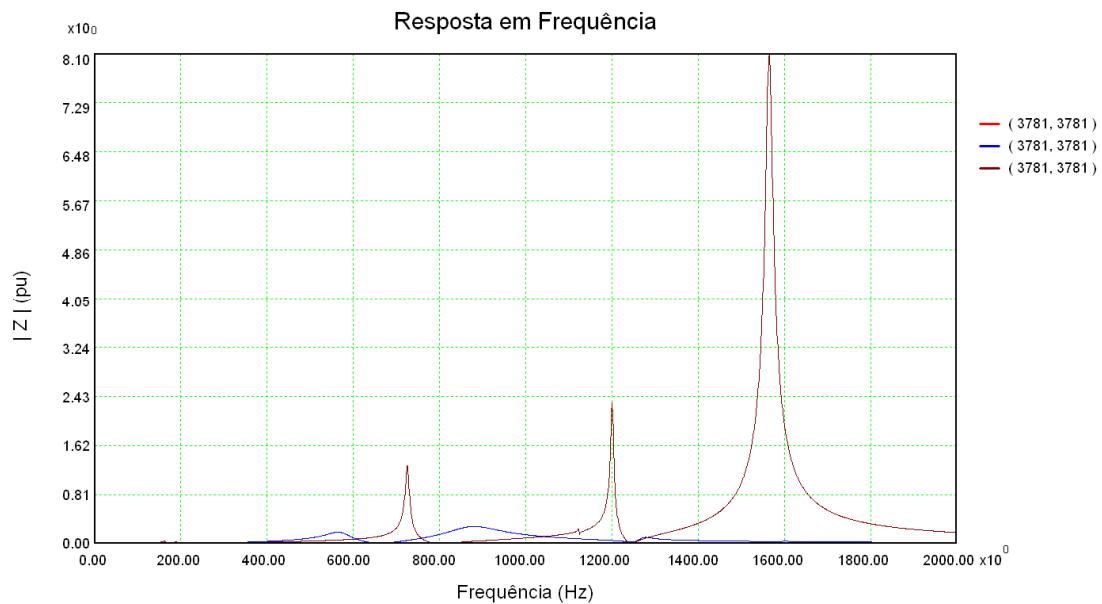


Figura 260: Resposta em frequência do módulo da impedância da barra 3781 considerando a rede completa (vermelho) e os sistemas reduzidos considerando o equivalente modal (azul) e o equivalente convencional para a vizinhança 3 (marrom)

Pode-se observar, pelas comparações apresentadas, que as curvas do sistema completo (vermelho) e as do sistema reduzido composto pelo equivalente modal (azul) são coincidentes, validando que o equivalente modal tem excelente qualidade e representa com fidelidade o que está além da rede interna.

Pode-se observar também que o equivalente convencional considerando a segunda ou terceira vizinhanças, é muito ruim e difere em muitas frequências da resposta da rede completa. Para a barra de interesse 5202, desejando a precisão adotada, mais vizinhanças serão necessários para que sejam obtidos bons resultados utilizando equivalentes convencionais.

Vale frisar que, com exceção da resposta em frequência da barra 3781 (Figura 260), todas as respostas em frequências são da rede interna, e mesmo não sendo de barras de fronteira, continuam não tendo muita qualidade quando o equivalente em questão é o convencional.

6.5 Informações sobre os Testes Realizados

O tempo necessário para o ajuste de todas as curvas das funções de transferência é dependente dos seguintes fatores:

- Número de amostras (ou número de frequências): define o tamanho do vetor de impedâncias que será ajustado. Quanto maior o número de amostras, mais pontos para serem ajustados e melhor definida fica a curva. Em compensação, o tempo de processamento aumenta. Se o número de amostras for pequeno, picos importantes da curva podem não ser informados;
- Dimensão e modelagem da rede elétrica externa: o tempo necessário para o cálculo do vetor de impedâncias, que serve como dado de entrada do Método do Ajuste Vetorial, é diretamente proporcional à dimensão da rede elétrica externa e, novamente, ao número de amostras. Isto porque este cálculo requer n soluções lineares, onde n é o número de amostras, de um sistema de dimensão do número de barras, somado ao número de circuitos PIs de linhas de transmissão e ao número de máquinas existentes na rede externa. Em sistemas de grande porte, onde geralmente a rede externa pode ser considerada praticamente do tamanho da rede completa (expande-se poucas vizinhanças a partir da barra piloto), a dimensão do sistema influencia muito no tempo de processamento. O tempo médio aproximado para o cálculo do vetor de

impedância de uma função de transferência, considerando 1001 amostras (que foi o número de amostras utilizado nos testes para o sistema de grande porte) é 18 segundos;

- Ordem de aproximação do ajuste: quanto maior a ordem, mais tempo é necessário para o ajuste pelo método. Caso se opte e seja necessário aumentar a ordem por não ser possível alcançar a convergência, seja manualmente ou automaticamente, o tempo de processamento se elevará ainda mais.
- Ativação das opções de ajuste automático (incremento ou decremento) da ordem de aproximação: ativar essas opções eleva bastante o tempo de processamento, porém define uma ordem de aproximação que não seja nem baixa, nem alta para cada função de transferência. O tempo de processamento a mais vai depender muito do fator de incremento/decremento que é ativado, pois um fator muito pequeno leva a muitos incrementos/decrementos até a convergência. Maiores detalhes sobre estas opções são apresentadas no item 5.3.1. Na Tabela 79 são apresentadas comparações entre os tempos de processamento dos ajustes para as vizinhanças 2 e 3, a partir da barra 5202 do SIN, considerando a busca automática da ordem e as possibilidades de se aumentar ou diminuir a ordem de aproximação para ter um número ótimo de polos. A ordem de aproximação média para cada caso e o desvio padrão são informados na Tabela 80;
- Tolerância do critério de parada: quanto menor a tolerância, considerando fixos a ordem de aproximação e o número de amostras, o número de iterações para cada função de transferência pode aumentar. Considerando a ordem variável, quanto menor a tolerância, maior será a ordem necessária. Na Tabela 79 são apresentadas comparações entre os tempos de processamento considerando também diferentes tolerâncias. Na Tabela 80 pode ser visualizada a variação da ordem com a diminuição da tolerância quando se compara o mesmo critério de definição da ordem de aproximação (BO, AO e ADO);

- Número de barras de fronteira: quanto maior o número de barras de fronteira, mais funções de transferência deverão ser ajustadas;

O número de funções de transferência pode ser encontrado através de (6.1), onde $N_{fronteiras}$ é o número de barras de fronteira.

$$Num_FT = \frac{(N_{fronteiras}^2 - N_{fronteiras})}{2} + N_{fronteiras} = \frac{N_{fronteiras}(N_{fronteiras} + 1)}{2} \quad (6.1)$$

Uma estatística dos testes realizados anteriormente é apresentada na Tabela 78. Todos os tempos de processamento medidos foram colhidos utilizando um notebook com processador Pentium I7 de 2,67 GHz com 4Gb de memória RAM. Os tempos processados foram para os ajustes das Num_FT funções de transferências encontradas. A coluna Dimensão indica o tamanho da rede completa e entre parênteses o tamanho, respectivamente, da rede interna e da rede externa.

Tabela 78: Estatística dos testes realizados

Sistema	Dimensão	Número Fronteiras	Número de FTs	Tolerância	Tempo de Processamento (h:m:s)
IEEE 14 – Viz 1	14 (5/13)	4	10	10^{-6}	0:01:18
IEEE 14 – Viz 2	14 (10/9)	5	15	10^{-6}	0:00:45
Sul Sudeste/ Transmissão	72 (40/34)	2	3	10^{-6}	0:01:38
SIN – Viz 2	6923 (20/6917)	14	105	10^{-6}	0:54:51
SIN – Viz 3	6923 (69/6901)	47	1128	10^{-6}	7:12:34

Na Tabela 79 é apresentada uma comparação entre os tempos de processamento do Método do Ajuste Vetorial para as vizinhanças 2 e 3 do SIN, a partir da barra de Araraquara 500 kV (barra 5202). Nesta tabela, a tolerância do erro entre a resposta em frequência completa e a do ajuste é variada de 10^{-3} a 10^{-6} . A definição da ordem também é variada e as opções são identificadas como BO, AO e ADO. A opção BO indica que a ordem é definida automaticamente no início do ajuste pelo número de picos e pelo fator de correção, e não é modificada durante o processamento. Utilizando esta opção, dependendo da tolerância, o número máximo de iterações pode ser atingido e não há como alterar a ordem. A opção AO indica que a ordem é definida inicialmente de modo análogo ao da opção BO, mas se for necessário, a ordem pode ser aumentada caso o

número de iterações máximo seja alcançado com a tolerância do erro maior que a esperada. A opção ADO indica que, além de aumentar a ordem dos ajustes de algumas funções de transferência, como é feito na opção AO, também é possível diminuir a ordem de outras que possuíram a definição da ordem inicial maior que a necessária. Nas opções AO e ADO, a ordem é aumentada ou diminuída com o passo de 20 em 20 polos.

Tabela 79: Comparações entre os tempos de processamentos para as vizinhanças 2 e 3 do SIN a partir da barra 5202 considerando a busca automática da ordem e a possibilidade de aumentar ou diminuir a ordem de aproximação

Tolerância \ Modo Busca	Vizinhança 2			Vizinhança 3		
	BO	AO	ADO	BO	AO	ADO
10^{-3}	0:31:30	0:31:20	0:32:33	5:00:05	5:01:24	5:09:18
10^{-4}	0:31:55	0:32:16	0:35:21	5:00:28	5:03:10	5:23:35
10^{-5}	0:33:44	0:34:40	0:42:50	5:11:16	5:18:22	5:59:34
10^{-6}	0:37:40	0:46:56	0:54:51	5:36:21	6:21:10	7:12:34

Legenda da Tabela 79:

BO – Busca automática da ordem

AO – Busca automática com possibilidade de aumento automático da ordem

ADO – Busca automática com possibilidade de aumento ou diminuição automáticos da ordem

Pode-se observar na Tabela 79 que à medida em que a tolerância vai aumentando, o tempo de processamento também aumenta. Analisando somente a opção BO, as diferenças de tempo são devido aos ajustes exigirem um pouco mais de iterações. Com a opção AO ativada, os tempos de processamentos são sempre maiores que para a opção BO, porque sempre se faz, primeiramente, a busca automática e após ser verificado o número de iterações, é aplicado ou não o aumento automático da ordem. De modo análogo, a opção ADO é aplicada somente após a busca automática.

Analisando as colunas verticalmente, pode-se observar sempre um aumento do tempo com o aumento da tolerância, também explicado pelo maior número de iterações necessário.

As grandes diferenças de tempo de processamento entre as vizinhanças 2 e 3 são facilmente explicadas pela diferença de quantidade de funções de transferência que são ajustadas, 105 para a segunda vizinhança e 1128 para a terceira.

Na Tabela 80 é apresentada a comparação entre os valores médios da ordem de aproximação e, entre parênteses, seus respectivos desvios padrão para as vizinhanças 2 e 3 da barra piloto 5202. De modo análogo à Tabela 79, a definição da ordem também é variada e as opções identificadas como BO, AO e ADO.

Tabela 80: Comparações entre as ordens de aproximação para as vizinhanças 1, 2 e 3 do SIN a partir da barra 5202 considerando a busca automática da ordem e a possibilidade de aumentar ou diminuir a ordem de aproximação

Modo Busca Tolerância	Vizinhança 2			Vizinhança 3		
	BO	AO	ADO	BO	AO	ADO
10^{-3}	89,37 (25,67)	89,37 (25,67)	16,42 (7,15)	70,46 (32,29)	70,66 (31,98)	13,48 (8,46)
10^{-4}	89,37 (25,67)	90,70 (23,20)	36,04 (11,29)	70,46 (32,29)	71,65 (30,92)	24,26 (14,60)
10^{-5}	89,37 (25,67)	94,90 (18,10)	64,99 (15,23)	70,46 (32,29)	74,81 (29,80)	43,89 (23,22)
10^{-6}	89,37 (25,67)	112,23 (14,78)	103,85 (19,19)	70,46 (32,29)	85,11 (31,36)	70,30 (32,04)

Pode-se observar que, caso sejam avaliadas as colunas AO e ADO independentemente, o valor da ordem de aproximação aumenta com a diminuição da tolerância do erro do ajuste.

Não há diferenças entre os valores para a coluna BO pois a busca automática é feita independente da tolerância. Porém, o número de iterações cresce à medida que se aumenta a tolerância e, em vários ajustes, o número de iterações alcançou o valor máximo (30 iterações).

Analisando para uma mesma tolerância e comparando as colunas BO e AO, pode-se notar que o valor médio da ordem é sempre maior na opção AO. Isso acontece pois a ordem é sempre aumentada a partir do valor encontrado na busca automática (BO). Já a coluna ADO pode ter valores maiores ou menores que as outras colunas, pois pode haver aumento na ordem de algumas funções de transferência e diminuição na ordem de outras.

Para que seja possível analisar os valores da ordem de cada função de transferência e não mais os valores da média das funções, na Tabela 81, na Tabela 82 e na Tabela 83 são apresentadas todas as ordem de aproximação para a vizinhança 2 do SIN

considerando, respectivamente, a busca automática da ordem (BO), o aumento da ordem (AO) e o aumento ou a diminuição da mesma (ADO). Os valores apresentados são para o valor da tolerância 10^{-6} , que é a tolerância aplicada nos testes para a vizinhança 2 e 3 vistos neste capítulo. Devido à grande quantidade de funções de transferência para a vizinhança 3, não é possível informar os valores da ordem de cada função de transferência como foi feito para a vizinhança 2 nas tabelas a seguir.

Tabela 81: Valores das ordens de aproximação das funções de transferência para a vizinhança 2, considerando a opção de busca da ordem e a tolerância de 10^{-6}

FT	2655	4326	2575	3690	3699	3700	3816	4282	4598	3720	4316	4319	4321	2630
2655	44	84	96	72	96	84	88	96	132	88	112	96	64	84
4326		40	120	80	96	104	76	140	108	64	88	52	80	100
2575			28	84	96	44	96	92	100	124	104	112	84	80
3690				16	48	56	76	116	108	72	112	84	84	96
3699					52	92	116	96	112	96	132	108	112	100
3700						24	76	88	68	112	92	108	104	88
3816							32	112	120	64	92	80	100	96
4282								44	88	132	124	140	92	88
4598									80	104	100	112	112	108
3720										56	92	84	88	120
4316											60	112	128	112
4319												52	84	108
4321													52	84
2630														56

Tabela 82: Valores das ordens de aproximação das funções de transferência para a vizinhança 2, considerando a opção de busca com possibilidade de aumento automático da ordem, com a tolerância de 10^{-6}

FT	2655	4326	2575	3690	3699	3700	3816	4282	4598	3720	4316	4319	4321	2630
2655	144	104	136	92	96	124	128	116	132	128	112	96	144	124
4326		100	120	80	96	104	96	140	108	104	88	92	100	100
2575			148	104	96	124	136	112	120	124	104	112	144	120
3690				96	88	96	96	116	108	72	112	84	104	96
3699					96	92	116	96	112	96	132	108	112	100
3700						124	116	108	108	112	112	108	124	108
3816							132	112	120	124	112	100	120	116
4282								124	108	132	124	140	112	108
4598									120	104	120	112	112	108
3720										116	112	104	128	120
4316											120	112	128	112
4319												92	104	108
4321													132	124
2630														116

Tabela 83: Valores das ordens de aproximação das funções de transferência para a vizinhança 2, considerando a opção de busca com possibilidade de aumento ou diminuição automático da ordem, com a tolerância de 10^6

FT	2655	4326	2575	3690	3699	3700	3816	4282	4598	3720	4316	4319	4321	2630
2655	144	104	136	92	76	124	128	116	112	128	112	96	144	124
4326		100	100	80	56	84	96	80	88	104	88	92	100	80
2575			148	104	76	124	136	112	120	104	104	92	144	120
3690				96	88	96	96	96	88	72	72	64	104	96
3699					96	72	76	96	72	76	72	68	92	80
3700						124	116	108	108	112	112	88	124	108
3816							132	112	120	124	112	100	120	116
4282								124	108	92	104	80	112	108
4598									120	104	120	92	112	108
3720										116	112	104	128	100
4316											120	92	108	112
4319												92	104	88
4321													132	124
2630														116

Capítulo 7 – Conclusões e Propostas de Trabalhos Futuros

7.1 Conclusões

Este trabalho é uma contribuição no cálculo de equivalentes de redes com aplicações em estudos de harmônicos e transitórios eletromagnéticos.

