

Universidade Federal de Juiz de Fora  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica  
Mestrado em Engenharia Elétrica

Thiago Resende de Almeida

REPRESENTAÇÃO DA VARIAÇÃO DA FREQUÊNCIA EM ESTUDOS DE  
SEGURANÇA DE TENSÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

Juiz de Fora

2013

Thiago Resende de Almeida

**Representação da Variação da Frequência em  
Estudos de Segurança de Tensão de Sistemas Elétricos de Potência**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, área de Sistemas de Energia, da Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. João Alberto Passos Filho, D.Sc.

Juiz de Fora

2013

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de geração automática da Biblioteca Universitária da UFJF, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Almeida, Thiago Resende de.  
Representação da Variação da Frequência em Estudos de Segurança de Tensão de Sistemas Elétricos de Potência / Thiago Resende de Almeida. -- 2013.  
163 f.

Orientador: João Alberto Passos Filho  
Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2013.

1. Sistemas elétricos de potência. 2. Regulação primária de frequência. 3. Segurança de tensão. I. Passos Filho, João Alberto, oriente. II. Título.

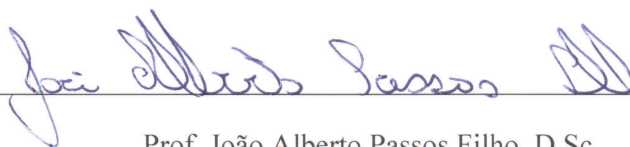
Thiago Resende de Almeida

**Representação da Variação da Frequência em  
Estudos de Segurança de Tensão de Sistemas Elétricos de Potência**

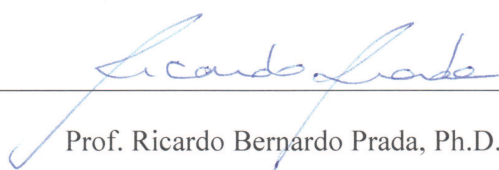
Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Área de Sistemas de Energia, da Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 30 de outubro de 2013.

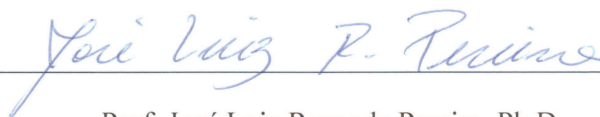
BANCA EXAMINADORA



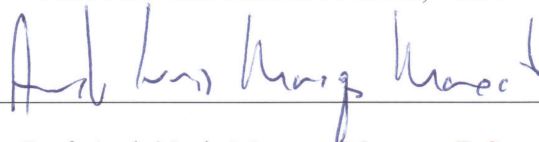
Prof. João Alberto Passos Filho, D.Sc.



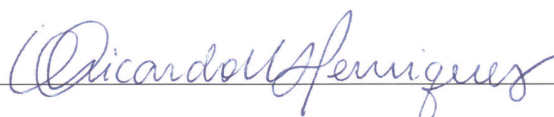
Prof. Ricardo Bernardo Prada, Ph.D.



Prof. José Luiz Rezende Pereira, Ph.D.



Prof. André Luis Marques Marcato, D.Sc.



Prof. Ricardo Mota Henriques, D.Sc.

*Dedico esse trabalho a toda minha  
família e à minha namorada Larissa.*

## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar agradeço a Deus, que nos momentos mais difíceis que tive sempre esteve ao meu lado com seu apoio.

Ao professor João Alberto Passos Filho por sua valiosa contribuição neste trabalho, pelos ensinamentos, dedicação, motivação e principalmente pela paciência e tempo dedicados a este trabalho.

Agradeço a aluna de doutorado e colega Paula Oliveira La Gatta, que acompanhou todo meu trabalho fornecendo importantes sugestões e por sua contribuição direta em grande parte dos resultados desta dissertação.

Aos professores Ricardo Henriques, José Luiz, Ricardo Prada e André Marcato pelas discussões técnicas e por ter participado da banca.

Agradeço ao Francisco (Chicão), companheiro de mestrado e república, pela amizade desde a época de graduação, motivação e discussões técnicas.

Aos companheiros do curso de mestrado, Felipe Duque e Heverton Reis, pelo companheirismo, ajuda em várias situações e pelos momentos de descontração.

Ao LABSPOT (Laboratório de Sistemas de Potência da Faculdade de Engenharia Elétrica) pelo suporte técnico.

À CAPES pelo suporte financeiro e o PPEE pela estrutura.

À toda minha família, em especial ao meu avô que não está mais comigo hoje. À minha mãe e minha avó que sempre confiaram em mim e que me fizeram ser a pessoa que sou hoje.

À minha namorada Larissa, pelo seu companheirismo, união, amor e por ser uma pessoa em que eu possa contar para tudo.

À todos meus amigos de graduação, aos meus amigos de Patrocínio e a todas pessoas que contribuíram de uma certa forma para a realização deste trabalho.

## RESUMO

O principal objetivo deste trabalho é avaliar a influência da variação dos parâmetros da rede elétrica em função da frequência do sistema em estudos relacionados à avaliação da segurança de tensão de Sistemas Elétricos de Potência (SEP). Neste sentido, é proposta uma alteração na formulação denominada Fluxo de Potência com Regulação Primária. Tal formulação representa uma modelagem alternativa do problema de Fluxo de Potência, onde a frequência do sistema pode ser estimada com precisão satisfatória. É importante destacar que a metodologia proposta neste trabalho mantém a formulação *full* Newton do problema.

A partir deste contexto são consideradas as variações dos parâmetros da rede, tais como *shunts* de barra, *shunts* de linha e o modelo de Linhas de Transmissão e Transformadores, tornando estes parâmetros dependentes com os desvios de frequência do sistema. É também realizada uma avaliação das cargas tipo motor de indução. Assim como os parâmetros da rede, os parâmetros do motor de indução são modificados de acordo com os desvios de frequência do sistema.

Em seguida são desenvolvidos estudos de avaliação da segurança de tensão a partir do desenvolvimento e implementação de um Fluxo de Potência Continuado modificado e de uma formulação alternativa do problema de Fluxo de Potência Ótimo (FPO). A partir dessas ferramentas é possível avaliar a variação da frequência do sistema em função do aumento do seu carregamento. Também são feitas análises a partir dos autovalores da matriz Jacobiana do método proposto.

Finalmente são utilizados cinco sistemas de pequeno e médio portes para a validação da metodologia proposta. Além de dois sistemas tutoriais de pequeno porte, é utilizado o sistema 16 Barras, que é um sistema criado a partir de dados reais e condições operativas encontradas no Sistema Interligado Nacional (SIN), os sistemas *New England* e IEEE-118 Barras, que são sistemas testes normalmente utilizados na literatura. O programa ANATEM, desenvolvido pelo CEPTEL, é utilizado de forma a validar os desenvolvimentos realizados neste trabalho.

**Palavras-chave:** regulação primária, Fluxo de Potência, Fluxo de Potência Ótimo, Fluxo de Potência Continuado, motor de indução, segurança de tensão.

## ABSTRACT

The main objective of this work is to evaluate the influence of varying the network parameters depending on the system frequency in studies related to the voltage security assessment of Electric Power Systems. In this sense, it is proposed a modification in the formulation of the called Governor Power Flow. Such formulation represents an alternative modeling of the power flow problem, where the system frequency can be estimated with satisfactory accuracy. It is important to highlight that in this work the proposed methodology retains full Newton formulation of the problem.

From this context it is considered variations of the network parameters, such as shunt devices (capacitors and reactors) and equivalent models of transmission lines and transformers, making them dependent parameters with frequency system. It is also studied the induction motor modeling. As the network parameters, the parameters of the induction motor are modified according to the deviation of system frequency.

Then voltage security assessment studies are carried out through the development and implementation of a Modified Continuation Power Flow and an Optimal Power Flow. Using these tools it is possible to evaluate the system frequency variation due to the increase of the system loading. Analyzes are also made using the eigenvalues of the Jacobian matrix associated with the proposed methodology.

Finally six systems of small and medium scale are used in validation process of the proposed methodology. In addition to two tutorials small systems are used a 16 buses test system, which is created from real data and operating conditions found in the Interconnected Brazilian System, the well know New England system and the IEEE-118 buses test systems, which are systems commonly used in the literature. The ANATEM program, developed by CEPEL, is used to validate the developments made in this work.

**Keyword:** governor model, power flow, optimal power flow, continuation power flow, induction motors, voltage security assessment.



# SUMÁRIO

<b>RESUMO.....</b>	<b>7</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>8</b>
<b>SUMÁRIO.....</b>	<b>9</b>
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>12</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>17</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS .....</b>	<b>20</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS .....</b>	<b>24</b>
<b>CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 Considerações Iniciais .....	1
1.2 Objetivos e Motivação.....	4
1.3 Publicações Decorrentes do Trabalho .....	5
1.4 Revisão Bibliográfica .....	5
1.5 Estrutura do Trabalho .....	9
<b>CAPÍTULO II - FLUXO DE POTÊNCIA COM REGULAÇÃO PRIMÁRIA .....</b>	<b>11</b>
2.1 Considerações Iniciais .....	11
2.2 Regulação Primária de Frequência.....	11
2.3 Fluxo de Potência com Regulação Primária.....	16
2.4 Sumário do Capítulo.....	20
<b>CAPÍTULO III - METODOLOGIA PROPOSTA.....</b>	<b>21</b>
3.1 Considerações Iniciais .....	21
3.2 Linhas de transmissão .....	21
3.3 <i>Shunt</i> de Barra .....	23

3.4	<i>Shunt</i> de Linha.....	25
3.5	Influência da frequência na compensação <i>shunt</i> .....	26
3.6	Exemplo Ilustrativo I.....	28
3.7	Exemplo Ilustrativo II .....	30
3.8	Equações Básicas do Motor de Indução com Rotor Bobinado .....	36
3.9	Modelo de Regime Permanente que Considera os Transitórios no Rotor e os Desvios de Frequência .....	38
3.10	Modelagem do Motor de Indução com Desvios de Frequência no Fluxo de Potência com Regulação Primária .....	47
3.11	Exemplo Ilustrativo III.....	49
3.12	Sumário do Capítulo.....	51
<b>CAPÍTULO IV - ANÁLISE DA SEGURANÇA DE TENSÃO .....</b>		<b>52</b>
4.1	Considerações Iniciais.....	52
4.2	Fluxo de Potência Ótimo.....	53
4.3	Avaliação da Segurança de Tensão .....	55
4.4	Método da Continuação.....	57
4.5	Análise Modal .....	60
4.6	Exemplo Ilustrativo .....	63
4.7	Sumário do Capítulo.....	64
<b>CAPÍTULO V - RESULTADOS.....</b>		<b>65</b>
5.1	Considerações Gerais .....	65
5.2	Sistema Teste 1.....	66
5.2.1	Primeira Avaliação .....	66
5.2.2	Segunda Avaliação .....	72
5.3	Sistema Teste 2.....	75
5.3.1	Primeira Avaliação .....	76

5.3.2	Segunda Avaliação .....	79
5.3.3	Terceira Avaliação .....	81
5.3.4	Quarta Avaliação.....	85
5.4	Sistema Teste 3.....	88
5.4.1	Primeira Avaliação .....	90
5.4.2	Segunda Avaliação .....	93
5.5	Sistema Teste 4.....	97
5.5.1	Primeira Avaliação .....	98
5.5.2	Segunda Avaliação .....	101
5.6	Sistema Teste 5.....	105
<b>CAPÍTULO VI - CONCLUSÕES.....</b>		<b>115</b>
6.1	Considerações Gerais .....	115
6.2	Sugestões para Trabalhos Futuros .....	117
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>		<b>118</b>
<b>APÊNDICE A - EQUAÇÃO BÁSICA DO MOTOR DE INDUÇÃO COM DESVIOS DE FREQUÊNCIA .....</b>		<b>123</b>
A.1	Considerações Iniciais.....	123
A.2	Equação do Motor de Indução.....	124
<b>APÊNDICE B - DADOS DOS SISTEMAS.....</b>		<b>127</b>
B.1	Considerações Gerais .....	127
B.2	Sistema Tutorial 2 Barras .....	127
B.3	Sistema 6 Barras .....	128
B.4	Sistema 16 Barras .....	129
B.5	Sistema <i>New England</i> .....	131
B.6	Sistema IEEE 118 Barras .....	133

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Curva da variação da carga com a frequência .....	12
Figura 2 - Diagrama de blocos do regulador com queda de velocidade.....	13
Figura 3 - Característica estática do regulador de velocidade .....	15
Figura 4 - Modelo equivalente $\pi$ da linha de transmissão .....	22
Figura 5 - Representação do shunt de barra .....	24
Figura 6 - Representação do shunt de linha.....	26
Figura 7 - Compensação reativa em três dimensões.....	27
Figura 8 - Curva Q x V .....	27
Figura 9 - Curva Q x F .....	27
Figura 10 - Sistema de 2 Barras com linha de 500 kV .....	28
Figura 11 - Perfil de tensão e frequência para estatismo 1 % .....	29
Figura 12 - Perfil de tensão e frequência para estatismo 2 % .....	29
Figura 13 - Perfil de tensão e frequência para estatismo 5 % .....	29
Figura 14 - Perfil de tensão e frequência para estatismo 10 % .....	30
Figura 15 - Sistema exemplo de 6 Barras.....	30
Figura 16 - Eixo d-q como referência do motor de indução com desvio de frequência.....	42
Figura 17 - Circuito equivalente transitório do motor de indução com desvio de frequência .	43

Figura 18 - Circuito equivalente do motor de indução com desvio de frequência em regime permanente.....	45
Figura 19 - Circuito equivalente do motor de indução com desvios de frequência para o FPRP .....	46
Figura 20 - Sistema 2 Barras .....	49
Figura 21 - Sistema 2 Barras com inserção do motor de indução .....	49
Figura 22 - Sistema 2 Barras com adição do modelo interno do motor de indução.....	50
Figura 23 - Curva PxV típica.....	56
Figura 24 - Diversos tipos de cargas e seus componentes.....	57
Figura 25 - Etapa de previsão e correção do FPC .....	59
Figura 26 - Circuito equivalente do sistema radial carga versus gerador.....	66
Figura 27 - Tensão na barra 2 versus aumento de carregamento do sistema .....	69
Figura 28 - Frequência do sistema versus aumento de carregamento do sistema .....	69
Figura 29 - Reatância da rede versus aumento de carregamento do sistema .....	70
Figura 30 - Comparação da tensão na barra 2 entre o FPC e o modelo proposto .....	71
Figura 31 – Menor autovalor da matriz Jacobiana reduzida (sistema teste 1) .....	71
Figura 32 - Comparação das curvas PxV na barra 2 (sistema teste 1 + motor tipo 4) .....	73
Figura 33 - Comparação das potência reativas no motor tipo 4 .....	73
Figura 34 - Frequência do sistema versus aumento de carregamento (sistema teste 1 + motor tipo 4).....	74
Figura 35 - Reatância série equivalente do motor versus aumento de carregamento.....	74

Figura 36 - Reatância shunt equivalente do motor vs aumento de carregamento .....	75
Figura 37 - Topologia do sistema teste de 6 Barras .....	76
Figura 38 - Evolução da frequência no programa ANATEM (sistema teste 2 sem perdas) ....	78
Figura 39 - Sistema teste 6 Barras considerando as perdas elétricas.....	79
Figura 40 - Evolução da frequência no programa ANATEM (sistema teste 2 com perdas)....	80
Figura 41 - Tensão nas barras 4 e 5 versus aumento do carregamento (sistema teste 2) .....	82
Figura 42 - Frequência do sistema versus aumento do carregamento (sistema teste 2).....	82
Figura 43 - Geração ativa versus aumento do carregamento (sistema teste 2).....	83
Figura 44 - Geração reativa versus aumento do carregamento (sistema teste 2) .....	84
Figura 45 - Menor autovalor da matriz Jacobiana reduzida (sistema teste 2) .....	84
Figura 46 - Topologia do sistema 6 Barras + motor de indução .....	86
Figura 47 - Evolução da tensão nas barras 4 e 5 ( sistema teste 2 + motor de indução) .....	86
Figura 48 - Evolução da frequência (sistema teste 2 + motor de indução) .....	87
Figura 49 - Evolução da geração de potência ativa (sistema teste 2 + motor de indução).....	87
Figura 50 - Evolução da geração de potência reativa (sistema teste 2 + motor de indução)....	88
Figura 51 - Topologia do sistema teste de 16 barras .....	89
Figura 52 - Evolução da frequência no programa ANATEM com freq ligado (sistema teste 3) .....	91
Figura 53 - Evolução da frequência no programa ANATEM com freq desligado (sistema teste 3).....	92

Figura 54 - Geração ativa versus aumento no carregamento (sistema teste 3).....	93
Figura 55 - Frequência do sistema versus aumento no carregamento (sistema teste 3).....	94
Figura 56 - Tensão nas barras 4 e 14 versus aumento no carregamento (sistema teste 3) .....	94
Figura 57 - Geração reativa versus aumento no carregamento (sistema teste 3) .....	95
Figura 58 - Menor autovalor da matriz Jacobiana reduzida (sistema teste 3) .....	96
Figura 59 - Topologia do sistema New England (quarto sistema teste).....	97
Figura 60 - Evolução da frequência do gerador conectado na barra 30 (sistema teste 4) .....	99
Figura 61 - Tensão na barra 8 versus aumento no carregamento (sistema teste 4).....	101
Figura 62 - Tensão na barra 29 versus aumento no carregamento (sistema teste 4) .....	102
Figura 63 - Frequência do sistema versus aumento no carregamento (sistema teste 4).....	102
Figura 64 - Perfil da geração ativa (sistema teste 4).....	103
Figura 65 - Perfil da geração reativa (sistema teste 4) .....	103
Figura 66 - Menor autovalor da matriz Jacobiana reduzida (sistema teste 4) .....	105
Figura 67 - Topologia do sistema IEEE 118 Barras.....	106
Figura 68 - Comparação da tensão na barra 44 (sistema teste 5) .....	108
Figura 69 - Comparação da tensão na barra 48 (sistema teste 5) .....	108
Figura 70 - Evolução da frequência do sistema (sistema teste 5).....	109
Figura 71 - Geração de potência ativa da barra 69 (sistema teste 5).....	109
Figura 72 - Geração de potência reativa da barra 69 (sistema teste 5).....	110

Figura 73 - Geração de potência ativa da barra 89 (sistema teste 5).....	110
Figura 74 - Geração de potência reativa da barra 89 (sistema teste 5).....	111
Figura 75 - Menor autovalor da matriz Jacobiana reduzida (sistema teste 5).....	114
Figura 76 - Circuito equivalente do motor de indução para o FPRP.....	123



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Ponto de conexão em tensão nominal igual ou superior a 69 kV e inferior a 230 kV .....	8
Tabela 2 - Ponto de conexão em tensão nominal igual ou superior a 230 kV.....	8
Tabela 3 - Solução do problema para o máximo carregamento do sistema .....	68
Tabela 4 - Comparação entre o modelo proposto e o fluxo convencional para o carregamento de 250 MW .....	70
Tabela 5 - Motores de indução típicos.....	72
Tabela 6 - Parâmetros do motores de indução típicos .....	72
Tabela 7 - Dados de estatismo e base de potência.....	75
Tabela 8 - Comparação entre o FPRP e o MP para o sistema 6 Barras sem perdas.....	76
Tabela 9 - Comparação entre o modelo proposto e o programa ANATEM (sistema teste 2 sem perdas) .....	78
Tabela 10 - Comparação entre o FPRP e o programa ANATEM (sistema teste 2 sem perdas) .....	79
Tabela 11 - Comparação entre o FPRP e o MP para o sistema 6 Barras com perdas .....	80
Tabela 12 - Solução do sistema teste 2 com perdas utilizando o programa ANATEM.....	81
Tabela 13 - Número de iterações para solução em um determinado carregamento .....	83
Tabela 14 - Comparação entre o FPO e o modelo proposto (sistema teste 2).....	85
Tabela 15 - Solução do FPRP (sistema teste 3).....	89

Tabela 16 - Dados de estatismo e base de potência do sistema teste 3 .....	90
Tabela 17 - Comparação da solução do sistema teste 3 entre o ANATEM e o modelo proposto .....	90
Tabela 18 - Comparação da solução do sistema teste 3 entre o ANATEM e o FPRP .....	92
Tabela 19 - Número de iterações para solução em diversos carregamentos – Sistema 16 Barras .....	95
Tabela 20 - Comparação entre o FPO e o modelo proposto (sistema teste 3).....	96
Tabela 21 - Dados de estatismo e base de potência do sistema teste 4 .....	97
Tabela 22 - Comparação da solução do sistema teste 4 entre o Anatem e o fluxo proposto....	98
Tabela 23 - Comparação da solução do sistema teste 4 entre o FPRP e o fluxo proposto.....	100
Tabela 24 - Comparação entre o FPO e o modelo proposto (sistema teste 4).....	104
Tabela 25 - Dados de estatismo e base de potência do sistema teste 5 .....	106
Tabela 26 - Fatores de participação de cada unidade geradora do sistema teste 5.....	107
Tabela 27 - Solução do máximo carregamento do sistema (sistema teste 5) .....	112
Tabela 28 - Dados de barra - Sistema 2 Barras .....	127
Tabela 29 - Dados de linha - Sistema 2 Barras.....	127
Tabela 30 - Dados de Potência - Sistema 2 Barras.....	127
Tabela 31 - Modelo e dados dos geradores - Sistema 2 Barras.....	128
Tabela 32 - Dados de barra - Sistema 6 Barras .....	128
Tabela 33 - Dados de linha - Sistema 6 Barras.....	128

Tabela 34 - Dados de Potência - Sistema 6 Barras.....	128
Tabela 35 - Modelo e dados dos geradores - Sistema 6 Barras.....	129
Tabela 36 - Dados de barra - Sistema 16 Barras .....	129
Tabela 37 - Dados de linha - Sistema 16 Barras.....	129
Tabela 38 - Dados de Potência - Sistema 16 Barras.....	130
Tabela 39 - Modelo e dados dos geradores - Sistema 16 barras.....	130
Tabela 40 - Parâmetros do Regulador de Tensão - Sistema 16 barras .....	130
Tabela 41 - Parâmetros do Regulador de Velocidade - Sistema 16 barras.....	130
Tabela 42 - Dados de barra - Sistema New England.....	131
Tabela 43 - Dados de linha - Sistema New England .....	132
Tabela 44 - Dados de Potência - Sistema New England .....	133
Tabela 45 - Modelo e dados dos geradores - Sistema New England .....	133
Tabela 46 - Dados de barra - Sistema IEEE 118 Barras.....	133
Tabela 47 - Dados de linha - Sistema IEEE 118 Barras .....	136

## LISTA DE SÍMBOLOS

- $B$ : Matriz admitância
- $B'$ : Derivada da matriz admitância em relação a frequência do sistema
- $B^f$ : Matriz admitância modificada devido aos desvios de frequência do sistema
- $b_{km}^{sh}$ : Susceptância *shunt* da linha de transmissão
- $b_{sh\_b}$ : *Shunt* de barra
- $b_{sh\_l}$ : *Shunt* de linha
- $G$ : Matriz condutância
- $G'$ : Derivada da matriz condutância em relação a frequência do sistema
- $G^f$ : Matriz condutância modificada devido aos desvios de frequência do sistema
- $\bar{E}'$ : Tensão atrás da impedância transitória da máquina de indução
- $E'_d$ : Tensão transitória de eixo direto do motor de indução (valor eficaz)
- $E'_q$ : Tensão transitória de eixo de quadratura do motor de indução (valor eficaz)
- $e'_d$ : Tensão transitória de eixo direto do motor de indução
- $e'_q$ : Tensão transitória de eixo em quadratura do motor de indução
- $h$ : Contador do número de iterações do método de Newton-Raphson
- $\bar{I}_s$ : Corrente complexa do estator com os eixos d-q na referência angular
- $I_{ds}$ : Componente da corrente do estator referido ao eixo d (valor eficaz)
- $I_{qs}$ : Componente da corrente do estator referido ao eixo q (valor eficaz)
- $\hat{I}_s$ : Corrente complexa do estator referida ao eixo d-q (valor eficaz)
- $i_{dr}$ : Componente da corrente instantânea do rotor referido ao eixo d
- $i_{ds}$ : Componente da corrente instantânea do estator referido ao eixo d
- $i_{qr}$ : Componente da corrente instantânea do rotor referido ao eixo q
- $i_{qs}$ : Componente da corrente instantânea do estator referido ao eixo q

- $L_m$ : Indutância mútua entre o estator e o rotor
- $L_r$ : Indutância de dispersão do rotor
- $L_{rr}$ : Indutância própria do rotor
- $L_s$ : Indutância de dispersão do estator
- $L_{ss}$ : Indutância própria do estator
- $L'_{ss}$ : Indutância transitória do motor de indução
- $nb$ : Número de barras do sistema
- $ng$ : Número de geradores do sistema
- $J$ : Matriz Jacobiana
- $J_R^Q$ : Matriz Jacobiana reduzida
- $P^{bm}$ : Base de potência aparente da máquina
- $P^{bs}$ : Base de potência aparente do sistema
- $P_{el}$ : Potência elétrica do motor de indução
- $P_{mec}$ : Potência mecânica do motor de indução
- $P_r$ : Potência nominal do gerador
- $R$ : Estatismo da máquina síncrona
- $R_L$ : Resistência série do circuito equivalente do sistema teste 1
- $r_{km}$ : Reatância série do ramo k-m
- $s$ : Escorregamento do rotor
- $T_0'$ : Constante de tempo transitória de circuito aberto do motor de indução
- $V_k$ : Magnitude de tensão nodal da barra  $k$
- $V_k^{esp}$ : Magnitude especificada da tensão nodal da barra  $k$
- $\bar{V}_s$ : Tensão complexa do estator com o eixo d-q na referência angular
- $V_{ds}$ : Componente da tensão do estator referida ao eixo d (valor eficaz)

- $V_{qs}$ : Componente da tensão do estator referida ao eixo q (valor eficaz)
- $\hat{V}_s$ : Tensão complexa do estator referida ao eixo d-q (valor eficaz)
- $v_{dr}$ : Componente da tensão instantânea do rotor referida ao eixo d
- $v_{ds}$ : Componente da tensão instantânea do estator referida ao eixo d
- $v_{qr}$ : Componente da tensão instantânea do rotor referida ao eixo q
- $v_{qs}$ : Componente da tensão instantânea do estator referida ao eixo q
- $w_s$ : Velocidade angular do estator
- $w_s^f$ : Velocidade angular do estator considerando os desvios de frequência
- $X$ : Reatância de circuito aberto do rotor do motor de indução
- $X_L$ : Reatância série do circuito equivalente do sistema teste 1
- $x_{km}$ : Reatância série do ramo k-m
- $X_m$ : Reatância mútua entre o estator e o rotor
- $X_r$ : Reatância de dispersão do rotor
- $X_s$ : Reatância de dispersão do estator
- $X_s'$ : Reatância transitória do motor de indução
- $X_s^f$ : Reatância transitória do motor de indução considerando os desvios de frequência
- $\lambda$ : Autovalores da matriz Jacobiana
- $\lambda_{dr}$ : Componente do fluxo enlaçado pelo rotor referido ao eixo d
- $\lambda_{ds}$ : Componente do fluxo enlaçado pelo estator referido ao eixo d
- $\lambda_{qr}$ : Componente do fluxo enlaçado pelo rotor referido ao eixo q
- $\lambda_{qs}$ : Componente do fluxo enlaçado pelo estator referido ao eixo q
- $\lambda_{dr}'$ : Componente transitória do fluxo enlaçado pelo rotor referido ao eixo d
- $\lambda_{qr}'$ : Componente transitória do fluxo enlaçado pelo rotor referido ao eixo q
- $\gamma$ : Parâmetro da continuação
- $\Delta A$ : Variação da abertura de admissão da turbina

$\Delta F$  : Variação da frequência

$\Delta P$  : Vetor de erros de injeção de potência ativa

$\Delta Q$  : Vetor de erros de injeção de potência reativa

$\Delta V$  : Vetor de variações das tensões (módulo)

$\Delta \theta$  : Vetor de variações dos ângulos das tensões

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ANATEM: Programa de Análise de Transitórios Eletromecânicos
- ANAREDE: Programa de Análise de Redes
- ANEEL: Agência Nacional de Energia Elétrica
- CDU: Controladores definidos pelo usuário
- CEPEL: Centro de Pesquisa de Energia Elétrica
- DAS: *Distribution Automation System*
- DFIG: *Doubly-fed induction generator*
- DMAX: Número máximo de vezes consecutivas que FDIV pode ser aplicado
- EPE: Empresa de Pesquisa Energética
- FDIV: Fator de redução do incremento automático de carga
- FPC: Fluxo de Potência Continuado
- FPRP: Fluxo de Potência com Regulação Primária
- FPO: Fluxo de Potência Ótimo
- GD: Geração Distribuída
- ICMN: Valor mínimo do incremento automático de carga
- LT: Modelo de linhas de transmissão e transformadores
- M.P.: Modelo Proposto
- ONS: Operador Nacional do Sistema Elétrico
- PCHs: Pequenas Centrais Hidroelétricas
- RQV: Regulador com queda de velocidade
- SEP: Sistemas Elétricos de Potência
- SIN: Sistema Interligado Nacional



---

# Capítulo I - Introdução

## 1.1 Considerações Iniciais

O setor elétrico mundial está passando por uma grande reavaliação em seus fundamentos. Isso pode ser observado pelo grande número de artigos em periódicos e congressos que tratam de temas de grande relevância para os dias atuais. Como exemplos de temas que têm sido habitualmente abordados nestes fóruns podem-se citar: *Smart Grids*, Fontes Alternativas de Energia, Geração Distribuída (GD), entre outros.

Muitos destes conceitos trazem, de uma forma geral, novas perspectivas para o setor elétrico (geração, transmissão e distribuição). A inclusão de Fontes Alternativas de Energia, por exemplo, pode ter impacto considerável nas rotinas de planejamento e operação do sistema, uma vez que sua característica intermitente tem impacto tanto em questões relacionadas a assuntos energéticos quanto elétricos. A GD pode quebrar paradigmas antes adotados como, por exemplo, o tratamento de Fluxo de Potência bidirecional na conexão entre as redes de distribuição e subtransmissão. Já o conceito de *Smart Grids* envolve também questões fundamentais, como por exemplo, o gerenciamento da demanda. De uma forma geral, o que pode ser observado em todos estes conceitos é que existe uma tendência crescente de utilização mais intensa das Redes Elétricas atuais, trazendo novos desafios para planejadores e operadores.

Pequenos sistemas isolados existem há muitas décadas para o atendimento da demanda de energia elétrica em pequenas comunidades remotas. Nestes casos, a interligação com o sistema principal pode não ser viável tecnicamente ou devido a razões econômicas. A utilização de combustíveis fósseis na geração de energia elétrica tem sido a escolha mais comum para este tipo de abastecimento. No entanto, com o advento de novas tecnologias de geração de energia elétrica viáveis, tanto do ponto de vista técnico quanto econômico, além de um ambiente pautado pela busca de fontes renováveis de energia, faz com que as fontes alternativas como, por exemplo, a Energia Solar, Eólica e Pequenas Centrais Hidroelétricas

---

(PCHs) tornem o planejamento e a operação de *Microgrids* em um tema bastante fértil de pesquisas [1].

*Microgrids* são normalmente identificados como um dos componentes chave para o desenvolvimento do conceito de *Smart Grids*, que entre outros objetivos, se caracteriza pela busca do aprimoramento dos índices de confiabilidade e qualidade do fornecimento de energia elétrica, aumentando a eficiência dos sistemas de energia de uma forma geral. Uma característica também importante dos *Microgrids*, normalmente associada ao conceito de *Smart Grids*, é a sua capacidade de “acomodar uma grande variedade de fontes e demandas: capacidade de integrar de forma transparente (*plug and play*) uma variedade de fontes de energia de várias dimensões e tecnologias”, conforme descrito em [2].

Embora uma definição detalhada a respeito de *Microgrids* ainda seja foco de discussão em fóruns técnicos especializados, este tipo de rede pode ser genericamente descrito como; “um grupo de cargas interconectadas com a presença de fontes de geração distribuída e topologia claramente definida, que pode atuar como uma entidade controlável em relação ao sistema interligado. Tal rede pode operar de forma conectada ou isolada (ilhada) do sistema principal” [3].

A operação ilhada de um sistema exige requisitos técnicos adicionais quando comparada a um sistema interligado, como por exemplo, um aumento na complexidade dos sistemas de proteção, avaliação quanto ao desvio de tensão, frequência e também da capacidade de regulação das unidades geradoras. Estas dificuldades são normalmente atribuídas na literatura à quebra de alguns paradigmas, como por exemplo, a possibilidade de inversão de Fluxo de Potência na rede e a inclusão de geração com característica intermitente, com considerável variabilidade e baixa inércia.

Além disso, outro aspecto de grande relevância que merece destaque é o contínuo crescimento da demanda de energia elétrica e a necessidade de obtenção de índices de qualidade e confiabilidade compatíveis com as necessidades da sociedade em geral. O atendimento do mercado futuro é sempre um tema de grande relevância em se tratando de sistemas elétricos, devido principalmente aos custos e tempos envolvidos na construção de novas fontes de geração e dos sistemas de transmissão associados.

---

A partir deste contexto, pode-se afirmar que o desenvolvimento e/ou aperfeiçoamento de ferramentas computacionais (incluindo modelos e técnicas de solução) que permitam ou facilitem a avaliação de sistemas de potência contendo a presença de GD e a possibilidade de operação ilhada, formando *Microgrids*, de forma planejada ou durante a ocorrência de contingências (emergências) é um tema de pesquisa de grande relevância para os sistemas atuais.

A análise de Fluxo de Potência é a ferramenta mais frequentemente utilizada nos vários estudos feitos atualmente em SEP. Em sua formulação clássica qualquer desbalanço entre a carga, perdas elétricas e geração são absorvidas pela barra de referência angular [4]. Em alguns programas comerciais existem funcionalidades específicas para distribuição automática deste desbalanço entre um conjunto de geradores, de acordo com um fator de participação predefinido [5]. Nos casos mencionados anteriormente é pressuposto que o sistema esteja operando com frequência no seu valor nominal, o que na prática nem sempre acontece.

Em [6] é proposta uma metodologia para representação da regulação primária de geradores no problema de Fluxo de Potência. As equações que modelam o comportamento da regulação primária de frequência são incluídas no problema. Contudo, apesar de se obter o valor da frequência no final do processo iterativo, não foi considerada a variação dos parâmetros da rede com a frequência. Parâmetros como as reatâncias das linhas de transmissão, *shunts* de barra, *shunts* de linha e susceptâncias *shunt* devido ao modelo equivalente  $\pi$  das linhas de transmissão variam com a frequência da rede. Portanto, qualquer tipo de alteração na frequência dos geradores será repercutido nesses parâmetros. A mesma ideia é utilizada para carga modelada através de motores de indução, onde a variação da frequência do sistema irá alterar o valor das reatâncias destes motores, podendo influenciar seu comportamento.

Grande parte da energia consumida no sistema está relacionada com carga tipo motor de indução e a não representação desse tipo de carga nos programas de Fluxo de Potência e Fluxo de Potência Continuado (FPC) pode gerar erros bastante significativos, principalmente em barras cuja potência reativa esteja operando no seu limite ou quando o sistema encontra-se no limiar de carregamento. Nestas situações há um aumento expressivo do consumo de potência reativa nos motores quando o valor da tensão sofre alterações significativas em sua

---

barra terminal. Por isso, é de extrema importância a representação adequada deste tipo de carga [7] [8].

O acompanhamento do perfil da tensão quando o carregamento do sistema é aumentando é uma das técnicas mais utilizadas na análise estática da estabilidade de tensão. Isto pode ser feito através do FPC, onde utiliza-se um esquema de previsão e correção na obtenção das características de tensão *versus* potência das barras (carregamento do sistema) e a correspondente margem de carregamento do sistema [9] [10]. No limiar de carregamento, a matriz Jacobiana torna-se singular quando a carga é modelada como potência constante. Sendo assim, não é possível obter uma solução para o Fluxo de Potência e pontos na vizinhança possuem dificuldades de convergência. Com o FPC as dificuldades de convergência quando o sistema encontra-se próximo do ponto de máximo carregamento são minimizadas.

A partir de tudo o que foi exposto, pode-se verificar que o detalhamento na representação dos Sistemas Elétricos de Potência tem aumentado em função da necessidade de uma avaliação mais precisa, cujos níveis de carregamento vem se tornando cada vez mais elevados. Além disso, a presença cada vez mais significativa de Geração Distribuída nas redes de subtransmissão e distribuição traz novos requisitos para a análise do desempenho do sistema. Por exemplo, situações onde pode ocorrer a operação isolada destes geradores, atendendo a uma parte considerável da carga do sistema, têm se tornado mais frequente [11]. Neste sentido, observa-se que o desenvolvimento de modelos e ferramentas computacionais que permitam uma análise mais detalhada do sistema pode ser de grande relevância.

## **1.2 Objetivos e Motivação**

A principal motivação do desenvolvimento deste trabalho é o aperfeiçoamento de ferramentas já utilizadas para estudos de segurança de tensão. Avalia-se que os desenvolvimentos propostos possam ser relevantes em estudos onde parte da rede encontra-se em operação ilhada.

A partir deste contexto, este trabalho tem como objetivo principal avaliar a influência da representação da variação dos parâmetros da rede com a frequência do sistema em estudos de segurança de tensão. Neste sentido, na elaboração da metodologia proposta, utiliza-se uma

---

formulação alternativa do problema de Fluxo de Potência, onde as equações da regulação primária de velocidade de geradores síncronos são incluídas. As equações são resolvidas simultaneamente com as equações de potência, pelo método *full* Newton. Esta formulação é denominada de Fluxo de Potência com Regulação Primária (FPRP).