Como destacado, os equivalentes de redes são ferramentas muito importantes nos estudos de transitórios eletromagnéticos. Na prática é inviável utilizar redes de grande porte completas em programas do tipo EMTP. Primeiro porque, em geral, não se tem os modelos de transitórios para a rede completa. Segundo porque o tempo de processamento necessário para simular toda rede é muito grande. Logo, a utilização de equivalentes de redes de alta qualidade é uma saída para considerar com boa aproximação o efeito da rede completa.

Em geral, o tipo de equivalente de redes utilizado nos estudos de transitórios eletromagnéticos é o de curto-circuito (ou equivalentes na frequência fundamental). Um motivador para a utilização deste equivalente é que se aproveita a base de dados de regime permanente de programas de fluxo de potência e de análise de faltas. Porém, para não prejudicar a precisão dos resultados nos estudos na área de interesse, existe a necessidade de se definir uma rede interna modelada em detalhes e de dimensões factíveis, substituindo o restante da rede (rede externa) por este equivalente convencional. É importante que a rede interna tenha um tamanho mínimo para que seja possível modelar o menor número de componentes em programas de transitórios. Porém, a determinação da dimensão mínima da rede interna que mantenha uma precisão adequada dos resultados é uma tarefa árdua.

Como uma primeira etapa deste trabalho, visando amenizar as dificuldades de definição da rede interna, foi desenvolvido um algoritmo que utiliza o conceito de vizinhanças elétricas para definição de redes internas. A partir de uma indicação do tamanho da rede

interna, o analista poderá modelar somente o necessário dentro de programas de transitórios eletromagnéticos e ainda utilizar os equivalentes convencionais que serão calculados após a utilização do algoritmo de vizinhanças. A grande contribuição do algoritmo é a facilidade de utilização, não sendo preciso despende muito tempo desenhando ou analisando diagramas unifilares. Somente uma barra piloto e o número de vizinhanças é necessário para executar o algoritmo.

Intimamente ligado ao algoritmo de vizinhanças, também é apresentado como resultado deste trabalho a implementação dos cálculos dos equivalentes convencionais no programa HarmZs. Testes comparando os valores dos equivalentes foram feitos com o programa Anafas obtendo-se excelentes resultados. Também foram realizados testes comparando os comportamentos em frequência dos sistemas reduzido e completo no próprio programa HarmZs. Na tentativa de se realizar um procedimento para facilitar a definição mínima da rede interna para o estudo em uma faixa de frequências definida, foi desenvolvida uma ferramenta para realizar sucessivas definições da rede interna utilizando o conceito de vizinhanças elétricas, para posterior comparação entre os traçados de resposta em frequência dos sistemas reduzidos e completo. O objetivo desta implementação é definir, através da análise visual dos traçados, a rede interna mínima que deve ser representada por completo. Foram apresentadas as dificuldades encontradas na utilização dos equivalentes convencionais.

No Capítulo 4 é apresentada a utilização de equivalentes modais como uma alternativa à utilização dos equivalentes convencionais. Foi apresentado o Método do Ajuste Vetorial como ferramenta para realizar a aproximação de respostas em frequência. Através deste método, pode-se aproximar a resposta em frequência de impedâncias por meio de funções racionais da frequência complexa s . Este método mostrou-se bastante aplicável ao problema pela sua robustez e pelo fato de se obter um nível de automatismo excepcional na aproximação racional de várias funções de transferência, que antes era impraticável de ser atingido com métodos tradicionais de cálculos de polos e resíduos para sistemas de grande porte.

A utilização deste método em uma versão não comercial do HarmZs foi um desafio a parte. Para evitar implementá-lo diretamente em C++, optou-se por compilar os arquivos do Método do Ajuste Vetorial que estavam disponíveis na linguagem Matlab

para que fossem utilizados no HarmZs, que é desenvolvido em C++. Deste modo, seria possível acessar a biblioteca do Método do Ajuste Vetorial em tempo real de processamento, sem necessidade de se parar o processamento para obter os resultados fora do HarmZs. Adquiriu-se um nível de conhecimento sobre a comunicação entre o Matlab e o C++ que possibilita a utilização desta ferramenta como um poderoso modo de se testar implementações futuras que podem ser realizadas primeiramente em Matlab para, em um passo seguinte, serem implementadas em C++.

Finalmente, foram apresentados os testes para validação dos equivalentes modais. Primeiramente foram realizados testes em dois sistemas elétricos de menor porte. Como último teste, foram apresentados resultados para um sistema real de grande porte. Nos ajustes vetoriais, para todos os testes, utilizou-se uma tolerância de erro igual a 10^{-6} . Logo, nas comparações entre redes externas modeladas por seu modelo completo e modelo reduzido, o erro médio quadrático de todas as curvas ajustadas é menor que esta tolerância. Não foram medidos os erros entre as curvas do sistema completo e sistema reduzido, porém, em todos os casos as curvas eram visualmente coincidentes, indicando que os erros permaneciam baixos.

Deve-se ressaltar que, embora as diferenças de ordens de grandeza de erros entre as curvas de resposta em frequência sejam pequenas mesmo para redes internas definidas com um número muito pequeno de componentes, deve-se ter atenção na definição da rede interna mesmo quando se está utilizando equivalentes modais. Isto porque a exatidão conseguida com esses modelos modais pode passar a falsa impressão de que não é necessário fazer uma definição razoável da rede interna. No entanto, deve-se observar que os equivalentes modais são baseados nas curvas de resposta em frequência utilizando modelos onde algumas características importantes para transitórios eletromagnéticos não são consideradas, tais como a real transposição de linhas de transmissão, detalhes da modelagem da dependência com a frequência de alguns componentes, algumas não linearidades, etc. Convém ainda ressaltar que a rede interna deve ser suficientemente ampla para permitir a modelagem dos equipamentos de manobra e dos eventos a serem estudados.

Por último, foi possível constatar que a utilização de equivalentes convencionais deve ser feita com cautela. Pode-se observar nos testes a imprecisão dos equivalentes

convencionais frente aos equivalentes modais quando a rede interna é definida com dimensão menor que a necessária. Constata-se ainda que, para um bom grau de precisão quando se utiliza equivalentes convencionais, a rede interna normalmente deve possuir grandes dimensões.

7.2 Propostas de Trabalhos Futuros

Como trabalhos futuros, destaca-se a implementação do Método do Ajuste Vetorial em C++ para torná-lo uma ferramenta de aproximação racional de respostas em frequência no cálculo de equivalentes de redes na versão comercial do programa HarmZs.

Pode-se ainda generalizar os algoritmos de determinação de vizinhanças para considerar, por exemplo, múltiplas barras piloto, crescimento desigual das vizinhanças a partir de interferências do usuário, generalização da escolha de barras do equivalente, permitindo incluir ou retirar arbitrariamente algumas barras, entre outras melhorias.

Sugere-se também a aplicação do processamento paralelo como forma de se ganhar mais performance na aproximação racional de respostas em frequência, já que há a possibilidade de paralelização de várias funcionalidades no programa HarmZs, como, por exemplo, aproximação racional simultânea de várias funções de transferência devido à independência entre elas.

Outra sugestão de trabalho futuro seria a realizar uma integração dos resultados obtidos no HarmZs com programas do tipo EMTP.

Também se pretende utilizar o primeiro e o terceiro índices, baseados no cálculo da energia espectral de um sinal, propostos em [50] para determinar:

1. A máxima frequência que o sistema reduzido deverá reproduzir com determinada exatidão o comportamento do sistema completo (primeiro índice).
2. O erro global do sistema reduzido (terceiro índice).

A utilização destes índices é importante tanto na construção dos equivalentes quanto na maior automatização da rede interna, pois seria desnecessário a comparação visual entre as respostas em frequência das funções de transferência dos sistemas completo e reduzido.

Referências

- [1] NETO, A. S., FERNANDES, A. B., “Efeito da Modelagem da Carga para Estudos de Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Transmissão”. *XIII ERIAC - Décimo Terceiro Encontro Regional Ibero-americano do Cigré*, Puerto Iguazú, Argentina, Maio 2009.
- [2] DOMMEL, H. W., *Electromagnetic Transients Program Reference Manual: EMTP Theory Book*, Portland, BPA, 1986.
- [3] GUSTAVSEN, B., SEMLYEN, A., “Rational approximation of frequency domain responses by Vector Fitting”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 14, no. 3 (July 1999), pp. 1052-1061.
- [4] GUSTAVSEN, B., SEMLYEN, A., “Combined Phase And Modal Domain Calculation of Transmission Line Transients Based on Vector Fitting”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 13, no. 2 (April 1998), pp. 596-604.
- [5] GUSTAVSEN, B., SEMLYEN, A., “Simulation of Transmission Line Transients Using Vector Fitting And Modal Decomposition”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 13, no. 2 (April 1998), pp. 605-614.
- [6] GUSTAVSEN, B., SEMLYEN, A., “Enforcing Passivity for Admittance Matrices Approximated by Rational Functions”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 16, no. 1 (February 2001), pp. 97-104.
- [7] GUSTAVSEN, B., “Computer Code for Rational Approximation of Frequency Dependent Admittance Matrices”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 17, no. 4 (October 2002), pp. 1093-1098.
- [8] FERNANDES, A. B., NEVES, W. L. A., LIMA, A. C. S., “Método do Ajuste Vetorial Aplicado a Síntese de Respostas em Frequência”. *V CBQEE - Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica*, Aracaju - SE, 17 a 20 de agosto de 2003.
- [9] FERNANDES, A. B., LIMA, A. C. S., “Modelagem de Transformadores para Estudos de Transitórios Eletromagnéticos de Altas Frequências com Base em Medições de Campo”. *SBSE - 2006 – Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos*, Campina Grande – PB, 17 a 19 de julho de 2006.
- [10] FERNANDES, A. B., LIMA, A. C. S., “Modelagem de Transformadores a partir de Medições em Campo para Estudos de Transitórios em Altas Frequências”.

VII CBQEE- Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica, Santos – SP, 2007.

- [11] PORKAR, B., VAKILIAN, M., FEUILLET, R., “Frequency-Dependent Network Equivalent for Electromagnetic Transient Studies by Vector Fitting,”. In: *Proc. Transmission and Distribution Conf. Exhibit.*, Dallas, TX, May 2006, pp. 166–171.
- [12] GUSTAVSEN, B., “Improving the Pole Relocating Properties of Vector Fitting”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 21, no. 3 (July 2006), pp. 1587-1592.
- [13] DESCHRIJVER, D., MROZOWSKI, M., DHAENE, T., ZUTTER, D. D. “Macromodeling of Multiport Systems Using a Fast Implementation of the Vector Fitting Method”, *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 18, no. 6 (June 2008), 383-385.
- [14] *Procedimentos de Rede - Submódulo 2.8 - Gerenciamento dos indicadores de desempenho da Rede Básica e de seus componentes – ONS – Operador Nacional do Sistema – Disponível em: < <http://www.ons.org.br/procedimentos/index.aspx>>. Acesso em: 5 jun 2013.*
- [15] COSTA, C. O., VÉLIZ, F. C., VARRICCHIO, S. L., MEDEIROS, J. R., “Avaliação do Desempenho Harmônico de Cargas Não Lineares Utilizando o Programa HarmZs”, *XII SEPOPE – Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica*, Rio de Janeiro - RJ, Brasil, 20 a 23 de maio de 2012.
- [16] COSTA, C. O., VARRICCHIO, S. L., VÉLIZ, F. C., *Manual do Usuário da Versão 1.7 do Programa HarmZs*, Relatório Técnico Cepel, No. DSE 51747 / 2007.
- [17] NETO, E. P., ALVES, F. R. M., FILHO, J. A. P., HENRIQUES, R. M., *Manual do Usuário da Versão 09.03.00 do Programa ANAREDE*, Relatório Técnico Cepel, No. DSE 22349 / 2008, 2008.
- [18] RANGEL, R. D., GOMES JR., S., FERRAZ, J. C. R., *Programa de Análise de Transitórios Eletromecânicos – ANATEM – Manual do Usuário – V09-08/04*, Relatório Técnico Cepel, No. DP-DSE 46023/04, 2005.
- [19] AZEVEDO, W. V. S., NEVES, W. L. A., FERNANDES Jr, D., SOARES, R. M., *et al.*, “Análise no Domínio da Frequência para Alocação de Equivalentes de Redes nos Sistemas Elétricos”, *III SBSE - Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos*, Maio 2010.

- [20] HINGORANI, N.G., BURBERY, M.F., “Simulation of AC System Impedance in HVDC System Studies”, *IEEE Transactions on Power Apparatus Systems*, vol. PAS-89 (May/June 1970), pp. 820-28.
- [21] CLERICI, A., MARZIO, L., “Coordinated use of TNA and Digital Computer for Switching Surge Studies: Transient Equivalent of a Complex Network”, *IEEE Transactions on Power Apparatus Systems*, vol. PAS-89 (Nov./Dec. 1970), pp. 1717-26.
- [22] MORCHED, A. S., BRANDWAJN, V., “Transmission Network Equivalents for Electromagnetic Transients Studies”, *IEEE Transactions on Power Apparatus Systems*, vol. PAS-102 (Sept. 1983), pp. 2984-90.
- [23] DO, V. Q., GAVRILOVIC, M. M., “An Iterative Pole Removal Method for Synthesis of Power System Equivalent Networks”, *IEEE Transactions on Power Apparatus Systems*, vol. PAS-103 (August. 1984), pp. 2065-70.
- [24] DO, V. Q., GAVRILOVIC, M. M., “A Synthesis Method for One Port and Multi-Port Equivalent Networks for Analysis of Power System Transients”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 1 (April. 1985), pp. 103-11.
- [25] LIMA, L. T. G., MARTINS, N., CARNEIRO Jr., S. “Dynamic Equivalents for Electromagnetic Transient Analysis Including Frequency-Dependent Transmission Line Parameters”. *Proceedings of the IPST'97 - International Power System Transients Conference*, Seattle, USA, July, 1997.
- [26] LIMA, L. T. G., MARTINS, N., PEREIRA, J. L. R., “Equivalentes Dinâmicos de Ordem Reduzida de Circuitos Elétricos para Simulação de Transitórios Eletromagnéticos”, *XI CBA – Congresso Brasileiro de Automática*, São Paulo, Setembro, 1996.
- [27] GOMES JR., S., 2002, *Modelagem e Métodos Numéricos para Análise Linear de Estabilidade Eletromecânica, Ressonância Subsíncrona, Transitórios Eletromagnéticos e Desempenho Harmônico de Sistemas de Potência*, Tese De Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- [28] GOMES JR., S., MARTINS, N., PORTELA, C., “Sequential Computation of Transfer Function Dominant Poles of s-Domain System Models”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 24, No. 2 (May 2009), pp. 776-784.
- [29] VÉLIZ, F. C., 2005, *Equivalentes Dinâmicos de Redes Elétricas de Grande Porte Utilizando Análise Modal*, Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

- [30] VÉLIZ, F. C., GOMES JR., S., VARRICCHIO, S. L., CARNEIRO Jr., S., “Dynamic Equivalents for Large AC Networks using Modal Analysis for s-Domain Models”. *IEEE Proceedings of the Power Engineering Society General Meeting*, June 2005.
- [31] VÉLIZ, F. C., VARRICCHIO, S. L., GOMES JR., S., “Equivalentes Dinâmicos para Estudos de Harmônicos usando Análise Modal”, *X SEPOPE - Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica*, Florianópolis, SC, Brasil, de 21 a 25 de maio de 2006.
- [32] VELIZ, F. C., VARRICCHIO, S. L., GOMES JR., S., “Equivalentes Dinâmicos de Redes Elétricas Multi-conectadas Utilizando Análise Modal”, *Revista EletroEvolução*, no. 59 (Junho de 2010), pp. 40 – 48.
- [33] VARRICCHIO, S. L., VÉLIZ, F. C., FREITAS, F. D., MARTINS, N., “Síntese de Equivalentes Dinâmicos de Redes Elétricas Multi-Conectadas”. *XII SEPOPE – Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica*, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 20 a 23 de maio de 2012.
- [34] SEMLYEN, A., ABDEL-RAHMAN, M. H., “Transmission Line Modelling By Rational Transfer Functions”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-101, No. 9 (September 1982), pp. 3576-3584.
- [35] MARTÍ, J. R. “Accurate Modelling of Frequency-Dependent Transmission Lines in Electromagnetic Transients Simulations”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS- 101, no. 1 (January 1982), pp.147-157.
- [36] MARTÍ, J. R. “Low-Order Approximation of Transmission Line Parameters for Frequency-Dependent Models”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS- 102, No. 11 (November 1983), pp. 3582-3589.
- [37] FERNANDES, A. B, NEVES, W. L. A., “Frequency-Dependent Low Order Approximation of Transmission Lines Parameters”, In: *Proceedings of the IPST’99 - International Conference on Power Systems Transients*, pp. 43-48, Budapest, Hungary, 1999.
- [38] FERNANDES, A. B, NEVES, W. L. A., “Transmission Lines: Fitting Technique Optimization”, *Proceedings of the IPST’97 - International Conference on Power Systems Transients*, Seattle, USA, June 22-26, 1997.
- [39] MORCHED, A., GUSTAVSEN, B., TARTIBI, M., “A Universal Model for Accurate Calculation of Electromagnetic Transients on Overhead Lines and Underground Cables”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 14, no.3 (July 1999), pp. 1032-1038.