De uma forma mais específica, o que é proposto neste trabalho é a inclusão da variação dos parâmetros da rede no FPRP e o desenvolvimento de formulações alternativas dos problemas de Fluxo de Potência Continuado e Fluxo de Potência Ótimo (utilizando-se a função objetivo de máximo carregamento), onde são consideradas a representação da regulação primária de geradores síncronos e as variações dos parâmetros da rede com a frequência.

### 1.3 Publicações Decorrentes do Trabalho

Em decorrência da pesquisa realizada na elaboração desta dissertação, foi produzido o seguinte trabalho:

- ALMEIDA, T. R.; LA GATTA, P. O.; PASSOS FILHO, J. A.; HENRIQUES, R. M. **Fluxo de Potência Ótimo Para Estudos de Segurança de Tensão Considerando a Regulação Primária de Frequência de Geradores**. XLV SBPO – Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, Natal, Rio Grande do Norte, 2013.

### 1.4 Revisão Bibliográfica

Convencionalmente em estudos de Fluxo de Potência pressupõe-se que a frequência de operação e as características dos geradores do sistema são constantes. A formulação do Fluxo de Potência, incluindo as características dos geradores foi originalmente proposta em [12]. Neste trabalho foi utilizado o modelo ZIP (modelo polinomial), incluindo os desvios de frequência na modelagem da potência ativa e reativa, dadas por:

---


$$P_D(V, f) = P_{D0} \cdot (1 + K_p \cdot \Delta f) \left( p_p + p_c \cdot \left( \frac{V}{V_0} \right)^{n_1} + p_z \cdot \left( \frac{V}{V_0} \right)^2 \right) \quad (1.1)$$

$$Q_D(V, f) = Q_{D0} \cdot (1 + K_q \cdot \Delta f) \left( q_p + q_c \cdot \left( \frac{V}{V_0} \right)^{n_1} + q_z \cdot \left( \frac{V}{V_0} \right)^2 \right) \quad (1.2)$$

onde  $\Delta f$  são os desvios de frequência do sistema.

A equação (1.3) representa a característica estática do regulador de velocidade e  $P_G$  representa a geração da unidade que será modificada para atender a nova demanda em um cenário de desbalanço entre carga e geração.

$$P_G(V, f) = P_{G0} - \frac{P_r}{R} \cdot \Delta f \quad (1.3)$$

Em [13] foi proposta uma formulação alternativa do Fluxo de Potência, incluindo os efeitos dos dispositivos de controles, onde os geradores foram modelados utilizando as mesmas características propostas em [12].

Em [6] é proposta uma metodologia para representação da regulação primária de geradores no problema de Fluxo de Potência. As equações que modelam o comportamento dos geradores são incluídas na formulação do problema. Nesta metodologia não é utilizado o conceito de barras *swing*, onde a referência angular pode ser qualquer barra do sistema e o estatismo de cada gerador irá definir a repartição de geração em um cenário de aumento ou diminuição de carga.

No trabalho desenvolvido em [14] apresenta-se uma abordagem para a solução estática do problema de Fluxo de Potência em sistemas de energia, onde a regulação primária é utilizada na modelagem dos geradores. Neste trabalho também é omitido o conceito de barra *swing*, sendo que a geração necessária para suprir cargas e perdas é repartida entre os geradores do sistema.

Um algoritmo genérico do Fluxo de Potência trifásico formulado para *microgrids* em redes ilhadas foi proposto em [15]. A frequência do sistema é considerada como uma das variáveis do Fluxo de Potência. Desta forma, a matriz impedância que leva em consideração a

impedância da linha, a impedância mútua e a variação da frequência, pode ser representada por:

$$[Z_{ij}^{abcn}(w)] = \begin{bmatrix} Z_{ij}^{aa} & Z_{ij}^{ab} & Z_{ij}^{ac} & Z_{ij}^{an} \\ Z_{ij}^{ba} & Z_{ij}^{bb} & Z_{ij}^{bc} & Z_{ij}^{bn} \\ Z_{ij}^{ca} & Z_{ij}^{cb} & Z_{ij}^{cc} & Z_{ij}^{cn} \\ Z_{ij}^{na} & Z_{ij}^{nb} & Z_{ij}^{nc} & Z_{ij}^{nn} \end{bmatrix} \quad (1.4)$$

Onde  $w$  é a velocidade angular do sistema. Neste trabalho os desvios de frequência também são incorporados na modelagem de carga. As equações (1.5) e (1.6) representam as equações do modelo exponencial dependente dos desvios de frequência do sistema.

$$P_{Li} = P_{oi} \cdot |V_i^\alpha| \cdot (1 + K_{pf} \cdot \Delta w) \quad (1.5)$$

$$Q_{Li} = Q_{oi} \cdot |V_i^\beta| \cdot (1 + K_{qf} \cdot \Delta w) \quad (1.6)$$

O despacho de geração ativa e reativa é feito através das características estáticas dos geradores, através de (1.7) e (1.8).

$$m_{pi} = \frac{w_{\max} - w_{\min}}{P_{Gi \max}} \quad (1.7)$$

$$n_{qi} = \frac{|V_i|_{\max} - |V_i|_{\min}}{Q_{Gi \max}} \quad (1.8)$$

Onde  $m$  e  $n$  são os ganhos estáticos associados à potência ativa e reativa, respectivamente.

Segundo os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional da ANEEL (PRODIST) - Módulo 8, são estabelecidos os limites adequados, precários e críticos para os níveis de tensão em regime permanente. A Tabela 1 mostra os limites de conexão de tensão nominal igual ou superior a 69 kV e inferior a 230 kV. A Tabela 2 mostra os limites de conexão em tensão nominal igual ou superior a 230 kV [16].

Tabela 1 - Ponto de conexão em tensão nominal igual ou superior a 69 kV e inferior a 230 kV

<b>Tensão de Atendimento</b>	<b>Faixa de Variação da Tensão em p.u.</b>
Adequada	$0,95 \leq V \leq 1,05$ p.u.
Precária	$0,90 \leq V < 0,95$ p.u. ou $1,05 < V \leq 1,07$ p.u.
Crítica	$V < 0,90$ p.u. ou $V > 1,07$ p.u.

Tabela 2 - Ponto de conexão em tensão nominal igual ou superior a 230 kV

<b>Tensão de Atendimento</b>	<b>Faixa de Variação da Tensão em p.u.</b>
Adequada	$0,95 \leq V \leq 1,05$ p.u.
Precária	$0,93 \leq V < 0,95$ p.u. ou $1,05 < V \leq 1,07$ p.u.
Crítica	$V < 0,93$ p.u. ou $V > 1,07$ p.u.

Em relação à frequência, o sistema de distribuição e as instalações de geração conectadas ao mesmo devem, em condições normais de operação e em regime permanente, operar dentro dos limites de frequência situados entre as faixas de 59,9 Hz e 60,1 Hz [16].

As instalações de geração conectadas ao sistema de distribuição devem garantir que, após algum tipo de distúrbio no sistema de distribuição, a frequência retorne para a faixa de 59,5 Hz a 60,5 Hz. O sistema deve retornar para esta faixa no prazo limite de trinta segundos, para permitir a recuperação do equilíbrio carga-geração [16].

Havendo necessidade de corte de geração ou de carga, durante os distúrbios no sistema de distribuição, a frequência não pode exceder 66 Hz ou ser inferior a 56,5 Hz em condições extremas. Quando o desbalanço de carga for maior que o de geração, a frequência pode permanecer acima de 62 Hz por no máximo trinta segundos e acima de 63,5 Hz por no máximo dez segundos. Para o caso contrário, a frequência pode permanecer abaixo de 58,5 Hz por no máximo dez segundos e abaixo de 57,5 Hz por no máximo cinco segundos [16].

A fim de melhorar a confiabilidade da alimentação de energia, o sistema de automação distribuído tem sido utilizado para aumentar a eficiência operacional dos sistemas de distribuição de energia. O *Distribution Automation System* (DAS) é definido como um sistema multi-funcional para monitorar e controlar a unidade terminal em uma vasta área, entre os quais, a restauração do DAS é a função mais importante para melhorar a confiabilidade da alimentação [17].

Em [18] é proposta a restauração da distribuição baseado em um sistema de multiagentes configurado por um agente central e por agentes terminais. A maior contribuição do trabalho foi a rápida restauração do sistema na ocorrência de algum tipo de falha.



---

Com a perspectiva de implantação de vários parques eólicos no Brasil, a geração de energia elétrica a partir de tal fonte surge como uma interessante alternativa para reforçar a matriz energética nacional. Segundo [19], os aerogeradores baseados em máquina de indução duplamente alimentada, também conhecido com DFIG, são responsáveis por 50 % da conversão eólicoelétrica mundial. Esse tipo de aerogerador utiliza uma máquina de indução que se conecta diretamente à rede, através dos terminais do estator, e possui um conversor estático bidirecional CA-CC-CA [20].

Na referência [21] são apresentadas algumas modelagens de aerogeradores baseada em máquinas de indução convencional conectadas diretamente à rede CA, máquinas de indução com dupla alimentação pelo rotor e máquinas síncronas conectadas à rede CA por conversores de tensão. Os testes foram realizados utilizando-se o programa ANATEM através de modelos pré-definidos, enquanto os respectivos controles e a turbina eólica foram modelados usando recursos de CDU. Este recurso é uma estratégia de construção, pelo usuário, de controladores em diagrama de blocos do programa ANATEM que sejam diferentes dos já definidos pelo programa.

Em [22] propõe-se a modelagem matemática de alguns tipos de geradores eólicos com base na representação de estado estacionário de geradores de indução. Este modelo foi formulado utilizando o Fluxo de Potência com controle automático de carga e frequência, utilizando o algoritmo de Newton-Raphon. O desvio de frequência é considerado uma variável de estado do sistema, influenciando diretamente as reatâncias do gerador de indução.

Em [8] foi desenvolvido um modelo para representação de cargas tipo motor de indução no Fluxo de Potência convencional e no Fluxo de Potência Continuado. Neste trabalho foi obtido o carregamento máximo da Área Rio, que faz parte Sistema Interligado Nacional.

## **1.5 Estrutura do Trabalho**

Incluindo o presente capítulo, esta dissertação está dividida em seis capítulos e mais dois apêndices. A seguir é apresentada uma breve descrição de cada capítulo.

---

O Capítulo 2 apresenta uma breve revisão dos principais conceitos associados à regulação primária de frequência em SEP. Pela importância do tema no trabalho, este capítulo também apresenta de forma resumida a modelagem do FPRP, proposto em [6].

No Capítulo 3 estão descritas as modelagens propostas. Para o FPRP modificado, são demonstradas todas as equações adicionais que serão incluídas na matriz Jacobiana do problema, além de detalhar todos os parâmetros da rede dependentes com a frequência que serão modificados no processo iterativo de solução. Neste Capítulo também é descrito a modelagem do motor de indução com desvios de frequência, que será inserido no modelo proposto. Para cada modelo, são incluídos exemplos ilustrativos e a formulação matemática do problema.

O Capítulo 4 apresenta de forma resumida conceitos envolvendo segurança de tensão e análise modal. Neste capítulo é descrita a modelagem do Fluxo de Potência Continuado utilizado neste trabalho e a modelagem alternativa para o FPO.

O Capítulo 5 reúne os principais resultados obtidos a partir da aplicação da metodologia proposta em cinco sistemas teste. Além de dois sistemas tutoriais, será utilizado o sistema 16 Barras, que é um sistema criado a partir de dados reais e condições operativas encontradas no SIN e os sistemas *New England* e IEEE 118 Barras, que são sistemas testes normalmente utilizados na literatura. Para a validação dos resultados será utilizado o Programa de Análise de Transitórios Eletromecânicos ANATEM, desenvolvido pelo CEPEL. Com o objetivo de verificar as alterações causadas pelos desvios de frequência, será feita a comparação dos resultados obtidos com o FPRP e o Fluxo de Potência Continuado convencional.

No Capítulo 6 estão reunidas as principais conclusões com relação à metodologia proposta e são discutidos os trabalhos futuros que podem ser feitos a partir da evolução do presente trabalho.

No Apêndice A está demonstrada a equação de controle utilizada na modelagem do motor de indução e no Apêndice B estão reunidos os dados de todos os sistemas que foram utilizados nesta dissertação.

---

## Capítulo II -

# Fluxo de Potência com Regulação Primária

### 2.1 Considerações Iniciais

Pela relevância do tema no contexto deste trabalho, este capítulo apresenta de forma sucinta uma revisão da modelagem do FPRP desenvolvido em [6]. Além disso, este capítulo também apresenta uma breve revisão dos principais conceitos associados à regulação primária de frequência, explorando principalmente os conceitos envolvidos com o regulador com queda de velocidade.

A formulação convencional do Fluxo de Potência consiste no cálculo das tensões nodais, em módulo e fase, e do cálculo dos fluxos de potência ativa e reativa do sistema de transmissão [4]. O FPRP consiste na adição de duas equações adicionais para cada barra de geração e uma equação adicional para a consideração da referência angular do sistema. Como estas equações são resolvidas de forma simultânea com as equações de potência, pode-se verificar que tal metodologia acompanha os conceitos dos métodos denominados *full* Newton. É feito o despacho de geração para suprir qualquer desbalanço entre carga e geração do sistema de acordo com o estatismo de cada máquina, e no final do processo iterativo é estimado o desvio de frequência do sistema em regime permanente. A seguir são apresentados os conceitos gerais de tal metodologia.

### 2.2 Regulação Primária de Frequência

Um Sistema Elétrico de Potência sofre grandes variações nas cargas durante o dia, principalmente em horários de pico, onde ocorre o maior aumento da carga no sistema. Em um primeiro instante, o aumento da demanda é suprido através da energia cinética das massas girantes das máquinas, diminuindo a velocidade de rotação e conseqüentemente a frequência elétrica do sistema [23]. Como geralmente as cargas variam com a frequência, após essa

---

variação de carga, o sistema atinge um novo estado de equilíbrio, e nessa nova situação, a frequência pode não ter o mesmo valor na operação pré-distúrbio.

Um sistema elétrico tem uma característica inerente, denominada de Regulação Própria, que consiste basicamente na capacidade deste sistema de alcançar um novo estado de equilíbrio, em resposta a uma variação instantânea da potência gerada com relação à potência demandada, supondo que as unidades geradoras do sistema não pudessem efetuar nenhum tipo de auxílio [23]. A variação da carga em relação à frequência é representada pelo parâmetro  $D$  denominado de “coeficiente de amortecimento”, cujo valor pode ser obtido através de (2.1).

$$D = \frac{\Delta P_D}{\Delta f} \quad (2.1)$$

Na equação acima,  $\Delta P_D$  representa a variação de potência ativa demandada e  $\Delta f$  representa a variação da frequência de operação do sistema. A Figura 1 mostra a curva representativa da variação da carga com a frequência.

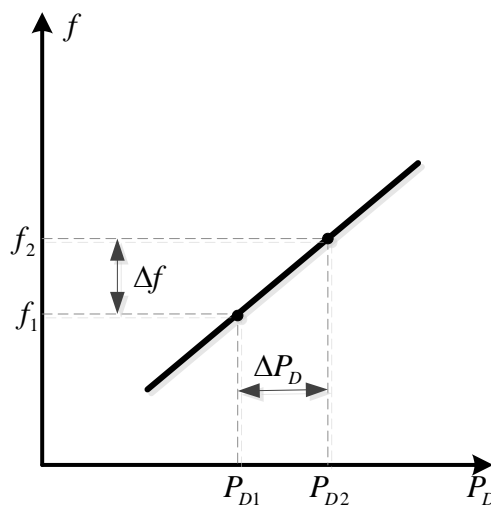


Figura 1 - Curva da variação da carga com a frequência

Os valores típicos para  $D$  são baixos, entre 1 % e 2 % [23] [24] [25]. O valor do coeficiente de amortecimento igual a 2 % significa que uma variação de 1 % da frequência do sistema equivale a 2 % de variação da carga.

Para sistemas de grande porte a variação de carga em um certo instante de tempo pode ser considerável, e somado ao baixo valor da constante de amortecimento  $D$ , a frequência pode sofrer grandes excursões de valor. Portanto, essa situação hipotética indica a necessidade de se contar com dispositivos controladores adicionais que atuem nesse desbalanço entre carga e geração evitando variações de frequência indesejáveis [6].

Desprezando a ação desses controladores, pode ser atingindo um novo estado de equilíbrio a partir desse desbalanço de carga e geração com desvios acentuados de frequência. Por isso, as unidades geradoras são munidas de mecanismos de regulação de velocidade automática, atuando no sentido de elevar ou reduzir a potência do gerador, quando a velocidade (ou a frequência) se afasta de seu valor de referência [23].

Essa regulação automática é feita pelos reguladores de velocidade das máquinas, sendo denominada de Regulação Primária. Existem basicamente dois tipos de reguladores de velocidade: reguladores isócronos e reguladores com queda de velocidade. A teoria associada aos reguladores isócronos não será abordada neste trabalho, pois não possui participação satisfatória em sistemas com mais de uma unidade geradora [23] [25]. Assim, a atenção será transferida apenas para os reguladores com queda de velocidade, cujo diagrama de blocos genérico pode ser visto através da Figura 2.

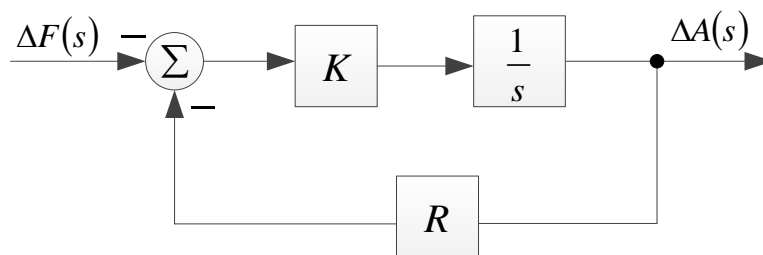


Figura 2 - Diagrama de blocos do regulador com queda de velocidade

Este tipo de regulador é definido como controlador proporcional, com um ganho de  $1/R$  [24]. Na Figura 2,  $\Delta F(s)$  representa a variação de frequência em p.u., sendo a entrada do controlador e  $\Delta A(s)$  representa a variação da abertura de admissão da turbina em p.u., sendo a saída da malha de controle. O integrador ( $K/s$ ), sem a malha de realimentação converteria diretamente uma variação de frequência  $\Delta F(s)$  em uma variação da abertura da turbina  $\Delta A$ . A malha de realimentação com o parâmetro  $R$ , que será definido posteriormente, surge como

uma forma de mudar o valor da referência a partir de seu ajuste. Ou seja, a realimentação é proporcional à variação da admissão da turbina.

A função transferência de malha fechada do diagrama de blocos mostrada na Figura 2 pode ser deduzida da seguinte forma:

$$\frac{\Delta A(s)}{\Delta F(s)} = \frac{-\frac{K}{s}}{1 + \frac{K \cdot R}{s}} \times \frac{\left(\frac{s}{K \cdot R}\right)}{\left(\frac{s}{K \cdot R}\right)} = \frac{-\frac{1}{R}}{1 + s \cdot \left(\frac{1}{R \cdot K}\right)} \quad (2.2)$$

Utilizando os valores em p.u., é possível demonstrar que a variação da admissão da turbina é proporcionalmente igual a variação de potência ativa gerada [23]. Sendo assim, uma aproximação através de (2.3) pode ser empregada em (2.2) na obtenção de (2.4).

O parâmetro  $(1/R)$  é chamado de Energia de Regulação da Máquina, e  $R$  representa a característica estática do regulador de velocidade, chamado de estatismo. Para determinar essa característica estática, basta aplicar-se o teorema do valor final [26] na função de transferência representado por (2.4), determinando assim (2.5).

$$\Delta A(s) = \Delta P_G(s) \quad (2.3)$$

$$\frac{\Delta P_G(s)}{\Delta F(s)} = \frac{-\frac{1}{R}}{1 + s \cdot \left(\frac{1}{R \cdot k}\right)} \quad (2.4)$$

$$(\Delta P_G)_{r.p} = \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot \left( -\frac{\frac{1}{R}}{1 + s \cdot \left(\frac{1}{R \cdot k}\right)} \right) \cdot \frac{\Delta f}{s} \quad (2.5)$$

$$(\Delta P_G)_{r.p} = -\frac{1}{R} \cdot \Delta f_{r.p} \quad (2.6)$$

Rearranjando a equação (2.6), pode-se obter a equação final dada por (2.7).

$$P_G - P_{G_0} + \frac{1}{R} \cdot (f - f_0) = 0 \quad (2.7)$$

A equação (2.7) representa a equação de uma reta passando pelo ponto  $(P_{G_0}, f_0)$ , ou seja, supondo um caso base na qual a potência gerada pela máquina seja  $P_{G_0}$ , a frequência de operação do sistema correspondente será dada por  $f_0$ . Essa equação de reta está representada no gráfico da Figura 3.

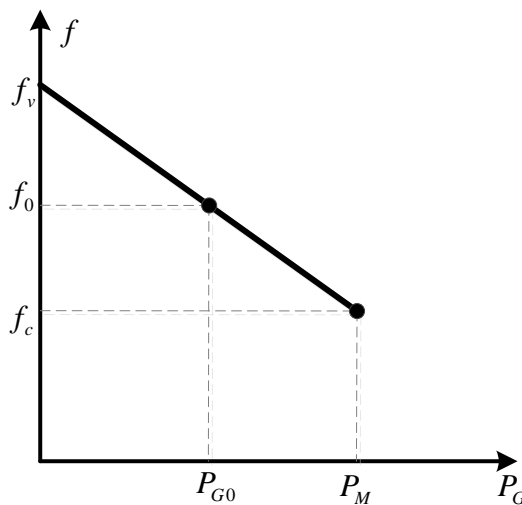


Figura 3 - Característica estática do regulador de velocidade

O estatismo  $R$  é chamado de percentual de regulação de velocidade [23]. Ele pode ser definido por (2.8), sendo a velocidade da máquina que se tem ao passar-se de carga zero (frequência  $f_v$ ) a 100 % da carga (frequência  $f_c$ ), expresso em p.u. da velocidade nominal (frequência  $f_n$ ).

$$R_{p.u.} = \frac{f_v - f_c}{f_n} \quad (2.8)$$

O estatismo  $R$  é uma medida da participação de cada máquina do sistema nas perdas e na variação de carga [27]. Ou seja, na operação de um sistema com mais de uma máquina geradora que contenham reguladores de velocidade, o estatismo do regulador de velocidade de cada gerador define a repartição de geração em um cenário de aumento ou diminuição de carga, além das perdas. O valor deste parâmetro geralmente é dado na base em potência

---

aparente da máquina. Portanto, para o uso em estudos de Fluxo de Potência, deve ser convertido para a base do sistema em questão, com o uso da equação (2.9).

$$(R)_{p.u.}^{bs} = (R)_{p.u.}^{bm} \times \frac{P^{bs}}{P^{bm}} \quad (2.9)$$

No Sistema Interligado Nacional, o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) determina que todos os reguladores de velocidade operem desbloqueados e com estatismo de 5 % na base da máquina [28]. Excepcionalmente, em função de necessidades do sistema e com base em estudos, pode ser definido com o valor diferente de 5 % [29].

### 2.3 Fluxo de Potência com Regulação Primária

A formulação básica do Fluxo de Potência consiste no cálculo das tensões nodais, em módulo e fase e dos fluxos de potência ativa e reativa do sistema de transmissão. Nesta formulação qualquer desbalanço entre a carga, perdas elétricas e geração são absorvidas pela barra de referência angular. Esta barra também é comumente denominada barra *swing*, *slack* ou  $V\theta$  [4].

Como já foi dito anteriormente, em um sistema real, as cargas variam ao longo do tempo e o desbalanço de potência é distribuído entre um conjunto de geradores. Contudo, tal equilíbrio nem sempre ocorre associado à frequência nominal. Em [6] foi desenvolvida uma ferramenta capaz de estimar os desvios de frequência do sistema em regime permanente após variação de carga e/ou geração. O despacho de geração para suprir as cargas e perdas do sistema é definido de acordo com o estatismo de cada máquina.

Na representação do FPRP, supõe-se um sistema de potência com  $nb$  barras e  $ng$  barras de geração, onde  $ng < nb$ . Desta forma, para cada uma das  $ng$  barras de geração, são incluídas um conjunto de equações a serem resolvidas pelo método de Newton-Raphson. Estas equações são definidas por:



---


$$P_{G_1} - P_{G_1}^{esp} + \frac{1}{R_1} \cdot (f - f^{esp}) = 0 \quad (2.10)$$

$$P_{G_2} - P_{G_2}^{esp} + \frac{1}{R_2} \cdot (f - f^{esp}) = 0 \quad (2.11)$$

⋮

$$P_{G_{ng}} - P_{G_{ng}}^{esp} + \frac{1}{R_{ng}} \cdot (f - f^{esp}) = 0 \quad (2.12)$$

As equações apresentadas em (2.10) a (2.12), representam a resposta em regime permanente do regulador com queda de velocidade de cada unidade geradora do sistema. Concluindo a representação das  $ng$  barras de geração, são incluídas ao conjunto as equações de (2.13) a (2.15), que mantém fixa a tensão dos geradores no seu valor especificado.

$$V_1 - V_1^{esp} = 0 \quad (2.13)$$

$$V_2 - V_2^{esp} = 0 \quad (2.14)$$

⋮

$$V_{ng} - V_{ng}^{esp} = 0 \quad (2.15)$$

É importante destacar que nesta formulação do problema não há uma barra de referência pré-estabelecida a fim de se manter a referência angular do sistema. Desta forma, é feita a inclusão da equação adicional (2.16), sendo que para qualquer barra  $i$  escolhida entre qualquer uma das  $nb$  barras do sistema, será garantido a manutenção da tensão  $\theta_i$  no seu valor especificado  $\theta_i^{esp}$ .

$$\theta_i - \theta_i^{esp} = 0 \quad (2.16)$$

A seguir é mostrada a representação genérica do FPRP descrita em [6], onde a nova matriz Jacobiana possui dimensões maiores que a matriz original do sistema. As novas equações serão resolvidas pelo método *full* Newton, como representado em (2.17).

$$\begin{bmatrix} \vdots \\ \Delta P_k \\ \Delta Q_k \\ \vdots \\ \Delta y_1 \\ \Delta y_1' \\ \vdots \\ \Delta y_{ng} \\ \Delta y_{ng}' \\ \vdots \\ \Delta \theta_i' \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \ddots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \ddots \\ \dots & \frac{\partial P_k}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_k}{\partial V_k} & \dots & \frac{\partial P_k}{\partial x_1} & \frac{\partial P_k}{\partial x_1'} & \dots & \frac{\partial P_k}{\partial x_{ng}} & \frac{\partial P_k}{\partial x_{ng}'} & \dots & \frac{\partial P_k}{\partial x_{2ng+1}} & \dots \\ \dots & \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_k} & \frac{\partial Q_k}{\partial V_k} & \dots & \frac{\partial Q_k}{\partial x_1} & \frac{\partial Q_k}{\partial x_1'} & \dots & \frac{\partial Q_k}{\partial x_{ng}} & \frac{\partial Q_k}{\partial x_{ng}'} & \dots & \frac{\partial Q_k}{\partial x_{2ng+1}} & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \dots \\ \dots & \frac{\partial y_1}{\partial \theta_k} & \frac{\partial y_1}{\partial V_k} & \dots & \frac{\partial y_1}{\partial x_1} & \frac{\partial y_1}{\partial x_1'} & \dots & \frac{\partial y_1}{\partial x_{ng}} & \frac{\partial y_1}{\partial x_{ng}'} & \dots & \frac{\partial y_1}{\partial x_{2ng+1}} & \dots \\ \dots & \frac{\partial y_1'}{\partial \theta_k} & \frac{\partial y_1'}{\partial V_k} & \dots & \frac{\partial y_1'}{\partial x_1} & \frac{\partial y_1'}{\partial x_1'} & \dots & \frac{\partial y_1'}{\partial x_{ng}} & \frac{\partial y_1'}{\partial x_{ng}'} & \dots & \frac{\partial y_1'}{\partial x_{2ng+1}} & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \dots \\ \dots & \frac{\partial y_{ng}}{\partial \theta_k} & \frac{\partial y_{ng}}{\partial V_k} & \dots & \frac{\partial y_{ng}}{\partial x_1} & \frac{\partial y_{ng}}{\partial x_1'} & \dots & \frac{\partial y_{ng}}{\partial x_{ng}} & \frac{\partial y_{ng}}{\partial x_{ng}'} & \dots & \frac{\partial y_{ng}}{\partial x_{2ng+1}} & \dots \\ \dots & \frac{\partial y_{ng}'}{\partial \theta_k} & \frac{\partial y_{ng}'}{\partial V_k} & \dots & \frac{\partial y_{ng}'}{\partial x_1} & \frac{\partial y_{ng}'}{\partial x_1'} & \dots & \frac{\partial y_{ng}'}{\partial x_{ng}} & \frac{\partial y_{ng}'}{\partial x_{ng}'} & \dots & \frac{\partial y_{ng}'}{\partial x_{2ng+1}} & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \dots \\ \dots & \frac{\partial \theta_i'}{\partial \theta_k} & \frac{\partial \theta_i'}{\partial V_k} & \dots & \frac{\partial \theta_i'}{\partial x_1} & \frac{\partial \theta_i'}{\partial x_1'} & \dots & \frac{\partial \theta_i'}{\partial x_{ng}} & \frac{\partial \theta_i'}{\partial x_{ng}'} & \dots & \frac{\partial \theta_i'}{\partial x_{2ng+1}} & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \ddots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vdots \\ \Delta \theta_k \\ \Delta V_k \\ \vdots \\ \Delta x_1 \\ \Delta x_1' \\ \vdots \\ \Delta x_{ng} \\ \Delta x_{ng}' \\ \vdots \\ \Delta x_{2ng+1} \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

A equação (2.17) mostra a representação de uma barra de geração  $k$  qualquer. Este sistema matricial deixa claro que a nova representação de barras de geração proposta pela formulação do FPRP reinsere no problema de Fluxo de Potência as equações de potência ativa e reativa para todas as barras de geração, ou seja, para as barras *swing* e PV da metodologia convencional. Em outras palavras, todas as equações de potência ativa e reativa são inseridas no conjunto de equações a serem resolvidas pelo método de Newton, independente do tipo de barra. Os elementos deste sistema genérico serão definidos a seguir.

Para cada barra de geração, são adicionados dois novos cálculos de resíduos, o primeiro correspondente a equação da característica estática do regulador de velocidade (2.18) e o segundo correspondente a equação que mantém fixa a tensão no valor especificado (2.19).

$$\Delta y_1 = -P_{G_1} + P_{G_1}^{esp} + \frac{1}{R_1} \cdot (f - f^{esp}) \quad (2.18)$$

---


$$\Delta y'_1 = V_1^{esp} - V_1 \quad (2.19)$$

$$\Delta y_{ng}' = P_{G_{ng}} - P_{G_{ng}}^{esp} + \frac{1}{R_{ng}} \cdot (f - f^{esp}) \quad (2.20)$$

$$\Delta y'_{ng} = V_{ng}^{esp} - V_{ng} \quad (2.21)$$

A equação (2.22) corresponde ao resíduo da referência angular, que pode ser qualquer barra  $i$  do sistema.

$$\Delta \theta'_i = \theta_i^{esp} - \theta_i \quad (2.22)$$

As novas variáveis de estado neste caso são dadas pelas equações de (2.23) a (2.27), que são as variações das gerações de potência ativa e reativa, e a variação da frequência de operação do sistema:

$$\Delta x_1 = \Delta P_{G_1} \quad (2.23)$$

$$\Delta x'_1 = \Delta Q_{G_1} \quad (2.24)$$

$$\Delta x_{ng} = \Delta P_{G_{ng}} \quad (2.25)$$

$$\Delta x'_{ng} = \Delta Q_{G_{ng}} \quad (2.26)$$

$$\Delta x_{2ng+1} = \Delta f \quad (2.27)$$

Ao final de cada iteração  $h$  do processo de solução, as potências ativa e reativa geradas em cada barra de geração e a frequência de operação do sistema irão ser atualizadas a partir das relações de (2.28) a (2.32):

$$P_{G_1}^{h+1} = P_{G_1}^h + \Delta P_{G_1}^h \quad (2.28)$$

$$Q_{G_1}^{h+1} = Q_{G_1}^h + \Delta Q_{G_1}^h \quad (2.29)$$

$$P_{G_{ng}}^{h+1} = P_{G_{ng}}^h + \Delta P_{G_{ng}}^h \quad (2.30)$$

---

$$Q_{G_{ng}}^{h+1} = Q_{G_{ng}}^h + \Delta Q_{G_{ng}}^h \quad (2.31)$$

$$f^{h+1} = f^h + \Delta f^h \quad (2.32)$$

## 2.4 Sumário do Capítulo

Este capítulo apresentou uma breve revisão da teoria envolvendo regulação primária de frequência e a modelagem do Fluxo de Potência com Regulação Primária. Seu principal objetivo consiste em subsidiar os desenvolvimentos propostos neste trabalho. Foi possível verificar que tal metodologia consiste em uma alteração da formulação tradicional do problema de Fluxo de Potência, onde a frequência do sistema pode ser estimada após sua convergência.

---

# Capítulo III -

## Metodologia Proposta

### 3.1 Considerações Iniciais

O modelo do FPRP, descrito no capítulo anterior, apesar de ser capaz de estimar de forma razoável a frequência de operação do sistema devido um desequilíbrio entre carga e geração, não leva em consideração a influência da variação dos parâmetros da rede elétrica em função da frequência.

Neste sentido, este capítulo tem como objetivo principal descrever as alterações necessárias na formulação do FPRP para a representação da variação dos parâmetros da rede com a frequência. São estudadas a modelagem matemática com que cada parâmetro da rede deve ser modificado. Além disso, procura-se apresentar a metodologia proposta de forma tutorial, destacando-se as alterações necessárias na formulação do problema.

### 3.2 Linhas de transmissão

A Figura 4 representa o modelo equivalente  $\pi$  da linha de transmissão normalmente utilizado para representar seu comportamento de regime permanente. Este modelo é definido por três parâmetros básicos: a resistência série  $r_{km}$ , a reatância série  $x_{km}$  e a susceptância *shunt*  $b_{km}^{sh}$ . É importante destacar que este modelo é utilizado na representação de linhas curtas, médias e longas, como definido em [30]. Contudo, neste trabalho parte-se do princípio que este modelo já está definido para cada linha do sistema.

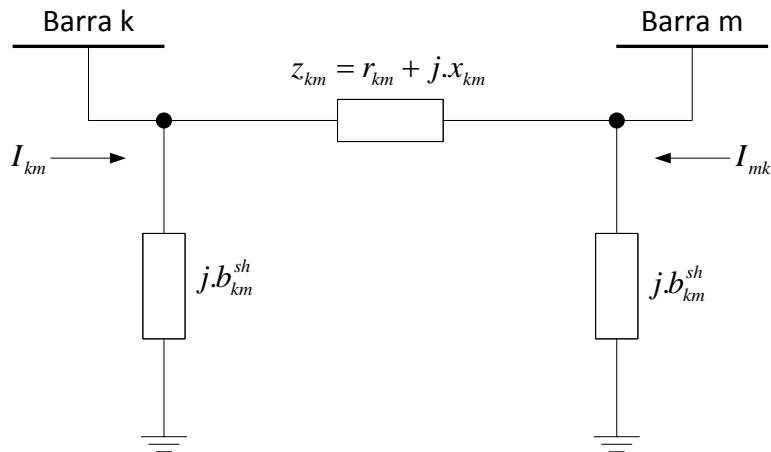


Figura 4 - Modelo equivalente  $\pi$  da linha de transmissão

A reatância série  $x_{km}$  e a susceptância *shunt*  $b_{km}^{sh}$ , são os elementos da rede dependentes dos desvios de frequência, ou seja, caso o sistema esteja operando em uma frequência diferente da nominal, estes parâmetros devem ser atualizados.

A cada iteração  $h$  do processo de solução, a reatância da rede será atualizada de acordo com a nova frequência do sistema. Considerando-se (3.1) a primeira iteração do sistema e (3.2) a iteração seguinte, é possível encontrar uma expressão para a nova reatância da rede, fazendo a divisão de (3.2) por (3.1).

$$x^h = 2 \cdot \pi \cdot f^h \cdot L \quad (3.1)$$

$$x^{h+1} = 2 \cdot \pi \cdot f^{h+1} \cdot L \quad (3.2)$$

$$\frac{x^{h+1}}{x^h} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f^{h+1} \cdot L}{2 \cdot \pi \cdot f^h \cdot L} \quad (3.3)$$

ou ainda:

$$x^{h+1} = x^h \cdot \frac{f^{h+1}}{f^h} \quad (3.4)$$

De acordo com a equação (3.4), é possível afirmar que caso o sistema esteja operando com uma frequência diferente da nominal, a nova reatância da rede será uma multiplicação da

---

reatância da iteração anterior pela divisão da frequência atual pela frequência da iteração anterior.

Utilizando-se a mesma ideia descrita anteriormente, as equações (3.7) e (3.8) serão utilizadas para demonstrar o valor da nova susceptância *shunt*, que será modificada devido aos desvios de frequência do sistema. A susceptância *shunt* (3.5) possui característica capacitiva, como exibido em (3.6).

$$b^{sh} = \frac{1}{x^{sh}} \quad (3.5)$$

$$x^{sh} = \frac{1}{2.\pi.f.C} \quad (3.6)$$

$$b_{sh}^h = 2.\pi.f^h.C \quad (3.7)$$

$$b_{sh}^{h+1} = 2.\pi.f^{h+1}.C \quad (3.8)$$

Fazendo a divisão da equação (3.8) pela equação (3.7) é possível encontrar uma expressão para nova susceptância *shunt*, representado por (3.10), que será atualizada a cada iteração do problema.

$$\frac{b_{sh}^{h+1}}{b_{sh}^h} = \frac{2.\pi.f^{h+1}.C}{2.\pi.f^h.C} \quad (3.9)$$

ou

$$b_{sh}^{h+1} = b_{sh}^h \cdot \frac{f^{h+1}}{f^h} \quad (3.10)$$

### 3.3 *Shunt* de Barra

O *shunt* de barra representado pela Figura 5, é formado por bancos de capacitores ou reatores, capaz de controlar os níveis de potência reativa injetada na barra e

consequentemente os níveis de tensão. Nos dados de entrada do sistema, típicos do programa ANAREDE, o valor correspondido para o *shunt* de barra refere-se a potência reativa injetada na tensão nominal (1,0 p.u.). Este valor deve ser positivo para capacitores e negativo para reatores [31]. Dependendo do elemento em questão, a atualização da frequência ocorrerá de maneira distinta.