- [40] HENRIKSEN, T., “Including High Order Rational Functions in EMTP a Comparison Between Alternative Methods with Emphasis on Accuracy”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 12, no.1 (January 1997), pp. 372-379.
- [41] NODA, T., NAGAOKA, N., AMETANI, A., “Phase Domain Modeling of Frequency-Dependent Transmission Lines by Means of an ARMA Model”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 11, no. 1 (January 1996), pp. 401-411.
- [42] NODA, T., NAGAOKA, N., AMETANI, A., “Further Improvements to a Phase-Domain ARMA Line Modeling Terms of Convolution, Steady-State Initialization, and Stability”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 12, no.3 (July 1997), pp. 1327-1334.
- [43] MONTICELLI, A. J., 1983, *Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica*. São Paulo, Editora Edgard Blücher Ltda.
- [44] GUSTAVSEN, B., JEEWANTHA DE SILVA, H. M., “Inclusion of Rational Models in an Electromagnetic Transients Program: Y-Parameters, Z-Parameters, S-Parameters, Transfer Functions”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 28, no. 2 (April 2013), pp. 1164-1174.
- [45] GRAINGER, J. J., STEVENSON, W. D., 1994, *Power system analysis*, McGraw-Hill.
- [46] GUSTAVSEN, B., *User’s Guide for vectfit3.m (Fast, Relaxed Vector Fitting)*, Disponível em: <<http://www.sintef.no/vectfit>>. Acesso em: 5 jun. 2013.
- [47] ROMERO, S. P., GONZÁLES, J. I. R., *Manual do Usuário da Versão 6.1 do Programa Anafas*, Relatório Técnico Cepel, No. DRE 9915 / 2010.
- [48] NETO, E. P., ALVES, F. R. M., GONZÁLES, J. I. R., PEREIRA, L. A. C., *et al.*, *Manual do Usuário da Versão 2.1.0 do Programa Sapre*, Relatório Técnico Cepel, No. DRE 28981 / 2009.
- [49] VARRICCHIO, S. L., GOMES JR, S., RANGEL, R. D., “Three Winding Transformer s-Domain Model for Modal Analysis of Electrical Networks”, *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, no. 33 (2011), pp. 420-429.
- [50] VARRICCHIO, S. L., FREITAS, F. D., MARTINS, N., "Spectral Energy Indices for Model Order Reduction". IEEE PES General Meeting, Vancouver, British Columbia, Canada, July 21-25 2013.

- [51] SEMLYEN, A., “s-Domain Methodology for Assessing the Small Signal Stability of Complex Systems in Non-Sinusoidal Steady State”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 6, no. 1 (February 1999), pp. 132-137.
- [52] GOMES JR, S., MARTINS, N., PORTELA, C. “Modal Analysis Applied to s-Domain Models of ac Networks”, *IEEE PES Winter Meeting*, Columbus, Ohio, January 2001.
- [53] MATLAB, *The MathWorks*. Disponível em: <<http://www.mathworks.com/products/>>. Acesso em: 5 jun. 2013.
- [54] MATLAB, Matlab Documentation – Create C/C++ and Fortran MEX-Files. Disponível em: <<http://www.mathworks.com/help/matlab/create-mex-files.html>>. Acesso em: 5 jun. 2013.

Anexos

A.1 Interfaces Gráficas do Programa HarmZs

Além dos algoritmos e implementações que foram desenvolvidos e apresentados ao longo do texto, foram desenvolvidas duas interfaces gráficas no programa HarmZs (versão não comercial) para facilitar a utilização do programa.

Na primeira interface, que é definida com o nome de Interface 1, é possível trabalhar com redes completas onde ainda não se tem a área interna definida. Esta definição da área interna de interesse é dada através do critério de vizinhanças elétricas, onde o usuário fornece até qual vizinhança, a partir de uma barra piloto, se deseja expandir a área interna. Entende-se que a área de interesse está contida dentro da área interna. Após esta definição da rede interna, pode-se trabalhar com equivalentes convencionais ou modais.

A segunda interface, que é definida com o nome de Interface 2, foi desenvolvida para utilizar o Método do Ajuste Vetorial para fazer ajuste de curvas de resposta em frequência de funções de transferência que podem ser escolhidas pelo usuário. Esta interface não tem o poder de separar uma rede em rede interna e rede externa. A criação desta interface é justificada na validação dos equivalentes modais onde é possível fazer a comparação entre a rede modelada pelo seu modelo completo e modelada por

$$z_{eq-kj}(s) \cong \sum_{i \in \Omega_{kj}} \frac{R_i^{(kj)}}{s - \lambda_i^{(kj)}} + d^{(kj)} + e^{(kj)}s, \text{ cujos parâmetros } R_i^{(kj)}, \lambda_i^{(kj)}, d^{(kj)} \text{ e } e^{(kj)} \text{ são}$$

calculados pelo Método do Ajuste Vetorial.

A.1.1 Interface 1

Para acessar esta interface, primeiramente é necessário carregar o arquivo da rede elétrica completa, rede esta que será dividida em rede interna e rede externa pelo algoritmo de vizinhanças elétricas. Após carregar a rede elétrica, basta acessar o menu “Equivalentes...” que se encontra no menu “Cálculos”. Este caminho para acessar a interface gráfica é apresentado na Figura 261.

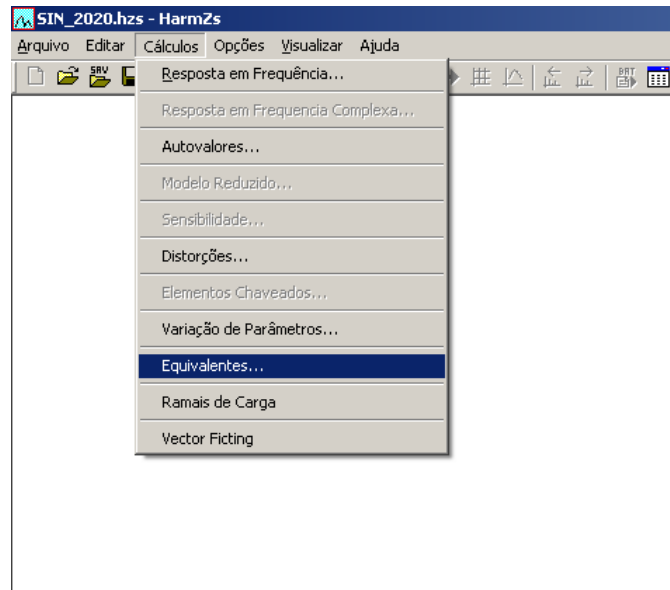


Figura 261: Menu para acessar a interface 1

Na Figura 262 é apresentada a Interface 1. A seguir serão apresentados alguns detalhes desta interface gráfica.

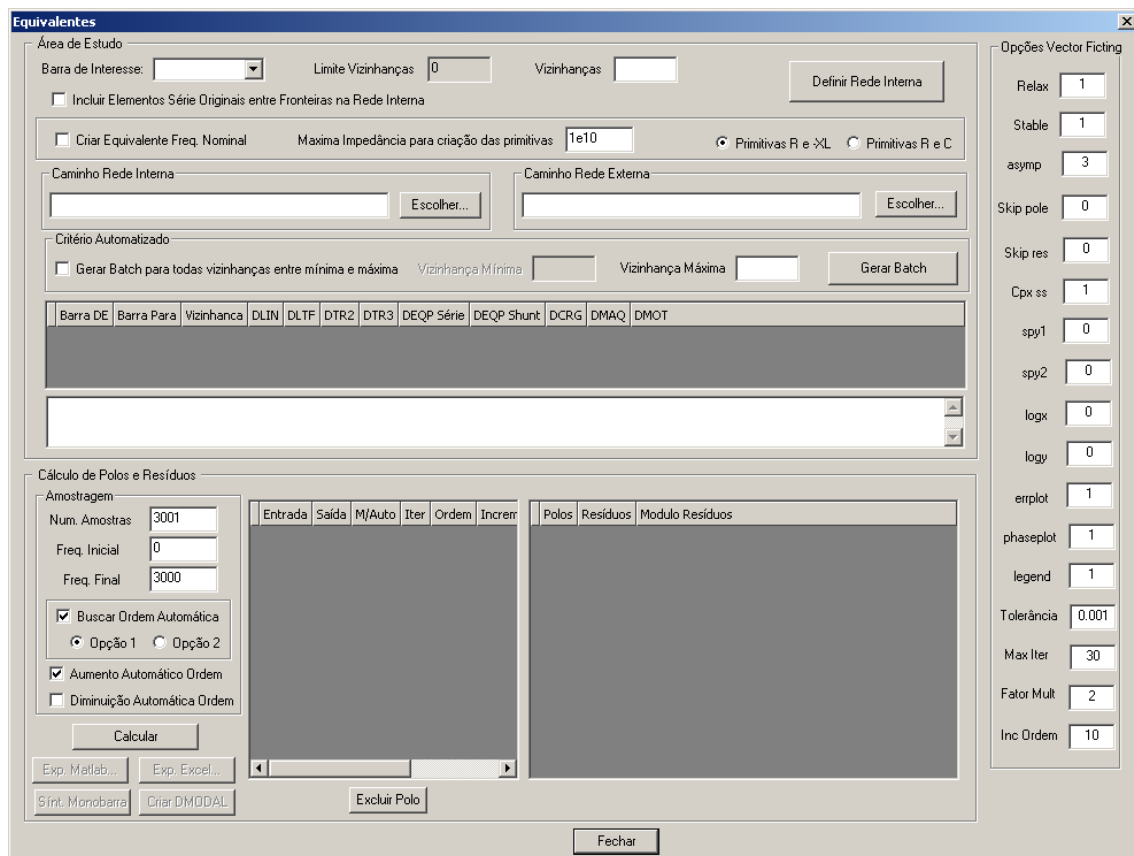


Figura 262: Interface 1 desenvolvida para trabalhar com redes elétricas completas

Na Figura 263 é apresentado o ponto de partida desta interface, que é a escolha da rede interna. A barra piloto deve ser fornecida no campo “*Barra de Interesse*”. Ao selecionar a barra piloto, automaticamente o número máximo de vizinhanças é calculado. Após a escolha da barra piloto e do cálculo do número máximo de vizinhanças, o usuário deverá informar quantas vizinhanças, a partir da barra piloto, se deseja expandir a rede interna. Este dado deve ser informado no campo “*Vizinhanças*”. Também deve ser informado se os elementos série que estão presentes na rede completa e conectam duas barras de fronteira farão parte ou não da rede interna. Esta inclusão dos elementos série é feita selecionando a opção “*Incluir Elementos Série Originais entre Fronteiras na Rede Interna*”.

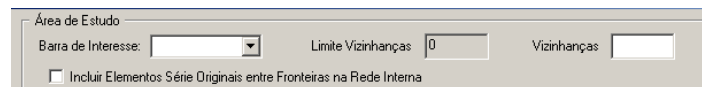


Figura 263: Escolha da barra piloto, do número de vizinhanças e da opção de incluir ou não os elementos série existentes entre barras de fronteira à rede interna

Os campos apresentados na Figura 264 só serão importantes no cálculo do equivalente convencional e só serão considerados caso a opção “*Criar Equivalente Freq. Nominal*” seja selecionada. Como algumas impedâncias primitivas entre barras de fronteira tem um valor muito grande, sendo equivalentes a circuitos abertos, não influenciando demasiadamente nos cálculos, seus valores podem ser desprezados, evitando-se assim a criação desnecessária de equipamentos com valores muito grandes no programa HarmZs. O valor a partir do qual as impedâncias primitivas vão ser desprezadas deve ser informado no campo “*Máxima Impedância para criação das primitivas*”.

Para o caso da impedância primitiva possuir parte imaginária negativa, criou-se a opção de escolher entre modelar a reatância da primitiva como um indutor com valor negativo ou como um capacitor com valor positivo. Esta opção foi criada para o caso de existir, no conjunto de barras de fronteira, barras fictícias que são utilizadas na representação de transformadores de 3 enrolamentos. Sabe-se que a representação dos transformadores de 3 enrolamentos no programa Anarede é feita através de 3 transformadores de 2 enrolamentos, onde um dos transformadores pode ter a indutância com valor negativo. Como o HarmZs faz a leitura dos arquivos históricos do Anarede, fará a leitura dos transformadores de 3 enrolamentos com 3 transformadores de 2 enrolamentos. Para esses casos, a reatância deve ser modelada com uma indutância negativa, e não como

um capacitor. De qualquer modo, essa característica não mais existirá quando o modelo de transformadores de 3 enrolamentos for implementado no programa Anarede. Cabe observar que o HarmZs já possui o modelo de transformador de 3 enrolamentos implementado e só não se criou um algoritmo para transformar os 3 transformadores de 2 enrolamentos em um transformador de 3 enrolamento porque o modelo de transformador de 3 enrolamentos ainda será implementado no Anarede. Cabe observar também que, na frequência nominal, o valor calculado das impedâncias nodais é igual escolhendo qualquer das duas opções. Esta escolha do modelo da reatância negativa pode ser realizada escolhendo-se entre a opção “*Primitivas R e -XL*” e “*Primitivas R e C*”.

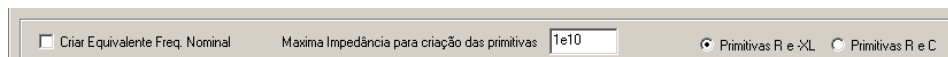


Figura 264: Opções existentes para o cálculo dos equivalentes à frequência fundamental

Ao executar o algoritmo de vizinhanças, a rede elétrica completa será dividida em duas redes: a rede interna (contendo a área de interesse) e a rede externa (utilizada no cálculo dos equivalentes). Em “Caminho da Rede Interna” e em “Caminho da Rede Externa” são informados o caminho e o nome de onde serão salvos, respectivamente, os dados que fazem parte da rede interna e da rede externa. Onde informar o caminho e o nome dessas redes é apresentado na Figura 265.



Figura 265: Escolha dos caminhos da rede interna e da rede externa

Após estabelecer todas as opções acima citadas, o algoritmo de vizinhanças elétricas pode ser executado acionando o botão “*Definir Rede Interna*”. Todos os elementos que foram incluídos à rede interna estão apresentados na janela da Figura 266. Informações sobre a qual vizinhança pertencem e qual tipo de equipamento são (transformadores, linhas, cargas, dentre outros) também estão apresentadas. Também são fornecidas outras informações sobre o algoritmo, como, por exemplo, quantas e quais são barras de fronteira encontradas, quantas e quais barras fazem parte da rede interna, dentre outras.

Barra DE	Barra Para	Vizinhança	DLIN	DLTF	DTR2	DTR3	DEQP Série	DEQP Shunt	DCRG	DMAQ	DMOT
5202	5202	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0
5202	2662	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0
5202	3717	1	1	0	0	0	0	2	0	0	0

Número de vizinhanças escolhido: 2
 Número de vizinhanças encontrado: 2
 Número de barras incluídas na rede interna: 20

Figura 266: Informações sobre o critério de vizinhanças elétricas

Nesta Interface 1 existe a opção de estabelecer um critério automático para definição da rede interna. Este critério realiza sucessivas definições da rede interna, a partir de uma vizinhança mínima até uma vizinhança máxima, monitorando as funções de transferência das barras de fronteira de uma vizinhança base. A vizinhança base pode ser entendida como a vizinhança que delimita a área de interesse. Maiores explicações sobre este critério podem ser encontradas no item 3.5 - Método para Definição da Rede Interna para Estudos de Transitórios Eletromagnéticos.

Critério Automatizado

Gerar Batch para todas vizinhanças entre mínima e máxima
 Vizinhança Mínima
Vizinhança Máxima

Figura 267: Critério automático de definição da rede interna

Na Figura 268 está apresentada a aplicação do Método do Ajuste Vetorial no cálculo de equivalentes modais de redes. Em “*Num. Amostras*” é informado o número de amostras que serão colhidas da resposta em frequência de cada função de transferência. O número de amostras pode ser entendido como o número de frequências para as quais serão calculadas as impedâncias nodais vistas das barras de fronteira, da frequência inicial até a frequência final informadas, respectivamente, nos campos “*Freq. Inicial*” e “*Freq. Final*”. Todas as funções de transferência entre as barras de fronteira estão apresentadas nesta janela. A opção de busca automática e a escolha da opção 1 ou opção 2 de busca são apresentadas no item 5.3. A escolha das opções de ajuste automático da ordem é apresentada no item 5.3.1. Caso a opção de busca automática não seja selecionada, a ordem de aproximação de cada função de transferência deve ser informada na janela onde estão as funções de transferência das barras de fronteira.

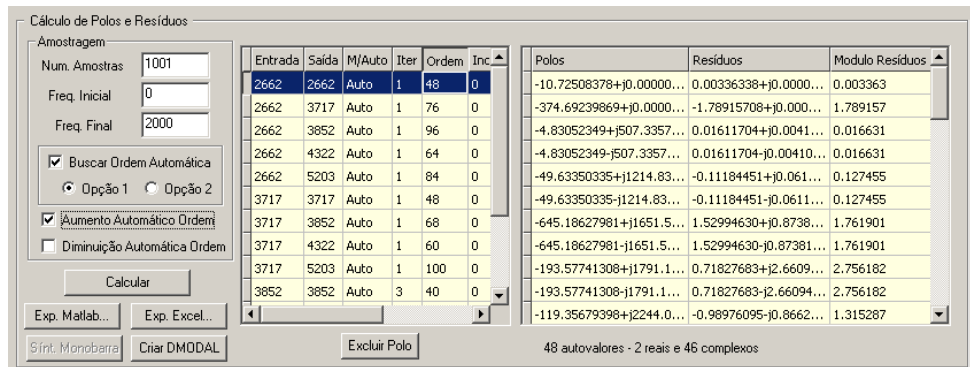


Figura 268: Aplicação do Método do Ajuste Vetorial no cálculo de equivalentes modais

Após informar o número de amostras, as frequências de interesse inicial e final e as opções de busca, basta acionar o botão “Calcular” e aguardar o ajuste de todas as funções de transferência pelo Método do Ajuste Vetorial. Após a execução do método, o número de iterações necessário é apresentado para cada função de transferência. Caso seja escolhida a busca automática, serão informados a ordem encontrada, o número de incrementos (caso a opção “Aumento Automático Ordem” seja selecionada), o número de decrementos (caso a opção “Diminuição Automática Ordem” seja selecionada) e o número de picos encontrado nas amostras fornecidas.

As opções necessárias para a execução do Método do Ajuste Vetorial podem ser encontradas na Figura 269. As explicações sobre as opções “Relax” até “legend” podem ser encontradas em [44]. Em “Tolerância” deve ser informado o valor máximo do erro RMS encontrado entre a curva real e a curva ajustada. Este erro é o erro do problema linear sobredeterminado que é resolvido pelo método dos mínimos quadrados. Em “Max Iter” é informado o número máximo de iterações estabelecido para o ajuste. Caso este número máximo seja alcançado sem a tolerância desejada, o ajuste é interrompido ou o aumento da ordem de aproximação é realizado caso a opção “Aumento Automático Ordem” esteja habilitada. O valor informado no campo “Fator Mult” é utilizado para definir a ordem inicial de aproximação. O valor inicial da ordem é definido segundo a equação (5.3), onde o número de picos é multiplicado por 2 (porque para pico existirá um par de polos complexos conjugados) e multiplicado pela fator de correção informado no campo “Fator Mult” (para representar polos reais e polos menos dominantes). O campo “Inc Ordem” está relacionado às opções “Aumento Automático Ordem” e “Diminuição Automática Ordem”. Caso haja necessidade de se aumentar ou diminuir a ordem de aproximação, o valor da ordem será aumentado ou diminuído de acordo com o valor informado em “Inc Ordem”.

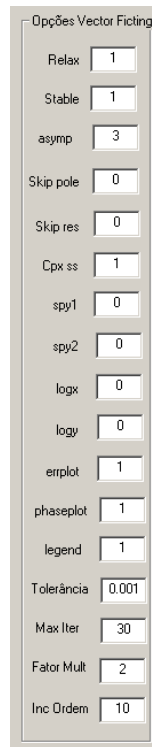


Figura 269: Opções para a execução do Método do Ajuste Vetorial na Interface 1

A.1.2 Interface 2

Para acessar esta interface, primeiramente é necessário carregar um arquivo de rede elétrica onde se deseja ajustar alguma curva de resposta em frequência. A rede que será carregada poderá ser inclusive uma rede externa produto do algoritmo de vizinhanças elétricas. Nesta dissertação, exatamente estas redes externas que foram utilizadas nesta interface gráfica, denominado Interface 2.

Esta interface, onde somente é possível se trabalhar com equivalentes modais, foi desenvolvida somente para fazer a comparação de uma rede elétrica externa modelada

por seus modelos completos e modelada por
$$z_{eq-kj}(s) \cong \sum_{i \in \Omega_{kj}} \frac{R_i^{(kj)}}{(s - \lambda_i^{(kj)})} + d^{(kj)} + e^{(kj)}s.$$

Após se carregar a rede elétrica, basta acessar o menu “*Vector Fitting...*” que se encontra no menu “*Cálculos*”. Este caminho para acessar a interface gráfica é apresentado na Figura 270.

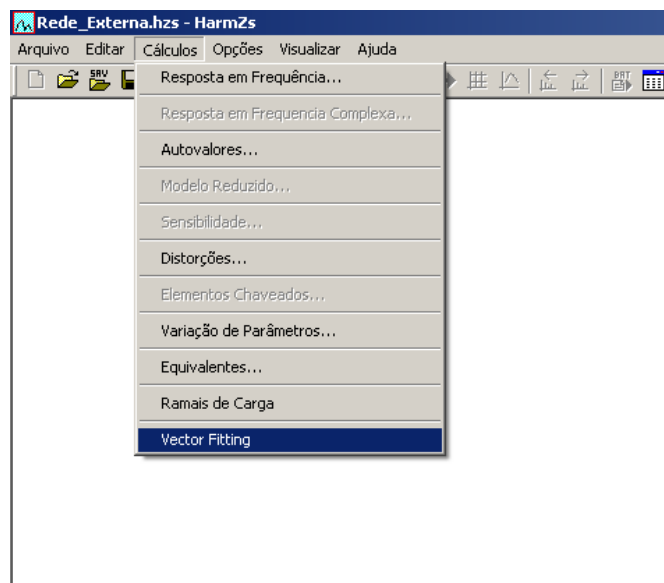


Figura 270: Menu para acessar a Interface 2 – Diálogo Vector Fitting

Na Figura 271 é apresentada a Interface 2. A seguir serão apresentados alguns detalhes desta interface gráfica. Muitos comentários sobre os campos desta interface são exatamente os mesmos da Interface 1.

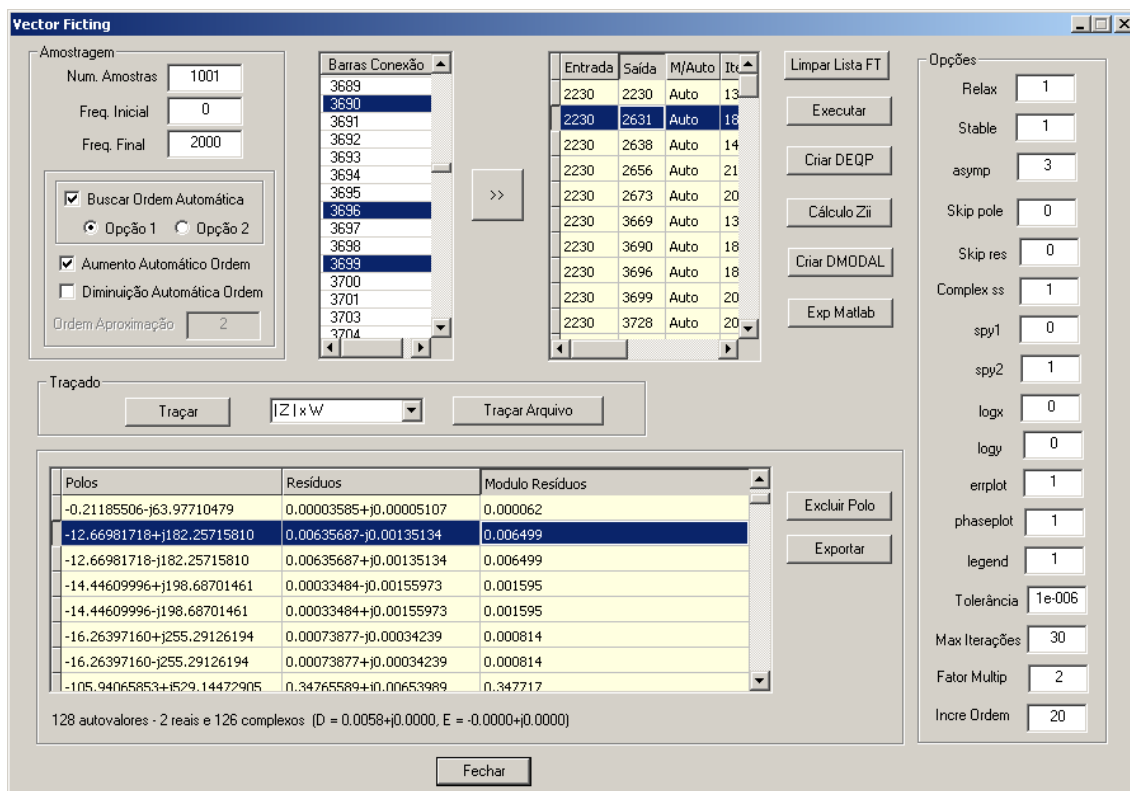


Figura 271: Interface 2 criada para se fazer a comparação entre uma rede representada por seu modelo completo ou pelo modelo reduzido modal (conjunto de polos e resíduos encontrado pelo Método do Ajuste Vetorial)

Como apresentado na Figura 272, na janela “*Amostragem*” estão contidos alguns campos necessários à aplicação do Método do Ajuste Vetorial. Em “*Num. Amostras*” é informado o número de amostras que serão colhidas da resposta em frequência de cada função de transferência. O número de amostras pode ser entendido como o número de frequências para as quais serão calculadas as impedâncias nodais vistas das barras de fronteira, da frequência inicial até a frequência final informadas, respectivamente, nos campos “*Freq. Inicial*” e “*Freq. Final*”. A opção de busca automática e a escolha da opção 1 ou opção 2 de busca são apresentadas no item 5.3. A escolha das opções de ajuste automático da ordem são apresentadas no item 5.3.1. Caso a opção de busca automática não seja selecionada, a ordem de aproximação de cada função de transferência deve ser informada na janela onde estão as funções de transferência escolhidas ou então pode-se escolher a ordem de aproximação igualmente e de uma só vez de todas as funções de transferência no campo “*Ordem Aproximação*” que só estará disponível caso a opção “*Busca Ordem Automática*” estiver desativada.

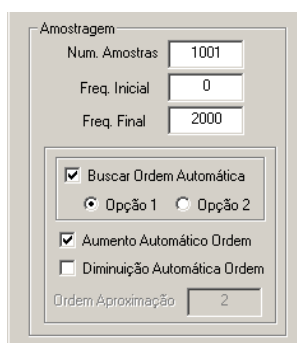



Figura 272: Opções gerais das amostras das funções de transferência da Interface 2

Ao contrário da Interface 1, onde as funções de transferência são definidas através das barras de fronteira, na Interface 2 o usuário pode montar as funções de transferência que se deseja através da escolha das barras de interesse. Estas barras de interesse podem ser escolhidas entre as barras disponíveis na janela “*Barras Conexão*”. Basta escolher as barras e acionar o botão . Automaticamente as funções de transferência entre todas as barras selecionadas são definidas na janela ao lado direito de “*Barras Conexão*”. Este procedimento de escolha das funções de transferência é apresentado na Figura 273.

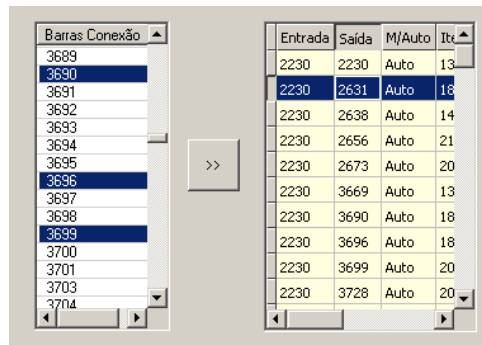


Figura 273: Escolha das funções de transferência na Interface 2

Após a escolha das funções de transferência basta acionar o botão “Executar” para aplicar o Método do Ajuste Vetorial” a todas as funções de transferência. Após a execução do método, o número de iterações necessário é apresentado na frente de cada função de transferência. Caso seja escolhida a busca automática, serão informados a ordem encontrada, o número de incrementos (caso a opção “Aumento Automático Ordem” seja selecionada), o número de decrementos (caso a opção “Diminuição Automática Ordem” seja selecionada) e o número de picos encontrado nas amostras fornecidas.

Para visualizar os polos e os resíduos calculados para uma determinada função de transferência, basta escolher a função de transferência desejada, como apresentado na Figura 273, que os polos, resíduos e módulo dos resíduos podem ser visualizados. Na Figura 274 são apresentados alguns polos e resíduos calculados para a função de transferência 2230-2631. A ordem encontrada, o número de polos reais, o número de polos complexos, o termo “*d*” e o termo “*e*” também são apresentados.

Polos	Resíduos	Módulo Resíduos
-0.21185506-j63.97710479	0.00003585+j0.00005107	0.000062
-12.66981718+j182.25715810	0.00635687-j0.00135134	0.006499
-12.66981718-j182.25715810	0.00635687+j0.00135134	0.006499
-14.44609996+j198.68701461	0.00033484-j0.00155973	0.001595
-14.44609996-j198.68701461	0.00033484+j0.00155973	0.001595
-16.26397160+j255.29126194	0.00073677-j0.00034239	0.000814
-16.26397160-j255.29126194	0.00073677+j0.00034239	0.000814
-105.94065853+j529.14472905	0.34765589+j0.00653989	0.347717

128 autovalores - 2 reais e 126 complexos (D = 0.0058+j0.0000, E = -0.0000+j0.0000)

Figura 274: Visualização dos polos e resíduos de uma função de transferência

Pode-se efetuar alguns traçados de resposta em frequência utilizando o conjunto de polos e resíduos calculados. O cálculo da impedância é realizado segundo a equação

$$z_{eq-kj}(s) \cong \sum_{i \in \Omega_{kj}} \frac{R_i^{(kj)}}{(s - \lambda_i^{(kj)})} + d^{(kj)} + e^{(kj)}s. \text{ Os tipos de traçados permitidos estão}$$

apresentados na Figura 275. Caso se deseje comparar com respostas em frequência de funções de transferência utilizando a modelagem completa, basta realizar os traçados sobrepostos aos traçados dados pela equação acima.