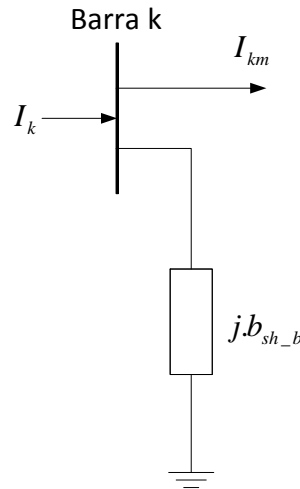


Figura 5 - Representação do shunt de barra

A expressão da reatância e do *shunt* de barra capacitivo, para uma determinada frequência de operação, pode ser representada pelas seguintes equações:

$$b^{sh\_b} = \frac{1}{x^{sh\_b}} \quad (3.11)$$

$$x^{sh\_b} = \frac{1}{2.\pi.f.C} \quad (3.12)$$

$$b_{sh\_b}^h = 2.\pi.f^h.C \quad (3.13)$$

$$b_{sh\_b}^{h+1} = 2.\pi.f^{h+1}.C \quad (3.14)$$

Fazendo a divisão da equação (3.14) pela equação (3.13), encontra-se o novo valor do *shunt* de barra que será atualizado a cada iteração, representado pela equação (3.16) e considerando o elemento capacitivo.



$$\frac{b_{sh\_b}^{h+1}}{b_{sh\_b}^h} = \frac{2.\pi.f^{h+1}.C}{2.\pi.f^h.C} \quad (3.15)$$

ou

$$b_{sh\_b}^{h+1} = b_{sh\_b}^h \cdot \frac{f^{h+1}}{f^h} \quad (3.16)$$

Para as seguintes equações, o *shunt* de barra será considerado banco de reatores. A expressão da reatância indutiva, para uma determinada frequência de operação, pode ser representada por (3.17):

$$x^{sh\_b} = 2.\pi.f.L \quad (3.17)$$

$$b_{sh\_b}^h = \frac{1}{2.\pi.f^h.L} \quad (3.18)$$

$$b_{sh\_b}^{h+1} = \frac{1}{2.\pi.f^{h+1}.L} \quad (3.19)$$

Fazendo a divisão da equação (3.19) pela equação (3.18), encontra-se o novo valor do *shunt* de barra que será atualizado a cada iteração, representado pela equação (3.21).

$$\frac{b_{sh\_b}^{h+1}}{b_{sh\_b}^h} = \frac{2.\pi.f^h.L}{2.\pi.f^{h+1}.L} \quad (3.20)$$

ou

$$b_{sh\_b}^{h+1} = b_{sh\_b}^h \cdot \frac{f^h}{f^{h+1}} \quad (3.21)$$

### 3.4 *Shunt* de Linha

O *shunt* de linha, representado pela Figura 6, são normalmente banco de reatores conectados na linha com objetivo de amenizar o Efeito Ferranti. A demonstração da equação do *shunt* de linha que será modificada devido aos desvios de frequência do sistema é análoga

a utilizada para a determinação das equações do *shunt* de barra indutivo. Esta equação é representada por (3.22).

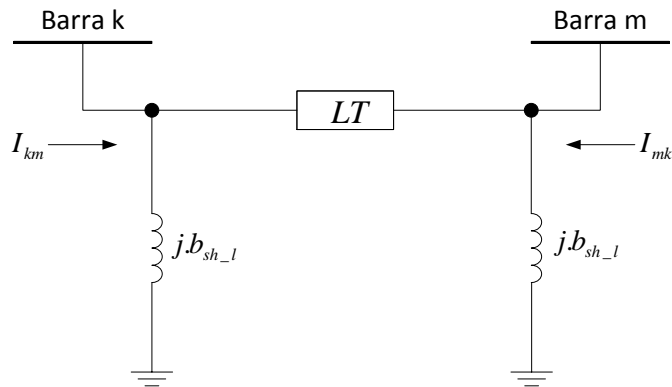


Figura 6 - Representação do shunt de linha

$$b_{sh\_l}^{h+1} = b_{sh\_l}^h \cdot \frac{f^h}{f^{h+1}} \quad (3.22)$$

### 3.5 Influência da frequência na compensação *shunt*

Esta subseção tem como objetivo verificar o comportamento dos bancos de capacitores e reatores devido aos desvios de frequência do sistema. É importante destacar que os seguintes gráficos não representam o comportamento real do sistema, apenas apresentam uma análise de sensibilidade sobre a influência da variação da frequência no valor da compensação reativa *shunt*.

Como mencionado anteriormente, bancos de capacitores e reatores são afetados de maneira distinta pelos desvios de frequência. As equações (3.23) e (3.24) representam, respectivamente, a compensação reativa por banco de capacitores e por banco de reatores. Para estas equações será considerado  $f^h$  igual a 1 p.u..

$$Q_{cap} = b \cdot f \cdot V^2 \quad (3.23)$$

$$Q_{ind} = \frac{b}{f} \cdot V^2 \quad (3.24)$$

Nos testes realizados foi considerada a compensação  $b$  igual a 200 Mvar, a tensão  $V$  variando de 0,6 a 1,4 p.u. e a frequência variando de 0,8 a 1,2 p.u.. As Figuras de 7 a 9 mostram as comparações da compensação reativa encontrada nas equações (3.23) e (3.24).

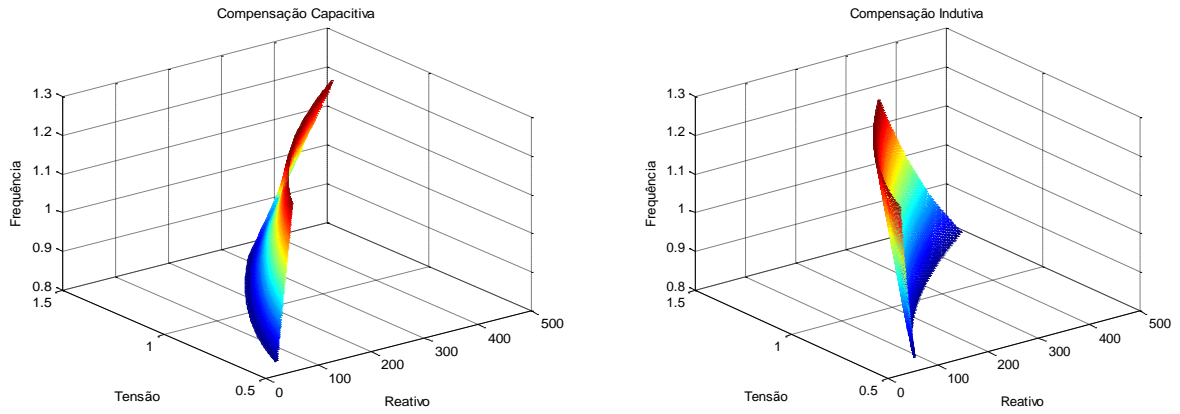


Figura 7 - Compensação reativa em três dimensões

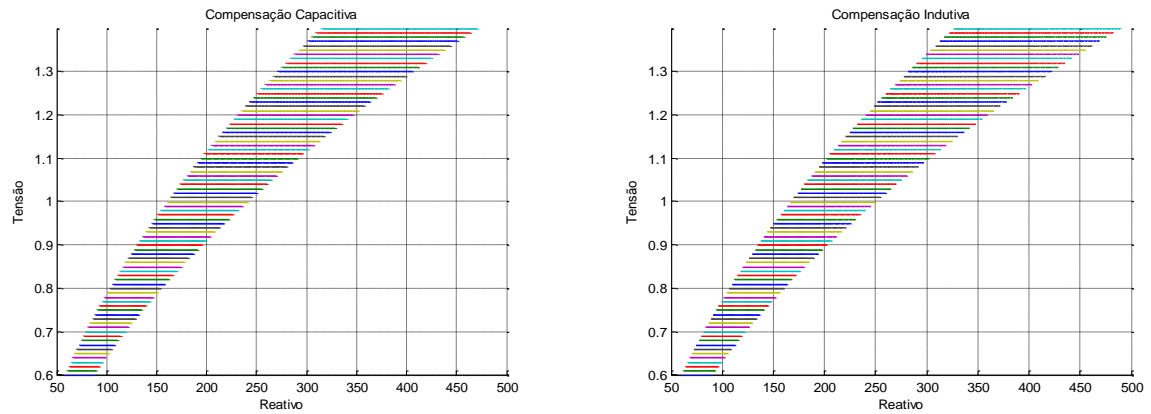


Figura 8 - Curva  $Q \times V$

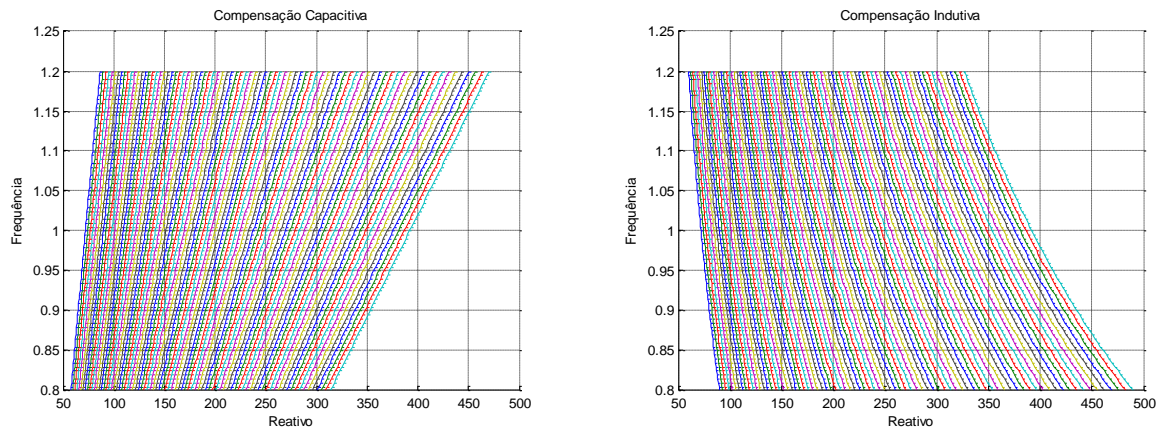


Figura 9 - Curva  $Q \times F$

---

Para ambos gráficos da Figura 9, cada reta representa um valor diferente de tensão. Analisando estes gráficos e fazendo analogia com um sistema real, percebe-se claramente a influência da frequência na compensação de um sistema. Considerando-se um súbito aumento de carga e uma conseqüente queda na frequência de operação, bancos de capacitores diminuirão sua capacidade de fornecer reativo para o sistema enquanto os bancos de reatores terão sua capacidade aumentada.

### 3.6 Exemplo Ilustrativo I

A Figura 10 mostra um sistema de 2 Barras com uma linha de transmissão típica de 500 kV. Os parâmetros deste sistema foram propostos em [24]. É importante ser destacado que foi feita a consideração da atuação do regulador com queda de velocidade apenas para análise de sensibilidade e avaliação tutorial, uma vez que neste sistema há apenas um gerador.

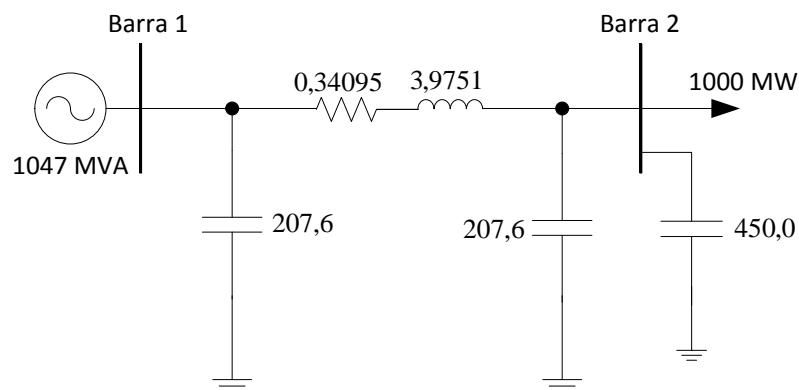


Figura 10 - Sistema de 2 Barras com linha de 500 kV

Este exemplo tem como objetivo verificar que em sistemas com elevada compensação, os desvios de frequência afetam diretamente a compensação reativa e conseqüentemente o perfil de tensão do sistema. Neste teste será realizado o incremento de carga na barra 2 até o sistema atingir o ponto de máximo carregamento. Os gráficos apresentados pelas Figuras 11, 12, 13 e 14 mostram o perfil de tensão para diferentes valores de estatismo. Novamente é importante destacar que os seguintes gráficos apresentam somente uma análise de sensibilidade a respeito da influência da frequência no valor da compensação reativa *shunt*.

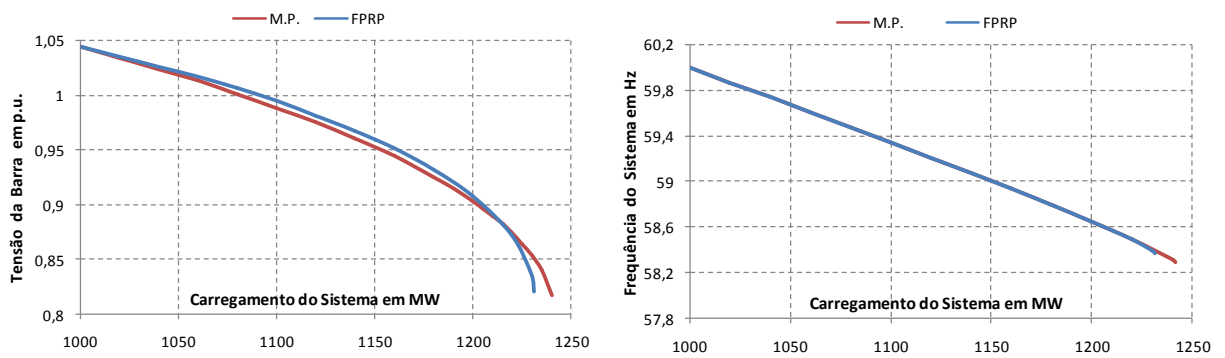


Figura 11 - Perfil de tensão e frequência para estatismo 1 %

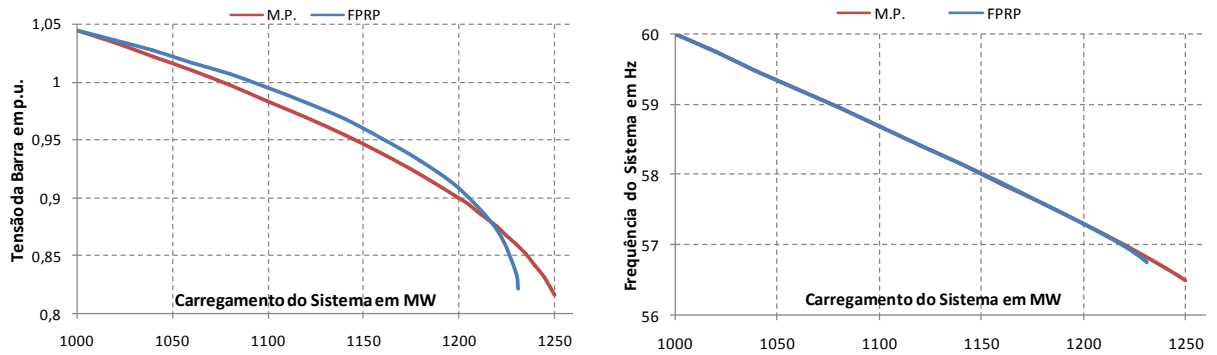


Figura 12 - Perfil de tensão e frequência para estatismo 2 %

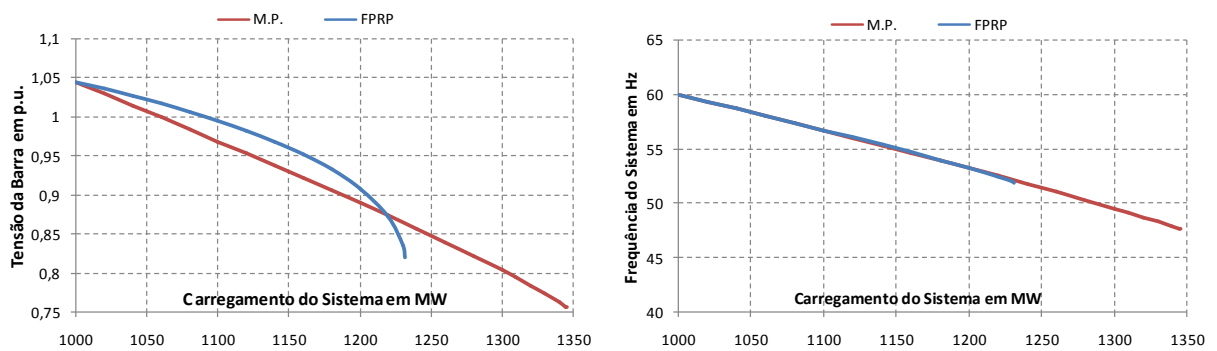


Figura 13 - Perfil de tensão e frequência para estatismo 5 %

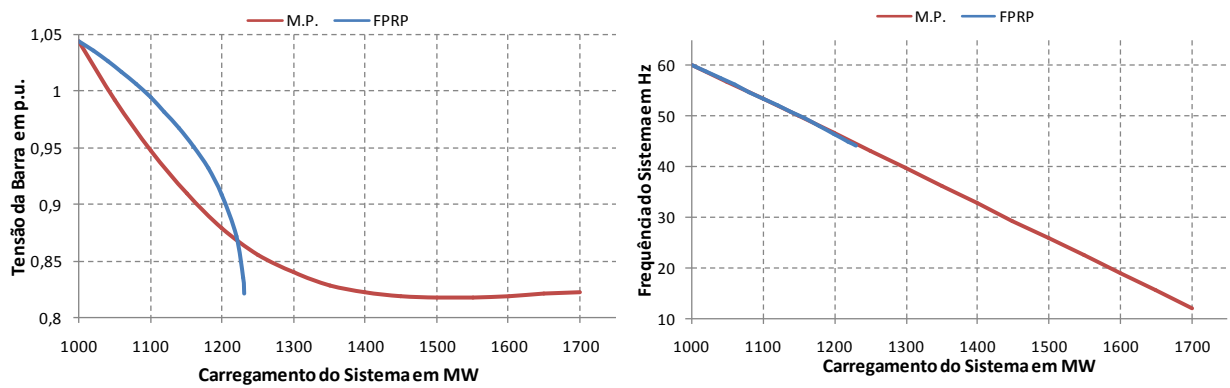


Figura 14 - Perfil de tensão e frequência para estatismo 10 %

### 3.7 Exemplo Ilustrativo II

Neste exemplo será detalhada a inclusão das equações do Fluxo de Potência em relação à frequência na matriz Jacobiana. Para isso, será utilizado o sistema de 6 Barras representado pela Figura 15, onde as barras 1, 2 e 6 são barras de geração, as barras 4 e 5 são barras de carga e a barra 3 é uma barra de passagem.

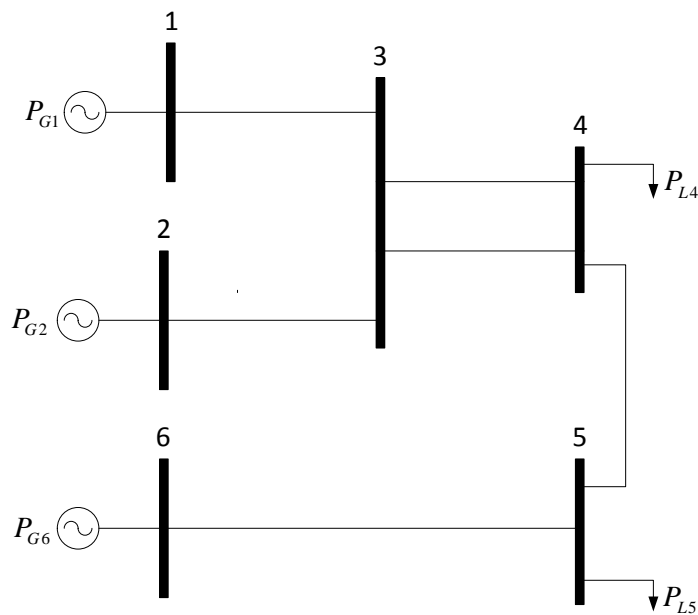


Figura 15 - Sistema exemplo de 6 Barras

O sistema matricial a ser resolvido a cada iteração pelo método de Newton em coordenadas polares é dado pela equação (3.25). Neste sistema estão representadas as duas equações adicionais para cada barra de geração e a equação que mantém a referência angular que, neste caso, foi escolhida a barra 1. Foi inserida outra linha e outra coluna com o objetivo de manter a estrutura em blocos (2x2) do sistema.

$$\begin{array}{l}
 \left[ \begin{array}{l} \Delta P'_1 \\ \Delta Q'_1 \\ \Delta P'_2 \\ \Delta Q'_2 \\ \Delta P'_3 \\ \Delta Q'_3 \\ \Delta P'_4 \\ \Delta Q'_4 \\ \Delta P'_5 \\ \Delta Q'_5 \\ \Delta P'_6 \\ \Delta Q'_6 \\ \Delta y_1 \\ \Delta y'_1 \\ \Delta y_2 \\ \Delta y'_2 \\ \Delta y_6 \\ \Delta y'_6 \\ 0 \\ \Delta \theta_1 \end{array} \right] = \left[ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccc}
 H_{11} & N_{11} & 0 & 0 & H_{13} & N_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & H_{17} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & N_{110} \\
 J_{11} & L_{11} & 0 & 0 & J_{13} & L_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L_{17} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L_{110} \\
 0 & 0 & H_{22} & N_{22} & H_{23} & N_{23} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & H_{28} & 0 & 0 & 0 & 0 & N_{210} \\
 0 & 0 & J_{22} & L_{22} & J_{23} & L_{23} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L_{28} & 0 & 0 & 0 & L_{210} \\
 H_{31} & N_{31} & H_{32} & N_{32} & H_{33} & N_{33} & H_{34} & N_{34} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & N_{310} \\
 J_{31} & L_{31} & J_{32} & L_{32} & J_{33} & L_{33} & J_{34} & L_{34} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L_{310} \\
 0 & 0 & 0 & 0 & H_{43} & N_{43} & H_{44} & N_{44} & H_{45} & N_{45} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & N_{410} \\
 0 & 0 & 0 & 0 & J_{43} & L_{43} & J_{44} & L_{44} & J_{45} & L_{45} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L_{410} \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & H_{54} & N_{54} & H_{55} & N_{55} & H_{56} & N_{56} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & N_{510} \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & J_{54} & L_{54} & J_{55} & L_{55} & J_{56} & L_{56} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L_{510} \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & H_{66} & N_{66} & 0 & 0 & 0 & 0 & H_{69} & 0 & 0 & N_{610} \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & J_{66} & L_{66} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L_{69} & 0 & L_{610} \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & H_{77} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & N_{710} \\
 0 & L_{71} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & H_{88} & 0 & 0 & 0 & 0 & N_{810} \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L_{82} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & H_{99} & 0 & 0 & N_{910} \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L_{96} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\
 J_{110} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0
 \end{array} \right] \left[ \begin{array}{l} \Delta \theta_1 \\ \Delta V_1 \\ \Delta \theta_2 \\ \Delta V_2 \\ \Delta \theta_3 \\ \Delta V_3 \\ \Delta \theta_4 \\ \Delta V_4 \\ \Delta \theta_5 \\ \Delta V_5 \\ \Delta \theta_6 \\ \Delta V_6 \\ \Delta P_{G_1} \\ \Delta Q_{G_1} \\ \Delta P_{G_2} \\ \Delta Q_{G_2} \\ \Delta P_{G_6} \\ \Delta Q_{G_6} \\ 0 \\ \Delta f \end{array} \right] \quad (3.25)
 \end{array}$$

Os termos que serão destacados posteriormente são as derivadas das equações de Fluxo de Potência em relação a frequência do sistema. Como as únicas variáveis que são relacionadas com a frequência nessas equações são os parâmetros  $G$  e  $B$  da matriz de admitância nodal ( $Y_{barra}$ ), será atribuído  $G'$  como  $\frac{\partial G}{\partial f}$  e  $B'$  como  $\frac{\partial B}{\partial f}$ .

As seguintes equações mostram os passos a serem seguidos para a determinação das matrizes  $G'$  e  $B'$ . Para isso será considerado  $g_{km}$  e  $b_{km}$  a condutância e a susceptância série da linha de transmissão. Os elementos  $g'_{km}$  e  $b'_{km}$  serão considerados suas respectivas derivadas em relação à frequência do sistema.

$$g_{km} = \frac{r_{km}}{r_{km}^2 + x_{km}^2} \quad (3.26)$$

ou ainda:

$$g = \frac{r}{r^2 + (2.\pi.f.L)^2} \quad (3.27)$$

$$g' = -\frac{r.(8.\pi^2.f.L^2)}{(r^2 + x^2)^2} \cdot \frac{f}{f} \quad (3.28)$$

$$g' = -\frac{2.x^2}{f.(r^2 + x^2)} \cdot \frac{r}{(r^2 + x^2)} \quad (3.29)$$

$$g'_{km} = -\frac{2.x_{km}^2}{f.(r_{km}^2 + x_{km}^2)} \cdot g_{km} \quad (3.30)$$

A matriz  $G'$  será construída com a seguinte regra de formação:

- O elemento da diagonal principal de índice  $ii$  é dado pela soma de todas variáveis  $g'$  pertencentes ao nó  $i$  do circuito. Neste caso o elemento  $G'_{kk}$  pode ser representado por:

$$G'_{kk} = -\sum_{m \in k} \frac{2.x_{km}^2}{f.(r_{km}^2 + x_{km}^2)} \cdot g_{km} \quad (3.31)$$

- O elemento fora da diagonal  $ij$  é dado pela variável  $g'$  (ou pela variável equivalente, no caso de existir mais de uma) pertencentes aos nós  $i$  e  $j$ , com sinal contrário. Neste caso o elemento  $G'_{km}$  pode ser representado por:

$$G'_{km} = \frac{2.x_{km}^2}{f.(r_{km}^2 + x_{km}^2)} \cdot g_{km} \quad (3.32)$$

A seguir serão mostrados os passos a serem seguidos para a determinação da matriz  $B'$ .



$$b_{km} = -\frac{x_{km}}{r_{km} + x_{km}} \quad (3.33)$$

ou ainda

$$b = -\frac{2.\pi.f.L}{r^2 + (2.\pi.f.L)^2} \quad (3.34)$$

$$b' = \frac{-2.\pi.L.(r^2 + x^2) + x.(8.\pi^2.f.L^2)}{(r^2 + x^2)} \cdot \frac{f}{f} \quad (3.35)$$

$$b' = \frac{-x.(r^2 + x^2) + 2.x.x^2}{f.(r^2 + x^2)^2} \quad (3.36)$$

$$b' = -\frac{(r^2 - x^2)}{f.(r^2 + x^2)} \cdot \frac{x}{(r^2 + x^2)} \quad (3.37)$$

$$b'_{km} = \frac{(r_{km}^2 - x_{km}^2)}{f.(r_{km}^2 + x_{km}^2)} \cdot b_{km} \quad (3.38)$$

A formação da matriz  $B'$  é análoga a formação da matriz  $G'$  e seus elementos  $ii$  e  $ij$  serão dados, respectivamente, por (3.39) e (3.40):

$$B'_{kk} = \sum_{m \in k} \frac{(r_{km}^2 - x_{km}^2)}{f.(r_{km}^2 + x_{km}^2)} \cdot b_{km} \quad (3.39)$$

$$B'_{km} = -\frac{(r_{km}^2 - x_{km}^2)}{f.(r_{km}^2 + x_{km}^2)} \cdot b_{km} \quad (3.40)$$

É importante destacar que a reatância  $x_{km}$  das equações apresentadas corresponde a expressão desenvolvida em (3.4).

A partir das expressões acima, os termos em destaques na equação (3.25) são dados por:

$$N_{110} = \frac{\partial P_1}{\partial f} = V_1^2 \cdot G'_{11} + V_1 \cdot V_3 \cdot (G'_{13} \cdot \cos \theta_{13} + B'_{13} \cdot \text{sen} \theta_{13}) \quad (3.41)$$

$$N_{210} = \frac{\partial P_2}{\partial f} = V_2^2 \cdot G'_{22} + V_2 \cdot V_3 \cdot (G'_{23} \cdot \cos \theta_{23} + B'_{23} \cdot \text{sen} \theta_{23}) \quad (3.42)$$

$$N_{310} = \frac{\partial P_3}{\partial f} = V_3^2 \cdot G'_{33} + V_3 \cdot V_1 \cdot (G'_{31} \cdot \cos \theta_{31} + B'_{31} \cdot \text{sen} \theta_{31}) + \quad (3.43)$$

$$+ V_3 \cdot V_2 \cdot (G'_{32} \cdot \cos \theta_{32} + B'_{32} \cdot \text{sen} \theta_{32}) + 2 \cdot V_3 \cdot V_4 \cdot (G'_{34} \cdot \cos \theta_{34} + B'_{34} \cdot \text{sen} \theta_{34})$$

$$N_{410} = \frac{\partial P_4}{\partial f} = V_4^2 \cdot G'_{44} + 2 \cdot V_4 \cdot V_3 \cdot (G'_{43} \cdot \cos \theta_{43} + B'_{43} \cdot \text{sen} \theta_{43}) + \quad (3.44)$$

$$+ V_4 \cdot V_5 \cdot (G'_{45} \cdot \cos \theta_{45} + B'_{45} \cdot \text{sen} \theta_{45})$$

$$N_{110} = \frac{\partial P_1}{\partial f} = V_1^2 \cdot G'_{11} + V_1 \cdot V_3 \cdot (G'_{13} \cdot \cos \theta_{13} + B'_{13} \cdot \text{sen} \theta_{13}) \quad (3.45)$$

$$+ V_5 \cdot V_6 \cdot (G'_{56} \cdot \cos \theta_{56} + B'_{56} \cdot \text{sen} \theta_{56})$$

$$N_{610} = \frac{\partial P_6}{\partial f} = V_6^2 \cdot G'_{66} + V_6 \cdot V_5 \cdot (G'_{65} \cdot \cos \theta_{65} + B'_{65} \cdot \text{sen} \theta_{65}) \quad (3.46)$$

$$L_{110} = \frac{\partial Q_1}{\partial f} = -V_1^2 \cdot G'_{11} + V_1 \cdot V_3 \cdot (G'_{13} \cdot \text{sen} \theta_{13} - B'_{13} \cdot \cos \theta_{13}) \quad (3.47)$$

$$L_{210} = \frac{\partial Q_2}{\partial f} = -V_2^2 \cdot G'_{22} + V_2 \cdot V_3 \cdot (G'_{23} \cdot \text{sen} \theta_{23} - B'_{23} \cdot \cos \theta_{23}) \quad (3.48)$$

$$L_{310} = \frac{\partial Q_3}{\partial f} = -V_3^2 \cdot G'_{33} + V_3 \cdot V_1 \cdot (G'_{31} \cdot \text{sen} \theta_{31} - B'_{31} \cdot \cos \theta_{31}) + \quad (3.49)$$

$$+ V_3 \cdot V_2 \cdot (G'_{32} \cdot \text{sen} \theta_{32} - B'_{32} \cdot \cos \theta_{32}) + 2 \cdot V_3 \cdot V_4 \cdot (G'_{34} \cdot \text{sen} \theta_{34} - B'_{34} \cdot \cos \theta_{34})$$

$$L_{410} = \frac{\partial Q_4}{\partial f} = -V_4^2 \cdot G'_{44} + 2 \cdot V_4 \cdot V_3 \cdot (G'_{43} \cdot \text{sen} \theta_{43} - B'_{43} \cdot \cos \theta_{43}) + \quad (3.50)$$

$$+ V_4 \cdot V_5 \cdot (G'_{45} \cdot \text{sen} \theta_{45} - B'_{45} \cdot \cos \theta_{45})$$

$$L_{510} = \frac{\partial Q_5}{\partial f} = -V_5^2 \cdot G'_{55} + V_5 \cdot V_4 \cdot (G'_{54} \cdot \text{sen} \theta_{54} - B'_{54} \cdot \cos \theta_{54}) + \quad (3.51)$$

$$+ V_5 \cdot V_6 \cdot (G'_{56} \cdot \text{sen} \theta_{56} - B'_{56} \cdot \cos \theta_{56})$$

$$L_{610} = \frac{\partial Q_6}{\partial f} = -V_6^2 \cdot G'_{66} + V_6 \cdot V_5 \cdot (G'_{65} \cdot \text{sen} \theta_{65} - B'_{65} \cdot \cos \theta_{65}) \quad (3.52)$$

---

Ao final de cada iteração  $h$  do processo de solução, as potências ativa e reativa geradas em cada barra de geração e a frequência de operação do sistema irão ser atualizadas da seguinte forma:

$$P_{G_1}^{h+1} = P_{G_1}^h + \Delta P_{G_1}^h \quad (3.53)$$

$$Q_{G_1}^{h+1} = Q_{G_1}^h + \Delta Q_{G_1}^h \quad (3.54)$$

$$P_{G_2}^{h+1} = P_{G_2}^h + \Delta P_{G_2}^h \quad (3.55)$$

$$Q_{G_2}^{h+1} = Q_{G_2}^h + \Delta Q_{G_2}^h \quad (3.56)$$

$$P_{G_6}^{h+1} = P_{G_6}^h + \Delta P_{G_6}^h \quad (3.57)$$

$$Q_{G_6}^{h+1} = Q_{G_6}^h + \Delta Q_{G_6}^h \quad (3.58)$$

$$f^{h+1} = f^h + \Delta f^h \quad (3.59)$$

Caso o sistema esteja operando com uma frequência diferente da nominal, o modelo proposto consiste em atualizar todos os parâmetros da rede dependentes da frequência, tais como descrito anteriormente. De posse destes novos parâmetros, recalcula-se a matriz de admitância nodal e adiciona-se as derivadas das equações de carga em relação à frequência na matriz Jacobiana a cada iteração  $h$  do processo de solução, até a metodologia proposta atingir a convergência.

É importante destacar que a equação (3.38) foi deduzida a partir de um sistema sem compensação e susceptâncias *shunt*. Para sistemas que apresentem estes parâmetros, as derivadas em relação a frequência das equações (3.16) e (3.21) que representam o *shunt* de barra e a derivada em relação a frequência da equação (3.10) que representa a susceptância *shunt* devido ao modelo equivalente  $\pi$  das linhas de transmissão devem ser adicionadas a equação (3.38), segundo a regra de formação da matriz admitância nodal.

O fato da matriz Jacobiana da metodologia proposta apresentar uma coluna cheia, devido as derivadas das equações do fluxo de carga em relação à frequência, o tempo computacional do processo iterativo não apresenta impacto significativo, pois o sistema ainda pode ser resolvido utilizando-se técnicas de eliminação ordenada para solução de sistemas

esparcos, tais como *Tinney-2* [32]. Em outras palavras, a linha e coluna adicionais são ordenadas por último minimizando as perdas de tempo computacional.

### 3.8 Equações Básicas do Motor de Indução com Rotor Bobinado

Considerando um motor de indução trifásico com rotor bobinado, suas equações básicas podem ser descritas em termos das variáveis relacionadas às fases *a*, *b* e *c*. Aplicando a Transformação de Park [24], as equações do modelo trifásico do motor de indução são transformadas para uma base de referência *d-q*, onde os eixos direto e em quadratura estão em velocidade síncrona, e *q* está adiantado de 90° em relação a *d* [8].

As equações de tensão (*v*) e fluxo enlaçado (*λ*), em valores instantâneos, podem ser descritos da seguinte forma [24] [33]:

Equações referentes ao estator:

$$v_{ds} = r_s \cdot i_{ds} + \frac{\partial \lambda_{ds}}{\partial t} - \omega_s \cdot \lambda_{qs} \quad (3.60)$$

$$v_{qs} = r_s \cdot i_{qs} + \frac{\partial \lambda_{qs}}{\partial t} - \omega_s \cdot \lambda_{ds} \quad (3.61)$$

$$\lambda_{ds} = L_{ss} \cdot i_{ds} + L_m \cdot i_{dr} \quad (3.62)$$

$$\lambda_{qs} = L_{ss} \cdot i_{qs} + L_m \cdot i_{qr} \quad (3.63)$$

Equações referentes ao rotor:

$$v_{dr} = r_r \cdot i_{dr} + \frac{\partial \lambda_{dr}}{\partial t} - s \cdot \omega_s \cdot \lambda_{qr} \quad (3.64)$$

$$v_{qr} = r_r \cdot i_{qr} + \frac{\partial \lambda_{qr}}{\partial t} - s \cdot \omega_s \cdot \lambda_{dr} \quad (3.65)$$

---


$$\lambda_{dr} = L_{rr} \cdot i_{dr} + L_m \cdot i_{ds} \quad (3.66)$$

$$\lambda_{qr} = L_{rr} \cdot i_{qr} + L_m \cdot i_{qs} \quad (3.67)$$

Os índices  $d$ ,  $q$ ,  $s$  e  $r$  indicam grandezas relativas ao eixo direto, eixo em quadratura e aos enrolamentos do estator e do rotor do motor de indução respectivamente [8].