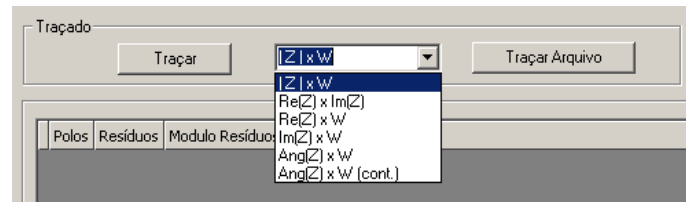


Figura 275: Traçados de resposta em frequência utilizando o modelo modal

As opções necessárias para a execução do Método do Ajuste Vetorial podem ser encontradas na Figura 276. As explicações sobre as opções “Relax” até “legend” podem ser encontradas em [44]. Em “Tolerância” deve ser informado o valor máximo do erro RMS encontrado entre a curva real e a curva ajustada. Este erro é o erro do problema linear sobredeterminado que é resolvido pelo método do mínimos quadrados. Em “Max Iterações” é informado o número máximo de iterações estabelecido para o ajuste. Caso este número máximo seja alcançado sem a tolerância desejada, o ajuste é interrompido ou o aumento da ordem de aproximação é realizado caso a opção “Aumento Automático Ordem” esteja habilitada. O valor informado no campo “Fator Multip” é utilizado para definir a ordem inicial de aproximação. O valor inicial da ordem é definido segundo a equação (5.3), onde o número de picos é multiplicado por 2 (porque para cada pico existirá um par de polos complexos conjugados) e multiplicado pela fator de correção informado no campo “Fator Multip” (para representar polos reais e polos menos dominantes). O campo “Incre Ordem” está relacionado às opções “Aumento Automático Ordem” e “Diminuição Automática Ordem”. Caso haja necessidade de se aumentar ou diminuir a ordem de aproximação, o valor da ordem será aumentado ou diminuído de acordo com o valor informado em “Incre Ordem”.

Opções

Relax	1
Stable	1
asympt	3
Skip pole	0
Skip res	0
Complex ss	1
spy1	0
spy2	1
logx	0
logy	0
errplot	1
phaseplot	1
legend	1
Tolerância	1e-006
Max Iterações	30
Fator Multip	2
Incr. Ordem	20

Figura 276: Opções para a execução do Método do Ajuste Vetorial na Interface 2

A.2 O Método do Ajuste Vetorial – Vector Fitting

Em [3] e [8] é apresentado com detalhes um método genérico de ajuste de dados no domínio da frequência. Este método, denominado *Vector Fitting*, é proposto para aproximar respostas em frequência por funções racionais. Deste modo, modelos computacionais precisos podem ser representados nos diversos tipos de estudo.

Em princípio, uma aproximação de uma dada ordem pode ser ajustada por uma razão de dois polinômios, como apresentado em (A.1).

$$f(s) = \frac{a_0 + a_1 \cdot s + a_2 \cdot s^2 + \dots + a_N \cdot s^N}{b_0 + b_1 \cdot s + b_2 \cdot s^2 + \dots + b_N \cdot s^N} \quad (\text{A.1})$$

A função polinomial racional apresentada em (A.1) é não linear em relação aos seus coeficientes mas pode ser reescrita como um problema linear do tipo $\mathbf{A} \cdot \mathbf{x} = \mathbf{b}$ multiplicando ambos os lados pelo denominador. No entanto, à medida que a ordem dos polinômios cresce, o sistema vai se apresentando mal condicionado. Isto limita o método a aproximações de mais baixa ordem, principalmente se o ajuste se dá em largas faixas de frequência.

Várias tentativas de formulação de metodologias genéricas resultaram em muitos métodos com aplicação em problemas particulares. O Método do Ajuste Vetorial é uma tentativa de formulação geral para sínteses de respostas em frequência.

O Método do Ajuste Vetorial se baseia no ajuste em dois estágios, ambos com polos conhecidos. O primeiro estágio é executado distribuindo polos iniciais ao longo da faixa de frequências. Numa primeira formulação do método, as estimativas dos polos eram somente reais. No entanto, a utilização de estimativas reais para os polos não era bem sucedida quando a função a ser ajustada possuía muitos picos de ressonância. Essas limitações foram sanadas com a utilização de polos iniciais complexos.

Além dos polos iniciais, uma função de escalonamento desconhecida e dependente da frequência é introduzida, a qual permite um ajuste preciso com os polos iniciais.

Da função ajustada, um novo conjunto de polos é obtido e utilizado na segunda etapa do método, agora para o ajuste da função sem escalonamento.

Considere a aproximação de função racional apresentada em (A.2).

$$f(s) = \sum_{n=1}^N \frac{c_n}{s - a_n} + d + s \cdot h \quad (\text{A.2})$$

Os resíduos $\{c_n\}$ e os polos $\{a_n\}$ são grandezas reais ou pares complexos conjugados, enquanto d e h são grandezas reais. O problema em mãos é estimar todos os coeficientes em (A.2) de modo que a aproximação de $f(s)$, através do método dos mínimos quadrados, seja obtida ao longo da faixa de frequências de interesse. Cabe lembrar que (A.2) é uma função não linear em relação à incógnita a_n que aparece no denominador.

Como dito anteriormente, o Método do Ajuste Vetorial resolve o problema apresentado na equação (A.2) sequencialmente como um problema linear em dois estágios, ambos com polos conhecidos.

A.2.1 Estágio 1: Identificação dos Polos

Um conjunto de polos iniciais $\{\tilde{a}_n\}$ é especificado em (A.2). Define-se uma função escalonamento $\sigma(s)$ que escala $f(s)$ pela multiplicação $\sigma(s) \cdot f(s)$. O problema aumentado é apresentado em (A.3):

$$\begin{bmatrix} \sigma(s) \cdot f(s) \\ \sigma(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{n=1}^N \frac{c_n}{s - \tilde{a}_n} + d + s \cdot h \\ \sum_{n=1}^N \frac{\tilde{c}_n}{s - \tilde{a}_n} + 1 \end{bmatrix} \quad (\text{A.3})$$

É importante frisar que os polos das funções $\sigma(s)$ e $\sigma(s) \cdot f(s)$ são os mesmos.

Multiplicando a segunda linha de (A.3) por $f(s)$, resulta em (A.4):

$$\left(\sum_{n=1}^N \frac{c_n}{s - \tilde{a}_n} + d + s \cdot h \right) = \left(\sum_{n=1}^N \frac{\tilde{c}_n}{s - \tilde{a}_n} + 1 \right) \cdot f(s) \quad (\text{A.4})$$

A partir da verificação de (A.3) e (A.4), pode-se chegar à relação apresentada em (A.5):

$$(\sigma \cdot f)_{fit}(s) = \sigma_{fit}(s) \cdot f(s) \quad (\text{A.5})$$

Como a_n não é mais uma variável desconhecida, a equação (A.4) é linear nos termos c_n , d , h e \tilde{c}_n . Reorganizando a equação (A.4) chega-se a (A.6).

$$\left(\sum_{n=1}^N \frac{c_n}{s - \tilde{a}_n} + d + s \cdot h \right) - \left(\sum_{n=1}^N \frac{\tilde{c}_n}{s - \tilde{a}_n} \right) \cdot f(s) = f(s) \quad (\text{A.6})$$

Para uma dada frequência s_k , tem-se:

$$\mathbf{A}_k \cdot \mathbf{x} = \mathbf{b}_k \quad (\text{A.7})$$

onde

$$\mathbf{A}_k = \begin{bmatrix} 1 & \dots & 1 & 1 & s_k & \frac{-f(s_k)}{s_k - \tilde{a}_1} & \dots & \frac{-f(s_k)}{s_k - \tilde{a}_N} \end{bmatrix} \quad (\text{A.8})$$

$$\mathbf{x} = [c_1 \quad \dots \quad c_N \quad d \quad h \quad \tilde{c}_1 \quad \dots \quad \tilde{c}_N] \quad (\text{A.9})$$

$$\mathbf{b}_k = f(s_k) \quad (\text{A.10})$$

No caso de polos complexos, uma modificação é introduzida para assegurar que os resíduos serão pares complexos conjugados. Assumindo que i e $i+1$ constituem um par complexo conjugado:

$$\begin{aligned} \tilde{a}_i &= \tilde{a}' + j\tilde{a}'' , & \tilde{a}_{i+1} &= \tilde{a}' - j\tilde{a}'' \\ \tilde{c}_i &= \tilde{c}' + j\tilde{c}'' , & \tilde{c}_{i+1} &= \tilde{c}' - j\tilde{c}'' \end{aligned} \quad (\text{A.11})$$

Os dois elementos correspondentes a $A_{k,i}$ e $A_{k,i+1}$ são apresentados em (A.12).

$$A_{k,i} = \frac{1}{s_k - \tilde{a}_i} + \frac{1}{s_k - \tilde{a}_i^*}, \quad A_{k,i+1} = \frac{j}{s_k - \tilde{a}_i} - \frac{j}{s_k - \tilde{a}_i^*} \quad (\text{A.12})$$

No processo de ajuste, somente frequências positivas são utilizadas. Para preservar a propriedade dos conjugados, a equação matricial linear sobredeterminada (A.7) é apresentada (A.13) em termos de quantidades reais:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A}' \\ \mathbf{A}'' \end{bmatrix} \cdot \mathbf{x} = \begin{bmatrix} \mathbf{b}' \\ \mathbf{b}'' \end{bmatrix} \quad (\text{A.13})$$

Escrevendo (A.7) para todos as frequências de interesse, tem-se o problema linear sobredeterminado apresentado em (A.14). Esta equação é resolvida como um problema de mínimos quadrados:

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{x} = \mathbf{b} \quad (\text{A.14})$$

A função racional aproximada apresentada em (A.4) e em (A.5) pode ser reescrita na sua forma fatorada, sendo apresentada em (A.15), (A.16) e, finalmente, em (A.17).

$$(\sigma \cdot f)_{fit}(s) = h \cdot \frac{\prod_{n=1}^N (s - z_n)}{\prod_{n=1}^N (s - \tilde{a}_n)} \quad (\text{A.15})$$

$$\sigma_{fit}(s) = \frac{\prod_{n=1}^N (s - \tilde{z}_n)}{\prod_{n=1}^N (s - \tilde{a}_n)} \quad (\text{A.16})$$

$$f(s) = \frac{(\sigma \cdot f)_{fit}(s)}{\sigma_{fit}(s)} = h \cdot \frac{\prod_{n=1}^N (s - z_n)}{\prod_{n=1}^N (s - \tilde{z}_n)} \quad (\text{A.17})$$

É fácil notar que os polos de $f(s)$ são iguais aos zeros de $\sigma_{fit}(s)$. Os polos iniciais são cancelados pela divisão $(\sigma \cdot f)_{fit}(s)$ por $\sigma_{fit}(s)$ já que foram utilizados os mesmos polos iniciais para estas duas funções.

Logo, os polos de $f(s)$ podem ser calculados como apresentado em (A.18)

$$\{a_n\} = \text{eig}(\mathbf{A} - \mathbf{b} \cdot \tilde{\mathbf{c}}^T) \quad (\text{A.18})$$

onde \mathbf{A} é uma matriz diagonal contendo os polos iniciais $\{\tilde{a}_n\}$, \mathbf{b} é um vetor coluna de 1 e $\tilde{\mathbf{c}}^T$ é um vetor linha contendo os resíduos de $\sigma_{fit}(s)$. No caso de pares de polos complexos, as submatrizes apresentadas em (A.18) podem ser modificadas via transformação de similaridade como apresentadas em (A.19):

$$\hat{\mathbf{A}} = \begin{bmatrix} a' & a'' \\ -a'' & a' \end{bmatrix}, \hat{\mathbf{b}} = \begin{bmatrix} 2 \\ 0 \end{bmatrix}, \hat{\mathbf{c}} = [\tilde{c}' \quad \tilde{c}''] \quad (\text{A.19})$$

Esta modificação assegura que os polos calculados sejam pares complexos conjugados.

Caso exista algum polo instável (parte real positiva), o que pode ocorrer durante as primeiras iterações do método devido à diferença entre os polos iniciais e os calculados, o sinal da parte real desses polos serão invertidos.

A.2.2 Estágio 2: Identificação dos Resíduos

O cálculo dos resíduos $\{c_n\}$ pode ser feito substituindo os zeros de $\sigma_{fit}(s)$ em (A.2) como sendo os novos polos $\{a_n\}$ de $f(s)$. Novamente pode-se estabelecer um problema linear sobredeterminado na forma $\mathbf{A} \cdot \mathbf{x} = \mathbf{b}$, onde tem-se para cada frequência s_k :

$$\mathbf{A}_k = \begin{bmatrix} \frac{1}{s_k - a_1} & \cdots & \frac{1}{s_k - a_N} & 1 & s_k \end{bmatrix} \quad (\text{A.20})$$

$$\mathbf{x} = [c_1 \quad \cdots \quad c_N \quad d \quad h] \quad (\text{A.21})$$

$$\mathbf{b}_k = f(s_k) \quad (\text{A.22})$$

A.2.3 Recomendações sobre as Estimativas Iniciais dos Polos

É primordial para um bom ajuste que a solução do sistema linear sobredeterminado apresentado em (A.14) se dê com uma precisão suficiente. Segundo os autores da metodologia, a escolha de polos iniciais pobres e de uma ordem de aproximação baixa podem comprometer a precisão desejada.

Primeiramente, para funções com picos de ressonância, o problema linear se torna mal condicionado caso os polos iniciais sejam reais. Este problema pode ser solucionado utilizando pares de polos complexos conjugados com parte real suficientemente pequena como apresentado em (A.23) e em (A.24).

$$a_n = -\alpha + j\beta, \quad a_{n+1} = -\alpha - j\beta \quad (\text{A.23})$$

$$\alpha = \frac{\beta}{100} \quad (\text{A.24})$$

A distribuição indevida dos polos ao longo da faixa de frequência de interesse também pode comprometer a solução do problema linear. Isso ocorre caso haja uma grande diferença entre os polos iniciais e os polos corretos. Esta diferença pode causar grandes variações entre $\sigma(s)$ e $\sigma(s) \cdot f(s)$ na solução do problema de mínimos quadrados. Este problema pode ser resolvido distribuindo os mesmos linearmente ao longo da faixa de frequência ou definindo como polos iniciais os picos de ressonância, distribuindo o restante dos polos linearmente entre os picos. No caso da definição pelos valores dos picos, cabe lembrar que cada pico deve ser definido por um par de polos complexos conjugados.

Devido à robustez do método, o problema da distribuição indevida dos polos iniciais também pode ser resolvida com a utilização dos polos calculados como novos polos

iniciais em um processo iterativo. O que pode ocorrer é que uma distribuição muito indevida ocasionará uma convergência mais lenta do processo.

A escolha da ordem também é um ponto importante tratado pelos autores. Testes mostraram que a escolha de uma ordem menor que a mínima não leva a um ajuste preciso, não sendo possível o ajuste de todos os picos. Neste caso, a escolha dos polos iniciais influencia quais picos serão ajustados e quais não serão. No entanto, a escolha de uma boa ordem de aproximação é suficiente para que este problema não ocorra.

A.2.4 Realocação de Polos (Método de Ajuste Vetorial Relaxado)

Em [12], os autores do Método do Ajuste Vetorial apresentam uma modificação do método para melhorar a performance de convergência e reduzir a importância da especificação da localização dos polos iniciais. Como dito anteriormente, a distribuição indevida dos polos ao longo da faixa de frequência de interesse pode comprometer a solução do problema linear.

Esta modificação deixa o método com uma maior capacidade de realocar os polos para melhores posições, mesmo com uma distribuição inicial indevida dos mesmos. Essa melhoria é conseguida substituindo a condição assintótica de alta frequência da função de escalonamento $\sigma(s)$ considerada na segunda parte de (A.3) por uma condição de maior relaxação.

A segunda parte da equação (A.3) é novamente apresentada em (A.25). Nota-se que, nesta formulação original do Método do Ajuste Vetorial, a função escalonamento $\sigma(s)$ se aproxima da unidade nas frequências infinitas. Esta condição reduz a capacidade de realocação de polos a grandes distâncias.

$$\sigma(s) = \sum_{n=1}^N \frac{\tilde{c}_n}{s - \tilde{a}_n} + 1 \quad (\text{A.25})$$

A nova função de escalonamento sugerida é apresentada em (A.26).

$$\sigma(s) = \sum_{n=1}^N \frac{\tilde{c}_n}{s - \tilde{a}_n} + \tilde{d} \quad (\text{A.26})$$

Para prevenir a solução trivial (solução nula), a equação (A.27) foi adicionada ao problema linear a ser resolvido:

$$\Re \left\{ \sum_{k=1}^{N_s} \left(\sum_{n=1}^N \frac{\tilde{c}_n}{s_k - \tilde{a}_n} + \tilde{d} \right) \right\} = N_s \quad (\text{A.27})$$

Nota-se que a equação (A.27) não adiciona outras complicações ao problema linear senão prevenir que $\sigma(s)$ se aproxime de zero.

Como $\sigma(s)$, durante as iterações, não mais se aproxima da unidade nas altas frequências, a equação (A.18) utilizada no cálculos dos novos polos (polos de $f(s)$ ou zeros de $\sigma(s)$) deve ser substituída pela equação (A.28).

$$\{a_n\} = \text{eig}(\mathbf{A} - \mathbf{b} \cdot \tilde{d}^{-1} \cdot \tilde{\mathbf{c}}^T) \quad (\text{A.28})$$

A.3 Criação da DLL do Método do Ajuste Vetorial

A implementação do algoritmo do Método do Ajuste Vetorial é distribuída na linguagem Matlab. É disponibilizado o arquivo “vectfit3.m”. Também são disponibilizados os arquivos “tri2full.m” e “ss2pr.m” e alguns exemplos para melhor entendimento do método.

Como o HarmZs foi desenvolvido em Visual C++, não haveria como chamar as funções escritas em Matlab. Uma maneira de utilizar o Método do Ajuste Vetorial seria implementá-lo em C++. Seria necessário entender o algoritmo a fundo para implementá-lo utilizando os mesmos conceitos de orientação a objetos e alocação dinâmica de memória utilizados no HarmZs. Com o objetivo de utilizar o algoritmo em sua forma originalmente proposta, livre de possíveis erros de implementação, evitou-se esse procedimento.

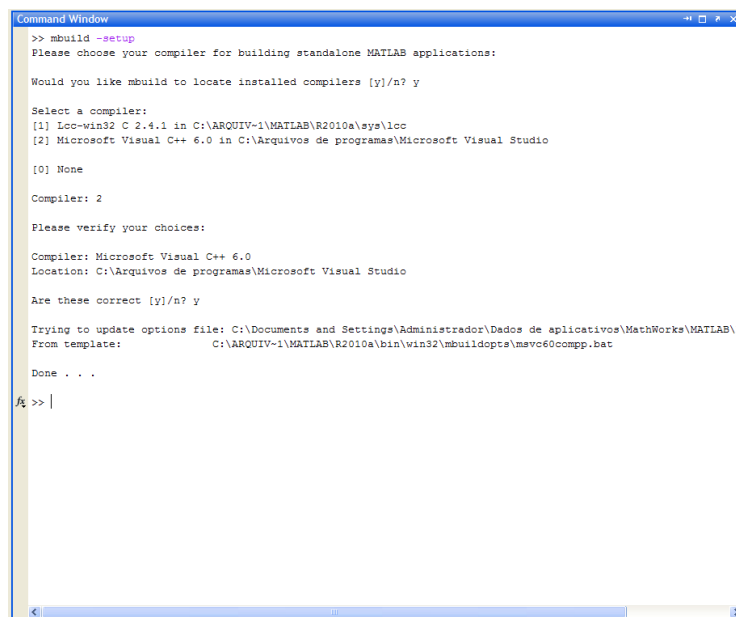
Partiu-se, então, para uma segunda opção: compilar o código do Método do Ajuste Vetorial em uma DLL utilizando o Matlab Compiler, criando um projeto autossuficiente (*standalone*). Com esta opção seria possível utilizar o algoritmo do Método do Ajuste Vetorial como uma aplicação fora do ambiente Matlab. Esta opção mostrou uma saída elegante pois a DLL poderia ser chamada em tempo de processamento do programa HarmZs, através de variáveis e funções, sem necessidade de ficar exportando arquivos texto para serem processados no Matlab e os valores processados retornados através de outros arquivos de saída também em texto, que deveriam ser lidos pelo HarmZs.

Outra vantagem de utilizar o método compilado em uma DLL é o fato de não haver necessidade de instalar o Matlab em outros computadores onde o programa será executado. Basta instalar o pacote MCR (Matlab Compiler Runtime) que é distribuído na homepage do Matlab. O MCR é um conjunto de bibliotecas independentes que permite executar arquivos em microcomputadores onde o Matlab não está instalado.

O MCR precisa ser fornecido em conjunto com o programa que utiliza a versão compilada do código Matlab para que seja possível utilizar o mesmo. Vale observar que

a versão do MCR deve ser composta pelas mesmas versões das dlls do Matlab onde o código foi compilado caso contrário não será possível integrar o Matlab ao C++.

Para compilar os arquivos do Método do Ajuste Vetorial que foram disponibilizados, basta utilizar o comando *mcc* na janela de comandos do programa Matlab. Caso seja a primeira vez que utilize essa funcionalidade, ou caso não saiba que compilador será utilizado, é preciso definir o compilador que será utilizado através do comando “*mbuild -setup*”, como apresentado na Figura 277.



```
>> mbuild -setup
Please choose your compiler for building standalone MATLAB applications:

Would you like mbuild to locate installed compilers [y]/n? y

Select a compiler:
[1] gcc-mingw32 C 2.4.1 in C:\ARQUIV-1\MATLAB\R2010a\sys\loc
[2] Microsoft Visual C++ 6.0 in C:\Arquivos de programas\Microsoft Visual Studio

[0] None
Compiler: 2

Please verify your choices:

Compiler: Microsoft Visual C++ 6.0
Location: C:\Arquivos de programas\Microsoft Visual Studio

Are these correct [y]/n? y

Trying to update options file: C:\Documents and Settings\Administrador\Dados de aplicativos\MathWorks\MATLAB\R
From template: C:\ARQUIV-1\MATLAB\R2010a\bin\win32\mbuildopts\msvc60comp.bat

Done . . .

fx >> |
```

Figura 277: Escolha do compilador que será utilizado pelo MCR

Após a escolha do compilador, basta executar o comando *mcc* e passar os nomes dos arquivos do Matlab que se deseja compilar. Uma série de opções para esse comando pode ser utilizada, como por exemplo a opção *link:lib* para criação de uma biblioteca (DLL) que será utilizada no programa desenvolvido em C++. Maiores informações podem ser obtidas na homepage do Matlab. A linha de comando completa que foi executada é: *mcc -W lib:vectfit3 -T link:lib vectfit3.m ss2pr.m tri2full.m*.

Concluído o processo de compilação, os arquivos LIB e DLL do método necessários no programa desenvolvido em C++ podem ser encontrados na mesma pasta onde estavam os arquivos “.m” do Método do Ajuste Vetorial. Todos os arquivos criados no processo de compilação podem ser visualizados na Figura 278, onde os arquivos *vectfit3.dll* e *vectfit3.lib* estão destacados.

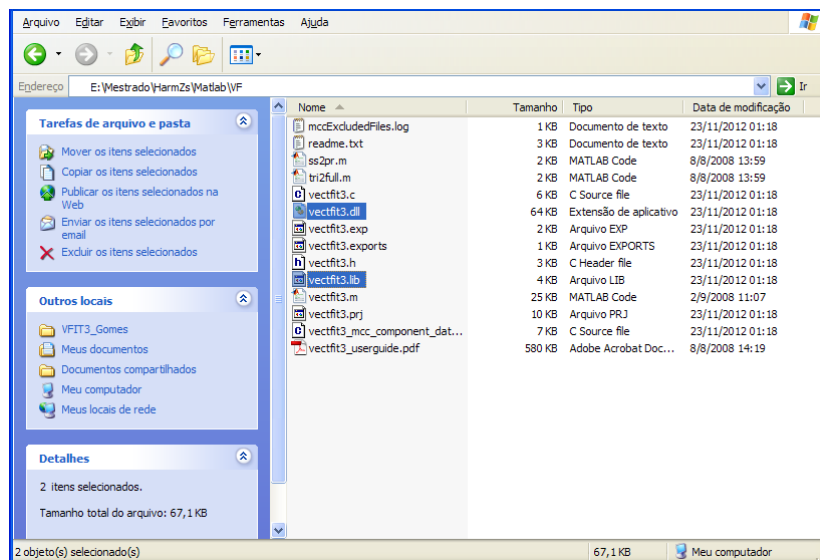


Figura 278: Arquivos criados no processo de compilação de arquivos do Matlab

Após a conclusão do processo de compilação dos arquivos do Método do Ajuste Vetorial no Matlab, uma série de funções estão disponibilizadas para acessar as funcionalidades do método no programa HarmZs desenvolvido em Visual C++. Na Tabela 84 estão apresentadas as funções existentes na DLL criada e uma breve descrição de cada função.

Tabela 84: Funções implementadas na DLL e que serão utilizadas no HarmZs

Função	Descrição
vectfit3Initialize	Função para inicializar a utilização da DLL
mlfVectfit3	Função para executar o Método do Ajuste Vetorial
mlfTri2full	Função para converter o modelo racional de matriz triangular inferior para a modelagem de espaço de estados de matrizes cheias
mlfSs2pr	Função para converter a modelagem de espaço de estados para modelagem de polos e resíduos
vectfit3Terminate	Função para terminar a utilização da DLL

A.4 Dados dos Sistemas Elétricos Utilizados ao Longo do Texto

A.4.1 Sistema Elétrico Teste de 5 Barras

A.4.1.1. Anafas

Listagem 1: Dados do Sistema Elétrico Teste de 5 Barras no formato do programa Anafas

```

(-----Titulo do Caso-----
TITU
Caso 5 Barras
DBAR
(-----Dados de Barra-----
(NB  CEM      BN      VPRE ANG VBAS DISJUN      DDMMAAADDMMAAAA IA  SA
(=====
1      Barra 1      13.8      1
2      Barra 2      138      1
3      Barra 3      138      1
4      Barra 4      138      1
5      Barra 5      13.8      1
99999
DCIR
(-----Dados de Circuitos-----
(BF  CE  BT   NCT  R1   X1   R0   X0   CN   S1   S0   TAP  TB   TCIA DEFE KM
(=====
1      0   1G    100      100      1
5      0   1G    100      100      1
1      5   1L    100      100      1
2      3   1L    100      100      1
3      4   1L    100      100      1
1      2   1T    100      100      1
4      5   1T    100      100      1
99999

```

A.4.1.2. HarmZs

Listagem 2: Dados do Sistema Elétrico Teste de 5 Barras no formato do programa HarmZs

```

#VERSAO 1.9
DGERAIS
FREQUENCIA      60
SBASE           100
DADOS           PU
INTERFACE       PU
METODOLOGIA     YS
TITULO
IDBARRA        NUMERO
FIM
DGBT
% Grupo          Tensão (kV)
      1           138
      2           13.8
FIM
DARE
% Area           Nome
      1           "** AREA 1 / NIVEL DE TENSÃO 138 KV *"
      2           "** AREA 2 / NIVEL DE TENSÃO 13.8 KV *"
FIM
DBAR
% Num           Nome          Tensao      Angulo      Base      Area
      1         "BARRA01-13.8"      1           0           2         2
      2         "BARRA02--138"      1           0           1         1
      3         "BARRA03--138"      1           0           1         1
      4         "BARRA04--138"      1           0           1         1
      5         "BARRA05-13.8"      1           0           2         2
FIM
DLIN
% De           Para Circ Est      Resist      Reat      Suscep      Comp      PI      Ident
      2         3     1     1      0           0.01      0           1     1     0
      3         4     1     1      0           0.01      0           1     1     0
      1         5     1     1      0           0.01      0           1     1     0
FIM
DTR2
% De           V_De      Ang_De      Para      V_Para      Ang_Para      Resist      Reat      S_Base      Circ      Est      Ident
      1         1           0           2         1           0           0           0.01      100       1     1     0
      4         1           0           5         1           0           0           0.01      100       1     1     0
FIM
DMAQ
% Barra      Est      Resist      Reat      SBase      Ident
      1         1         0           0.01      100       0
      5         1         0           0.01      100       0
FIM

```


A.4.2 Sistema Elétrico IEEE 14 Barras

A.4.2.1. Anafas

Listagem 3: Dados do Sistema Elétrico IEEE 14 Barras no formato do programa Anafas

```

TIPO
A 1
TITU
**** Sistema teste de 14 barras - IEEE ****
DBAR
(NB CEM BN VPRE ANG VBAS DISJUN DDMMAAAADDMMAAAA IA SA
(-----)
1 BARRA-1 1000 1
2 BARRA-2 1000-5.7 1
3 BARRA-3 1000 -15 1
4 BARRA-4 956 -12 1
5 BARRA-5 958-9.9 1
6 BARRA-6 1000 -16 1
7 BARRA-7 984 -15 1
8 BARRA-8 1000 -15 1
9 BARRA-9 979 -17 1
10 BARRA-10 975 -17 1
11 BARRA-11 984 -17 1
12 BARRA-12 984 -17 1
13 BARRA-13 978 -17 1
14 BARRA-14 959 -18 1
99999
DCIR
(BF CE BT NCT R1 X1 R0 X0 CN S1_PgS0_Qg TAP TB TCIA DEFE KM
(-----)
1 2 1L 1.938 5.917 1.938 5.917 528 528 1
1 5 1L 5.40322.304 5.40322.304 492 492 1
2 3 1L 4.69919.797 4.69919.797 438 438 1
2 4 1L 5.81117.632 5.81117.632 374 374 1
2 5 1L 5.69517.388 5.69517.388 340 340 1
3 4 1L 6.70117.103 6.70117.103 346 346 1
4 5 1L 1.335 4.211 1.335 4.211 128 128 1
4 7 1T 20.912 20.912 9780 1
4 9 1T 55.618 55.618 9690 1
5 6 1T 25.202 25.202 9320 1
6 11 1L 9.498 1989 9.498 1989 1
6 12 1L12.29125.58112.29125.581 1
6 13 1L 6.61513.027 6.61513.027 1
7 8 1L 17.615 17.615 1
7 9 1L 11.001 11.001 1
9 10 1L 3.181 845 3.181 845 1
9 14 1L12.71127.03812.71127.038 1
10 11 1L 8.20519.207 8.20519.207 1
12 13 1L22.09219.98822.09219.988 1
13 14 1L17.09334.80217.09334.802 1
0 9 1H -52632 -52632 1
0 2 1C 34326 20089 34326 20089 1
0 3 1C 1020120.575 1020120.575 1
0 4 1C 18994 -1550 18994 -1550 1
0 5 1C115633 24344115633 24344 1
0 6 1C 61643 41279 61643 41279 1
0 9 1C 24676 13885 24676 13885 1
0 10 1C 74630 48095 74630 48095 1
0 11 1C218780112515218780112515 1
0 12 1C148513 38954148513 38954 1
0 13 1C 59811 25696 59811 25696 1
0 14 1C 55476 18616 55476 18616 1
0 1 1G 12.685 999998 1
0 2 1G 5660 999998 1
0 3 1G 5660 999998 1
0 6 1G 5660 999998 1
0 8 1G 5660 999998 1
99999
DARE
(NN C NOME
1
99999