As equações (3.68) e (3.69) exibem a posição angular do rotor e as equações (3.70) e (3.71) suas respectivas derivadas.

$$\theta = w_r \cdot t \quad (3.68)$$

$$\theta = w_s \cdot t - \theta_r \quad (3.69)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = w_r \quad (3.70)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = w_s - \frac{\partial \theta_r}{\partial t} \quad (3.71)$$

Substituindo a equação (3.70) em (3.71) se obtém a velocidade angular relativa entre o estator e o rotor, dada por:

$$\frac{\partial \theta_r}{\partial t} = w_s - w_r \quad (3.72)$$

$$\frac{\partial \theta_r}{\partial t} = s \cdot w_s \quad (3.73)$$

A equação (3.73) é derivada da equação (3.72), e representa a velocidade síncrona do campo magnético gerado pelo estator. A partir destas equações é possível definir o escorregamento do motor de indução.

---

$$s = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} \quad (3.74)$$

O escorregamento  $s$ , dado por (3.74), é a diferença percentual da velocidade do rotor para a velocidade do campo girante do motor de indução.

### 3.9 Modelo de Regime Permanente que Considera os Transitórios no Rotor e os Desvios de Frequência

Para o desenvolvimento do modelo dinâmico do motor de indução, são desprezados os transitórios do estator, a saturação, a histerese e as correntes parasitas. Considera-se também uma distribuição puramente senoidal para o fluxo magnético e no rotor os enrolamentos estão curto-circuitados [8] [24]. A representação do motor de indução em regime permanente apresenta vantagens para implementação no programa de Fluxo de Potência, pois este pode ser representado como um problema padrão com dois nós [34] [35] [36].

Para representar o modelo do motor de indução com desvios de frequência, deve-se destacar que o parâmetro do motor dependente da frequência é sua velocidade angular  $\omega_s$ , como representado na equação (3.75).

$$\omega_s = 2.\pi.f \quad (3.75)$$

Considerando que o motor esteja operando com frequência diferente da nominal, este desvio será impactado em sua velocidade angular. Uma equação que destaca essa condição é dada por (3.76):

$$\omega_s^f = 2.\pi.f_1 \quad (3.76)$$

A equação (3.76) representa um novo ponto de operação, onde o motor está operando com uma frequência diferente da nominal.

Dividindo a equação (3.76) por (3.75), obtêm-se:

$$w_s^f = w_s \cdot \frac{f_1}{f} \quad (3.77)$$

A frequência  $f_1$  pode ser representada da seguinte forma:

$$f_1 = f + \Delta f \quad (3.78)$$

A equação (3.78) mostra que a frequência  $f_1$  pode ser dada pela soma da frequência nominal  $f$  mais um desvio de frequência  $\Delta f$ .

Substituindo a equação (3.78) em (3.77), tem-se:

$$w_s^f = w_s \cdot \frac{f + \Delta f}{f} \quad (3.79)$$

Considerando que os valores estejam em p.u., pode-se substituir a frequência nominal  $f$  do motor por 1 p.u.. Sendo assim, a equação (3.79) pode ser reescrita da seguinte maneira:

$$w_s^f = w_s \cdot (1 + \Delta f) \quad (3.80)$$

A equação (3.80) demonstra que a velocidade angular  $w_s^f$  pode ser representada pela velocidade angular  $w_s$  em frequência nominal acrescida de um desvio de frequência  $\Delta f$ .

Desprezando-se os transitórios do estator e substituindo essas considerações nas expressões (3.62), (3.63), (3.66) e (3.67), obtêm-se as seguintes equações [24] [33].

$$v_{ds} = r_s \cdot i_{ds} - w_s^f \cdot L_{ss} \cdot i_{qs} - w_s^f \cdot L_m \cdot i_{qr} \quad (3.81)$$

$$v_{qs} = r_s \cdot i_{qs} + w_s^f \cdot L_{ss} \cdot i_{ds} + w_s^f \cdot L_m \cdot i_{dr} \quad (3.82)$$

$$0 = r_s \cdot i_{dr} + \frac{\partial \lambda_{dr}}{\partial t} - s \cdot w_s^f \cdot L_{rr} \cdot i_{qr} - s \cdot w_s^f \cdot L_m \cdot i_{qs} \quad (3.83)$$

$$0 = r_r \cdot i_{qr} + \frac{\partial \lambda_{qr}}{\partial t} + s \cdot w_s^f \cdot L_{rr} \cdot i_{dr} + s \cdot w_s^f \cdot L_m \cdot i_{ds} \quad (3.84)$$

Nas equações de (3.81) a (3.84), a velocidade angular  $w_s^f$  corresponde a expressão deduzida em (3.80), e destas equações chegam-se em:

$$i_{dr} = \frac{\lambda_{dr} - L_m \cdot i_{ds}}{L_{rr}} \quad (3.85)$$

$$i_{qr} = \frac{\lambda_{qr} - L_m \cdot i_{qs}}{L_{rr}} \quad (3.86)$$

Substituindo (3.85) e (3.86) em (3.82) e (3.81) respectivamente, obtêm-se:

$$v_{ds} = r_s \cdot i_{ds} - w_s^f \cdot (L_{ss} - \frac{L_m^2}{L_{rr}}) \cdot i_{qs} - w_s^f \cdot \frac{L_m}{L_{rr}} \cdot \lambda_{qr} \quad (3.87)$$

$$v_{qs} = r_s \cdot i_{qs} + w_s^f \cdot (L_{ss} - \frac{L_m^2}{L_{rr}}) \cdot i_{ds} + w_s^f \cdot \frac{L_m}{L_{rr}} \cdot \lambda_{dr} \quad (3.88)$$

A partir destas equações pode se definir a reatância transitória, tensão transitória de eixo direto e tensão transitória de eixo em quadratura do motor de indução com desvios de frequência, dadas por:

$$X_s^f = w_s^f \cdot (L_{ss} - \frac{L_m^2}{L_{rr}}) = w_s^f \cdot L_{ss}' \quad (3.89)$$

$$e_d' = -w_s^f \cdot \frac{L_m}{L_{rr}} \cdot \lambda_{qr} = -w_s^f \cdot \lambda_{qr}' \quad (3.90)$$

$$e_q' = w_s^f \cdot \frac{L_m}{L_{rr}} \cdot \lambda_{dr} = w_s^f \cdot \lambda_{dr}' \quad (3.91)$$

Os termos  $L_{ss}$  e  $L_{rr}$  podem ser expressos por:



---


$$L_{ss} = L_m + L_s \quad (3.92)$$

$$L_{rr} = L_m + L_r \quad (3.93)$$

Substituindo-se (3.92) e (3.93) em (3.89), obtêm-se:

$$X_s^f = w_s \cdot (1 + \Delta f) \cdot \left( L_s + \frac{L_r \cdot L_m}{L_r + L_m} \right) \quad (3.94)$$

ou

$$X_s^f = \left( X_s + \frac{X_r \cdot X_m}{X_r + X_m} \right) \cdot (1 + \Delta f) \quad (3.95)$$

Considerando um sistema operando com frequência nominal, a reatância transitória do motor de indução (3.95), pode ser reescrita da seguinte forma:

$$X_s' = X_s + \frac{X_r \cdot X_m}{X_r + X_m} \quad (3.96)$$

Substituindo a equação (3.96) em (3.95), tem-se:

$$X_s^f = X_s' \cdot (1 + \Delta f) \quad (3.97)$$

As equações (3.87) e (3.88) estão expressas em valores instantâneos, transformando estas para valores eficazes, obtêm-se as seguintes expressões:

$$V_{ds} = R_s \cdot I_{ds} - X_s^f \cdot I_{qs} + E_d' \quad (3.98)$$

$$V_{qs} = R_s \cdot I_{qs} - X_s^f \cdot I_{ds} + E_q' \quad (3.99)$$

Substituindo-se (3.85) e (3.86) em (3.83) e (3.84), chega-se em:

$$0 = r_r \cdot \left( \frac{\lambda_{dr} - L_m \cdot i_{ds}}{L_{rr}} \right) + \frac{\partial \lambda_{dr}}{\partial t} - s \cdot \omega_s^f \cdot L_{rr} \cdot i_{qr} - s \cdot \omega_s^f \cdot L_m \cdot i_{qs} \quad (3.100)$$

$$0 = r_r \cdot \left( \frac{\lambda_{qr} - L_m \cdot i_{qs}}{L_{rr}} \right) + \frac{\partial \lambda_{qr}}{\partial t} - s \cdot \omega_s^f \cdot L_{rr} \cdot i_{dr} - s \cdot \omega_s^f \cdot L_m \cdot i_{ds} \quad (3.101)$$

Das equações demonstradas anteriormente tem-se:

$$\lambda'_{dr} = \lambda_{dr} \cdot \frac{L_m}{L_{rr}} \quad (3.102)$$

$$\lambda_{qr} = L_{rr} \cdot i_{qr} + L_m \cdot i_{qs} \quad (3.103)$$

Multiplicando-se as equações (3.100) e (3.101) por  $\frac{L_m}{L_{rr}}$  e utilizando-se as expressões

(3.102) e (3.103), chega-se em:

$$\frac{\partial \lambda'_{dr}}{\partial t} = s \cdot \omega_s^f \cdot \lambda'_{qr} - \frac{r_r}{L_{rr}} \cdot \lambda'_{dr} + r_r \cdot \frac{L_m^2}{L_{rr}^2} \cdot i_{ds} \quad (3.104)$$

$$\frac{\partial \lambda'_{qr}}{\partial t} = -s \cdot \omega_s^f \cdot \lambda'_{dr} - \frac{r_r}{L_{rr}} \cdot \lambda'_{qr} + r_r \cdot \frac{L_m^2}{L_{rr}^2} \cdot i_{qs} \quad (3.105)$$

A Figura 16 mostra o diagrama fasorial de tensão e corrente com os eixos  $d$ - $q$  adotados na referência angular do sistema.

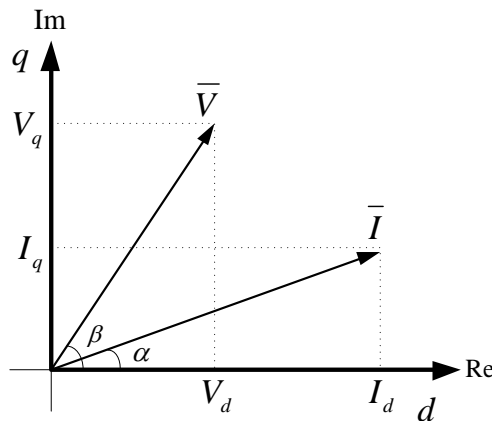


Figura 16 - Eixo  $d$ - $q$  como referência do motor de indução com desvio de frequência

Do diagrama fasorial, obtêm-se as seguintes equações de corrente (3.106) e tensão (3.107) para o estator máquina.

$$\hat{I}_s = I_{ds} + j.I_{qs} \quad (3.106)$$

$$\hat{V}_s = V_{ds} + j.V_{qs} \quad (3.107)$$

Utilizando o eixo  $d-q$  como referência angular, a tensão transitória da máquina de indução pode ser expressa por (3.108):

$$\bar{E}' = E'_d + j.E'_q \quad (3.108)$$

Substituindo (3.98) e (3.99) em (3.108) e utilizando as equações (3.106) e (3.107) obtêm-se (3.109):

$$\bar{V} = R_s \bar{I}_s + j.X_s^f . \bar{I}_s + E' \quad (3.109)$$

ou ainda:

$$\bar{V} = R_s \bar{I}_s + j.X_s' . (1 + \Delta f) . \bar{I}_s + E' \quad (3.110)$$

A equação (3.110) define o circuito equivalente transitório do motor de indução com desvio de frequência, representado na Figura 17.

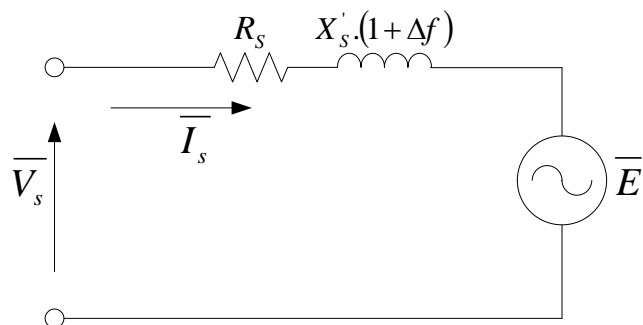


Figura 17 - Circuito equivalente transitório do motor de indução com desvio de frequência

As equações apresentadas anteriormente serão utilizadas para a representação do motor de indução com desvios de frequência em regime permanente. Substituindo (3.90) e (3.91) em (3.104) e (3.105), tem-se:

$$\frac{\partial e'_q}{\partial t} = -s \cdot w_s^f \cdot e'_d - \frac{r_r}{L_{rr}} \cdot e'_q + r_r \cdot w_s^f \cdot \frac{L_m^2}{L_{rr}^2} \cdot i_{ds} \quad (3.111)$$

$$\frac{\partial e'_d}{\partial t} = -s \cdot w_s^f \cdot e'_q - \frac{r_r}{L_{rr}} \cdot e'_d + r_r \cdot w_s^f \cdot \frac{L_m^2}{L_{rr}^2} \cdot i_{qs} \quad (3.112)$$

A constante de tempo transitória de circuito aberto pode ser definida por:

$$T_0' = \frac{L_{rr}}{r_r} = \frac{X_r + X_m}{w_s^f \cdot R_r} \cdot (1 + \Delta f) \quad (3.113)$$

A reatância de circuito aberto do rotor pode ser definida como:

$$X = w_s^f \cdot L_{ss} \quad (3.114)$$

ou ainda:

$$X = (X_s + X_m) \cdot (1 + \Delta f) \quad (3.115)$$

Substituindo-se a equação (3.114) em (3.89) obtêm-se:

$$(X - X_s') \cdot (1 + \Delta f) = w_s^f \cdot \frac{L_m^2}{L_{rr}} \quad (3.116)$$

As equações (3.111) e (3.112) podem ser reescritas tal como em (3.117) e (3.118), utilizando (3.113) e (3.116) e passando os valores instantâneos para valores eficazes.

$$\frac{\partial E'_q}{\partial t} = -\frac{1}{T_0'} \cdot [E'_q - (X - X_s') \cdot (1 + \Delta f) \cdot I_{ds}] - s \cdot w_s^f \cdot E'_d \quad (3.117)$$

$$\frac{\partial E'_d}{\partial t} = -\frac{1}{T_0} \cdot [E'_d - (X - X'_s)(1 + \Delta f)I_{qs}] - s \cdot \omega_s^f \cdot E'_q \quad (3.118)$$

ou ainda:

$$\frac{\partial \bar{E}'}{\partial t} = -\frac{1}{T_0} \cdot [\bar{E}' - j \cdot (X - X'_s)(1 + \Delta f) \cdot \bar{I}_s] - j \cdot s \cdot \omega_s^f \cdot \bar{E}' \quad (3.119)$$

Para a situação em regime permanente, desprezam-se os transitórios do rotor, ou seja, as derivadas das equações (3.117), (3.118) e (3.119) são nulas, sendo assim, estas expressões podem ser definidas como:

$$0 = -\frac{1}{T_0} \cdot [\bar{E}' - j \cdot (X - X'_s)(1 + \Delta f) \cdot \bar{I}_s] - j \cdot s \cdot \omega_s^f \cdot \bar{E}' \quad (3.120)$$

Reorganizando a equações (3.120), deduz-se a expressão para o cálculo da corrente drenada  $I_s$ , dada por:

$$\bar{I}_s = \frac{T_0 \cdot s \cdot \omega_s^f \cdot \bar{E}'}{(X - X'_s)(1 + \Delta f)} + \frac{\bar{E}'}{j \cdot (X - X'_s)(1 + \Delta f)} \quad (3.121)$$

A equação (3.121) define o circuito equivalente do motor de indução com desvio de frequência em regime permanente, partido do modelo que considera o transitório do rotor, representado na Figura 18.

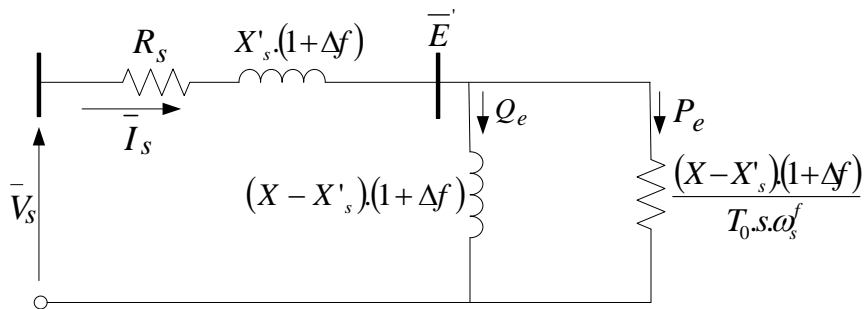


Figura 18 - Circuito equivalente do motor de indução com desvio de frequência em regime permanente

Apresentado o modelo equivalente do motor de indução com desvio de frequência, é possível calcular as condições iniciais com a finalidade de incluir este modelo em um estudo de Fluxo de Potência [8]. A tensão interna  $E'$  se relaciona com a tensão nos terminais do motor por uma impedância, como mostra a Figura 18:

O circuito equivalente é formado por uma impedância série  $Z$  (3.122), uma derivação indutiva na barra interna  $Y$  (3.123) e uma carga ativa  $P_e = P_{mec}$  (3.124).

$$Z = R_s + j.X'_s.(1 + \Delta f) \quad (3.122)$$

$$Y = \frac{1}{j.(X - X'_s).(1 + \Delta f)} \quad (3.123)$$

$$P_e = P_{mec} = \frac{T_0.s.w_s^f \cdot |\bar{E}'|^2}{(X - X'_s).(1 + \Delta f)} \quad (3.124)$$

A Figura 19 representa o circuito equivalente do motor de indução com desvio de frequência para o FPRP.

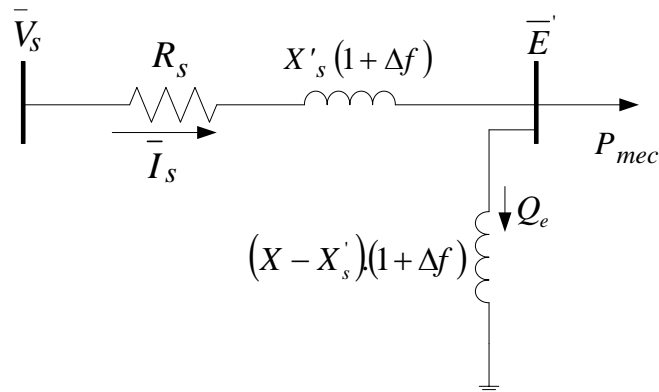


Figura 19 - Circuito equivalente do motor de indução com desvios de frequência para o FPRP

---

### 3.10 Modelagem do Motor de Indução com Desvios de Frequência no Fluxo de Potência com Regulação Primária

A modelagem do motor de indução a ser incluído no FPRP está representada na Figura 19.  $\bar{E}'$  é a tensão da barra interna do motor, onde tem-se conectado um elemento em derivação  $Y$  (3.123), uma carga com potência constante expressando a potência elétrica entregue ao rotor (3.124) e uma impedância em série (3.122) relacionada com a tensão terminal  $\bar{V}_s$  de uma das barras do sistema.

Para cada motor de indução será incluído três equações de regime permanente na resolução do problema, obtendo assim uma Matriz Jacobiana expandida resolvida pelo método *full* Newton. A barra interna  $\bar{E}'$ , é representada como uma barra PQ adicional, contribuindo assim com as equações de potência ativa e reativa. Além disso, é adicionada a equação (3.125) relacionando  $E$ ,  $P_{mec}$  e  $P_{el}$ , que representa a quantidade de potência elétrica que é convertida em potência mecânica utilizada pelo motor de indução.

$$P_{mec}^2 \cdot R_s \cdot [(X_0 - X') (1 + \Delta f)]^2 + P_{mec} \cdot E^2 \cdot [(X_0 - X') (1 + \Delta f)]^2 + E^4 \cdot R_s - E_2 \cdot P_{el} \cdot [(X_0 - X') (1 + \Delta f)]^2 = 0 \quad (3.125)$$

A demonstração da equação (3.125) está apresentada no Apêndice A.

A representação genérica da inserção do modelo do motor de indução com desvios de frequência no FPRP está expressa no sistema matricial em (3.126).

$$\begin{bmatrix} \vdots \\ \Delta P_T \\ \Delta Q_T \\ \vdots \\ \Delta ref \\ \vdots \\ \Delta P_{int} \\ \Delta Q_{int} \\ \Delta F_{int} \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \ddots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \\ \dots & \frac{\partial P_T}{\partial \theta_T} & \frac{\partial P_T}{\partial V_T} & \dots & \frac{\partial P_T}{\partial f} & \dots & \frac{\partial P_T}{\partial \theta_{int}} & \frac{\partial P_T}{\partial V_{int}} & \frac{\partial P_T}{\partial P_{mec\ int}} & \dots \\ \dots & \frac{\partial Q_T}{\partial \theta_T} & \frac{\partial Q_T}{\partial V_T} & \dots & \frac{\partial Q_T}{\partial f} & \dots & \frac{\partial Q_T}{\partial \theta_{int}} & \frac{\partial Q_T}{\partial V_{int}} & \frac{\partial Q_T}{\partial P_{mec\ int}} & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \dots & \frac{\partial ref}{\partial \theta_T} & \frac{\partial ref}{\partial V_T} & \dots & \frac{\partial ref}{\partial f} & \dots & \frac{\partial ref}{\partial \theta_{int}} & \frac{\partial ref}{\partial V_{int}} & \frac{\partial ref}{\partial P_{mec\ int}} & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \dots & \frac{\partial P_{int}}{\partial \theta_T} & \frac{\partial P_{int}}{\partial V_T} & \dots & \frac{\partial P_{int}}{\partial f} & \dots & \frac{\partial P_{int}}{\partial \theta_{int}} & \frac{\partial P_{int}}{\partial V_{int}} & \frac{\partial P_{int}}{\partial P_{mec\ int}} & \dots \\ \dots & \frac{\partial Q_{int}}{\partial \theta_T} & \frac{\partial Q_{int}}{\partial V_T} & \dots & \frac{\partial Q_{int}}{\partial f} & \dots & \frac{\partial Q_{int}}{\partial \theta_{int}} & \frac{\partial Q_{int}}{\partial V_{int}} & \frac{\partial Q_{int}}{\partial P_{mec\ int}} & \dots \\ \dots & \frac{\partial F_{int}}{\partial \theta_T} & \frac{\partial F_{int}}{\partial V_T} & \dots & \frac{\partial F_{int}}{\partial f} & \dots & \frac{\partial F_{int}}{\partial \theta_{int}} & \frac{\partial F_{int}}{\partial V_{int}} & \frac{\partial F_{int}}{\partial P_{mec\ int}} & \dots \\ \ddots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \vdots \\ \Delta \theta_T \\ \Delta V_T \\ \vdots \\ \Delta f \\ \vdots \\ \Delta \theta_{int} \\ \Delta V_{int} \\ \Delta P_{mec\ int} \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (3.126)$$

As equações adicionais, requerem o cálculo de novos resíduos pelo método de Newton-Raphson que são dados por:

$$\Delta P_{int} = P_{int}^{esp} - P_{calc} \quad (3.127)$$

$$\Delta Q_{int} = Q_{int}^{esp} - Q_{calc} \quad (3.128)$$

$$\Delta F_{int} = P_{mec}^2 \cdot R_s \cdot [(X_0 - X') (1 + \Delta f)]^2 + P_{mec} \cdot E^2 \cdot [(X_0 - X') (1 + \Delta f)]^2 + E^4 \cdot R_s - \quad (3.129)$$

$$+ E^4 \cdot R_s - E_2 \cdot P_{el} \cdot [(X_0 - X') (1 + \Delta f)]^2$$

As novas variáveis de estado para as equações acima, serão a variação da tensão interna  $\Delta V_{int}$ , a variação do ângulo da barra interna  $\Delta \theta_{int}$  e a variação da potência mecânica do motor de indução  $\Delta P_{mec\ int}$ .

Da solução de (3.126), determinam-se as novas variáveis de estado relacionadas a barra interna do modelo do motor de indução, que serão atualizadas em cada iteração  $h$  do processo de solução da seguinte forma:



$$V_{\text{int}}^{h+1} = V_{\text{int}}^h + \Delta V_{\text{int}}^h \quad (3.130)$$

$$\theta_{\text{int}}^{h+1} = \theta_{\text{int}}^h + \Delta \theta_{\text{int}}^h \quad (3.131)$$

$$P_{\text{mec int}}^{h+1} = P_{\text{mec int}}^h + \Delta P_{\text{mec int}}^h \quad (3.132)$$

### 3.11 Exemplo Ilustrativo III

A Figura 20 mostra um sistema de 2 Barras, onde a barra 1 é uma barra de geração e foi escolhida como referência angular, a barra 2 é uma barra de carga e será conectado nela o motor de indução.

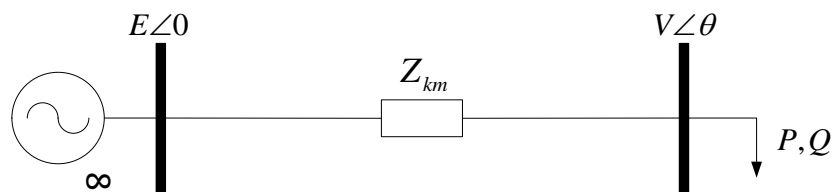


Figura 20 - Sistema 2 Barras

A Figura 21 mostra como é a representação da carga tipo motor de indução no exemplo ilustrativo apresentado. A Figura 22 expressa a incorporação do circuito fictício junto ao sistema de 2 Barras, expandindo o modelo com o circuito série, o termo em derivação e a barra interna do motor de indução.

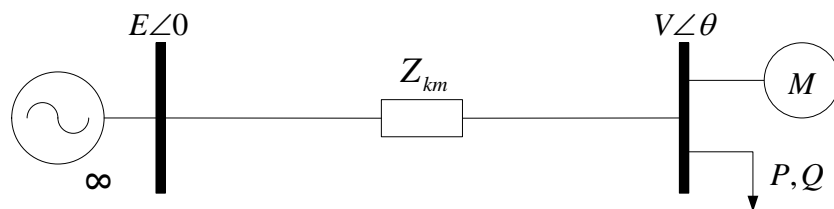


Figura 21 - Sistema 2 Barras com inserção do motor de indução

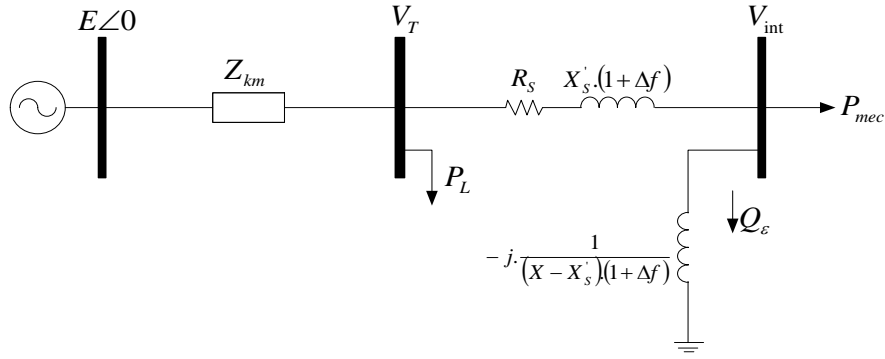


Figura 22 - Sistema 2 Barras com adição do modelo interno do motor de indução

A representação do sistema matricial para o exemplo apresentado está na equação (3.133), incorporando as equações do motor de indução no FPRP modificado.

$$\begin{bmatrix} \Delta P'_1 \\ \Delta Q'_1 \\ \Delta P_2 \\ \Delta Q_2 \\ \Delta y_1 \\ \Delta y_1 \\ \Delta P_{int} \\ \Delta Q_{int} \\ \Delta F_2 \\ \Delta \theta_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11} & N_{11} & H_{12} & N_{12} & H_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 & N_{15} \\ J_{11} & L_{11} & J_{12} & L_{12} & 0 & L_{13} & 0 & 0 & 0 & L_{15} \\ H_{21} & N_{21} & H_{22} & N_{22} & 0 & 0 & H_{24} & N_{24} & 0 & N_{25} \\ J_{21} & L_{21} & J_{22} & L_{22} & 0 & 0 & J_{24} & L_{24} & 0 & L_{25} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & H_{33} & 0 & 0 & 0 & 0 & N_{35} \\ 0 & L_{31} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & H_{42} & N_{42} & 0 & 0 & H_{44} & N_{44} & H_{45} & N_{45} \\ 0 & 0 & J_{42} & L_{42} & 0 & 0 & J_{44} & L_{44} & 0 & L_{45} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L_{54} & H_{55} & N_{55} \\ J_{51} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_1 \\ \Delta V_1 \\ \Delta \theta_2 \\ \Delta V_2 \\ \Delta P_{G1} \\ \Delta Q_{G1} \\ \Delta \theta_{int} \\ \Delta V_{int} \\ \Delta P_{mec\ int} \\ \Delta f \end{bmatrix} \quad (3.133)$$

As equações em destaques são dadas por:

$$N_{45} = \frac{\partial (P_{int} - P_{int}^{esp})}{\partial f} = V_{int}^2 \cdot G'_{int\ int} + V_{int} \cdot V_2 \cdot (G'_{int2} \cdot \cos(\theta_{int} - \theta_2) + B'_{int2} \cdot \text{sen}(\theta_{int} - \theta_2)) \quad (3.134)$$

$$L_{45} = \frac{\partial (Q_{int} - Q_{int}^{esp})}{\partial f} = -V_{int}^2 \cdot B'_{int\ int} + V_{int} \cdot V_2 \cdot (G'_{int2} \cdot \text{sen}(\theta_{int} - \theta_2) - B'_{int2} \cdot \cos(\theta_{int} - \theta_2)) \quad (3.135)$$

$$L_{54} = \frac{\partial F_2}{\partial V_{int}} = 2 \cdot P_{mec\ int} \cdot V_{int} \cdot [(X_0 - X') \cdot (1 + \Delta f)]^2 + 4 \cdot V_{int}^3 \cdot R_s - 2 \cdot V_{int} \cdot P_{el} \cdot [(X_0 - X') \cdot (1 + \Delta f)]^2 \quad (3.136)$$

$$H_{55} = \frac{\partial F_2}{\partial P_{mec\ int}} = 2 \cdot P_{mec\ int} \cdot R_s \cdot [(X_0 - X')(1 + \Delta f)]^2 + V_{int}^2 \cdot [(X_0 - X')(1 + \Delta f)]^2 \quad (3.137)$$

$$N_{55} = \frac{\partial F_2}{\partial f} = (P_{mec}^2 \cdot R_s + P_{mec} \cdot V_{int}^2 - P_{el} \cdot V_{int}^2) \left( \frac{2 \cdot (X_0 - X')^2}{(1 + \Delta f)} \right) \quad (3.138)$$

Ao final de cada iteração  $h$  do processo de solução, obtêm-se as variáveis  $\Delta P_{G1}$ ,  $\Delta Q_{G1}$ ,  $\Delta \theta_{int}$ ,  $\Delta V_{int}$ ,  $\Delta P_{mec\ int}$  e  $\Delta f$ , que serão atualizadas da seguinte forma:

$$P_{G1}^{h+1} = P_{G1}^h + \Delta P_{G1}^h \quad (3.139)$$

$$Q_{G1}^{h+1} = Q_{G1}^h + \Delta Q_{G1}^h \quad (3.140)$$

$$\theta_{int}^{h+1} = \theta_{int}^h + \Delta \theta_{int}^h \quad (3.141)$$

$$V_{int}^{h+1} = V_{int}^h + \Delta V_{int}^h \quad (3.142)$$

$$P_{mec\ int}^{h+1} = P_{mec\ int}^h + \Delta P_{mec\ int}^h \quad (3.143)$$

$$f^{h+1} = f^h + \Delta f^h \quad (3.144)$$

### 3.12 Sumário do Capítulo

Neste capítulo foi apresentada uma proposta para modificação dos parâmetros da rede dependentes com os desvios de frequência, tais como *shunt* de barra, *shunt* de linha e susceptância *shunt*. Tais parâmetros serão atualizados a cada iteração do FPRP. Além disso, foi proposta a inclusão das equações que representam as derivadas das equações do fluxo de potência em relação à frequência, que serão incluídas na matriz Jacobiana do problema.

Também foi avaliado o modelo do motor de indução com desvios de frequência que será inserido no FPRP. Assim como os parâmetros da rede, os parâmetros do motor de indução foram modificados de acordo com os desvios de frequência do sistema.

---

# Capítulo IV -

## Análise da Segurança de Tensão

### 4.1 Considerações Iniciais

Estudos envolvendo análise da segurança de tensão estão ganhando maior importância na análise de SEPs. Um dos principais motivos para isso é que os sistemas estão operando cada vez mais próximos de seus limites (máxima capacidade). Desta forma, aumenta-se a probabilidade de ocorrência de colapso de tensão em sistemas interligados e o risco de blecautes regionais ou mesmo de grande porte se tornam mais frequentes.

Uma das técnicas mais utilizadas na análise estática da estabilidade de tensão é a obtenção da curva  $P \times V$ , que pode ser feito através do sucessivo aumento do carregamento do sistema, obtendo uma trajetória de soluções de Fluxo de Potência. Contudo, no ponto de máximo carregamento a matriz Jacobiana é singular quando a carga é modelada como potência constante, não sendo, portanto, possível obter uma solução para o Fluxo de Potência. Este problema pode ser resolvido através da utilização do método da continuação [37], utilizando-se um esquema de previsão-correção e um parâmetro de continuação.

Neste capítulo será proposta uma formulação alternativa do método da continuação baseado no FPRP. A proposta principal é incluir na formulação original do FPC as equações do controle primário de frequência, como definido no FPRP, e a variação dos parâmetros da rede com a frequência. Também é feita de forma sucinta uma breve revisão sobre alguns conceitos envolvendo os autovalores da matriz Jacobiana QV reduzida, obtida a partir da matriz Jacobiana do método proposto neste trabalho.

Neste capítulo também será proposta uma formulação alternativa para o Fluxo de Potência Ótimo, incluindo as equações da regulação primária e considerando os parâmetros da rede dependentes dos desvios de frequência do sistema.

---

## 4.2 Fluxo de Potência Ótimo

O FPO é formulado matematicamente como um problema genérico de programação não linear, de acordo com o seguinte formato padrão:

$$\text{Minimize } f(x)$$

s.a.

$$g_i(x)=0 \tag{4.1}$$

$$h_i(x) \geq 0$$

Onde  $f(x)$  é a função objetivo, as equações  $g_i(x)=0$  são as restrições de igualdade e  $h_i(x) \geq 0$  são as restrições de desigualdade. No caso do FPO, as restrições de igualdade são estabelecidas pelas equações de potência ativa e reativa da rede elétrica, normalmente utilizadas para a solução do problema de Fluxo de Potência. Por outro lado, as restrições de desigualdade são definidas pelos limites das variáveis de controle e restrições físicas e operacionais do sistema.

Neste trabalho é proposta uma metodologia alternativa do problema de FPO, considerando-se adicionalmente como restrições de igualdade as equações que representam a resposta da regulação primária de frequência dos geradores síncronos e considerando-se todos os parâmetros da rede modificados, devido aos desvios de frequência do sistema.

Adota-se a função objetivo de máximo carregamento, de forma a se obter as margens de potência ativa do sistema. No entanto, é importante ser destacado que qualquer função objetivo poderia ser modelada segundo a formulação proposta neste trabalho.

As equações abaixo mostram a formulação adotada:

$$\text{Max} \sum_{i=1}^{nbl} (1 + \gamma) \cdot P_{L_i} \tag{4.2}$$

s. a.

$$V_i \cdot \sum_{i,j \in \Omega} V_j \cdot (G_{ij} \cdot \cos(\theta_i - \theta_j) + B_{ij} \cdot \sin(\theta_i - \theta_j)) = P_{G_i} - (1 + \mu) \cdot P_{L_i} \quad (4.3)$$

$$V_i \cdot \sum_{i,j \in \Omega} V_j \cdot (G_{ij} \cdot \sin(\theta_i - \theta_j) - B_{ij} \cdot \cos(\theta_i - \theta_j)) = Q_{G_i} - (1 + \mu) \cdot Q_{L_i} \quad (4.4)$$

$$G_{ij} = G_{ij}^f \quad (4.5)$$

$$B_{ij} = B_{ij}^f \quad (4.6)$$

$$P_{G_{ig}} = P_{G_{ig}}^{esp} - \frac{1}{R_{ig}} \cdot (f - f^{esp}) \quad (4.7)$$

$$V_{ig} - V_{ig}^{esp} = 0 \quad (4.8)$$

$$f^{\min} \leq f \leq f^{\max} \quad (4.9)$$

$$P_{G_{ig}}^{\min} \leq P_{G_{ig}} \leq P_{G_{ig}}^{\max} \quad (4.10)$$

$$Q_{G_{ig}}^{\min} \leq Q_{G_{ig}} \leq Q_{G_{ig}}^{\max} \quad (4.11)$$

$$V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max} \quad (4.12)$$

$$Fl_{ij}^{\min} \leq Fl_{ij} \leq Fl_{ij}^{\max} \quad (4.13)$$

$$Fl_{ji}^{\min} \leq Fl_{ji} \leq Fl_{ji}^{\max} \quad (4.14)$$

Onde,

$i,j=1,2,3...nb$ , e  $nb$  é o número de barras do sistema;

$ig=1,2,3...ng$ , e  $ng$  é o número de geradores do sistema

$nbl$  é o número de barras de carga participantes do carregamento;

$\Omega$  é o conjunto de todas as barras diretamente conectadas a barras  $i$ ;

$G_{ij}^f$  e  $B_{ij}^f$  correspondem, respectivamente, a matriz condutância e admitância que serão modificadas devido aos desvios de frequência do sistema.