```

A.4.2.2. HarmZs

Listagem 4: Dados do Sistema Elétrico IEEE 14 Barras no formato do programa HarmZs

```

#VERSAO 1.9
DGERAIS
  FREQUENCIA 60
  SBASE 100
  DADOS PU
  INTERFACE PU
  METODOLOGIA YS
  TITULO Sistema_teste_de_14_barras_-_IEEE
  IDBARRA NUMERO
FIM
DGBT
% Grupo Tensao (kV)
  1 1
FIM
DARE
% Area Nome
  1 ""
FIM
DBAR
% Num Nome Tensao Angulo Base Area
  1 "BARRA-1" 1 0.0 1 1
  2 "BARRA-2" 1 -5.7 1 1
  3 "BARRA-3" 1 -15 1 1
  4 "BARRA-4" 0.956 -12 1 1
  5 "BARRA-5" 0.958 -9.9 1 1
  6 "BARRA-6" 1 -16 1 1
  7 "BARRA-7" 0.984 -15 1 1
  8 "BARRA-8" 1 -15 1 1
  9 "BARRA-9" 0.979 -17 1 1
  10 "BARRA-10" 0.975 -17 1 1
  11 "BARRA-11" 0.984 -17 1 1
  12 "BARRA-12" 0.984 -17 1 1
  13 "BARRA-13" 0.978 -17 1 1
  14 "BARRA-14" 0.959 -18 1 1
FIM
DLIN
% De Para Circ Est Resist Reat Suscep Comp PI Ident
  1 2 1 1 0.01938 0.05917 0.0528 1 1 0
  1 5 1 1 0.05403 0.22304 0.0492 1 1 0
  2 3 1 1 0.04699 0.19797 0.0438 1 1 0
  2 4 1 1 0.05811 0.17632 0.0374 1 1 0
  2 5 1 1 0.05695 0.17388 0.0340 1 1 0
  3 4 1 1 0.06701 0.17103 0.0346 1 1 0
  4 5 1 1 0.01335 0.04211 0.0128 1 1 0
  13 14 1 1 0.17093 0.34802 0 1 1 0
  6 11 1 1 0.09498 0.19890 0 1 1 0
  6 12 1 1 0.12291 0.25581 0 1 1 0
  6 13 1 1 0.06615 0.13027 0 1 1 0
  7 8 1 1 0 0.17615 0 1 1 0
  7 9 1 1 0 0.11001 0 1 1 0
  9 10 1 1 0.03181 0.08450 0 1 1 0
  9 14 1 1 0.12711 0.27038 0 1 1 0
  10 11 1 1 0.08205 0.19207 0 1 1 0
  12 13 1 1 0.22092 0.19988 0 1 1 0
FIM
DTR2
% De V_De Ang_De Para V_Para Ang_Para Resist Reat S_Base Circ Est Ident
  4 0.969 0 9 1 0 0 0.55618 100 1 1 0
  5 0.932 0 6 1 0 0 0.25202 100 1 1 0
  4 0.978 0 7 1 0 0 0.20912 100 1 1 0
FIM
DCRG
% Barra Circ Est Pot_Ativa Pot_Reativa Lig Ident.Ramal
  2 1 1 0.216999992728233 0.127000004053116 s 0
  3 1 1 0.941999971866608 0.189999997615814 s 0
  4 1 1 0.477999985218048 -0.0390000008046627 s 0
  5 1 1 0.0759999975562096 0.0160000007599592 s 0
  6 1 1 0.112000003457069 0.0750000029802322 s 0
  9 1 1 0.294999986886978 0.165999993681908 s 0
  10 1 1 0.0900000035762787 0.0579999983310699 s 0
  11 1 1 0.0350000001490116 0.0179999992251396 s 0
  12 1 1 0.0610000006854534 0.0160000007599592 s 0

```

13	1	1	0.135000005364418	0.0579999983310699	s	0		
14	1	1	0.149000003933907	0.0500000007450581	s	0		
FIM								
DEQP								
%	De	Para	Circ	Est	Resist	Reat	Suscep	Lig
9		0	1	1	0	0	0.1899984800121599	p
FIM								
DMAQ								
% Barra	Est	Resistencia	Reatancia	SBase	Identificador			
1	1	0	0.12685	100	0			
2	1	0	0.566	100	0			
3	1	0	0.566	100	0			
6	1	0	0.566	100	0			
8	1	0	0.566	100	0			
FIM								

A.4.3 Sistema Elétrico Sul-Sudeste / Industrial

A.4.3.1. Sistema de Transmissão Sul-Sudeste – Rede Externa

Listagem 5: Dados do Sistema Elétrico de Transmissão Sul-Sudeste no formato do programa HarmZs

DGERAIS						
FREQUENCIA	60					
SBASE	100					
DADOS	PU					
INTERFACE	PU					
METODOLOGIA	YS					
TITULO						
IDBARRA	NUMERO					
FIM						
DGBT						
%	Grupo	Tensão (kV)				
	1	1.0				
FIM						
DBAR						
%	Num	Nome	Tensao	Angulo	Base	Area
	1	"BARRA 1"	1.0180000	0.3982330	1	1
	2	"BARRA 2"	0.9917722	0.1366038	1	1
	3	"BARRA 3"	1.0148420	-0.0637668	1	1
	4	"BARRA 4"	0.9777082	-0.3334859	1	1
	5	"BARRA 5"	1.0727500	-0.4099668	1	1
	6	"BARRA 6"	1.0343632	-0.0740474	1	1
	7	"BARRA 7"	1.0285393	0.0152649	1	1
	8	"BARRA 8"	1.0232714	-0.0242775	1	1
	9	"BARRA 9"	1.0266656	-0.1194424	1	1
	10	"BARRA 10"	1.0274028	-0.1155402	1	1
	11	"BARRA 11"	1.0193146	-0.0750483	1	1
	12	"BARRA 12"	1.0243729	-0.1745390	1	1
	13	"BARRA 13"	0.9799035	-0.4148465	1	1
	14	"BARRA 14"	1.0723441	-0.5122620	1	1
	15	"BARRA 15"	1.0776275	-0.5532810	1	1
	16	"BARRA 16"	1.0910000	-0.5410520	1	1
	17	"BARRA 17"	1.0666548	-0.5015534	1	1
	18	"BARRA 18"	1.0446701	-0.4163041	1	1
	19	"BARRA 19"	1.0254096	-0.4734192	1	1
	20	"BARRA 20"	1.0241081	-0.1173326	1	1
	21	"BARRA 21"	1.0521110	-0.1418740	1	1
	22	"BARRA 22"	1.0551361	0.0389105	1	1
	23	"BARRA 23"	1.0311644	-0.2045768	1	1
	24	"BARRA 24"	1.0212932	-0.4714343	1	1
	25	"BARRA 25"	1.0394679	-0.5084931	1	1
	26	"BARRA 26"	1.0430000	0.3419691	1	1
	27	"BARRA 27"	1.0000000	0.0500894	1	1
	28	"BARRA 28"	0.9820000	0.3209325	1	1
	29	"BARRA 29"	0.9790000	0.1077624	1	1
	30	"BARRA 30"	0.9890000	-0.0409282	1	1
	31	"BARRA 31"	1.0369999	0.1342774	1	1
	32	"BARRA 32"	0.9960000	-0.4641638	1	1
	33	"BARRA 33"	1.0000000	-0.1126379	1	1
	34	"BARRA 34"	1.0191674	-0.0743504	1	1
	110	"BARRA 110"	1.0246046	-0.2307989	1	1
	111	"BARRA 111"	1.0168369	-0.2521992	1	1
	112	"BARRA 112"	1.0161479	-0.2536954	1	1
	113	"BARRA 113"	1.0162201	-0.2554068	1	1
	114	"BARRA 114"	1.0153826	-0.2563346	1	1
	121	"BARRA 121"	1.0044801	-0.2555535	1	1
	122	"BARRA 122"	1.0015620	-0.2592227	1	1
	123	"BARRA 123"	1.0005258	-0.2599806	1	1
	124	"BARRA 124"	1.0000807	-0.2603267	1	1
	125	"BARRA 125"	0.9985283	-0.2620999	1	1
	126	"BARRA 126"	0.9959154	-0.2649390	1	1
	131	"BARRA 131"	1.0001649	-0.2534508	1	1
	132	"BARRA 132"	0.9946007	-0.2575922	1	1
	133	"BARRA 133"	0.9890153	-0.2619016	1	1
	134	"BARRA 134"	0.9840352	-0.2656795	1	1
	135	"BARRA 135"	0.9880422	-0.2627531	1	1
	141	"BARRA 141"	1.0186186	-0.2457086	1	1
	142	"BARRA 142"	1.0184642	-0.2483548	1	1

143	"BARRA 143"	1.0182086	-0.2500966	1	1			
1110	"BARRA 1110"	1.0404856	-0.2018084	1	1			
1111	"BARRA 1111"	1.0331720	-0.2226708	1	1			
1112	"BARRA 1112"	1.0325116	-0.2241267	1	1			
1113	"BARRA 1113"	1.0326215	-0.2257989	1	1			
1114	"BARRA 1114"	1.0317975	-0.2266975	1	1			
1121	"BARRA 1121"	1.0208683	-0.2258569	1	1			
1122	"BARRA 1122"	1.0180287	-0.2294205	1	1			
1123	"BARRA 1123"	1.0170095	-0.2301542	1	1			
1124	"BARRA 1124"	1.0165718	-0.2304891	1	1			
1125	"BARRA 1125"	1.0150465	-0.2322057	1	1			
1126	"BARRA 1126"	1.0124775	-0.2349534	1	1			
1131	"BARRA 1131"	1.0166253	-0.2238138	1	1			
1132	"BARRA 1132"	1.0111564	-0.2278221	1	1			
1133	"BARRA 1133"	1.0056666	-0.2319916	1	1			
1134	"BARRA 1134"	1.0007712	-0.2356453	1	1			
1135	"BARRA 1135"	1.0047098	-0.2328152	1	1			
1141	"BARRA 1141"	1.0349048	-0.2163752	1	1			
1142	"BARRA 1142"	1.0348293	-0.2189673	1	1			
1143	"BARRA 1143"	1.0346248	-0.2206721	1	1			
FIM								
DLIN								
% De	Para	Circ	Est	Resist	Reat	Suscep	Comp	PI
2	3	1	1	0.0002555	0.0037020	25.0000000	1.0	0
3	4	1	1	0.0004544	0.0053560	29.5009995	1.0	0
5	14	1	1	0.0004130	0.0052000	0.6400000	1.0	0
6	7	1	1	0.0015400	0.0194000	2.3697000	1.0	0
8	7	1	1	0.0005600	0.0069700	0.8574600	1.0	0
8	9	1	1	0.0005200	0.0065400	0.8049300	1.0	0
9	6	1	1	0.0015900	0.0201200	2.4577000	1.0	0
9	12	1	1	0.0016200	0.0204800	2.5016999	1.0	0
10	9	1	1	0.0000500	0.0006250	0.3063200	1.0	0
11	7	1	1	0.0017200	0.0217000	2.6515999	1.0	0
12	11	1	1	0.0010200	0.0126800	1.5524000	1.0	0
12	13	1	1	0.0022500	0.0303300	3.8146000	1.0	0
13	11	1	1	0.0028200	0.0385200	4.9369998	1.0	0
14	15	1	1	0.0001420	0.0017600	0.2166000	1.0	0
14	17	1	1	0.0002230	0.0028000	0.1446200	1.0	0
15	16	1	1	0.0000350	0.0004400	0.0541400	1.0	0
18	19	1	1	0.0002030	0.0020000	0.3024000	1.0	0
18	20	1	1	0.0135000	0.0580000	2.6500001	1.0	0
21	22	1	1	0.0152100	0.0786400	0.5421200	1.0	0
23	22	1	1	0.0230550	0.1187500	0.8237300	1.0	0
23	24	1	1	0.0238500	0.1219700	0.8594500	1.0	0
25	24	1	1	0.0435900	0.2249900	0.5097700	1.0	0
26	11	1	1	0.0032850	0.0436850	4.8878002	1.0	0
34	11	1	1	0.0000000	0.0005000	0.0283800	1.0	0
34	11	2	1	0.0000000	0.0005000	0.0283800	1.0	0
110	111	1	1	0.0134980	0.0345940	0.0099250	1.0	0
111	112	1	1	0.0014000	0.0035870	0.0010290	1.0	0
112	113	1	1	0.0030990	0.0079440	0.0022790	1.0	0
113	114	1	1	0.0023000	0.0058940	0.0016910	1.0	0
110	121	1	1	0.0112980	0.0289560	0.0083070	1.0	0
121	122	1	1	0.0021000	0.0053810	0.0015440	1.0	0
122	123	1	1	0.0014000	0.0035870	0.0010290	1.0	0
122	125	1	1	0.0036990	0.0094810	0.0027200	1.0	0
123	124	1	1	0.0014000	0.0035870	0.0010290	1.0	0
125	126	1	1	0.0056990	0.0146060	0.0041900	1.0	0
110	131	1	1	0.0114980	0.0294690	0.0084540	1.0	0
131	132	1	1	0.0024990	0.0064060	0.0018380	1.0	0
132	133	1	1	0.0030990	0.0079440	0.0022790	1.0	0
133	134	1	1	0.0062990	0.0161440	0.0046320	1.0	0
133	135	1	1	0.0027990	0.0071750	0.0020580	1.0	0
110	141	1	1	0.0126970	0.0325440	0.0093370	1.0	0
141	142	1	1	0.0031990	0.0082000	0.0023530	1.0	0
142	143	1	1	0.0041990	0.0107620	0.0030880	1.0	0
1110	1111	1	1	0.0134980	0.0345940	0.0099250	1.0	0
1111	1112	1	1	0.0014000	0.0035870	0.0010290	1.0	0
1112	1113	1	1	0.0030990	0.0079440	0.0022790	1.0	0
1113	1114	1	1	0.0023000	0.0058940	0.0016910	1.0	0
1110	1121	1	1	0.0112980	0.0289560	0.0083070	1.0	0
1121	1122	1	1	0.0021000	0.0053810	0.0015440	1.0	0
1122	1123	1	1	0.0014000	0.0035870	0.0010290	1.0	0
1122	1125	1	1	0.0036990	0.0094810	0.0027200	1.0	0
1123	1124	1	1	0.0014000	0.0035870	0.0010290	1.0	0
1125	1126	1	1	0.0056990	0.0146060	0.0041900	1.0	0
1110	1131	1	1	0.0114980	0.0294690	0.0084540	1.0	0