---

As restrições de igualdade do FPO são definidas de (4.3) a (4.8), e as restrições de desigualdade são definidas de (4.9) a (4.14).

As equações (4.3) e (4.4) constituem, respectivamente, as injeções de potência ativa e reativa para as  $nb$  barras do sistema. As equações (4.5) e (4.6) são as restrições de igualdade da matriz admitância nodal. A equação (4.7) representa a característica estática do regulador com queda de velocidade para as  $ng$  barras de geração, e a equação (4.8) refere-se a restrição de igualdade de tensão para cada  $ng$  barras de geração, que mantém fixa o seu valor em relação ao valor especificado.

A inequação (4.9) representa o limite de operação da frequência do sistema. As inequações (4.10) e (4.11) representam, respectivamente, os limites de geração de potência ativa e reativa das barras de geração. As inequações (4.12), (4.13) e (4.14) representam os limites de tensão nas barras do sistema e os limites de fluxo, respectivamente.

### **4.3 Avaliação da Segurança de Tensão**

Um sistema em condições normais de operação deve operar de forma estável e ter a capacidade de se manter estável após sofrer algum tipo de contingência, aumento em seu carregamento ou uma alteração nas suas condições de operação. Caso isso não aconteça, a tensão pode sofrer uma queda descontrolada, aumentando o risco da ocorrência de situações de colapso, provenientes de fenômenos de instabilidade de tensão.

O fenômeno instabilidade de tensão pode ser definido quanto a duração do problema. Este fenômeno pode durar poucos segundos, envolvendo um grande distúrbio como um curto-circuito ou a retirada de uma linha de transmissão ou até alguns minutos, envolvendo um grande distúrbio e/ou mudanças na demanda ou na transferência de potência no sistema [10] [38].

A principal causa da instabilidade de tensão é a incapacidade do sistema em responder ao suporte de potência reativa, devido ao fato de que os sistemas estão operando cada vez mais próximo de seus limites. Por isso, é muito importante conhecer o ponto de máximo carregamento do sistema (e conseqüentemente a margem de carregamento) para que este possa operar em condições satisfatórias em uma margem de segurança aceitável.

A Figura 23 mostra uma curva característica  $P$  versus  $V$  normalizada. Esta curva é obtida a partir de um sistema de 2 Barras, colando a tensão normalizada no eixo vertical e a potência normalizada no eixo horizontal.

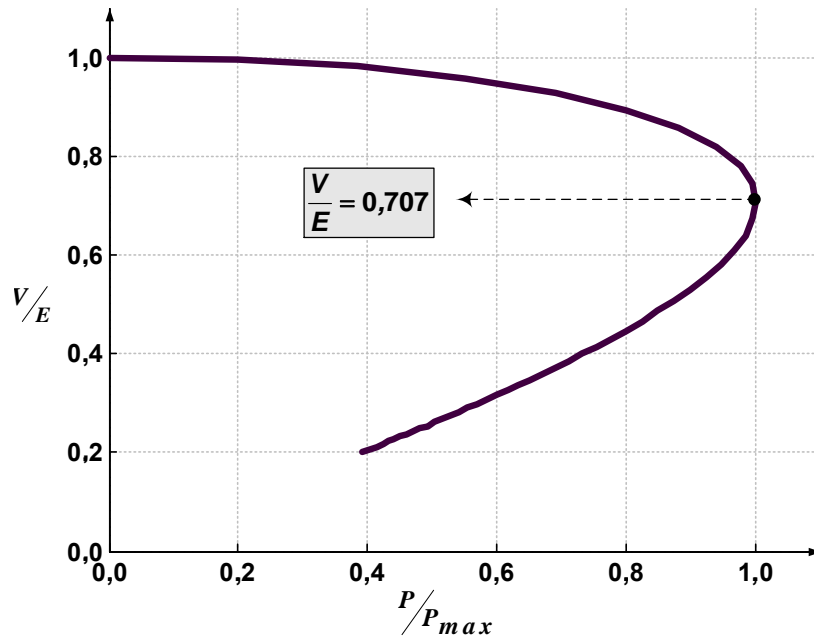


Figura 23 - Curva  $PxV$  típica

A modelagem da carga é outro aspecto que deve ser considerado em problemas de estabilidade de tensão, pois as características das cargas influenciam diretamente na estabilidade do sistema. Em sistema com grande presença de motores, a dinâmica da carga torna-se muito importante em estudos de estabilidade. Normalmente, os motores consomem de 60 a 70 % da energia elétrica gerada. A partir disso pode-se perceber a importância na representação de suas características dinâmicas [39].

Alguns dos principais componentes nos barramentos dos Sistemas Elétricos de Potência estão representados na Figura 24 [8].



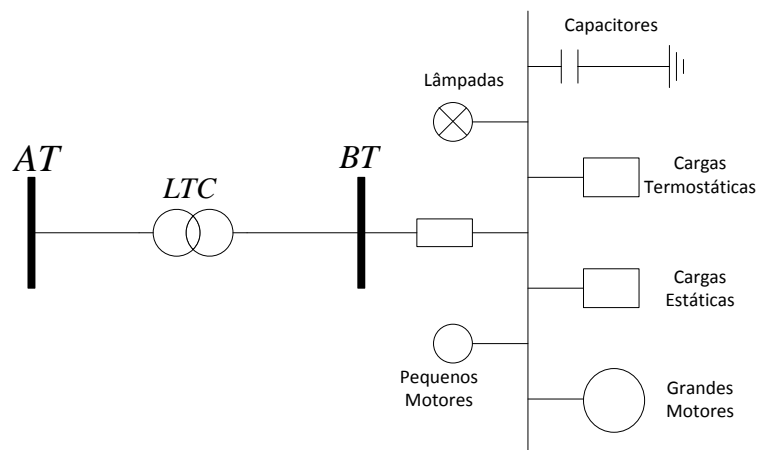


Figura 24 - Diversos tipos de cargas e seus componentes

A modelagem estática é utilizada para expressar o comportamento das cargas em um dado instante de tempo, como função da tensão a qual a barra está conectada e a frequência da rede [24].

Um dos modelos mais conhecidos na literatura é o modelo polinomial, em que a parte ativa e reativa das cargas são representadas separadamente, e a carga é dividida em três parcelas, sendo que uma possui variação quadrática com a tensão, uma varia linearmente e a outra parcela é independente do valor da tensão. Esse modelo também é conhecido como modelo ZIP, pois parte da carga pode ser modelada como potência constante (P), corrente constante (I) e impedância constante (Z) [24].

Em [6] foi realizado a avaliação do modelo de carga com a variação da frequência. Na metodologia proposta, a representação da dependência da carga com a variação da frequência também poderia ser realizada, uma vez que a frequência do sistema é uma das variáveis da solução do problema.

#### 4.4 Método da Continuação

Como mencionado anteriormente, o método da continuação é uma das técnicas mais utilizadas na análise estática da estabilidade de tensão. O FPC utiliza um esquema de previsão-correção que permite obter a solução do problema em qualquer ponto da curva  $P \times V$ .

---

As equações que representam a variação da carga ativa e reativa nas barras do sistema podem ser dadas por:

$$P_{Lk} = P_{Lk}^0 + \gamma \cdot (\delta_k \cdot S \cdot \cos(\psi_k)) \quad (4.15)$$

$$Q_{Lk} = Q_{Lk}^0 + \gamma \cdot (\delta_k \cdot S \cdot \sin(\psi_k)) \quad (4.16)$$

Onde  $\gamma$  é o fator de carregamento e  $S$  é um valor aleatório de potência aparente usado como referência para o escalamento de  $\gamma$ . Para uma determinada barra  $k$ ,  $P_{Lk}^0$  e  $Q_{Lk}^0$  são os valores iniciais da carga ativa e reativa,  $\delta_k$  é o fator de variação da carga e  $\psi_k$  é o fator de variação do fator de potência.

Supondo um crescimento de carga com fator de potência constante, as equações (4.15) e (4.16) podem ser representadas de forma simplificada por:

$$P_{Lk} = P_{Lk}^0 \cdot (1 + \gamma) \quad (4.17)$$

$$Q_{Lk} = Q_{Lk}^0 \cdot (1 + \gamma) \quad (4.18)$$

O parâmetro da continuação pode ser escolhido de duas maneiras distintas. Para pontos próximos ao caso base, grandes variações na carga produzem pequenas variações de tensão e ângulo, então o fator de carregamento  $\gamma$  deve ser escolhido como parâmetro da continuação. No ponto de máximo carregamento a matriz Jacobiana é singular, não existindo solução para o Fluxo de Potência e para pontos próximos ao ponto crítico o sistema encontra dificuldades na convergência, e portanto, nestes casos, usa-se a tensão como parâmetro da continuação.

Neste trabalho foi utilizado somente o fator de carregamento como parâmetro da continuação, utilizando as constantes DMAX e ICMN do programa ANAREDE como critério de parada do FPC [31].

A Figura 25 exemplifica as etapas de previsão e correção do FPC.

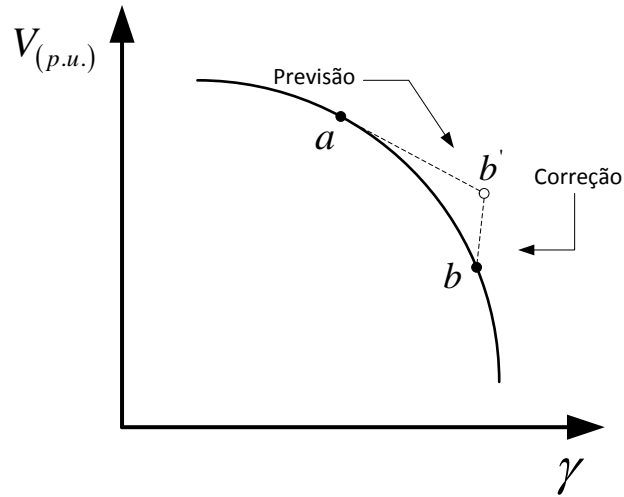


Figura 25 - Etapa de previsão e correção do FPC

A etapa de previsão é feita a partir de um caso base ( $a$ ), onde uma previsão da próxima solução ( $b'$ ) pode ser obtida através de um vetor tangente à função, tendo a distância definida pelo fator de carregamento. A equação (4.19) representa a expressão matricial do FPC modificado com o motor de indução inserido, tomando a Figura 22 como exemplo ilustrativo.

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1' \\ \Delta Q_1' \\ \Delta P_2 \\ \Delta Q_2 \\ \Delta y_1 \\ \Delta y_1' \\ \Delta P_{int} \\ \Delta Q_{int} \\ \Delta F_2 \\ \Delta \theta_1 \\ 0 \\ \gamma \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11} & N_{11} & H_{12} & N_{12} & H_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 & N_{15} & 0 & 0 \\ J_{11} & L_{11} & J_{12} & L_{12} & 0 & L_{13} & 0 & 0 & 0 & L_{15} & 0 & 0 \\ H_{21} & N_{21} & H_{22} & N_{22} & 0 & 0 & H_{24} & N_{24} & 0 & N_{25} & 0 & P_{L1} \\ J_{21} & L_{21} & J_{22} & L_{22} & 0 & 0 & J_{24} & L_{24} & 0 & L_{25} & 0 & Q_{L1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & H_{33} & 0 & 0 & 0 & 0 & N_{35} & 0 & 0 \\ 0 & L_{31} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & H_{42} & N_{42} & 0 & 0 & H_{44} & N_{44} & H_{45} & N_{45} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & J_{42} & L_{42} & 0 & 0 & J_{44} & L_{44} & 0 & L_{45} & 0 & 0 \\ J_{51} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & N_{54} & H_{55} & N_{55} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_1 \\ \Delta V_1 \\ \Delta \theta_2 \\ \Delta V_2 \\ \Delta P_{G1} \\ \Delta Q_{G1} \\ \Delta \theta_{int} \\ \Delta V_{int} \\ \Delta P_{mec int} \\ \Delta f \\ 0 \\ \Delta \gamma \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

O parâmetro de continuação  $\gamma$ , também chamado de tamanho do passo, representa a distância entre duas soluções consecutivas [9], e deve ter seu valor especificado (por exemplo, no valor 1).

Uma vez calculado o vetor tangente por (4.19), a previsão da solução é calculada por (4.20):

$$\begin{bmatrix} \theta_1^{h+1} \\ V_1^{h+1} \\ \theta_2^{h+1} \\ V_2^{h+1} \\ P_{G1}^{h+1} \\ Q_{G1}^{h+1} \\ \theta_{int}^{h+1} \\ V_{int}^{h+1} \\ P_{mec\ int}^{h+1} \\ f^{h+1} \\ \gamma^{h+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta_1^h \\ V_1^h \\ \theta_2^h \\ V_2^h \\ P_{G1}^h \\ Q_{G1}^h \\ \theta_{int}^h \\ V_{int}^h \\ P_{mec\ int}^h \\ f^h \\ \gamma^h \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta\theta_1^h \\ \Delta V_1^h \\ \Delta\theta_2^h \\ \Delta V_2^h \\ \Delta P_{G1}^h \\ \Delta Q_{G1}^h \\ \Delta\theta_{int}^h \\ \Delta V_{int}^h \\ \Delta P_{mec\ int}^h \\ \Delta f^h \\ \Delta\gamma^h \end{bmatrix} \quad (4.20)$$

A etapa de correção (*b*) é realizada naturalmente com a solução de um novo Fluxo de Potência. O método da continuação é encontrado com maiores detalhes em [10] [37].

#### 4.5 Análise Modal

A avaliação dos autovalores da matriz sensibilidade reduzida Q-V [40] é bastante utilizada para a avaliação da estabilidade de tensão, fornecendo informações sobre possíveis problemas e suas causas. No ponto de máximo carregamento, estes estudos determinam quais medidas são mais efetivas para o reforço do sistema [41].

O sistema linear do FPRP modificado a ser revolido a cada iteração do método de Newton-Raphson é dado por:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ \Delta y \\ \Delta y' \\ \Delta\theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{P\theta} & J_{PV} & J_{PP_G} & J_{PQ_G} & J_{Pf} \\ J_{Q\theta} & J_{QV} & J_{QP_G} & J_{QQ_G} & J_{Qf} \\ J_{y\theta} & J_{yV} & J_{yP_G} & J_{yQ_G} & J_{yf} \\ J_{y'\theta} & J_{y'V} & J_{y'P_G} & J_{y'Q_G} & J_{y'f} \\ J_{\theta\theta} & J_{\theta V} & J_{\theta P_G} & J_{\theta Q_G} & J_{\theta f} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta V \\ \Delta P_G \\ \Delta Q_G \\ \Delta f \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

A matriz Jacobiana reduzida (4.22) é obtida supondo que haja apenas variação de potência reativa no sistema, ou seja, os resíduos de potência ativa, os resíduos do regulador de velocidade e o resíduo da referência angular são considerados iguais a zero, considerando-se, portanto, o sistema em um ponto de operação. Dessa maneira, se tem a relação entre o vetor

de variação incremental da potência reativa, o vetor de variação do módulo da tensão nas barras e seus autovalores para casos reais não possuem parte imaginária considerável [10] [24].

$$\begin{bmatrix} 0 \\ \Delta Q \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{P\theta} & J_{PV} & J_{PP_G} & J_{PQ_G} & J_{Pf} \\ J_{Q\theta} & J_{QV} & J_{QP_G} & J_{QQ_G} & J_{Qf} \\ J_{y\theta} & J_{yV} & J_{yP_G} & J_{yQ_G} & J_{yf} \\ J_{y\dot{\theta}} & J_{y\dot{V}} & J_{y\dot{P}_G} & J_{y\dot{Q}_G} & J_{y\dot{f}} \\ J_{\theta\theta} & J_{\theta V} & J_{\theta P_G} & J_{\theta Q_G} & J_{\theta f} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta V \\ \Delta P_G \\ \Delta Q_G \\ \Delta f \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

ou ainda:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{P\theta} & J_{PP_G} & J_{PQ_G} & J_{Pf} & J_{QV} \\ J_{y\theta} & J_{yP_G} & J_{yQ_G} & J_{yf} & J_{yV} \\ J_{y\dot{\theta}} & J_{y\dot{P}_G} & J_{y\dot{Q}_G} & J_{y\dot{f}} & J_{y\dot{V}} \\ J_{\theta\theta} & J_{\theta P_G} & J_{\theta Q_G} & J_{\theta f} & J_{\theta V} \\ J_{Q\theta} & J_{QP_G} & J_{QQ_G} & J_{Qf} & J_{QV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta P_G \\ \Delta Q_G \\ \Delta f \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (4.23)$$

A equação (4.23) por ser reescrita da seguinte forma:

$$\Delta Q = (J_4 - J_3 \cdot J_1^{-1} \cdot J_2) \Delta V = J_R^Q \cdot \Delta V \quad (4.24)$$

Onde os termos em destaque são dados por:

$$J_1 = \begin{bmatrix} J_{P\theta} & J_{PP_G} & J_{PQ_G} & J_{Pf} \\ J_{y\theta} & J_{yP_G} & J_{yQ_G} & J_{yf} \\ J_{y\dot{\theta}} & J_{y\dot{P}_G} & J_{y\dot{Q}_G} & J_{y\dot{f}} \\ J_{\theta\theta} & J_{\theta P_G} & J_{\theta Q_G} & J_{\theta f} \end{bmatrix} \quad (4.25)$$

$$J_2 = \begin{bmatrix} J_{PV} \\ J_{yV} \\ J_{y\dot{V}} \\ J_{\theta V} \end{bmatrix} \quad (4.26)$$

$$J_3 = \begin{bmatrix} J_{Q\theta} & J_{QP_G} & J_{QQ_G} & J_{Qf} \end{bmatrix} \quad (4.27)$$

$$J_4 = J_{QV} \quad (4.28)$$

---

Onde  $J_R^Q$  é a matriz Jacobiana reduzida, descrevendo a sensibilidade Q-V do sistema.

Os autovalores de uma matriz são definidos como sendo os valores que satisfazem a solução não trivial ( $U \neq 0$ ) da equação (4.29):

$$A.U = \lambda.U \quad (4.29)$$

Os  $n$  autovalores  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$  da matriz podem ser calculados através da solução das raízes do seu polinômio ou equação característica, que é definida por:

$$\det(A - \lambda.I) = 0 \quad (4.30)$$

Onde  $A$  é uma matriz de dimensão ( $n \times n$ ),  $\lambda$  é um vetor de dimensão ( $n \times 1$ ) e  $I$  é a matriz identidade.

A matriz  $J_R^Q$  pode ser decomposta da seguinte forma:

$$J_R^Q = U.\Lambda.W \quad (4.31)$$

Onde:

$U$  : Matriz dos autovetores à direita.

$\Lambda$  : Matriz diagonal de autovalores.

$W$  : Matriz dos autovetores à esquerda.

Sendo que:

$$W.U = I \quad (4.32)$$

Substituindo a equação (4.31) em (4.24) tem-se:

$$\Delta V = U.\Lambda^{-1}.W.\Delta Q \quad (4.33)$$

Da equação (4.33), pode-se definir a seguinte relação de sensibilidade para o *k*-ésimo termo do vetor de tensões, dado por:

$$\frac{\Delta V_k}{\Delta Q_k} = \sum_i \frac{U_{ik} \cdot W_{ik}}{\lambda_{ik}} \quad (4.34)$$

Se todos os autovalores de  $\Lambda$  forem positivos,  $J_R^Q$  será uma matriz positiva, indicando que o sistema é estável. Se um dos autovalores de  $\Lambda$  for negativo o sistema é instável e no caso da existência de pelo menos um autovalor nulo, implica que o sistema encontra-se em seu máximo carregamento, ou seja, no limiar de estabilidade [10].

#### 4.6 Exemplo Ilustrativo

Neste exemplo será utilizado o sistema representado pelo diagrama unifilar da Figura 20, com o objetivo de comprovar a singularidade da matriz Jacobiana no ponto de máxima transferência de potência e conseqüentemente a existência de pelo menos um autovalor nulo. Serão desconsideradas as perdas elétricas e considerada a tensão na barra de geração igual a  $1 \angle 0 p.u.$ . Para este sistema a matriz Jacobiana do FPRP modificado, que considera os desvios de frequência, pode ser representada da seguinte forma:

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta P_1}{\partial \theta_1} & \frac{\partial \Delta P_1}{\partial V_1} & \frac{\partial \Delta P_1}{\partial \theta_2} & \frac{\partial \Delta P_1}{\partial V_2} & \frac{\partial \Delta P_1}{\partial P_{G1}} & 0 & \frac{\partial \Delta P_1}{\partial f} \\ \frac{\partial \Delta Q_1}{\partial \theta_1} & \frac{\partial \Delta Q_1}{\partial V_1} & \frac{\partial \Delta Q_1}{\partial \theta_2} & \frac{\partial \Delta Q_1}{\partial V_2} & 0 & \frac{\partial \Delta Q_1}{\partial Q_{G1}} & \frac{\partial \Delta Q_1}{\partial f} \\ \frac{\partial \Delta P_2}{\partial \theta_1} & \frac{\partial \Delta P_2}{\partial V_1} & \frac{\partial \Delta P_2}{\partial \theta_2} & \frac{\partial \Delta P_2}{\partial V_2} & 0 & 0 & \frac{\partial \Delta P_2}{\partial f} \\ \frac{\partial \Delta Q_2}{\partial \theta_1} & \frac{\partial \Delta Q_2}{\partial V_1} & \frac{\partial \Delta Q_2}{\partial \theta_2} & \frac{\partial \Delta Q_2}{\partial V_2} & 0 & 0 & \frac{\partial \Delta Q_2}{\partial f} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial \Delta y_1}{\partial P_{G1}} & 0 & \frac{\partial \Delta y_1}{\partial f} \\ 0 & \frac{\partial \Delta y_1}{\partial V_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\partial \Delta \theta_1}{\partial \theta_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.35)$$

Substituindo cada termo em destaque por sua respectiva expressão, obtêm-se a seguinte matriz Jacobiana J.

$$J = \begin{bmatrix} \frac{V_2 \cdot \cos \theta_2}{x} & -\frac{V_2 \cdot \sin \theta_2}{x} & -\frac{V_2 \cdot \cos \theta_2}{x} & -\frac{\sin \theta_2}{x} & 0 & -1 & -\frac{V_2 \cdot \cos \theta_2}{x \cdot f} \\ \frac{V_2 \cdot \sin \theta_2}{x} & \frac{2 - V_2 \cdot \cos \theta_2}{x} & \frac{V_2 \cdot \sin \theta_2}{x} & -\frac{\cos \theta_2}{x} & -1 & 0 & \frac{(1 - V_2 \cdot \cos \theta_2)}{x \cdot f} \\ -\frac{V_2 \cdot \cos \theta_2}{x} & \frac{V_2 \cdot \sin \theta_2}{x} & \frac{V_2 \cdot \cos \theta_2}{x} & \frac{\sin \theta_2}{x} & 0 & 0 & \frac{V_2 \cdot \sin \theta_2}{x \cdot f} \\ -\frac{V_2 \cdot \sin \theta_2}{x} & -\frac{V_2 \cdot \cos \theta_2}{x} & \frac{V_2 \cdot \sin \theta_2}{x} & \frac{2 \cdot V_2 - \cos \theta_2}{x} & 0 & 0 & -\frac{1}{x \cdot f} \cdot (V_2^2 - V_2 \cdot \cos \theta_2) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & \frac{1}{R_1} \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.36)$$

O determinante da matriz  $J$  é dado por:

$$Det(J) = \left( \frac{V_2 \cdot (2 \cdot V_2 \cdot \cos(\theta_2) - 1) \cdot (f \cdot x - R_1 \cdot V_2 \cdot \cos(\theta_2) + R_1 \cdot V_2 \cdot \sin(\theta_2))}{R_1 \cdot f \cdot x^3} \right) \quad (4.37)$$

No capítulo seguinte será mostrado que para o máximo carregamento do sistema, os resultados de tensão e ângulo podem ser encontrados analiticamente, sendo que para este ponto a tensão e o ângulo na barra 2 são dados por  $1/\sqrt{2}$  e  $-45^\circ$ , respectivamente. Substituindo-se estes valores na expressão (4.37) é verificado que no ponto de máximo carregamento o determinante da matriz Jacobiana modificada definida por (4.36) é igual à zero.

#### 4.7 Sumário do Capítulo

Este capítulo apresentou alguns conceitos a respeito da avaliação da segurança de tensão. Foi apresentada a formulação do FPC modificado, onde é possível avaliar a variação da frequência do sistema em função do aumento do carregamento. Neste capítulo também foram apresentadas algumas análises a partir dos autovalores da matriz Jacobiana reduzida.

Adicionalmente também foi apresentada uma formulação alternativa para o FPO, levando-se em consideração a regulação primária e a utilização dos parâmetros da rede dependentes dos desvios de frequência. Isto é feito através da inclusão de restrições de igualdade na formulação clássica e utilizando a função objetivo de máximo carregamento do sistema.



---

# Capítulo V -

## Resultados

### 5.1 Considerações Gerais

Este capítulo tem como principal objetivo a apresentação dos resultados obtidos através da utilização da metodologia proposta em alguns sistemas normalmente utilizados na literatura especializada. O trabalho desenvolvido em ambiente Matlab<sup>®</sup> [42], consiste na inclusão da variação dos parâmetros da rede em função dos desvios de frequência no FPRP. Uma formulação de Fluxo de Potência Ótimo foi desenvolvida e implementada, sendo utilizada para comparar os resultados obtidos no ponto de máximo carregamento do sistema. Foi utilizada a plataforma LINGO<sup>®</sup> [43] para implementação do FPO. Também é importante destacar que o programa de Análise de Transitórios Eletromecânicos - ANATEM, desenvolvido pelo CEPEL [44], foi utilizado para validar alguns resultados da metodologia proposta. Este programa possui uma Opção de Execução (FREQ) que permite a consideração da variação dos parâmetros da rede com a frequência durante a simulação no tempo.

Os resultados produzidos foram gerados com os seguintes sistemas testes:

- Sistema Teste 1: Sistema tutorial de 2 Barras
- Sistema Teste 2: Sistema de 6 Barras [45]
- Sistema Teste 3: Sistema de 16 Barras [46]
- Sistema Teste 4: Sistema *New England* [47]
- Sistema Teste 5: Sistema de 118 Barras do IEEE [48]

---

## 5.2 Sistema Teste 1

### 5.2.1 Primeira Avaliação

Nesta primeira avaliação serão apresentados alguns estudos sobre o ponto de máximo carregamento do sistema teste 1, cuja topologia foi apresentada anteriormente através da Figura 20. Procura-se avaliar a importância de se considerar a frequência na solução do problema, mostrando-se comparações entre o modelo proposto e o Fluxo de Potência convencional, que considera a frequência operando sempre em seu valor nominal.

A capacidade da máxima transferência de potência depende da impedância de transmissão do sistema, do nível de compensação da carga e do fator de potência. A Figura 26 representa o circuito equivalente para o modelo apresentado na Figura 20.

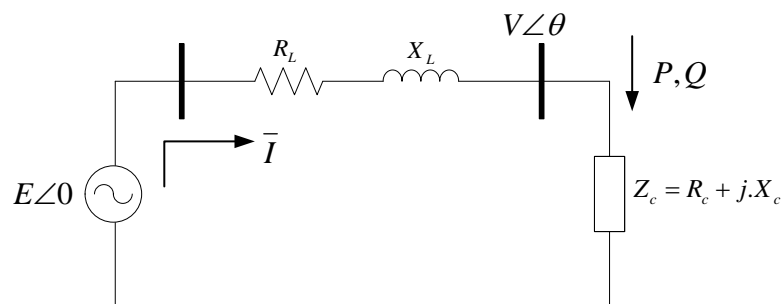


Figura 26 - Circuito equivalente do sistema radial carga versus gerador

Em [49] é demonstrada as equações do modelo em relação ao ponto de máxima transferência de potência. Para este circuito, é considerada a carga totalmente compensada e impedância da linha igual a  $0 + j0,20 p.u.$ .

É importante destacar que a equação (3.4) representa a variação da reatância da rede com a frequência. Nesta equação será considerado  $f^h$  como a frequência nominal do sistema, ou seja, 1 p.u.. Desta forma, a resistência da carga, potência ativa consumida e a tensão da carga no ponto de máximo carregamento podem ser dadas por:

$$R_c^{\max} = X \cdot f \quad (5.1)$$

$$P^{\max} = \frac{E^2}{2 \cdot X \cdot f} \quad (5.2)$$

$$V^{\max} = \frac{E}{\sqrt{2}} \cong 0,707 \cdot E = 0,707 \text{ p.u.} \quad (5.3)$$

Para que seja possível encontrar a potência ativa consumida e a impedância da carga é necessária a utilização de mais uma equação. A equação (2.7) representa a resposta em regime permanente do regulador com queda de velocidade. Esta equação pode ser reescrita da seguinte forma:

$$P_G - P_{G0} = -\frac{1}{R} \cdot (f - f_0) \quad (5.4)$$

As seguintes considerações serão feitas para a equação (5.4).

Foi adotado o estatismo no valor de 5 % na base da máquina,  $f_0$  a frequência nominal do sistema, ou seja, 1 p.u. e  $P_{G0}$  no valor de 1 MW. Será considerada tanto a potência nominal da máquina quanto a potência base do sistema como 100 MVA. Diante destas considerações, o estatismo da máquina pode ser calculado pela seguinte expressão.

$$\left(\frac{1}{R}\right)_{p.u.}^{100MVA} = \left(\frac{1}{R}\right)_{p.u.}^{100MW} \cdot \frac{P^{bs}}{P^{bm}} = \frac{1}{0,05} \cdot \frac{100}{100} = 20 \text{ p.u.} \quad (5.5)$$

ou ainda

$$R = 0,05 \text{ p.u.} \quad (5.6)$$

Substituindo-se os dados do sistema adotados anteriormente na equação (5.4) e utilizando todos os dados em p.u. tem-se:

$$P_G - 0,01 = -\frac{1}{0,05} \cdot (f - 1) \quad (5.7)$$

Partindo da equação (5.7) e fazendo-se algumas manipulações algébricas obtêm-se a expressão a seguir:

$$f = 1,0005 - 0,05.P_G \quad (5.8)$$

Substituindo-se (5.8) em (5.2), deduz-se a expressão de segundo grau para o cálculo da máxima potência do circuito, descrito na Figura 26, como sendo:

$$(0,02.P^{\max})^2 - 0,4002.P^{\max} + 1 = 0 \quad (5.9)$$

Resolvendo-se a equação (5.9), obtêm-se o valor da máxima potência do circuito da Figura 26, dada por:

$$P^{\max} = 2,927 \text{ p.u.} \quad (5.10)$$

Substituindo-se (5.10) em (5.1) e (5.8), obtêm-se os valores de resistência da carga e frequência do sistema para situação de máxima transferência de potência.

$$R_c = 0,1708 \text{ p.u.} \quad (5.11)$$

$$f = 0,8541 \text{ p.u.} \quad (5.12)$$

ou ainda

$$f = 51,25 \text{ Hz} \quad (5.13)$$

Utilizando-se o FPC modificado é possível verificar o perfil de tensão da barra de carga através da Figura 27 e a evolução da frequência do sistema na Figura 28. A Figura 29 mostra a variação da reatância da rede em relação ao aumento do carregamento.

O FPC modificado foi capaz de reproduzir com exatidão os resultados obtidos através das equações (5.10), (5.11) e (5.12). A Tabela 3 mostra a solução do problema para o máximo carregamento do sistema.

*Tabela 3 - Solução do problema para o máximo carregamento do sistema*

<i>Solução do problema</i>	<i>Tensão (p.u.)</i>	<i>Ângulo (°)</i>	<i>Carregamento Máximo (MW)</i>
	0,707	-45,0°	292,69

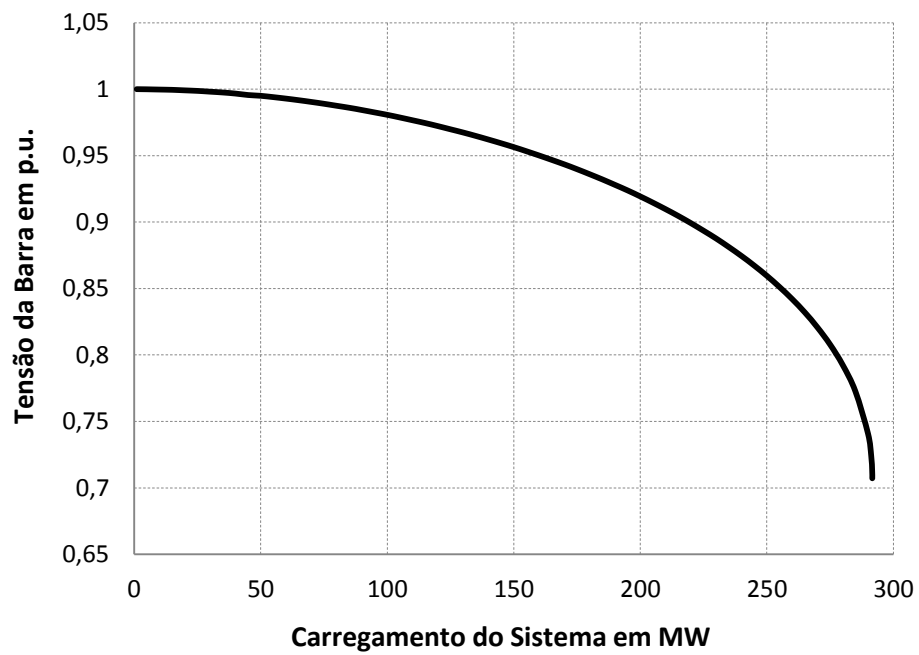


Figura 27 - Tensão na barra 2 versus aumento de carregamento do sistema

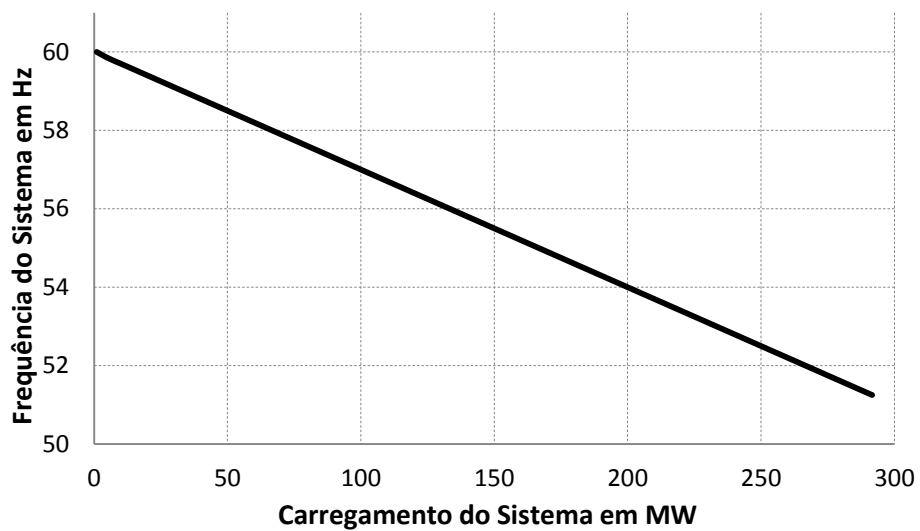


Figura 28 - Frequência do sistema versus aumento de carregamento do sistema

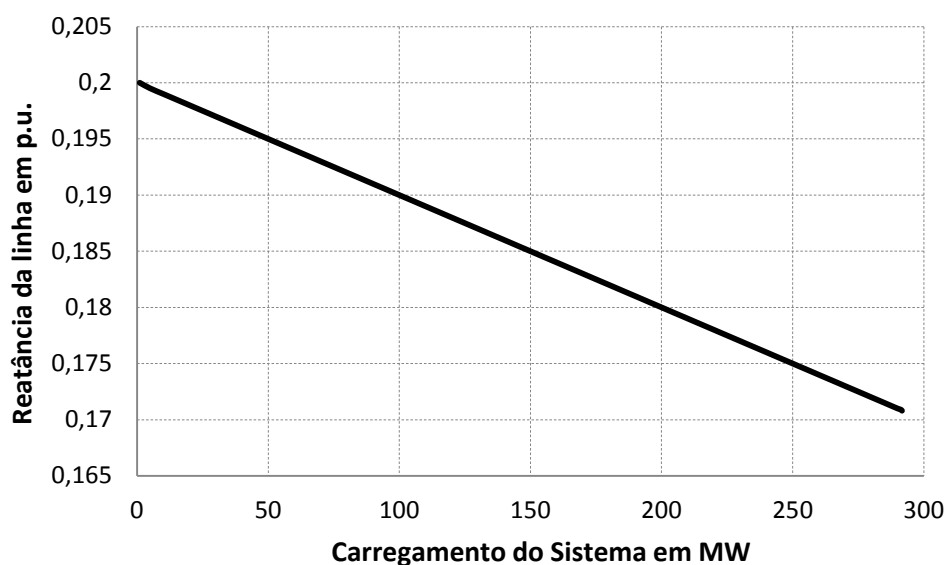


Figura 29 - Reatância da rede versus aumento de carregamento do sistema

Não considerando os efeitos da variação da frequência, o sistema tem um carregamento máximo de 2,5 p.u., que pode ser facilmente verificado na equação (5.2), substituindo  $f$  por 1 p.u.. A Tabela 4 mostra a comparação entre o modelo proposto e o Fluxo de Potência convencional no carregamento igual a 2,5 p.u.. Nesta tabela estão contidos os resultados de tensão, ângulo, Fluxo de Potência ativa e reativa.

Tabela 4 - Comparação entre o modelo proposto e o fluxo convencional para o carregamento de 250 MW

<b>Grandeza</b>	<b>Fluxo de potência convencional</b>	<b>Fluxo de potência proposto</b>	<b>Diferença Percentual</b>
<i>Tensão (p.u.)</i>	0,707	0,861	21,78 %
<i>Ângulo (°)</i>	-45,0	-30,5	-32,22 %
<i>Fluxo Ativo (MW)</i>	250,0	250,0	0,00 %
<i>Fluxo Reativo (Mvar)</i>	250,0	147,6	-40,96 %

Neste sistema tutorial verifica-se que, no ponto escolhido, a frequência influenciou de forma considerável a solução do problema. O maior desvio encontrado foi para a geração de potência reativa, onde ocorreu uma diferença de 102,4 Mvar (40,96 %).

A Figura 30 mostra a comparação da curva P $\times$ V na barra 2 entre FPC convencional e o FPC modificado. O carregamento máximo do sistema passou de 250 MW para 292,7 MW, ou seja, um ganho de 42,7 MW (17,08 % superior) na margem de carregamento.

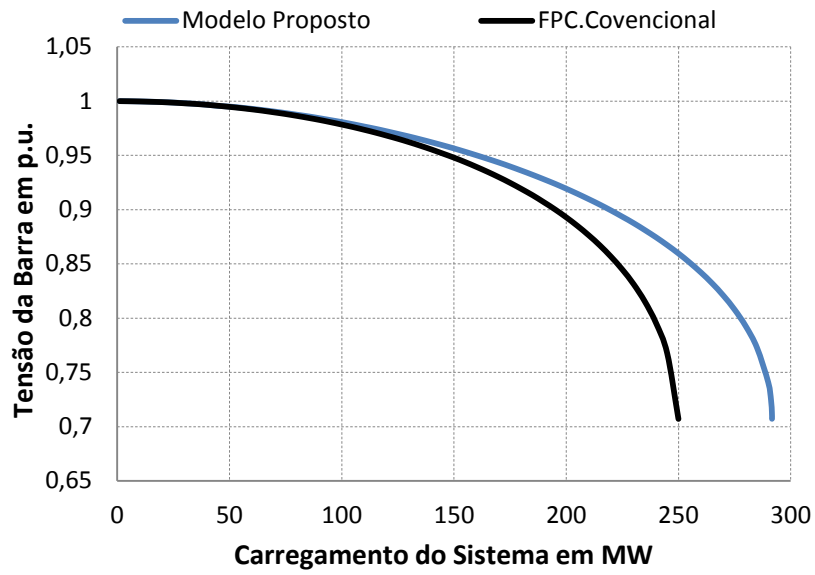


Figura 30 - Comparação da tensão na barra 2 entre o FPC e o modelo proposto

A Figura 31 mostra o comportamento do menor autovalor da matriz Jacobiana reduzida, utilizando a metodologia proposta, quando há um incremento no carregamento do sistema. Nota-se que, à medida que o sistema atinge o máximo carregamento o autovalor da matriz Jacobiana reduzida vai para o valor zero.

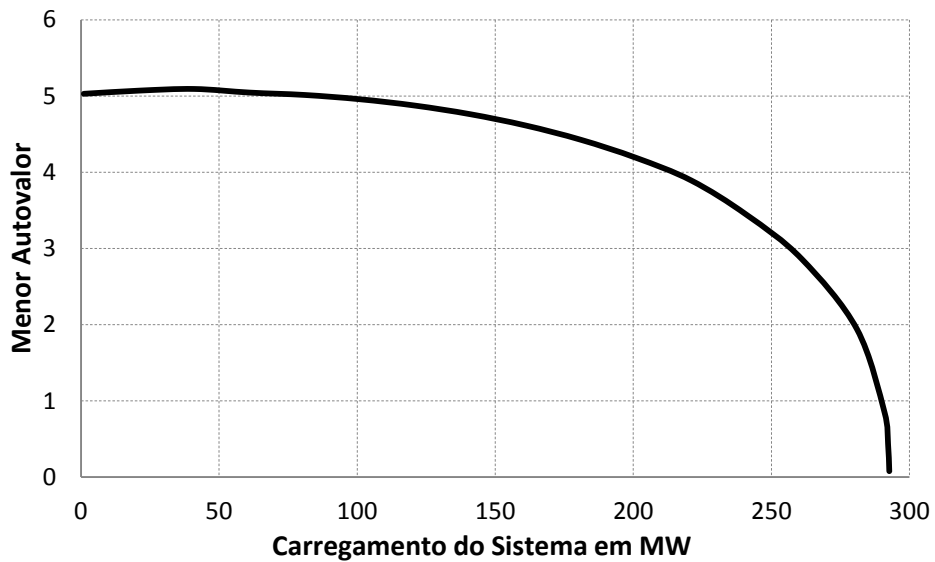


Figura 31 – Menor autovalor da matriz Jacobiana reduzida (sistema teste 1)

É importante destacar novamente que foi feita a consideração de um regulador com queda de velocidade neste sistema apenas para permitir uma avaliação de sensibilidade do efeito da variação da frequência em relação ao ponto de máximo carregamento.

### 5.2.2 Segunda Avaliação

Nesta avaliação será feita a incorporação de cargas tipo motor de indução no sistema teste 1.

Na modelagem proposta em [8] foram apresentados parâmetros de sete motores típicos definidos na literatura [24] [39] [50]. A Tabela 5 mostra os motores de indução típicos e a Tabela 6 seus respectivos parâmetros. Neste trabalho adotou-se os motores típicos utilizados de números 4 e 5 para estudos de sistemas com motor de indução.

Tabela 5 - Motores de indução típicos

<i>Tipo</i>	<i>Motor relacionado</i>
1	Industrial Pequeno
2	Industrial Grande 1
3	Valores médios para motores de 11 KVA
<b>4</b>	<b>Industrial Pequeno 2</b>
<b>5</b>	<b>Comercial + Alimentador</b>
6	Residencial Agregado
7	Monofásico

Tabela 6 - Parâmetros do motores de indução típicos

<i>Tipo</i>	<i>Parâmetros em % na base do motor</i>				
	$R_s$	$X_s$	$X_m$	$R_r$	$X_r$
1	3,1	10	320	1,8	18
2	1,3	6,7	380	0,9	17
3	1,6	6,3	96	0,9	1,6
<b>4</b>	<b>7,8</b>	<b>6,5</b>	<b>267</b>	<b>4,4</b>	<b>4,9</b>
<b>5</b>	<b>0,1</b>	<b>23</b>	<b>300</b>	<b>2,0</b>	<b>23</b>
6	7,7	10,7	222	7,9	9,8
7	11	12	200	11	13

Foram reproduzidos os resultados obtidos em [8] com o objetivo de se comparar com o modelo proposto.



As Figuras 32 e 33 mostram, respectivamente, a comparação entre as curvas de tensão na barra de carga e o consumo de potência reativa no motor em relação ao carregamento do sistema. Foi adotado o motor tipo 4 e a carga modelada como 100 % motor de indução.

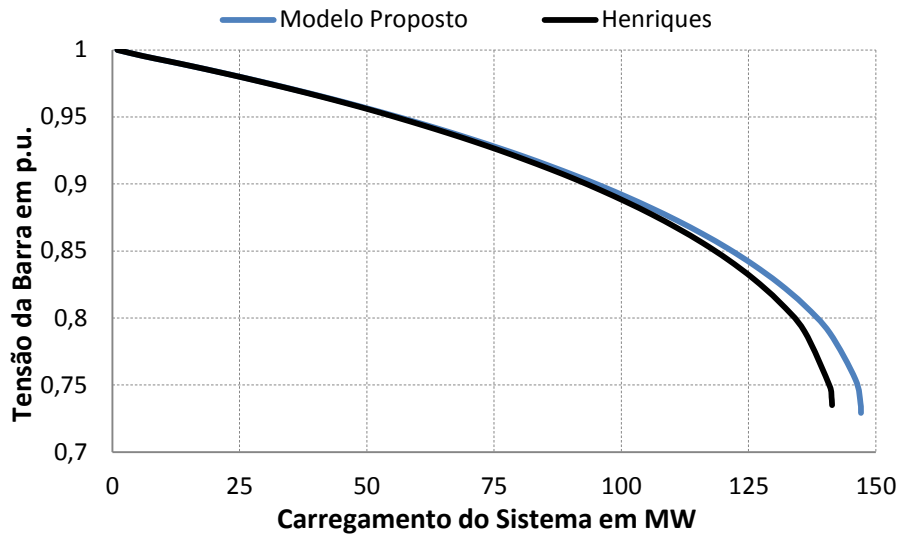


Figura 32 - Comparação das curvas PxV na barra 2 (sistema teste 1 + motor tipo 4)

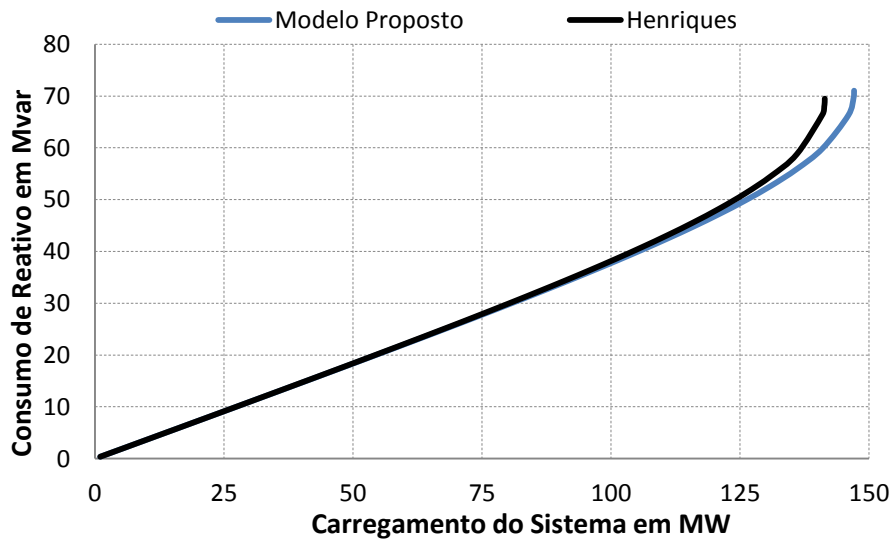


Figura 33 - Comparação das potências reativas no motor tipo 4

O ponto de máximo carregamento obtido pelo modelo proposto foi de 147,1 MW, com frequência de 58,54 Hz, enquanto que o obtido pelo modelo descrito em [8] foi de 141,4 MW, ou seja, houve um ganho de 5,7 MW (4,03 %) na margem de carregamento. A Figura 34 mostra a evolução da frequência do sistema em relação ao aumento no carregamento.

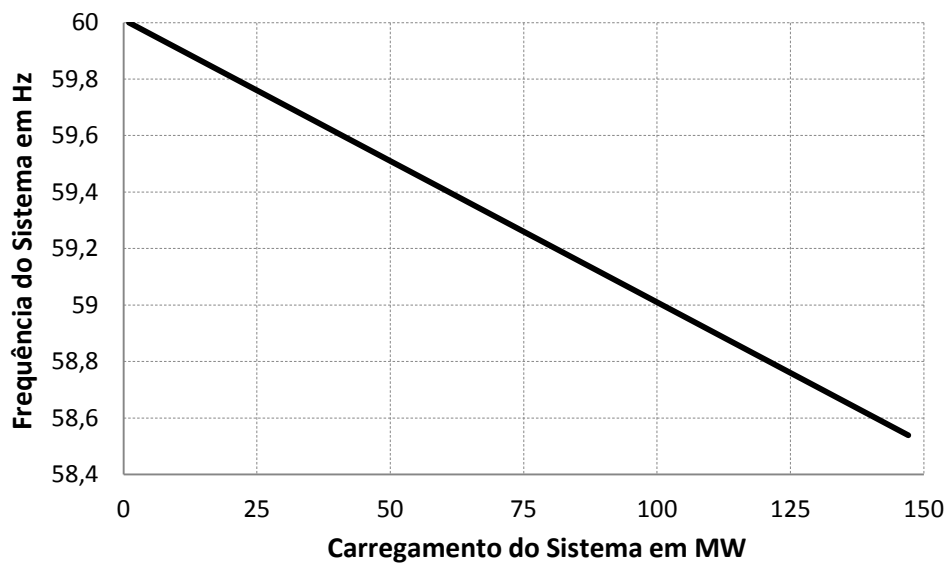


Figura 34 - Frequência do sistema versus aumento de carregamento (sistema teste 1 + motor tipo 4)

No modelo proposto em [8], ao se considerar um aumento no carregamento de uma carga modelada como motor de indução, significa que novos motores estão sendo inseridos em paralelo no sistema, afetando assim a reatância equivalente dos motores. As Figuras 35 e 36 mostram, respectivamente, a variação das reatâncias  $X'_s$  e  $X$  em relação ao carregamento do sistema.

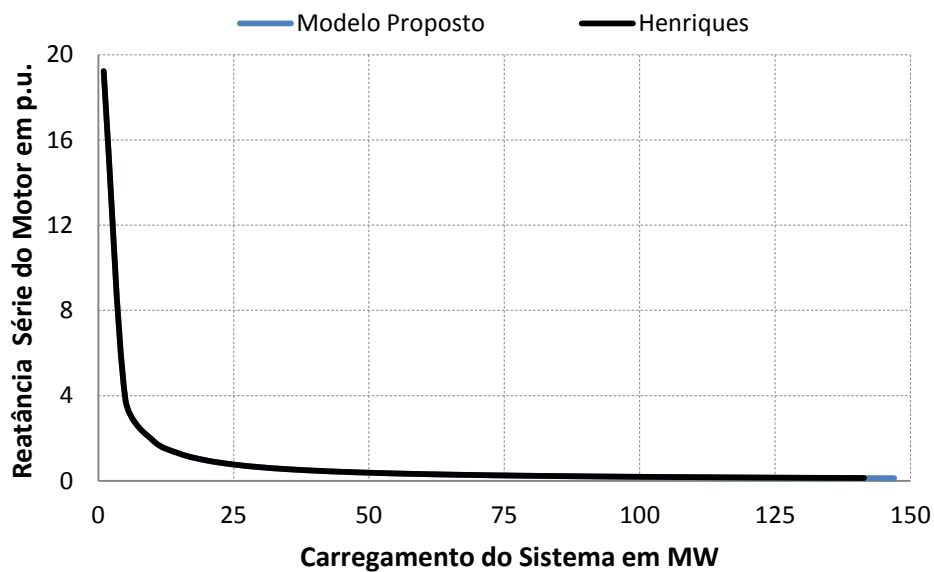


Figura 35 - Reatância série equivalente do motor versus aumento de carregamento

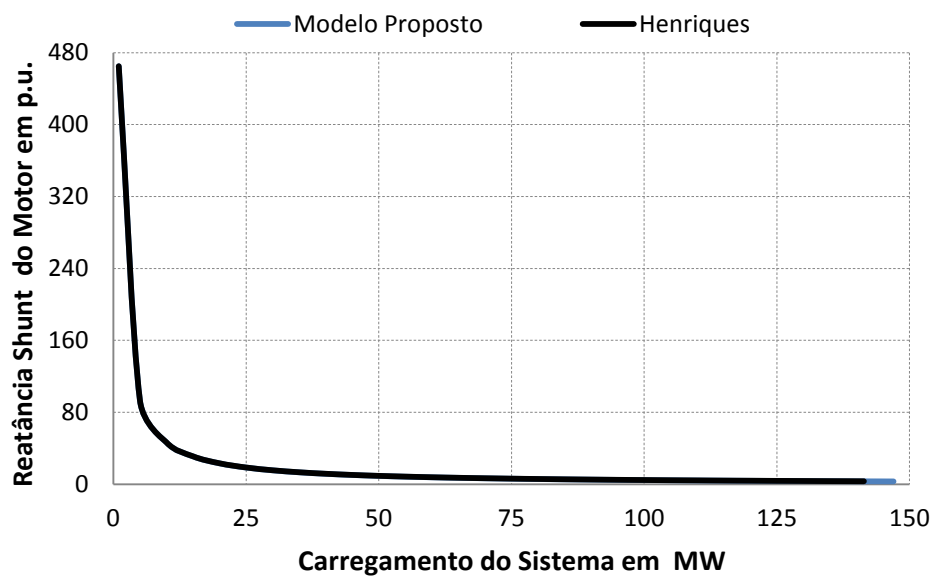


Figura 36 - Reatância shunt equivalente do motor vs aumento de carregamento

Ao se realizar o incremento na carga modelada como motor de indução, visualmente não é possível verificar diferenças nos parâmetros do motor, uma vez que para frequências baixas a reatância equivalente dos motores é quase desprezível (devido ao paralelismo do número de unidades de motores).

### 5.3 Sistema Teste 2

A Figura 37 mostra o sistema teste de 6 Barras, inicialmente proposto em [45], onde as barras de geração 1, 2 e 6 suprem as cargas conectadas nas barras 4 e 5. Na Tabela 7 estão descritos o estatismo dos geradores, tanto na base da máquina quanto na base do sistema.

Tabela 7 - Dados de estatismo e base de potência

<b>Gerador</b>	<b>Base de Potência (MVA)</b>	<b>Estatismo na base da máquina</b>	<b>Estatismo na base do sistema (100 MVA)</b>
1	100	0,05	0,05
2	200	0,05	0,025
3	50	0,05	0,1

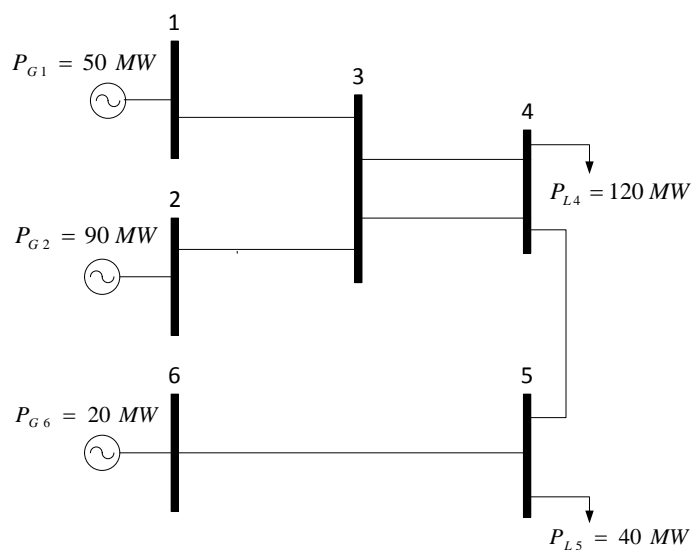


Figura 37 - Topologia do sistema teste de 6 Barras

### 5.3.1 Primeira Avaliação

Nesta primeira avaliação será feita a comparação do FPRP com o modelo proposto, onde os parâmetros da rede são modificados de acordo com o valor da frequência do sistema. Nesta avaliação será realizado um acréscimo de 60 MW na carga da barra 4 e um acréscimo de 30 MW na carga da barra 5.

A Tabela 8 mostra a comparação dos resultados para ambas metodologias. Para o modelo proposto, o sistema convergiu com 3 iterações e as tolerâncias de potência ativa e reativa para o processo iterativo foram de  $10^{-5}$  p.u.. Para o sistema sem perdas a frequência de operação pode ser obtida analiticamente, de acordo com a equação (5.14). Esta equação está definida em [23].

Tabela 8 - Comparação entre o FPRP e o MP para o sistema 6 Barras sem perdas

Barra	Tensão (p.u.)		Ângulo (°)		Geração Ativa (MW)		Geração Reativa (Mvar)	
	FPRP	M.P.	FPRP	M.P.	FPRP	M.P.	FPRP	M.P.
1	1,024	1,024	0,0	0	75,7	75,7	23,7	23,4
2	1,021	1,021	-3,0	-2,9	141,4	141,4	54,0	53,1
3	0,989	0,990	-8,6	-8,5	0,0	0,0	0,0	0,0
4	0,963	0,965	-20,4	-20,1	0,0	0,0	0,0	0,0

Barra	Tensão (p.u.)		Ângulo (°)		Geração Ativa (MW)		Geração Reativa (Mvar)	
	FPRP	M.P.	FPRP	M.P.	FPRP	M.P.	FPRP	M.P.
5	0,984	0,984	-41,1	-40,5	0,0	0,0	0,0	0,0
6	1,004	1,004	-37,3	-36,7	32,9	32,9	11,4	11,1

$$\Delta f = \frac{\Delta P_L}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_{ng}}} \quad (5.14)$$

Na equação (5.14),  $\Delta P_L$  representa o aumento total de carga no sistema em p.u. e  $R_1$ ,  $R_2$  e  $R_{ng}$  o estatismo dos geradores na base do sistema. Substituindo os valores é possível obter a frequência no final do processo de solução.

$$f = 60 \cdot \left[ 1 - \frac{0,9}{\frac{1}{0,05} + \frac{1}{0,025} + \frac{1}{0,1}} \right] = 59,2286 \quad (5.15)$$

A frequência da equação (5.15) foi encontrada com exatidão tanto pelo FPRP quanto para o modelo proposto. A tensão e o ângulo tiveram diferenças pouco significativas, tendo o maior desvio a geração de potência reativa da barra 2, onde o modelo proposto apresentou um consumo menor da ordem de quase 1 Mvar.

Para validar os resultados obtidos foi utilizado o programa ANATEM. Este programa possui uma Opção de Execução, denominada “FREQ”, onde é ativada a dependência de parâmetros da rede CA equivalente com a frequência [44]. A Figura 38 mostra o resultado da frequência do gerador conectado na barra 1 e a Tabela 9 mostra a comparação entre os resultados do modelo proposto e o programa ANATEM. É importante destacar que a simulação foi realizada com a opção “FREQ” ativada. O evento foi simulado em 1 segundo com tempo total da simulação de 30 segundos.

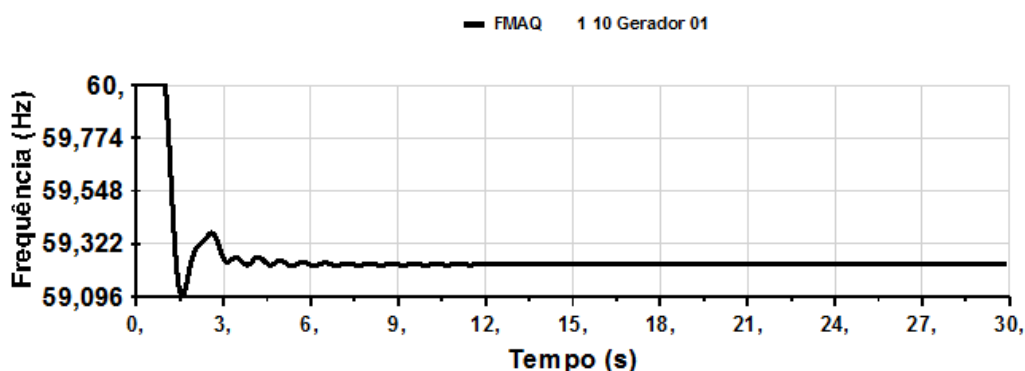


Figura 38 - Evolução da frequência no programa ANATEM (sistema teste 2 sem perdas)

Tabela 9 - Comparação entre o modelo proposto e o programa ANATEM (sistema teste 2 sem perdas)

Barra	Tensão (p.u.)		Ângulo (°)		Geração Ativa (MW)		Geração Reativa (Mvar)	
	ANATEM	M.P.	ANATEM	M.P.	ANATEM	M.P.	ANATEM	M.P.
1	1,0210	1,0210	0,0	0,0	75,7	75,7	23,7	23,7
2	1,0177	1,0177	-2,9	-2,9	141,4	141,4	53,5	53,5
3	0,9861	0,9861	-8,5	-8,5	0,0	0,0	0,0	0,0
4	0,9612	0,9612	-20,3	-20,3	0,0	0,0	0,0	0,0
5	0,9806	0,9806	-40,8	-40,8	0,0	0,0	0,0	0,0
6	1,0006	1,0006	37,0	-37,0	32,9	32,9	11,2	11,2

O ganho do regulador de tensão utilizado no programa ANATEM para esta simulação foi de 100. Este ganho modificou as tensões das barras de geração (1, 2 e 6), modificando assim a solução do problema. Essas diferenças podem ser percebidas comparando a Tabela 8 com Tabela 9 e verificando as tensões nas barras de geração (PV), que tem seus valores especificados.

Com o objetivo de validar o problema, as tensões nas barras de geração da Tabela 9, obtidas pelo programa ANATEM, foram substituídas pelos valores no caso base para o modelo proposto. Esta substituição tem a mesma aplicação que considerar o efeito do regulador de tensão no modelo proposto. Foram encontradas com exatidão as mesmas soluções obtidas pelo programa ANATEM. Como esperado a frequência determinada foi de 59,2286 Hz e o sistema convergiu com 3 iterações.

A Tabela 10 mostra a comparação entre os resultados do FPRP e o programa ANATEM com a opção “FREQ” desativada. Nota-se que as tensões nas barras de geração foram substituídas pelos valores no caso base do FPRP para validação do problema.

Tabela 10 - Comparação entre o FPRP e o programa ANATEM (sistema teste 2 sem perdas)

Barra	Tensão (p.u.)		Ângulo (°)		Geração Ativa (MW)		Geração Reativa (Mvar)	
	ANATEM	FPRP	ANATEM	FPRP	ANATEM	FPRP	ANATEM	FPRP
1	1,0210	1,0210	0,0	0,0	75,7	75,7	24,0	24,0
2	1,0177	1,0177	-3,0	-3,0	141,4	141,4	54,4	54,4
3	0,9851	0,9851	-8,7	-8,7	0,0	0,0	0,0	0,0
4	0,9594	0,9594	-20,6	-20,6	0,0	0,0	0,0	0,0
5	0,9799	0,9799	-41,4	-41,4	0,0	0,0	0,0	0,0
6	1,0006	1,0006	-37,6	-37,6	32,9	32,9	11,5	11,5

### 5.3.2 Segunda Avaliação

Nesta segunda avaliação será proposta a inclusão das perdas no sistema. A Figura 39 mostra o caso base do sistema 6 Barras utilizado nesta situação. Nota-se um aumento de 5,15 MW no gerador 1 (barra de referência), utilizado para fechar o balanço de geração, carga e as perdas elétricas do sistema.

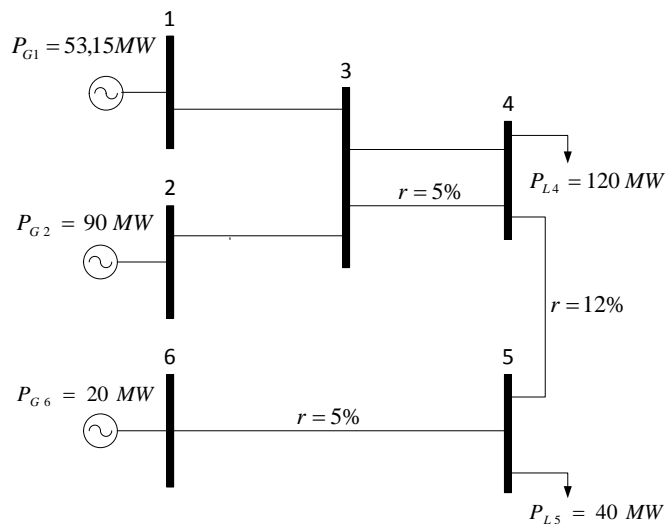


Figura 39 - Sistema teste 6 Barras considerando as perdas elétricas

Para os testes realizados foi considerado um acréscimo de 60 MW na carga da barra 4 e um acréscimo de 30 MW na carga da barra 5. A Tabela 11 mostra a comparação dos resultados para ambas metodologias.

Tabela 11 - Comparação entre o FPRP e o MP para o sistema 6 Barras com perdas

Barra	Tensão (p.u.)		Ângulo (°)		Geração Ativa (MW)		Geração Reativa (Mvar)	
	FPRP	M.P.	FPRP	M.P.	FPRP	M.P.	FPRP	M.P.
1	1,038	1,038	-0,0	-0,0	80,6	80,6	23,7	23,3
2	1,036	1,036	-3,3	-3,3	144,9	144,8	53,9	52,8
3	1,004	1,005	-8,9	-8,8	0,0	0,0	0,0	0,0
4	0,953	0,955	-21,0	-20,7	0,0	0,0	0,0	0,0
5	0,971	0,972	-43,2	-42,5	0,0	0,0	0,0	0,0
6	1,020	1,020	-39,7	-39,1	33,7	33,7	17,3	17,1

O modelo proposto convergiu com 3 iterações, com frequência final de 59,1774 Hz enquanto no FPRP a frequência final foi de 59,1770 Hz. Novamente a solução do problema para ambas metodologias foram parecidas. Nota-se que a inclusão da frequência no cálculo dos parâmetros da rede afeta principalmente o consumo de potência reativa.

Novamente será utilizado o programa ANATEM para a validação dos resultados. A Figura 40 mostra a evolução da frequência durante a simulação do evento, aplicada no instante de tempo igual a 1 segundo, com tempo total de simulação igual a 30 segundos. É importante destacar que a simulação foi realizada com a opção “FREQ” ativada.

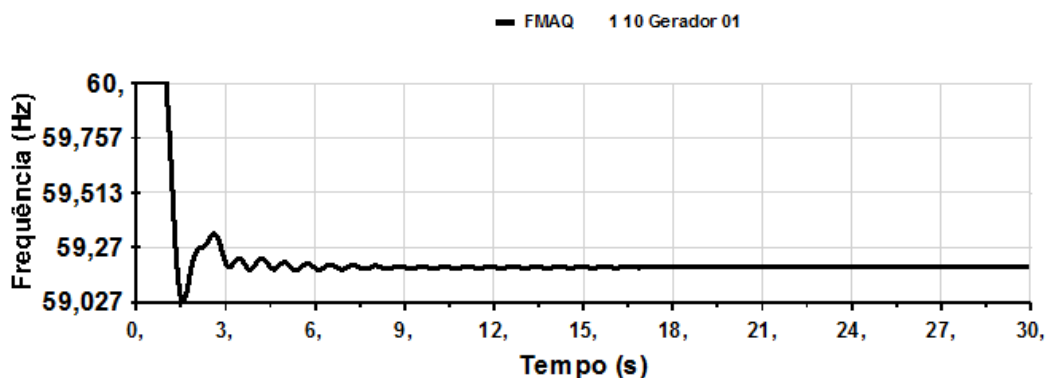


Figura 40 - Evolução da frequência no programa ANATEM (sistema teste 2 com perdas)



A Tabela 12 mostra a comparação dos resultados obtidos entre o ANATEM e o modelo proposto.

Tabela 12 - Solução do sistema teste 2 com perdas utilizando o programa ANATEM

Barra	Tensão (p.u.)		Ângulo (°)		Geração Ativa (MW)		Geração Reativa (Mvar)	
	ANATEM	M.P.	ANATEM	M.P.	ANATEM	M.P.	ANATEM	M.P.
1	1,0342	1,0342	0,0	0,0	80,6	80,6	23,7	23,7
2	1,0318	1,0318	-3,3	-3,3	144,9	144,9	<b>53,4</b>	<b>53,3</b>
3	1,0008	1,0008	-8,8	-8,8	0,0	0,0	0,0	0,0
4	0,9501	0,9501	-20,9	-20,9	0,0	0,0	0,0	0,0
5	0,9671	0,9671	-42,9	-42,9	0,0	0,0	0,0	0,0
6	1,0154	1,0154	-39,6	-39,6	33,7	33,7	17,2	17,2

O ganho do regulador de tensão utilizado no programa ANATEM novamente modificou as tensões das barras de geração (1, 2 e 6), modificando a solução do problema. Nos resultados apresentados na Tabela 12, foram substituídos os valores das tensões das barras de geração encontrados pelo ANATEM no caso base de operação do modelo proposto. O modelo proposto conseguiu reproduzir os resultados com exatidão, com exceção do valor de geração reativa na barra 2, que está destacado em negrito. A frequência encontrada para esta situação operativa foi de 59,1765 Hz, a mesma encontrada no programa ANATEM.

### 5.3.3 Terceira Avaliação

Nesta avaliação será utilizado o FPC com objetivo de não só avaliar o máximo carregamento, mas também o perfil das tensões, frequência e geração de potência ativa e reativa do sistema. Para este teste foi utilizado o sistema teste 2 sem perdas, descrito na Figura 37. Com a utilização do FPC será possível fazer uma comparação mais ampla entre FPRP e o modelo proposto, sendo possível a análise em qualquer ponto de carregamento do sistema. As Figuras 41 e 42 mostram as comparações de ambas metodologias utilizando o FPC. A Figura 41 mostra as curvas de variação de tensão das barras de carga (4 e 5) e a Figura 42 a variação da frequência em relação ao carregamento total do sistema.

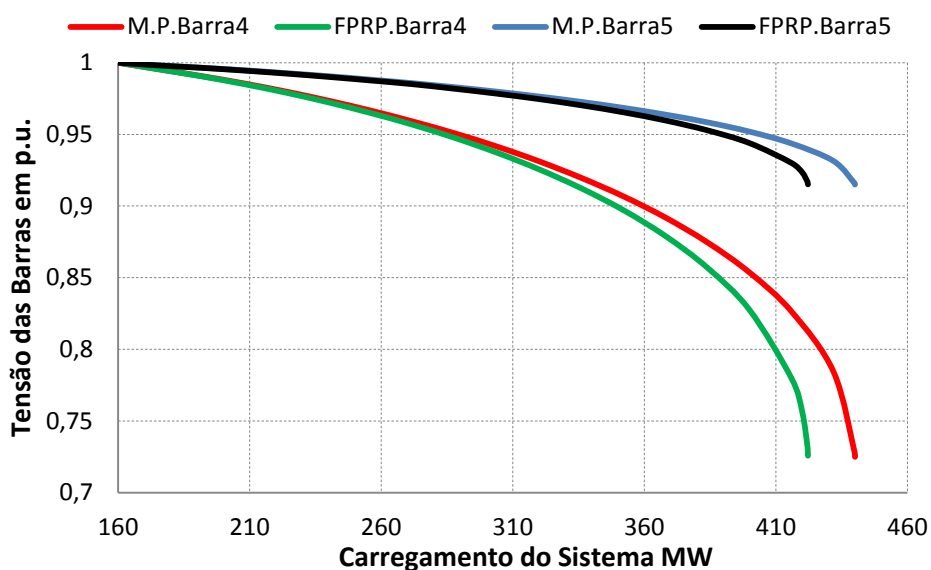


Figura 41 - Tensão nas barras 4 e 5 versus aumento do carregamento (sistema teste 2)

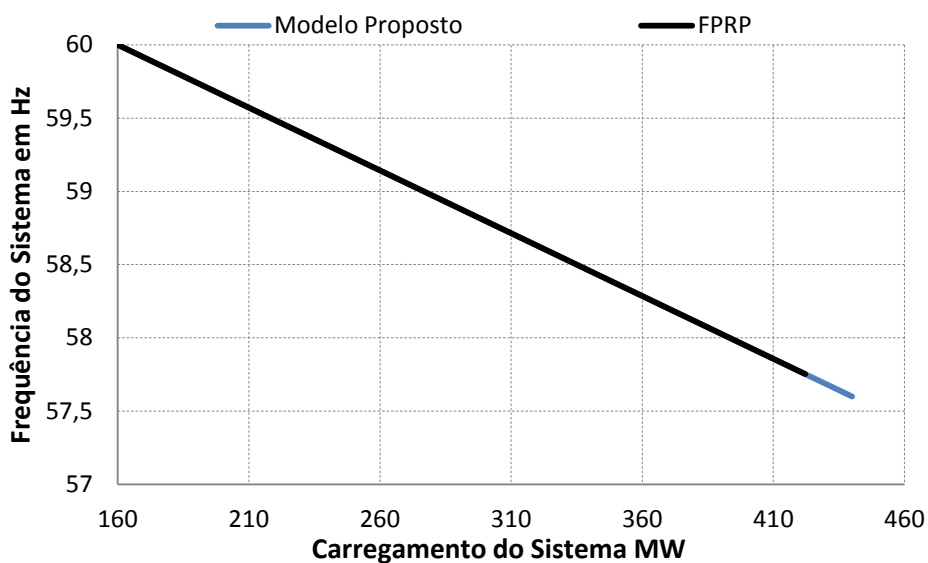


Figura 42 - Frequência do sistema versus aumento do carregamento (sistema teste 2)

O ponto de máximo carregamento obtido pelo modelo proposto foi de 440,05 MW, com frequência de 57,5996 Hz, enquanto o FPRP o máximo carregamento foi de 422,19 MW com frequência de 57,7526 Hz, ou seja, um ganho de 17,86 MW (4,23 %) na margem de carregamento.

Ao longo do processo de carregamento, o método de Newton-Raphson começa a encontrar dificuldades em sua convergência. A Tabela 13 mostra com quantas iterações

ambas metodologias convergiram para um determinado carregamento, considerando-se a tolerância do processo iterativo igual  $10^{-4}$  p.u..

Tabela 13 - Número de iterações para solução em um determinado carregamento

Carregamento (MW)	Iterações	
	M.P	FPRP
210	2	2
310	3	3
410	4	5

As Figuras 43 e 44 mostram, respectivamente, a comparação do perfil de geração de potência ativa e reativa para ambas metodologias em relação ao carregamento total do sistema.