1131	1132	1	1	0.0024990	0.0064060	0.0018380	1.0	0		
1132	1133	1	1	0.0030990	0.0079440	0.0022790	1.0	0		
1133	1134	1	1	0.0062990	0.0161440	0.0046320	1.0	0		
1133	1135	1	1	0.0027990	0.0071750	0.0020580	1.0	0		
1110	1141	1	1	0.0126970	0.0325440	0.0093370	1.0	0		
1141	1142	1	1	0.0031990	0.0082000	0.0023530	1.0	0		
1142	1143	1	1	0.0041990	0.0107620	0.0030880	1.0	0		
110	1110	1	1	0.0100000	0.0256300	0.0073520	1.0	0		
FIM										
DTR2										
%De	V_De	Ang_De	Para	V_Para	Ang_Para	Resist	Reat	S_Base	Cir	Est
2	0.9752	0.0	1	1.0	0.0	0.00001259999985185	0.0049753	100	1	1
5	1.0970	0.0	4	1.0	0.0	0.00000000000000000	0.0032400	100	1	1
6	1.0060	0.0	3	1.0	0.0	0.000005000000003633	0.0037170	100	1	1
7	1.0240	0.0	28	1.0	0.0	0.00027329998152703	0.0161200	100	1	1
8	1.0240	0.0	29	1.0	0.0	0.00000000000000000	0.0140000	100	1	1
10	1.0480	0.0	30	1.0	0.0	0.00000000000000000	0.0108830	100	1	1
17	1.0230	0.0	19	1.0	0.0	0.00000000000000000	0.0072000	100	1	1
18	1.0640	0.0	4	1.0	0.0	0.00000000000000000	0.0030000	100	1	1
20	0.9704	0.0	6	1.0	0.0	0.00000000000000000	0.0089900	100	1	1
21	1.0380	0.0	9	1.0	0.0	0.000309999999042813	0.0120700	100	1	1
22	1.0250	0.0	31	1.0	0.0	0.00016730001196987	0.0113330	100	1	1
23	1.0250	0.0	33	1.0	0.0	0.001000000009241435	0.0461400	100	1	1
24	1.0530	0.0	13	1.0	0.0	0.00008729999897745	0.0032960	100	1	1
25	1.0500	0.0	32	1.0	0.0	0.000509999996827317	0.0153100	100	1	1
34	1.0000	0.0	27	1.0	0.0	0.00000000000000000	0.0436200	100	1	1
23	1.0000	0.0	110	1.0	0.0	0.00000000000000000	0.0150000	100	1	1
21	1.0000	0.0	1110	1.0	0.0	0.00000000000000000	0.0150000	100	1	1
FIM										
DCRG										
%	Barra	Circ	Est	Pot_Ativa	Pot_Reativa	Lig				
1	1	1	1	0.1590000	0.0000000	2				
6	1	1	1	0.0300100	0.0000000	2				
7	1	1	1	3.0999999	-1.6600000	1				
9	1	1	1	16.3600006	11.3199997	2				
11	1	1	1	0.0290100	0.0000000	2				
12	1	1	1	2.8599999	0.6200000	2				
13	1	1	1	0.0430000	-0.0080000	1				
15	1	1	1	61.4900017	24.0000000	2				
19	1	1	1	26.9899998	8.3970003	2				
22	1	1	1	4.2550001	1.0500000	2				
24	1	1	1	18.3600006	3.6500001	2				
25	1	1	1	5.7930002	0.6400000	2				
28	1	1	1	0.0170300	0.0000000	2				
30	1	1	1	0.0590100	0.0000000	2				
31	1	1	1	0.0161000	0.0000000	2				
32	1	1	1	0.3140000	0.1570000	2				
111	1	1	1	0.1940000	0.0930000	1				
112	1	1	1	0.2500000	0.1080000	1				
114	1	1	1	0.1898000	0.0710000	1				
121	1	1	1	0.2160000	0.0620000	1				
122	1	1	1	0.1250000	0.0500000	1				
123	1	1	1	0.1558000	0.1050000	1				
124	1	1	1	0.1258000	0.0755000	1				
125	1	1	1	0.1431000	0.0878000	1				
126	1	1	1	0.2280000	0.0910000	1				
131	1	1	1	0.1087000	0.0656000	1				
132	1	1	1	0.1499000	0.1057000	1				
133	1	1	1	0.2510000	0.1610000	1				
134	1	1	1	0.3003000	0.1882000	1				
135	1	1	1	0.1460000	0.0780000	1				
141	1	1	1	0.1800000	0.1000000	1				
142	1	1	1	0.1430000	0.0960000	1				
143	1	1	1	0.1538000	0.1032000	1				
1111	1	1	1	0.1940000	0.0930000	1				
1112	1	1	1	0.2500000	0.1080000	1				
1114	1	1	1	0.1898000	0.0710000	1				
1121	1	1	1	0.2160000	0.0620000	1				
1122	1	1	1	0.1250000	0.0500000	1				
1123	1	1	1	0.1558000	0.1050000	1				
1124	1	1	1	0.1258000	0.0755000	1				
1125	1	1	1	0.1431000	0.0878000	1				
1126	1	1	1	0.2280000	0.0910000	1				
1131	1	1	1	0.1087000	0.0656000	1				
1132	1	1	1	0.1499000	0.1057000	1				
1133	1	1	1	0.2510000	0.1610000	1				
1134	1	1	1	0.3003000	0.1882000	1				

1135	1	1	0.1460000	0.0780000	1		
1141	1	1	0.1800000	0.1000000	1		
1142	1	1	0.1430000	0.0960000	1		
1143	1	1	0.1538000	0.1032000	1		
FIM							
DEQP							
% De	Para	Cir	Est	Resist	Reat	Suscep	Lig
2	0	1	1	0.000000000000000000	0.10101010490225223	0.000000000000000000	1
3	0	1	1	0.000000000000000000	0.15151515370448654	0.000000000000000000	1
4	0	1	1	0.000000000000000000	0.10101010490225223	0.000000000000000000	1
9	0	1	1	0.000000000000000000	0.000000000000000000	10.26000022888183600	1
11	0	1	1	0.000000000000000000	0.33333333333333337	0.000000000000000000	1
18	0	1	1	0.000000000000000000	0.000000000000000000	10.00000000000000000	1
20	0	1	1	0.000000000000000000	0.000000000000000000	0.40000000596046448	1
21	0	1	1	0.000000000000000000	0.000000000000000000	0.250000000000000000	1
23	0	1	1	0.000000000000000000	0.000000000000000000	0.250000000000000000	1
24	0	1	1	0.000000000000000000	0.000000000000000000	1.36000001430511470	1
25	0	1	1	0.000000000000000000	0.000000000000000000	1.28699994087219240	1
26	0	1	1	0.000000000000000000	1.000000000000000000	0.000000000000000000	1
110	0	1	1	0.000000000000000000	0.000000000000000000	0.21529999375343323	1
111	0	1	1	0.000000000000000000	0.000000000000000000	0.13269999623298645	1
113	0	1	1	0.000000000000000000	0.000000000000000000	0.14699999988079071	1
122	0	1	1	0.000000000000000000	0.000000000000000000	0.16410000622272491	1
131	0	1	1	0.000000000000000000	0.000000000000000000	0.15240000188350677	1
142	0	1	1	0.000000000000000000	0.000000000000000000	0.14900000393390656	1
143	0	1	1	0.000000000000000000	0.000000000000000000	0.13269999623298645	1
1110	0	1	1	0.000000000000000000	0.000000000000000000	0.21529999375343323	1
1111	0	1	1	0.000000000000000000	0.000000000000000000	0.13269999623298645	1
1113	0	1	1	0.000000000000000000	0.000000000000000000	0.14699999988079071	1
1122	0	1	1	0.000000000000000000	0.000000000000000000	0.16410000622272491	1
1131	0	1	1	0.000000000000000000	0.000000000000000000	0.15240000188350677	1
1142	0	1	1	0.000000000000000000	0.000000000000000000	0.14900000393390656	1
1143	0	1	1	0.000000000000000000	0.000000000000000000	0.13269999623298645	1
9	25	1	1	0.022506999298352277	0.13641999589579576	0.000000000000000000	2
FIM							
DMAQ							
% Barra		Est					
1		1					
16		1					
26		1					
27		1					
28		1					
29		1					
30		1					
31		1					
32		1					
33		1					
FIM							

A.4.3.2. Sistema Industrial – Rede Interna

Listagem 6: Dados do Sistema Elétrico Industrial no formato do programa HarmZs

DGERAIS									
FREQUENCIA	60								
SBASE	100								
DADOS	PU								
INTERFACE	PU								
METODOLOGIA	YS								
TITULO									
IDBARRA	NUMERO								
FIM									
DGBT									
%	Grupo	Tensão (kV)							
	1	1.0							
FIM									
DBAR									
%	Num	Nome	Tensao	Angulo	Base	Area			
	21	"BARRA 21"	1.0521110	-0.1418740	1	1			
	23	"BARRA 23"	1.0311644	-0.2045768	1	1			
	110	"BARRA 110"	1.0246046	-0.2307989	1	1			
	111	"BARRA 111"	1.0168369	-0.2521992	1	1			
	112	"BARRA 112"	1.0161479	-0.2536954	1	1			
	113	"BARRA 113"	1.0162201	-0.2554068	1	1			
	114	"BARRA 114"	1.0153826	-0.2563346	1	1			
	121	"BARRA 121"	1.0044801	-0.2555535	1	1			
	122	"BARRA 122"	1.0015620	-0.2592227	1	1			
	123	"BARRA 123"	1.0005258	-0.2599806	1	1			
	124	"BARRA 124"	1.0000807	-0.2603267	1	1			
	125	"BARRA 125"	0.9985283	-0.2620999	1	1			
	126	"BARRA 126"	0.9959154	-0.2649390	1	1			
	131	"BARRA 131"	1.0001649	-0.2534508	1	1			
	132	"BARRA 132"	0.9946007	-0.2575922	1	1			
	133	"BARRA 133"	0.9890153	-0.2619016	1	1			
	134	"BARRA 134"	0.9840352	-0.2656795	1	1			
	135	"BARRA 135"	0.9880422	-0.2627531	1	1			
	141	"BARRA 141"	1.0186186	-0.2457086	1	1			
	142	"BARRA 142"	1.0184642	-0.2483548	1	1			
	143	"BARRA 143"	1.0182086	-0.2500966	1	1			
	1110	"BARRA 1110"	1.0404856	-0.2018084	1	1			
	1111	"BARRA 1111"	1.0331720	-0.2226708	1	1			
	1112	"BARRA 1112"	1.0325116	-0.2241267	1	1			
	1113	"BARRA 1113"	1.0326215	-0.2257989	1	1			
	1114	"BARRA 1114"	1.0317975	-0.2266975	1	1			
	1121	"BARRA 1121"	1.0208683	-0.2258569	1	1			
	1122	"BARRA 1122"	1.0180287	-0.2294205	1	1			
	1123	"BARRA 1123"	1.0170095	-0.2301542	1	1			
	1124	"BARRA 1124"	1.0165718	-0.2304891	1	1			
	1125	"BARRA 1125"	1.0150465	-0.2322057	1	1			
	1126	"BARRA 1126"	1.0124775	-0.2349534	1	1			
	1131	"BARRA 1131"	1.0166253	-0.2238138	1	1			
	1132	"BARRA 1132"	1.0111564	-0.2278221	1	1			
	1133	"BARRA 1133"	1.0056666	-0.2319916	1	1			
	1134	"BARRA 1134"	1.0007712	-0.2356453	1	1			
	1135	"BARRA 1135"	1.0047098	-0.2328152	1	1			
	1141	"BARRA 1141"	1.0349048	-0.2163752	1	1			
	1142	"BARRA 1142"	1.0348293	-0.2189673	1	1			
	1143	"BARRA 1143"	1.0346248	-0.2206721	1	1			
FIM									
DLIN									
%	De	Para	Circ	Est	Resist	Reat	Suscep	Comp	PI
	110	111	1	1	0.0134980	0.0345940	0.0099250	1.0	0
	111	112	1	1	0.0014000	0.0035870	0.0010290	1.0	0
	112	113	1	1	0.0030990	0.0079440	0.0022790	1.0	0
	113	114	1	1	0.0023000	0.0058940	0.0016910	1.0	0
	110	121	1	1	0.0112980	0.0289560	0.0083070	1.0	0
	121	122	1	1	0.0021000	0.0053810	0.0015440	1.0	0
	122	123	1	1	0.0014000	0.0035870	0.0010290	1.0	0
	122	125	1	1	0.0036990	0.0094810	0.0027200	1.0	0
	123	124	1	1	0.0014000	0.0035870	0.0010290	1.0	0
	125	126	1	1	0.0056990	0.0146060	0.0041900	1.0	0
	110	131	1	1	0.0114980	0.0294690	0.0084540	1.0	0
	131	132	1	1	0.0024990	0.0064060	0.0018380	1.0	0
	132	133	1	1	0.0030990	0.0079440	0.0022790	1.0	0
	133	134	1	1	0.0062990	0.0161440	0.0046320	1.0	0

133	135	1	1	0.0027990	0.0071750	0.0020580	1.0	0		
110	141	1	1	0.0126970	0.0325440	0.0093370	1.0	0		
141	142	1	1	0.0031990	0.0082000	0.0023530	1.0	0		
142	143	1	1	0.0041990	0.0107620	0.0030880	1.0	0		
1110	1111	1	1	0.0134980	0.0345940	0.0099250	1.0	0		
1111	1112	1	1	0.0014000	0.0035870	0.0010290	1.0	0		
1112	1113	1	1	0.0030990	0.0079440	0.0022790	1.0	0		
1113	1114	1	1	0.0023000	0.0058940	0.0016910	1.0	0		
1110	1121	1	1	0.0112980	0.0289560	0.0083070	1.0	0		
1121	1122	1	1	0.0021000	0.0053810	0.0015440	1.0	0		
1122	1123	1	1	0.0014000	0.0035870	0.0010290	1.0	0		
1122	1125	1	1	0.0036990	0.0094810	0.0027200	1.0	0		
1123	1124	1	1	0.0014000	0.0035870	0.0010290	1.0	0		
1125	1126	1	1	0.0056990	0.0146060	0.0041900	1.0	0		
1110	1131	1	1	0.0114980	0.0294690	0.0084540	1.0	0		
1131	1132	1	1	0.0024990	0.0064060	0.0018380	1.0	0		
1132	1133	1	1	0.0030990	0.0079440	0.0022790	1.0	0		
1133	1134	1	1	0.0062990	0.0161440	0.0046320	1.0	0		
1133	1135	1	1	0.0027990	0.0071750	0.0020580	1.0	0		
1110	1141	1	1	0.0126970	0.0325440	0.0093370	1.0	0		
1141	1142	1	1	0.0031990	0.0082000	0.0023530	1.0	0		
1142	1143	1	1	0.0041990	0.0107620	0.0030880	1.0	0		
110	1110	1	1	0.0100000	0.0256300	0.0073520	1.0	0		
FIM										
DTR2										
%De	V_De	Ang_De	Para	V_Para	Ang_Para	Resist	Reat	S_Base	Cir	Est
23	1.0	0.0	110	1.0	0.0	0.0	0.015	100.0	1	1
21	1.0	0.0	1110	1.0	0.0	0.0	0.015	100.0	1	1
FIM										
DCRG										
%	Barra	Circ	Est	Pot_Ativa	Pot_Reativa	Lig				
	111	1	1	0.1940000	0.0930000	1				
	112	1	1	0.2500000	0.1080000	1				
	114	1	1	0.1898000	0.0710000	1				
	121	1	1	0.2160000	0.0620000	1				
	122	1	1	0.1250000	0.0500000	1				
	123	1	1	0.1558000	0.1050000	1				
	124	1	1	0.1258000	0.0755000	1				
	125	1	1	0.1431000	0.0878000	1				
	126	1	1	0.2280000	0.0910000	1				
	131	1	1	0.1087000	0.0656000	1				
	132	1	1	0.1499000	0.1057000	1				
	133	1	1	0.2510000	0.1610000	1				
	134	1	1	0.3003000	0.1882000	1				
	135	1	1	0.1460000	0.0780000	1				
	141	1	1	0.1800000	0.1000000	1				
	142	1	1	0.1430000	0.0960000	1				
	143	1	1	0.1538000	0.1032000	1				
	1111	1	1	0.1940000	0.0930000	1				
	1112	1	1	0.2500000	0.1080000	1				
	1114	1	1	0.1898000	0.0710000	1				
	1121	1	1	0.2160000	0.0620000	1				
	1122	1	1	0.1250000	0.0500000	1				
	1123	1	1	0.1558000	0.1050000	1				
	1124	1	1	0.1258000	0.0755000	1				
	1125	1	1	0.1431000	0.0878000	1				
	1126	1	1	0.2280000	0.0910000	1				
	1131	1	1	0.1087000	0.0656000	1				
	1132	1	1	0.1499000	0.1057000	1				
	1133	1	1	0.2510000	0.1610000	1				
	1134	1	1	0.3003000	0.1882000	1				
	1135	1	1	0.1460000	0.0780000	1				
	1141	1	1	0.1800000	0.1000000	1				
	1142	1	1	0.1430000	0.0960000	1				
	1143	1	1	0.1538000	0.1032000	1				
FIM										
DEQP										
%	De	Para	Cir	Est	Resist	Reat	Suscep	Lig		
	110	0	1	1	0.0	0.0	0.21529999375343323	1		
	111	0	1	1	0.0	0.0	0.13269999623298645	1		
	113	0	1	1	0.0	0.0	0.14699999988079071	1		
	122	0	1	1	0.0	0.0	0.16410000622272491	1		
	131	0	1	1	0.0	0.0	0.15240000188350677	1		
	142	0	1	1	0.0	0.0	0.14900000393390656	1		
	143	0	1	1	0.0	0.0	0.13269999623298645	1		
	1110	0	1	1	0.0	0.0	0.21529999375343323	1		
	1111	0	1	1	0.0	0.0	0.13269999623298645	1		

1113	0	1	1	0.0	0.0	0.14699999988079071	1
1122	0	1	1	0.0	0.0	0.16410000622272491	1
1131	0	1	1	0.0	0.0	0.15240000188350677	1
1142	0	1	1	0.0	0.0	0.14900000393390656	1
1143	0	1	1	0.0	0.0	0.13269999623298645	1
FIM							