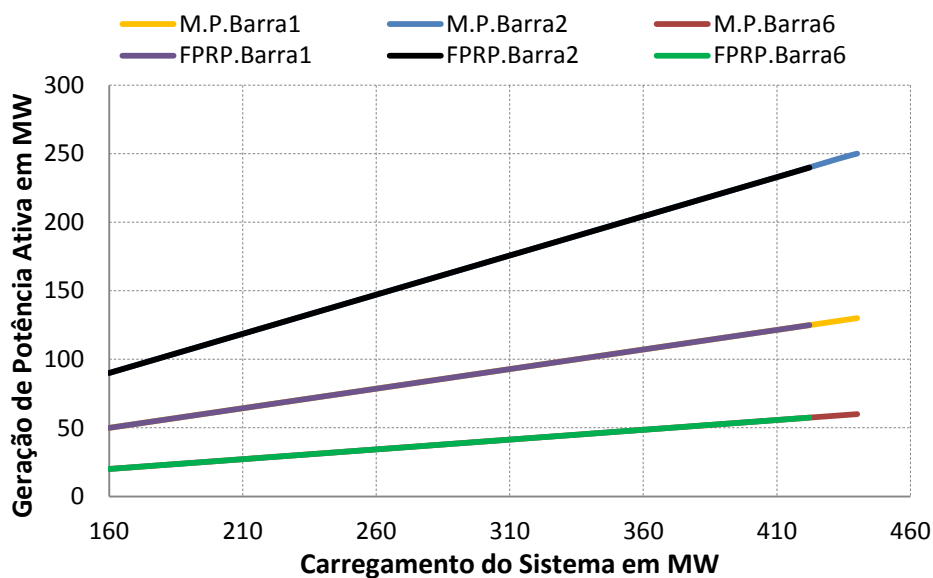


Figura 43 - Geração ativa versus aumento do carregamento (sistema teste 2)

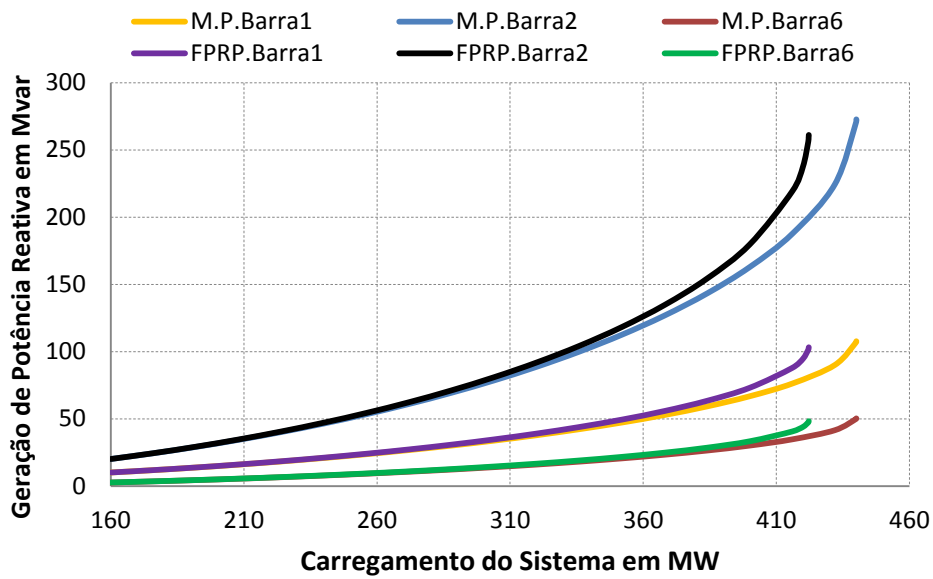


Figura 44 - Geração reativa versus aumento do carregamento (sistema teste 2)

Com o aumento do carregamento, a frequência do sistema vai ficando cada vez menor, diminuindo consequentemente as reatâncias da rede. Com reatâncias menores, o sistema consome menos potência reativa.

A Figura 45 mostra o comportamento do menor autovalor da matriz Jacobiana reduzida, utilizando-se a metodologia proposta, em relação ao incremento de carga do sistema. Novamente o autovalor da matriz Jacobiana reduzida tende a zero quando o sistema está no ponto limite de carregamento.

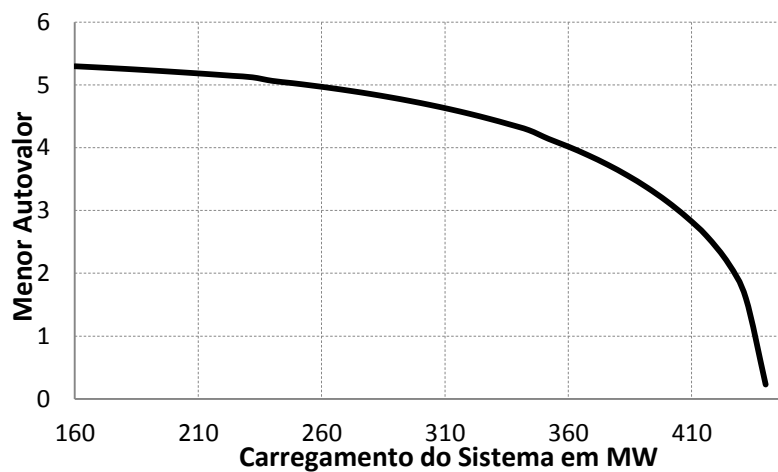


Figura 45 - Menor autovalor da matriz Jacobiana reduzida (sistema teste 2)

Com o objetivo de validar os resultados obtidos pelo modelo proposto foi utilizado o FPO para determinar o estado de máximo carregamento da rede, utilizando a modelagem descrita na seção 4.2. A Tabela 14 mostra a comparação das tensões em todas as barras do sistema, geração ativa e reativa, encontradas pelo FPO e o modelo proposto.

Tabela 14 - Comparação entre o FPO e o modelo proposto (sistema teste 2)

Barra	Tensão (p.u.)		Ângulo (°)		Geração Ativa (MW)		Geração Reativa (Mvar)	
	FPO	M.P.	FPO	M.P.	FPO	M.P.	FPO	M.P.
1	1,0240	1,0240	0,0	0,0	130,02	1300,0	108,92	107,0
2	1,0210	1,0210	-5,47	-4,44	250,05	250,0	276,11	270,7
3	0,8553	0,8588	-16,56	-16,49	0,0	0,0	0,0	0,0
4	0,7207	0,7276	-48,75	-48,19	0,0	0,0	0,0	0,0
5	0,9138	0,9157	-89,76	-88,60	0,0	0,0	0,0	0,0
6	1,0040	1,0040	-82,54	-81,40	60,1	60,0	50,93	50,0

O FPO encontrou uma frequência de 57,5993 Hz com fator de carregamento de 1,7505, enquanto que o modelo proposto determinou a frequência de 57,5996 Hz, com fator de carregamento de 1,7503. Analisando a Tabela 14 verifica-se que o FPO encontrou uma maior queda das tensões nas barras 3, 4 e 5 (barras de carga) e uma maior geração de potência ativa e reativa.

As pequenas diferenças encontradas entre FPO e o modelo proposto já eram esperadas, visto que o FPO tem como função objetivo o máximo carregamento do sistema enquanto o modelo proposto usa um critério de incremento mínimo como critério de parada do método da continuação (diferenças entre constantes e critérios).

#### 5.3.4 Quarta Avaliação

Nesta avaliação será proposta a inclusão de cargas tipo motor de indução no sistema teste 2, e será aplicado o FPC para a avaliação deste sistema. A carga conectada na barra 4 será modelada como um motor tipo 4 e a carga conectada na barra 5 será modelada como um motor tipo 5, tal como definidos na Tabela 6. Ambas as cargas serão modelados como 100 % motor de indução e a Figura 46 mostra o diagrama desta situação.

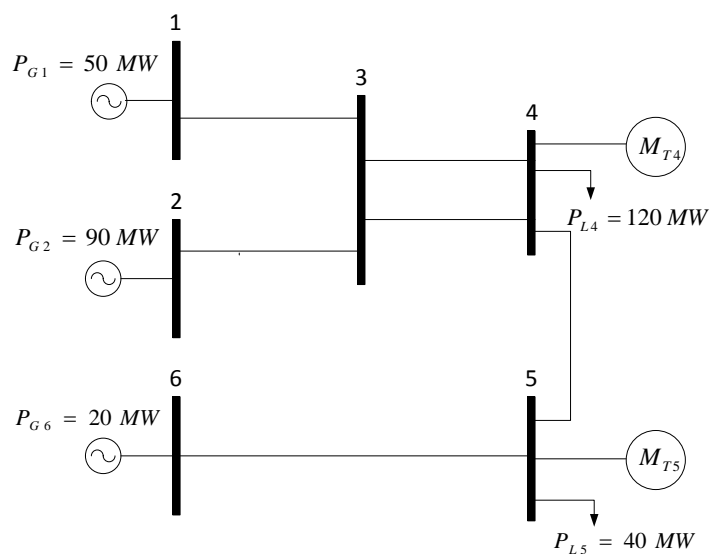


Figura 46 - Topologia do sistema 6 Barras + motor de indução

A Figura 47 mostra a evolução do perfil das tensões nas barras 4 e 5 com o aumento do carregamento. Comparando este gráfico com o da Figura 41, onde não existe carga modelada como motor de indução, percebe-se uma queda mais acentuada da tensão da barra 5, devido ao grande consumo de potência reativa do motor tipo 5 conectado a ela.

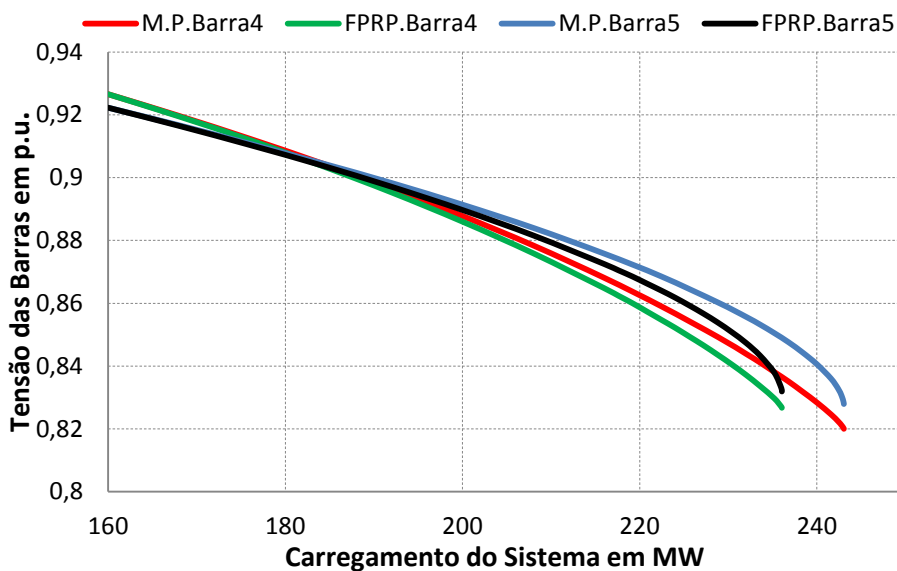


Figura 47 - Evolução da tensão nas barras 4 e 5 ( sistema teste 2 + motor de indução)

A Figura 48 mostra a evolução da variação da frequência sistema. O ponto de máximo carregamento obtido com o modelo proposto foi de 243,05 MW, com frequência de 59,2881

Hz, enquanto no FPRP o carregamento máximo do sistema foi de 236,05 MW, com frequência de 59,3481 Hz. Nota-se um ganho de 7 MW (3 %) na margem de carregamento.

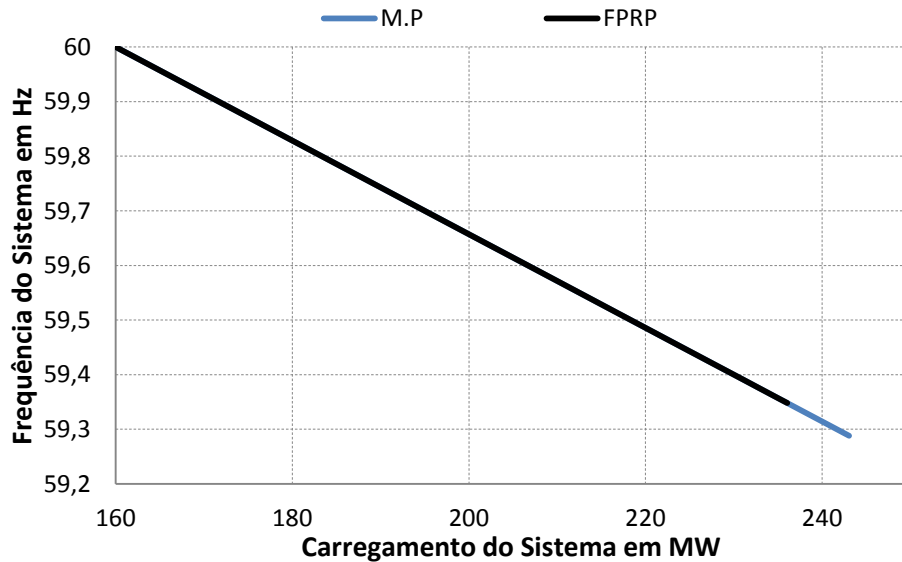


Figura 48 - Evolução da frequência (sistema teste 2 + motor de indução)

As Figuras 49 e 50 mostram, respectivamente, a evolução de geração ativa e reativa de todos geradores. Novamente as diferenças entre as soluções acontecem em pontos próximos ao máximo carregamento do sistema.

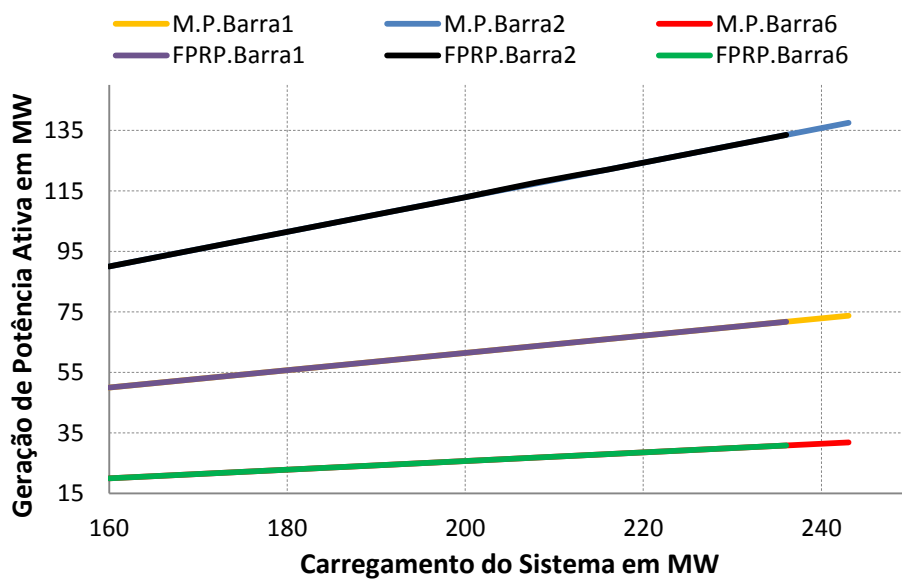


Figura 49 - Evolução da geração de potência ativa (sistema teste 2 + motor de indução)

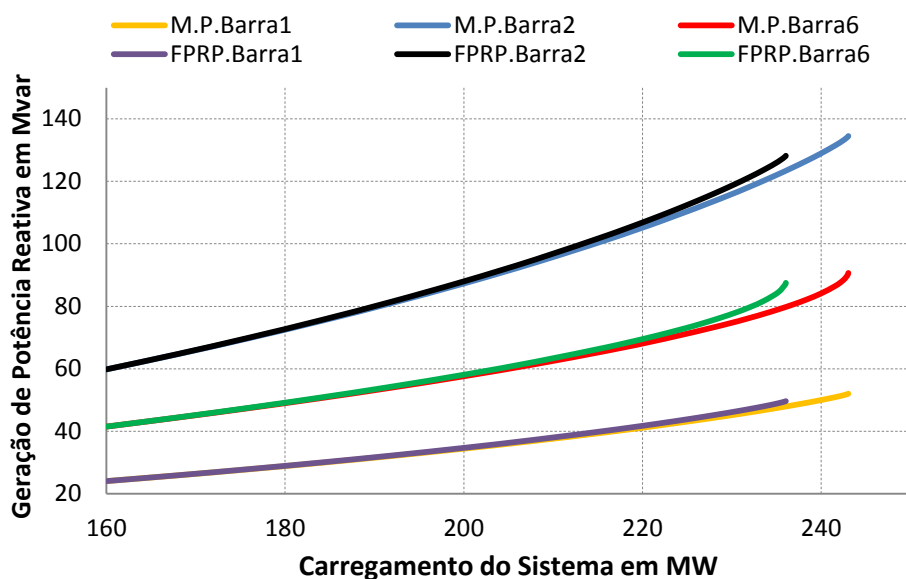


Figura 50 - Evolução da geração de potência reativa (sistema teste 2 + motor de indução)

Como tanto a barra 4 quanto a barra 5 estão modeladas como 100 % motor de indução, a medida que o sistema vai ficando mais carregado, haverá um aumento do número de motores de indução conectados em paralelo nas referidas barras. Devido ao aumento do número de motores, haverá consequentemente um aumento no consumo de potência reativa, impactando diretamente na diminuição da margem de carregamento do sistema, quando comparado a situação onde não há carga modelada como motor de indução.

#### 5.4 Sistema Teste 3

A topologia básica do sistema teste de 16 Barras é mostrada na Figura 51. Destaca-se que este sistema, apesar de pequeno porte, possui as principais características de sistemas de grande porte (representação de perdas, transformadores, equipamentos *shunts*, etc). Este sistema foi extraído a partir de dados do sistema de Furnas da região Goiás/Brasília, em três níveis de tensão (138 kV, 230 kV e 345 kV). O sistema possui duas áreas elétricas, a área 1 concentra a rede de alta tensão (345 kV) e a área 2 concentra a rede de baixa tensão (230 kV) [46].



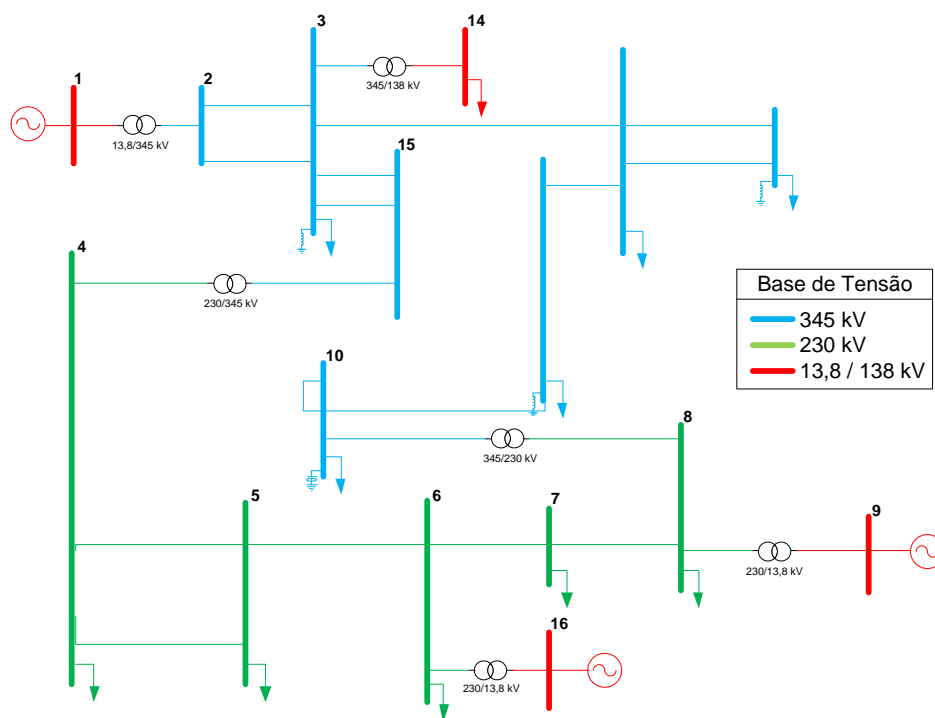


Figura 51 - Topologia do sistema teste de 16 barras

A Tabela 15 mostra a solução do FPRP para o caso base de operação e a frequência obtida foi de 60 Hz. A Tabela 16 mostra as bases de potências dos geradores conectados nas barras 1 e 16 e o estatismo do regulador com queda de velocidade conectado ao gerador de cada barra. É importante destacar que a barra 9 está conectada a um compensador síncrono.

Tabela 15 - Solução do FPRP (sistema teste 3)

Barra	Tensão		Geração		Carga	
	Mod (p.u.)	Ang (°)	(MW)	(Mvar)	(MW)	(Mvar)
<b>Área 1</b>						
1	0,970	7,2	200,0	-115,0	0,0	0,0
2	1,007	3,6	0,0	0,0	0,0	0,0
3	1,016	0,8	0,0	0,0	26,0	16,0
10	1,009	-1,7	0,0	0,0	23,0	16,0
11	1,022	-1,6	0,0	0,0	22,0	15,0
12	1,028	-1,0	0,0	0,0	56,0	31,0
13	1,027	-1,2	0,0	0,0	33,0	19,0
14	1,010	-0,7	0,0	0,0	32,0	21,0
15	1,010	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0
<b>Área 2</b>						
4	1,049	-0,6	0,0	0,0	58,0	39,0
5	1,039	0,2	0,0	0,0	16,0	11,0
6	1,012	1,8	0,0	0,0	10,0	7,0

<i>Barra</i>	<i>Tensão</i>		<i>Geração</i>		<i>Carga</i>	
	<i>Mod (p.u.)</i>	<i>Ang (°)</i>	<i>(MW)</i>	<i>(Mvar)</i>	<i>(MW)</i>	<i>(Mvar)</i>
7	1,020	0,2	0,0	0,0	9,0	8,0
8	1,020	-0,9	0,0	0,0	21,0	13,0
9	0,970	-0,9	0,0	-38,8	0,0	0,0
16	0,970	5,0	108,0	-77,9	0,0	0,0

Tabela 16 - Dados de estatismo e base de potência do sistema teste 3

<i>Gerador</i>	<i>Barra</i>	<i>Base de Potência (MVA)</i>	<i>Estatismo na base da máquina</i>	<i>Estatismo na base do sistema (100 MVA)</i>
1	1	422	0,05	0,01185
2	16	140	0,05	0,03571

#### 5.4.1 Primeira Avaliação

Nesta primeira avaliação foi realizado um aumento de 80 % nas cargas ativas e reativas conectadas nas barras 4, 5, 6, 7 e 8, ou seja, as barras de cargas situadas na área 2. O programa ANATEM foi utilizado na validação dos resultados.

A Tabela 17 mostra as comparações entre os resultados obtidos no programa ANATEM e o modelo proposto. Novamente o ganho do regulador de tensão introduziu um erro em regime permanente, desviando os valores das tensões especificadas nas barras de geração. As tensões obtidas nas barras 1, 9 e 16 pelo programa ANATEM foram utilizadas no caso base para solução do modelo proposto. Nesta simulação a opção “FREQ” que ativa os parâmetros da rede CA com a frequência foi ativada.

Tabela 17 - Comparação da solução do sistema teste 3 entre o ANATEM e o modelo proposto

<i>Barra</i>	<i>Tensão (p.u.)</i>		<i>Ângulo (°)</i>		<i>Geração Ativa (MW)</i>		<i>Geração Reativa (Mvar)</i>	
	<i>ANATEM</i>	<i>M.P.</i>	<i>ANATEM</i>	<i>M.P.</i>	<i>ANATEM</i>	<i>M.P.</i>	<i>ANATEM</i>	<i>M.P.</i>
1	0,9656	0,9656	11,43	11,43	269,3	269,3	-59,3	-59,3
2	0,9874	0,9874	6,61	6,61	0,0	0,0	0,0	0,0
3	0,9839	0,9839	2,70	2,70	0,0	0,0	0,0	0,0
4	0,9923	0,9923	-1,83	-1,83	0,0	0,0	0,0	0,0
5	0,9904	0,9904	-1,04	<b>-1,05</b>	0,0	0,0	0,0	0,0
6	0,9814	0,9814	1,06	1,06	0,0	0,0	0,0	0,0
7	0,9870	0,9870	-0,78	-0,78	0,0	0,0	0,0	0,0
8	0,9899	0,9899	-1,73	-1,73	0,0	0,0	0,0	0,0

Barra	Tensão (p.u.)		Ângulo (°)		Geração Ativa (MW)		Geração Reativa (Mvar)	
	ANATEM	M.P.	ANATEM	M.P.	ANATEM	M.P.	ANATEM	M.P.
9	0,9668	0,9668	-1,73	-1,73	0,0	0,0	-18,0	-18,0
10	0,9752	0,9752	-1,38	-1,38	0,0	0,0	0,0	0,0
11	0,9876	<b>0,9875</b>	-0,80	-0,80	0,0	0,0	0,0	0,0
12	0,9935	<b>0,9934</b>	0,47	0,47	0,0	0,0	0,0	0,0
13	0,9922	<b>0,9921</b>	0,24	0,24	0,0	0,0	0,0	0,0
14	0,9776	<b>0,9775</b>	1,14	1,14	0,0	0,0	0,0	0,0
15	0,9679	0,9679	1,06	1,06	0,0	0,0	0,0	0,0
16	0,9624	0,9624	5,0	5,0	131,0	131,0	-32,3	-32,3

Para este caso foi utilizado uma tolerância de  $10^{-4}$  p.u. e a metodologia proposta convergiu com 3 iterações, com frequência de 59,5071 Hz. Na Tabela 17 estão em destaque os resultados que não convergiram com exatidão, porém os desvios aparecem apenas na quarta casa decimal. A Figura 52 mostra a evolução da frequência do gerador conectado na barra 16 utilizando o programa ANATEM. O evento teve um tempo total de 30 segundos de simulação, e o mesmo evento foi aplicado no instante de tempo igual a 1 segundo. O programa ANATEM, após o tempo de simulação, obteve a frequência de 59,5071 Hz. É importante destacar que o programa ANATEM considera nos cálculos a média da frequência dos geradores, ponderada pelas inércias das máquinas geradoras [31].

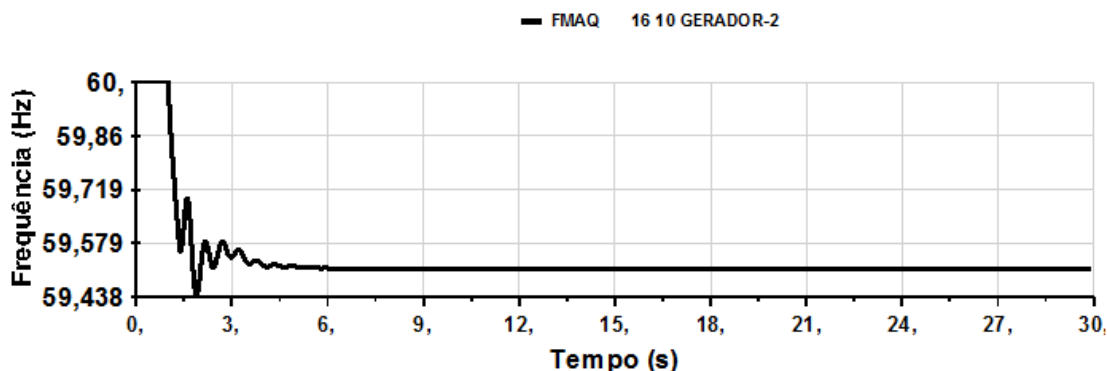


Figura 52 - Evolução da frequência no programa ANATEM com freq ligado (sistema teste 3)

Para este mesmo evento em questão, foram gerados os mesmo resultados utilizando o FPRP. A Tabela 18 mostra a comparação entre os resultados obtidos no FPRP e no programa ANATEM com a opção “FREQ” desativada. Nota-se que as tensões nas barras de geração foram substituídas pelos valores no caso base do FPRP para validação do problema.

A Figura 53 mostra a evolução da frequência do gerador conectado na barra 16. O evento foi simulado em um segundo. O tempo total de simulação foi de 30 segundos, onde a frequência estabilizou em 59,5071 Hz.

Tabela 18 - Comparação da solução do sistema teste 3 entre o ANATEM e o FPRP

Barra	Tensão (p.u.)		Ângulo (°)		Geração Ativa (MW)		Geração Reativa (Mvar)	
	ANATEM	FPRP	ANATEM	FPRP	ANATEM	FPRP	ANATEM	FPRP
1	0,9658	0,9658	11,45	11,45	269,3	269,3	-64,0	-64,0
2	0,9893	<b>0,9892</b>	6,60	6,60	0,0	0,0	0,0	0,0
3	0,9869	<b>0,9868</b>	2,67	2,67	0,0	0,0	0,0	0,0
4	0,9947	0,9947	-1,87	-1,87	0,0	0,0	0,0	0,0
5	0,9925	0,9925	-1,08	<b>-1,09</b>	0,0	0,0	0,0	0,0
6	0,9827	0,9827	1,03	1,03	0,0	0,0	0,0	0,0
7	0,9887	0,9887	-0,82	-0,82	0,0	0,0	0,0	0,0
8	0,9917	0,9917	-1,77	-1,77	0,0	0,0	0,0	0,0
9	0,9670	0,9670	-1,77	-1,77	0,0	0,0	-19,2	<b>-19,1</b>
10	0,9784	0,9784	-1,42	-1,42	0,0	0,0	0,0	0,0
11	0,9912	0,9912	-0,84	-0,84	0,0	0,0	0,0	0,0
12	0,9971	<b>0,9970</b>	-0,43	-0,43	0,0	0,0	0,0	0,0
13	0,9959	<b>0,9958</b>	0,20	0,20	0,0	0,0	0,0	0,0
14	0,9804	0,9804	1,10	1,10	0,0	0,0	0,0	0,0
15	0,9707	0,9707	1,02	1,02	0,0	0,0	0,0	0,0
16	0,9626	0,9626	5,00	5,00	131,0	131,0	-34,1	-34,1

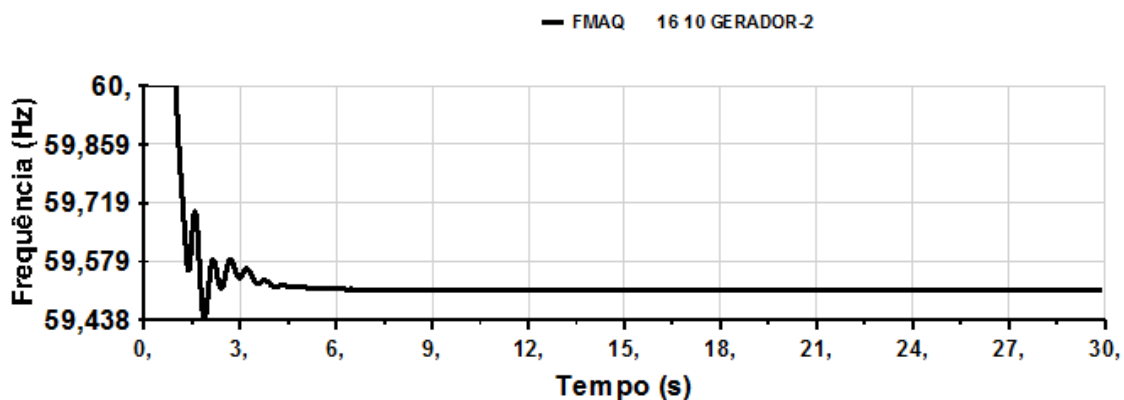


Figura 53 - Evolução da frequência no programa ANATEM com freq desligado (sistema teste 3)

#### 5.4.2 Segunda Avaliação

Nesta segunda avaliação será utilizado o FPC em ambas metodologias, tendo como objetivo avaliar o perfil das tensões, frequência e geração ativa e reativa do sistema em relação ao aumento do carregamento. Nesta avaliação foi realizado um aumento de carga em todas as barras PQ do sistema, sendo que as cargas foram modeladas como potência constante e o incremento de carga foi realizado com fator de potência constante.

A Figura 54 mostra a evolução dos geradores conectados nas barras 1 e 16. A Figura 55 mostra a evolução da variação da frequência do sistema. O modelo proposto obteve um carregamento máximo de 802,11 MW, com frequência de 57,18 Hz enquanto o FPRP obteve um carregamento máximo de 782,75 MW, com frequência de 57,30 Hz. Nota-se um aumento de 19,36 MW (2,47 %) na margem de carregamento.

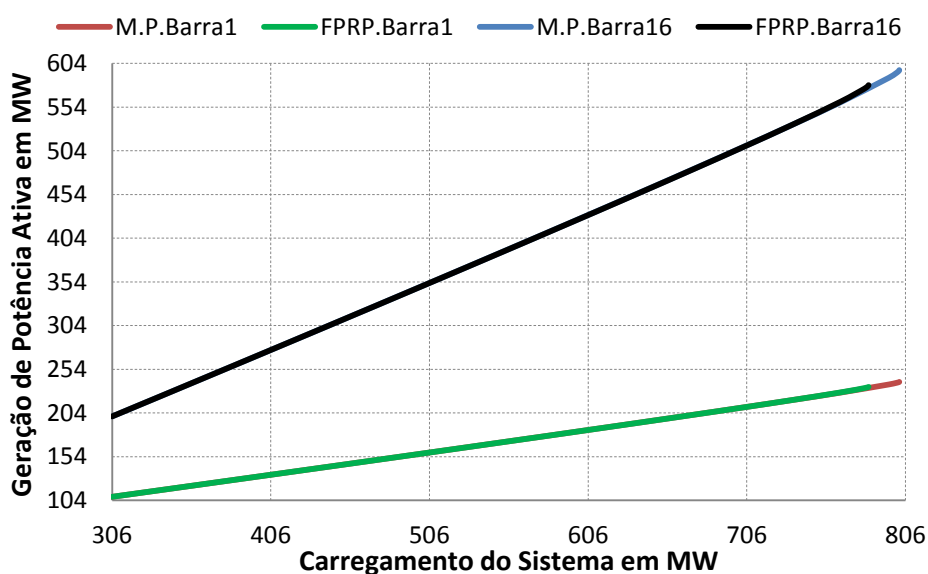


Figura 54 - Geração ativa versus aumento no carregamento (sistema teste 3)

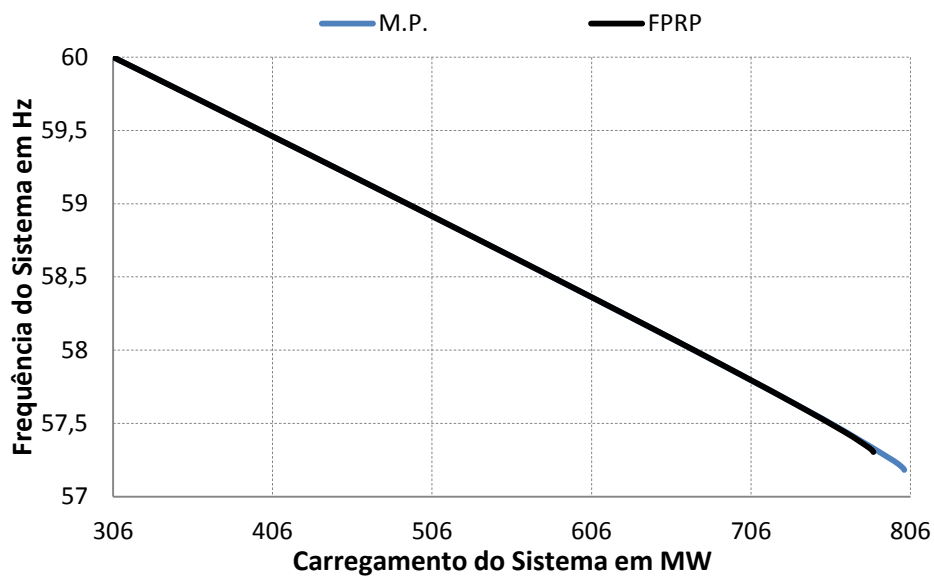


Figura 55 - Frequência do sistema versus aumento no carregamento (sistema teste 3)

A Figura 56 mostra a evolução das tensões nas barras 4 e 14, que são respectivamente, as barras com maior declínio de tensão nas áreas 2 e 1. A Figura 57 mostra a evolução da geração reativa em relação ao aumento do carregamento do sistema.

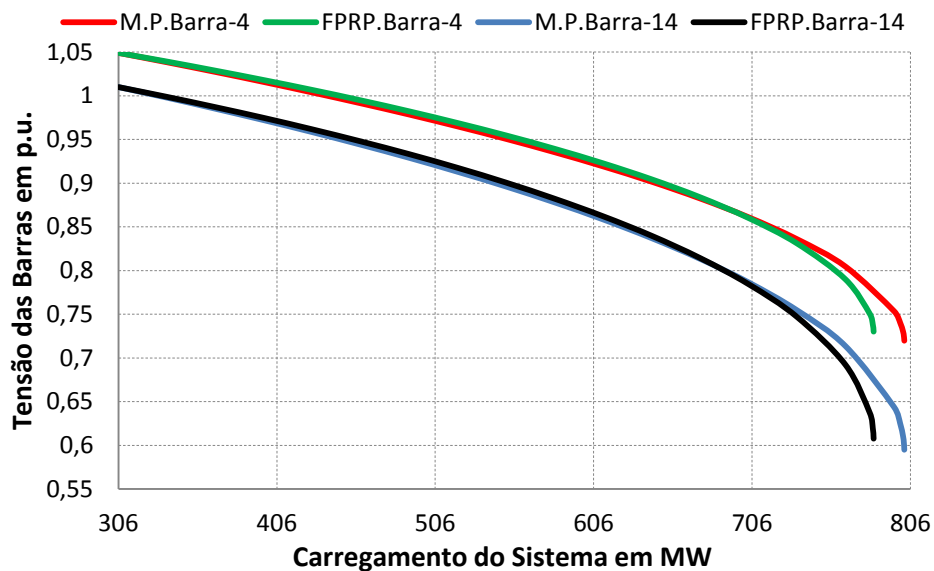


Figura 56 - Tensão nas barras 4 e 14 versus aumento no carregamento (sistema teste 3)

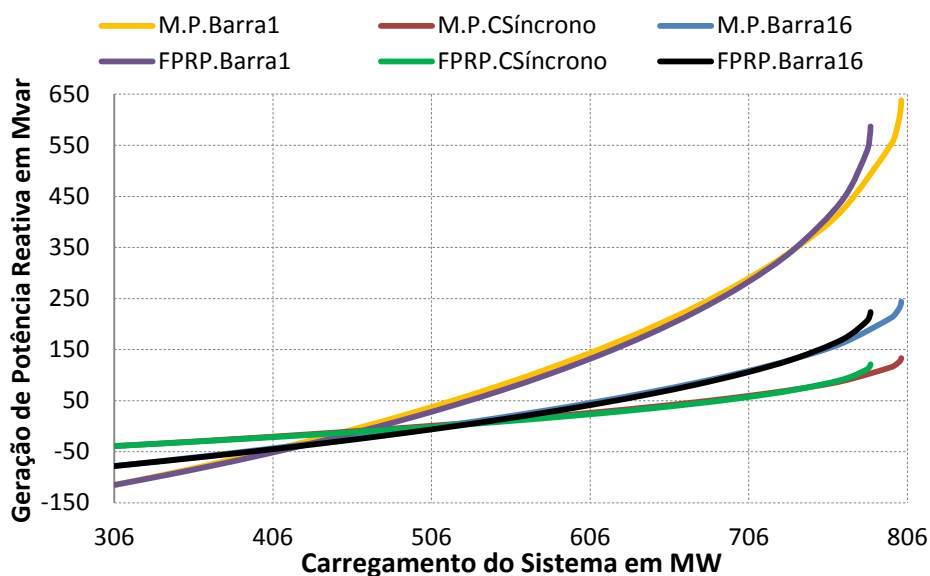


Figura 57 - Geração reativa versus aumento no carregamento (sistema teste 3)

Analisando o gráfico da Figura 56 percebe-se que, até um determinado carregamento, a curva de tensão do modelo proposto está abaixo do FPRP. Esta característica acontece porque os desvios de frequência diminuem os valores dos parâmetros *shunts*, resultando em um menor fornecimento de reativo para o sistema e ocasionando um maior esforço dos geradores para suprir a demanda. Esta situação pode ser verificada pela Figura 57.

A Tabela 19 mostra o número de iterações para um determinado carregamento comparando o FPRP e o modelo proposto. A tolerância para o processo iterativo adotada foi de  $10^{-4}$  p.u. para todos os parâmetros do vetor resíduo.

Tabela 19 - Número de iterações para solução em diversos carregamentos – Sistema 16 Barras

<i>Carregamento (MW)</i>	<i>Iterações</i>	
	<i>M.P</i>	<i>FPRP</i>
459	3	3
612	4	4
780	5	6

A Figura 58 mostra o comportamento do menor autovalor da matriz Jacobiana reduzida utilizando a metodologia proposta.

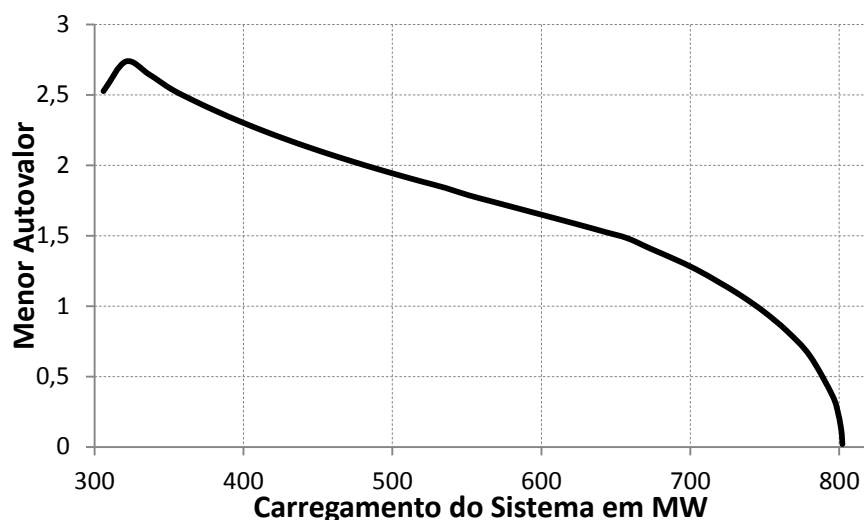


Figura 58 - Menor autovalor da matriz Jacobiana reduzida (sistema teste 3)

O FPO foi novamente utilizado com o objetivo de validar os resultados obtidos pelo modelo proposto no máximo carregamento do sistema. Neste ponto o FPO encontrou uma frequência de 57,1807 Hz, com fator de carregamento de 1,6214, enquanto no modelo proposto a frequência foi de 57,1827 Hz, com fator de carregamento de 1,6212. A Tabela 20 mostra a solução do problema no ponto de máximo carregamento tanto pelo FPO quanto pelo modelo proposto.

Tabela 20 - Comparação entre o FPO e o modelo proposto (sistema teste 3)

Barra	Tensão (p.u.)		Ângulo (°)		Geração Ativa (MW)		Potência Reativa (Mvar)	
	FPO	M.P.	FPO	M.P.	FPO	M.P.	FPO	M.P.
1	0,9700	0,9700	30,91	30,71	596,57	596,30	643,02	637,40
2	0,8000	0,8016	18,21	18,04	0,0	0,0	0,0	0,0
3	0,6673	0,6700	4,05	3,96	0,0	0,0	0,0	0,0
4	0,7179	0,7200	-8,57	-8,55	0,0	0,0	0,0	0,0
5	0,7705	0,7722	-6,83	-6,81	0,0	0,0	0,0	0,0
6	0,8575	0,8585	-2,89	-2,88	0,0	0,0	0,0	0,0
7	0,8224	0,8237	-8,15	-8,12	0,0	0,0	0,0	0,0
8	0,8049	0,8063	-11,62	-11,58	0,0	0,0	0,0	0,0
9	0,9700	0,9700	-11,62	-11,58	0,0	0,0	134,46	133,30
10	0,6476	0,6502	-14,64	-14,56	0,0	0,0	0,0	0,0
11	0,6189	0,6219	-12,86	-12,79	0,0	0,0	0,0	0,0
12	0,6099	0,6130	-7,18	-7,16	0,0	0,0	0,0	0,0
13	0,5989	0,6021	-8,70	-8,67	0,0	0,0	0,0	0,0
14	0,5921	0,5953	-5,54	-5,53	0,0	0,0	0,0	0,0
15	0,6667	0,6692	-0,87	-0,91	0,0	0,0	0,0	0,0
16	0,9700	0,9700	5,0	5,0	239,56	239,47	245,54	243,50



## 5.5 Sistema Teste 4

A Figura 59 mostra o diagrama unifilar do sistema *New England*. Este sistema é composto por 39 barras, dentre as quais 10 são barras de geração. A Tabela 21 mostra a base da potência aparente das dez barras de geração e o respectivo estatismo do regulador de velocidade de cada máquina do sistema.

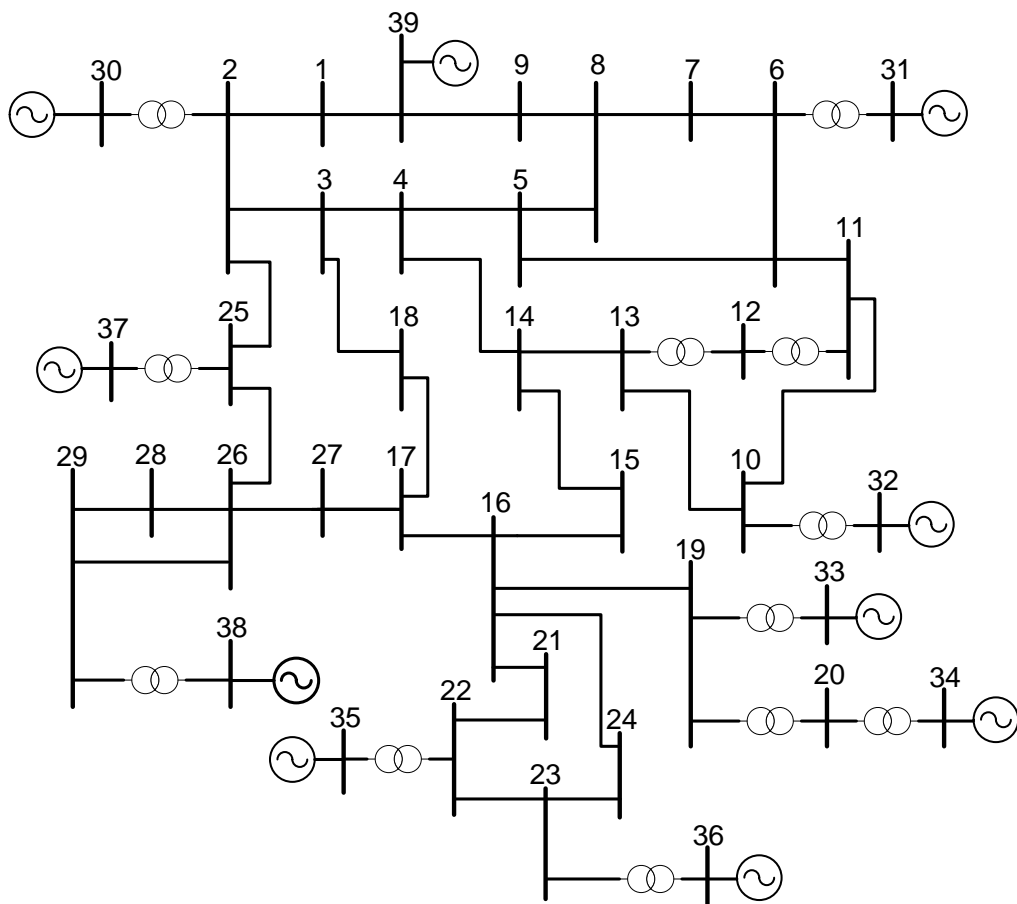


Figura 59 - Topologia do sistema New England (quarto sistema teste)

Tabela 21 - Dados de estatismo e base de potência do sistema teste 4

<b>Gerador</b>	<b>Barra</b>	<b>Unidades Geradoras</b>	<b>Base de Potência (MVA)</b>	<b>Estatismo na base da máquina</b>	<b>Estatismo na base do sistema (100 MVA)</b>
1	30	1	1000,0	0,05	0,005
2	31	1	1000,0	0,05	0,005
3	32	1	1000,0	0,05	0,005
4	33	1	1000,0	0,05	0,005
5	34	1	1000,0	0,05	0,005

<i>Gerador</i>	<i>Barra</i>	<i>Unidades Geradoras</i>	<i>Base de Potência (MVA)</i>	<i>Estatismo na base da máquina</i>	<i>Estatismo na base do sistema (100 MVA)</i>
6	35	1	1000,0	0,05	0,005
7	36	1	1000,0	0,05	0,005
8	37	1	1000,0	0,05	0,005
9	38	1	1000,0	0,05	0,005
10	39	1	1000,0	0,05	0,005

### 5.5.1 Primeira Avaliação

Nesta avaliação foi realizado um aumento de 91 % nas cargas conectadas em todas as barras do sistema. A Tabela 22 mostra as comparações entre os resultados obtidos no programa ANATEM e o Fluxo de Potência proposto. É importante destacar que as tensões das barras de geração do caso base utilizado foram substituídas pelas tensões obtidas na solução de regime permanente do programa ANATEM. Esta substituição tem a mesma aplicação que considerar o efeito do regulador de tensão no modelo proposto. Nesta simulação a opção “FREQ” que ativa os parâmetros da rede CA com a frequência foi ativada.

Tabela 22 - Comparação da solução do sistema teste 4 entre o Anatem e o fluxo proposto

<i>Barra</i>	<i>Tensão (p.u.)</i>		<i>Ângulo (°)</i>		<i>Geração Ativa (MW)</i>		<i>Geração Reativa (Mvar)</i>	
	<i>ANATEM</i>	<i>M.P.</i>	<i>ANATEM</i>	<i>M.P.</i>	<i>ANATEM</i>	<i>M.P.</i>	<i>ANATEM</i>	<i>M.P.</i>
1	1,0073	1,0073	-4,87	-4,87	0,0	0,0	0,0	0,0
2	0,9780	0,9780	6,01	6,01	0,0	0,0	0,0	0,0
3	0,9125	0,9125	-0,97	-0,97	0,0	0,0	0,0	0,0
4	0,8511	0,8511	-3,80	-3,80	0,0	0,0	0,0	0,0
5	0,8604	0,8604	-1,32	-1,32	0,0	0,0	0,0	0,0
6	0,8679	0,8679	0,45	0,45	0,0	0,0	0,0	0,0
7	0,8430	0,8430	-5,54	<b>-5,53</b>	0,0	0,0	0,0	0,0
8	0,8425	0,8425	-7,04	-7,04	0,0	0,0	0,0	0,0
9	0,9631	0,9631	-9,67	-9,67	0,0	0,0	0,0	0,0
10	0,8945	0,8945	6,42	<b>6,43</b>	0,0	0,0	0,0	0,0
11	0,8816	0,8816	4,42	<b>4,43</b>	0,0	0,0	0,0	0,0
12	0,8448	0,8448	4,47	4,47	0,0	0,0	0,0	0,0
13	0,8828	0,8828	4,83	4,83	0,0	0,0	0,0	0,0
14	0,8673	0,8673	1,02	1,02	0,0	0,0	0,0	0,0
15	0,8681	0,8681	0,61	0,61	0,0	0,0	0,0	0,0
16	0,9053	0,9053	4,33	4,33	0,0	0,0	0,0	0,0
17	0,9075	<b>0,9076</b>	1,50	1,50	0,0	0,0	0,0	0,0
18	0,9053	0,9053	-0,47	-0,47	0,0	0,0	0,0	0,0
19	0,9797	0,9797	15,82	15,82	0,0	0,0	0,0	0,0
20	0,9297	0,9297	13,76	13,76	0,0	0,0	0,0	0,0

Barra	Tensão (p.u.)		Ângulo (°)		Geração Ativa (MW)		Geração Reativa (Mvar)	
	ANATEM	M.P.	ANATEM	M.P.	ANATEM	M.P.	ANATEM	M.P.
21	0,9098	0,9098	10,20	10,20	0,0	0,0	0,0	0,0
22	0,9690	0,9690	20,44	20,44	0,0	0,0	0,0	0,0
23	0,9568	0,9568	20,23	20,23	0,0	0,0	0,0	0,0
24	0,9159	0,9159	4,69	4,69	0,0	0,0	0,0	0,0
25	0,9959	0,9959	8,63	8,63	0,0	0,0	0,0	0,0
26	0,9515	0,9515	4,03	4,03	0,0	0,0	0,0	0,0
27	0,9156	0,9156	0,18	0,18	0,0	0,0	0,0	0,0
28	0,9723	0,9723	8,98	8,98	0,0	0,0	0,0	0,0
29	0,9903	0,9903	13,92	13,92	0,0	0,0	0,0	0,0
30	1,0465	1,0465	14,37	14,37	825,7	825,7	610,2	<b>610,0</b>
31	0,9756	0,9756	20,77	20,77	1148,8	1148,8	872,3	872,3
32	0,9764	0,9764	23,38	23,38	1225,5	<b>1225,6</b>	888,7	<b>888,6</b>
33	0,9917	0,9917	26,13	26,13	1207,7	1207,7	591,9	<b>591,8</b>
34	0,9997	0,9997	25,34	25,34	1083,7	1083,7	499,3	499,3
35	1,0432	1,0432	30,38	30,38	1225,6	1225,6	841,5	<b>841,6</b>
36	1,0587	1,0587	37,29	37,29	1135,6	1135,6	556,0	<b>555,8</b>
37	1,0235	1,0235	23,16	<b>23,15</b>	1115,7	1115,7	346,8	346,8
38	1,0232	1,0232	26,15	26,15	1405,7	1405,7	458,9	<b>458,8</b>
39	1,0296	1,0296	-11,0	-11,0	1575,5	<b>1575,6</b>	801,1	801,1

A Figura 60 mostra a evolução da frequência do gerador conectado na barra 30, utilizando o programa ANATEM. O evento foi simulado no instante de tempo de 1 segundo com tempo total de simulação de 20 segundos, onde a frequência estabilizou em 58,2731 Hz. É importante destacar que o modelo proposto conseguiu identificar o mesmo valor de frequência em questão.

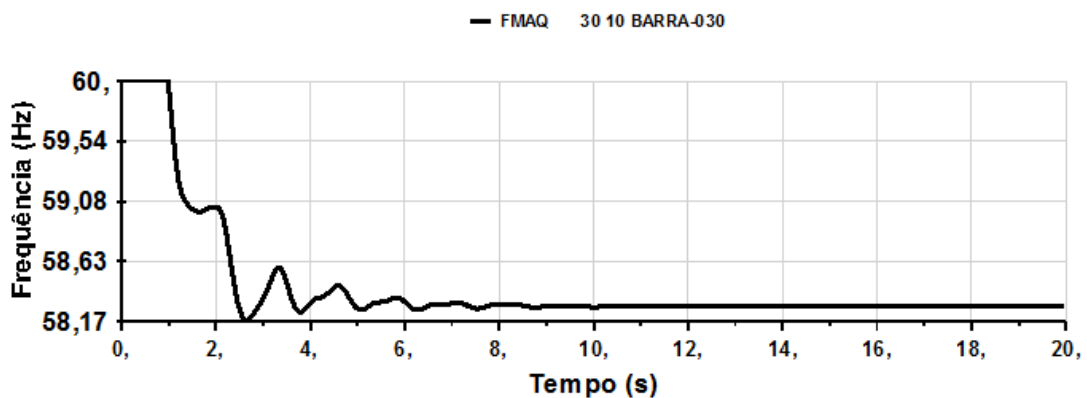


Figura 60 - Evolução da frequência do gerador conectado na barra 30 (sistema teste 4)

Para este mesmo caso base e aumento de carga, foram gerados os mesmo resultados utilizando o FPRP. A Tabela 23 mostra as comparações entre os resultados obtidos no FPRP e no modelo proposto. O FPRP obteve uma frequência de 58,2719 Hz para este ponto de operação.

Tabela 23 - Comparação da solução do sistema teste 4 entre o FPRP e o fluxo proposto

Barra	Tensão (p.u.)		Ângulo (°)		Geração Ativa (MW)		Geração Reativa (Mvar)	
	FPRP	M.P.	FPRP	M.P.	FPRP	M.P.	FPRP	M.P.
1	1,0053	1,0073	-4,64	-4,87	0,0	0,0	0,0	0,0
2	0,9732	0,9780	6,71	6,01	0,0	0,0	0,0	0,0
3	0,9039	0,9125	-0,58	-0,97	0,0	0,0	0,0	0,0
4	0,8388	0,8511	-3,55	-3,80	0,0	0,0	0,0	0,0
5	0,8488	0,8604	-0,91	-1,32	0,0	0,0	0,0	0,0
6	0,8558	0,8679	0,97	0,45	0,0	0,0	0,0	0,0
7	0,8300	0,8430	-5,37	-5,53	0,0	0,0	0,0	0,0
8	0,8296	0,8425	-6,97	-7,04	0,0	0,0	0,0	0,0
9	0,9584	0,9631	-9,66	-9,67	0,0	0,0	0,0	0,0
10	0,8838	0,8945	7,28	6,43	0,0	0,0	0,0	0,0
11	0,8702	0,8816	5,17	4,43	0,0	0,0	0,0	0,0
12	0,8314	0,8448	5,21	4,47	0,0	0,0	0,0	0,0
13	0,8715	0,8828	5,59	4,83	0,0	0,0	0,0	0,0
14	0,8555	0,8673	1,54	1,02	0,0	0,0	0,0	0,0
15	0,8567	0,8681	1,09	0,61	0,0	0,0	0,0	0,0
16	0,8956	0,9053	5,01	4,33	0,0	0,0	0,0	0,0
17	0,8984	0,9076	2,02	1,50	0,0	0,0	0,0	0,0
18	0,8962	0,9053	-0,05	-0,47	0,0	0,0	0,0	0,0
19	0,9745	0,9797	17,04	15,82	0,0	0,0	0,0	0,0
20	0,9257	0,9297	14,89	13,76	0,0	0,0	0,0	0,0
21	0,9000	0,9098	11,18	10,20	0,0	0,0	0,0	0,0
22	0,9623	0,9690	21,92	20,44	0,0	0,0	0,0	0,0
23	0,9495	0,9568	21,70	20,23	0,0	0,0	0,0	0,0
24	0,9065	0,9159	5,39	4,69	0,0	0,0	0,0	0,0
25	0,9914	0,9959	9,40	8,63	0,0	0,0	0,0	0,0
26	0,9455	0,9515	4,63	4,03	0,0	0,0	0,0	0,0
27	0,9076	0,9156	0,61	0,18	0,0	0,0	0,0	0,0
28	0,9680	0,9723	9,78	8,98	0,0	0,0	0,0	0,0
29	0,9868	0,9903	14,92	13,92	0,0	0,0	0,0	0,0
30	1,0465	1,0465	15,36	14,37	826,1	825,7	623,8	610,0
31	0,9756	0,9756	22,23	20,77	1149,4	1148,8	907,1	872,3
32	0,9764	0,9764	24,98	23,38	1226,0	1225,6	925,4	888,6
33	0,9917	0,9917	27,71	26,13	1208,1	1207,7	915,5	591,8
34	0,9997	0,9997	26,88	25,34	1084,1	1083,7	514,0	499,3
35	1,0432	1,0432	32,24	30,38	1226,0	1225,6	871,8	841,6
36	1,0587	1,0587	39,43	37,29	1136,0	1135,6	579,6	555,8
37	1,0235	1,0235	24,43	23,15	1116,1	1115,7	365,3	346,8
38	1,0232	1,0232	27,55	26,15	1406,1	1405,7	477,2	458,8
39	1,0296	1,0296	-11,00	-11,0	1576,0	1575,6	815,3	801,1

### 5.5.2 Segunda Avaliação

Nesta avaliação será utilizado o FPC com o objetivo de avaliar as alterações causadas pelos desvios de frequência no sistema. Será realizado o incremento de carga em todas as barras, com exceção a barra 39 que representa um equivalente de rede externa. É importante destacar que apesar de ser uma barra de geração (PV), esta barra foi modelada como uma barra de carga (PQ) por apresentar geração negativa em seu caso base de operação. Novamente as cargas foram modeladas como potência constante e o incremento de carga foi realizado com fator de potência constante.

As Figuras 61 e 62 mostram, respectivamente, a evolução das tensões nas barras 8 e 29, que são as barras com maior e menor declínio de tensão neste sistema. Através do modelo proposto o máximo carregamento do sistema obtido foi de 11.209 MW, com frequência de 57,8945 Hz enquanto no FPRP o máximo carregamento foi de 10.856 MW, com frequência de 58,0184 Hz. Nota-se um ganho de 353 MW (3,25 %) na margem de carregamento. A Figura 63 mostra a evolução da variação da frequência do sistema.

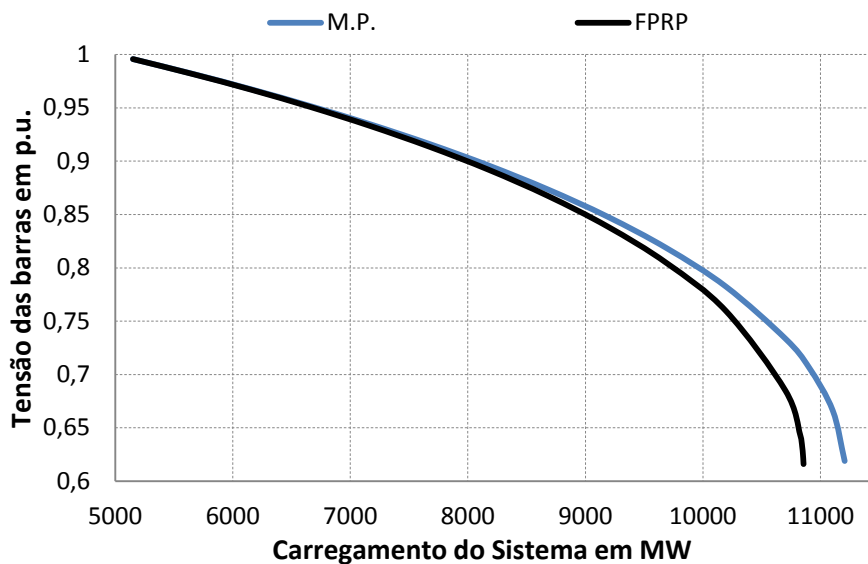


Figura 61 - Tensão na barra 8 versus aumento no carregamento (sistema teste 4)

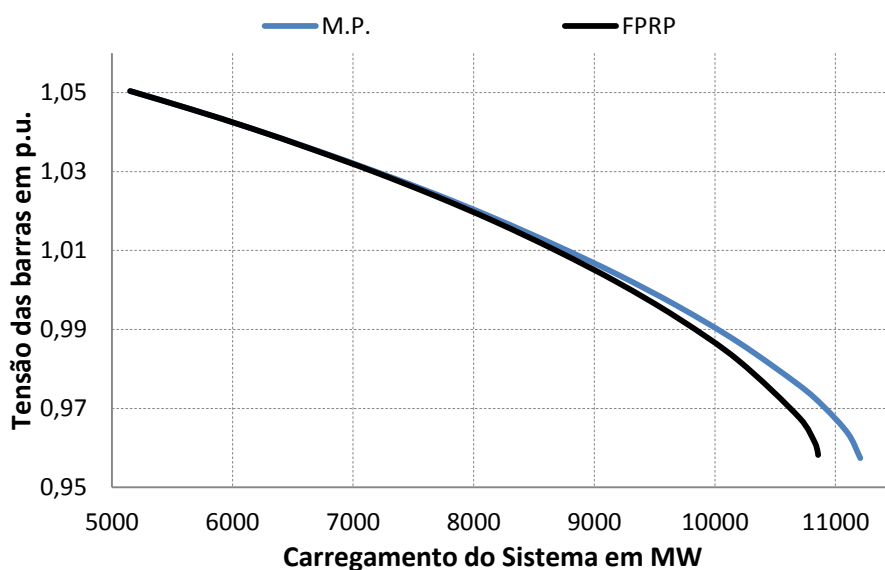


Figura 62 - Tensão na barra 29 versus aumento no carregamento (sistema teste 4)

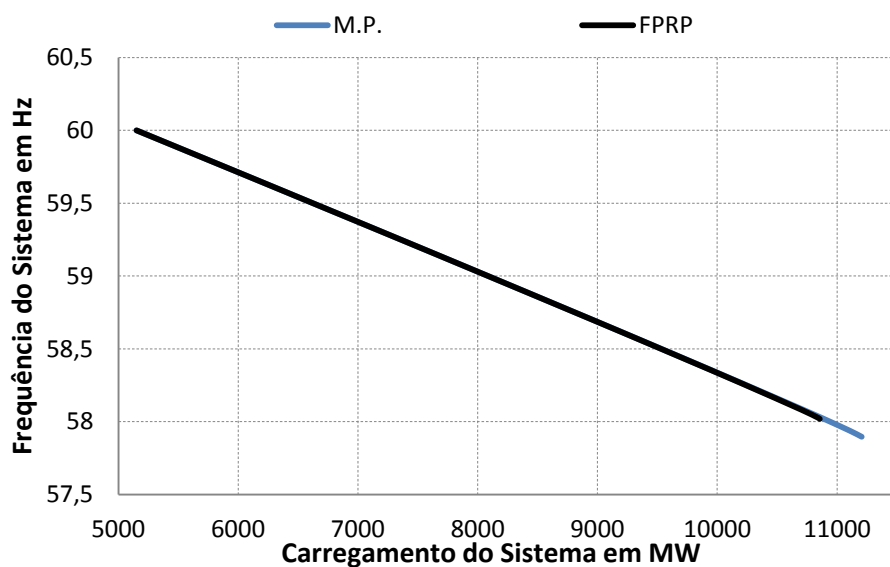


Figura 63 - Frequência do sistema versus aumento no carregamento (sistema teste 4)

As Figuras 64 e 65 mostram, respectivamente, o perfil da geração ativa e reativa dos geradores conectados nas barras 35 e 38, que são os geradores mais sobrecarregados do sistema.

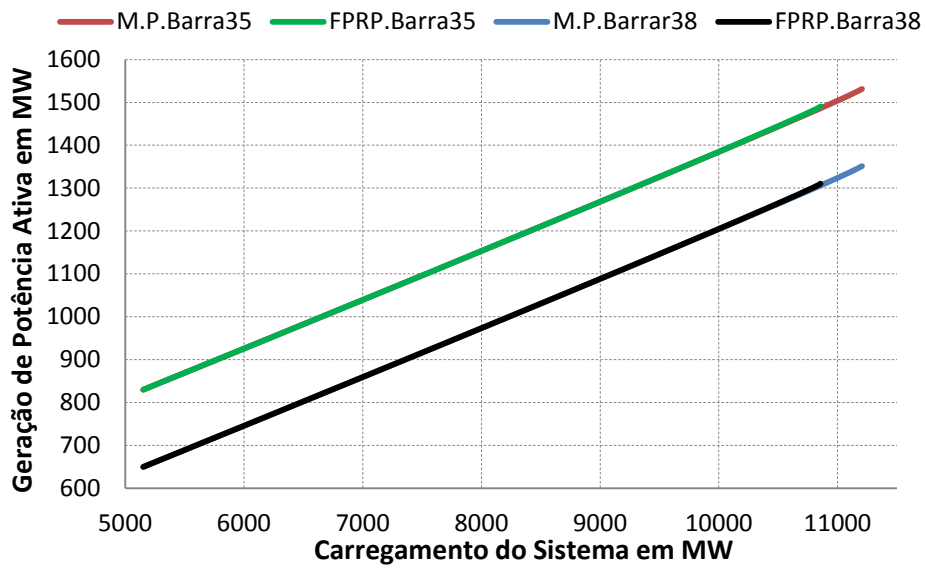


Figura 64 - Perfil da geração ativa (sistema teste 4)

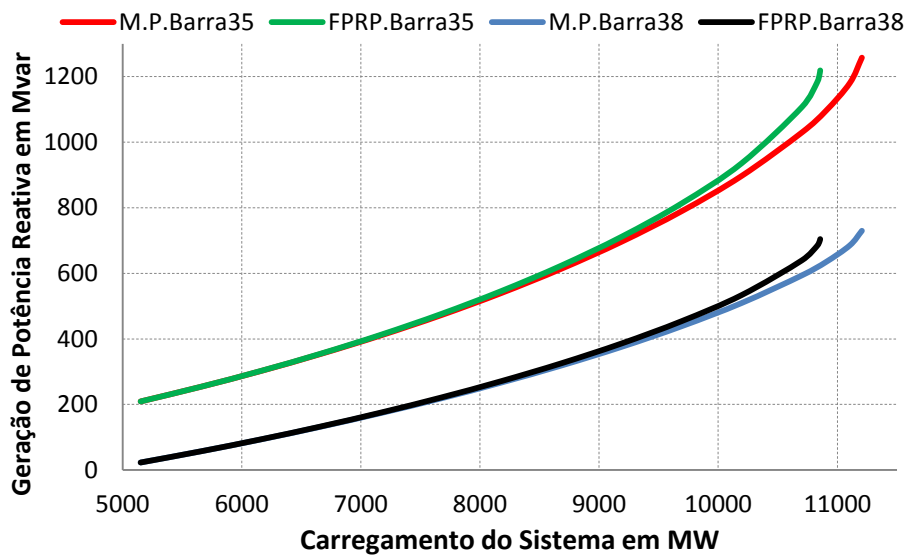


Figura 65 - Perfil da geração reativa (sistema teste 4)

A Tabela 24 está mostrando a comparação entre o FPO e o modelo proposto no ponto de máximo carregamento do sistema. Para este ponto em questão, o FPO encontrou um fator de carregamento de 1,2008, com frequência de 57,8928 Hz, enquanto o modelo proposto encontrou um fator de carregamento de 1,2004, com frequência de 57,8944 Hz.

Tabela 24 - Comparação entre o FPO e o modelo proposto (sistema teste 4)

Barra	Tensão (p.u.)		Ângulo (°)		Geração Ativa (MW)		Geração Reativa (Mvar)	
	FPO	M.P.	FPO	M.P.	FPO	M.P.	FPO	M.P.
1	0,7685	0,7732	-5,43	-5,51	0,0	0,0	0,0	0,0
2	0,8895	0,8917	1,44	1,32	0,0	0,0	0,0	0,0
3	0,7842	0,7876	-10,50	-10,54	0,0	0,0	0,0	0,0
4	0,6701	0,6757	-15,51	-15,48	0,0	0,0	0,0	0,0
5	0,6626	0,6689	-10,03	-10,08	0,0	0,0	0,0	0,0
6	0,6777	0,6839	-5,87	-6,98	0,0	0,0	0,0	0,0
7	0,6164	0,6236	-17,52	-17,40	0,0	0,0	0,0	0,0
8	0,6071	0,6144	-20,00	-19,83	0,0	0,0	0,0	0,0
9	0,6636	0,6703	-14,46	-14,40	0,0	0,0	0,0	0,0
10	0,7468	0,7516	1,94	1,72	0,0	0,0	0,0	0,0
11	0,7175	0,7228	-0,89	-1,08	0,0	0,0	0,0	0,0
12	0,6650	0,6707	-1,16	-1,34	0,0	0,0	0,0	0,0
13	0,7280	0,7329	-0,86	-1,04	0,0	0,0	0,0	0,0
14	0,7063	0,7112	-7,83	-7,92	0,0	0,0	0,0	0,0
15	0,7429	0,7464	-10,94	-10,98	0,0	0,0	0,0	0,0
16	0,8096	0,8121	-6,32	-6,39	0,0	0,0	0,0	0,0
17	0,8031	0,8058	-9,35	-9,40	0,0	0,0	0,0	0,0
18	0,7902	0,7933	-11,31	-11,34	0,0	0,0	0,0	0,0
19	0,9430	0,9440	7,26	7,12	0,0	0,0	0,0	0,0
20	0,9089	0,9095	4,31	4,18	0,0	0,0	0,0	0,0
21	0,8283	0,8304	1,10	0,98	0,0	0,0	0,0	0,0
22	0,9218	0,9230	13,91	13,74	0,0	0,0	0,0	0,0
23	0,9057	0,9070	13,61	13,44	0,0	0,0	0,0	0,0
24	0,8260	0,8284	-6,05	-6,13	0,0	0,0	0,0	0,0
25	0,9217	0,9234	3,01	2,90	0,0	0,0	0,0	0,0
26	0,8671	0,8710	-5,64	-5,72	0,0	0,0	0,0	0,0
27	0,8170	0,8194	-11,14	-11,18	0,0	0,0	0,0	0,0
28	0,9234	0,9244	-0,73	-0,82	0,0	0,0	0,0	0,0
29	0,9562	0,9570	4,97	4,87	0,0	0,0	0,0	0,0
30	1,0480	1,0480	11,98	11,83	952,4	951,8	1169,2	1156,0
31	0,9820	0,9820	22,26	21,86	1275,6	1275,0	1755,5	1728,1
32	0,9830	0,9830	24,30	23,91	1352,4	1351,8	1719,2	1694,1
33	0,9970	0,9970	18,84	18,69	1334,4	1333,8	904,4	897,1
34	1,0120	1,0120	17,23	17,08	1210,4	1209,8	718,1	714,5
35	1,0490	1,0490	25,32	25,13	1352,4	1351,8	1273,0	1263,7
36	1,0640	1,0640	33,45	33,25	1262,4	1261,8	835,7	830,0
37	1,0280	1,0280	20,23	20,08	1242,4	1241,8	743,0	734,9
38	1,0270	1,0270	18,54	18,43	1532,4	1531,8	738,2	733,1
39	0,6924	0,6985	-11,00	-11,00	0,0	0,0	0,0	0,0



---

A Figura 66 mostra o comportamento do menor autovalor da matriz Jacobiana reduzida utilizando a metodologia proposta em relação ao incremento de carga do sistema. Novamente o autovalor da matriz Jacobiana reduzida tende a zero quando o sistema está próximo do seu máximo carregamento.

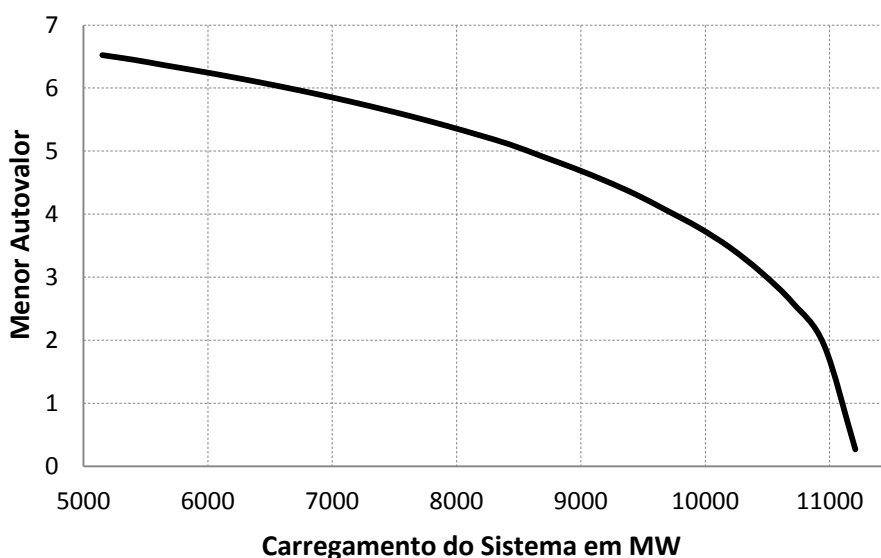


Figura 66 - Menor autovalor da matriz Jacobiana reduzida (sistema teste 4)

## 5.6 Sistema Teste 5

Finalmente, a Figura 67 mostra a topologia do Sistema IEEE 118 barras que será utilizado nessa seção. O sistema possui 54 barras de geração, onde cada gerador foi modelado da seguinte forma:

- Alguns geradores apresentavam geração negativa em seu caso base de operação. Esta geração foi considerada uma carga conectada na barra deste gerador e essas máquinas com geração negativa foram consideradas compensadores síncronos.
- O demais geradores foram modelados como um gerador síncrono e regulador com queda de velocidade com ganho 5 % na base de potência do gerador. A Tabela 25 mostra as bases de potência das máquinas modeladas como gerador síncrono e o respectivo estatismo do regulador de velocidade.

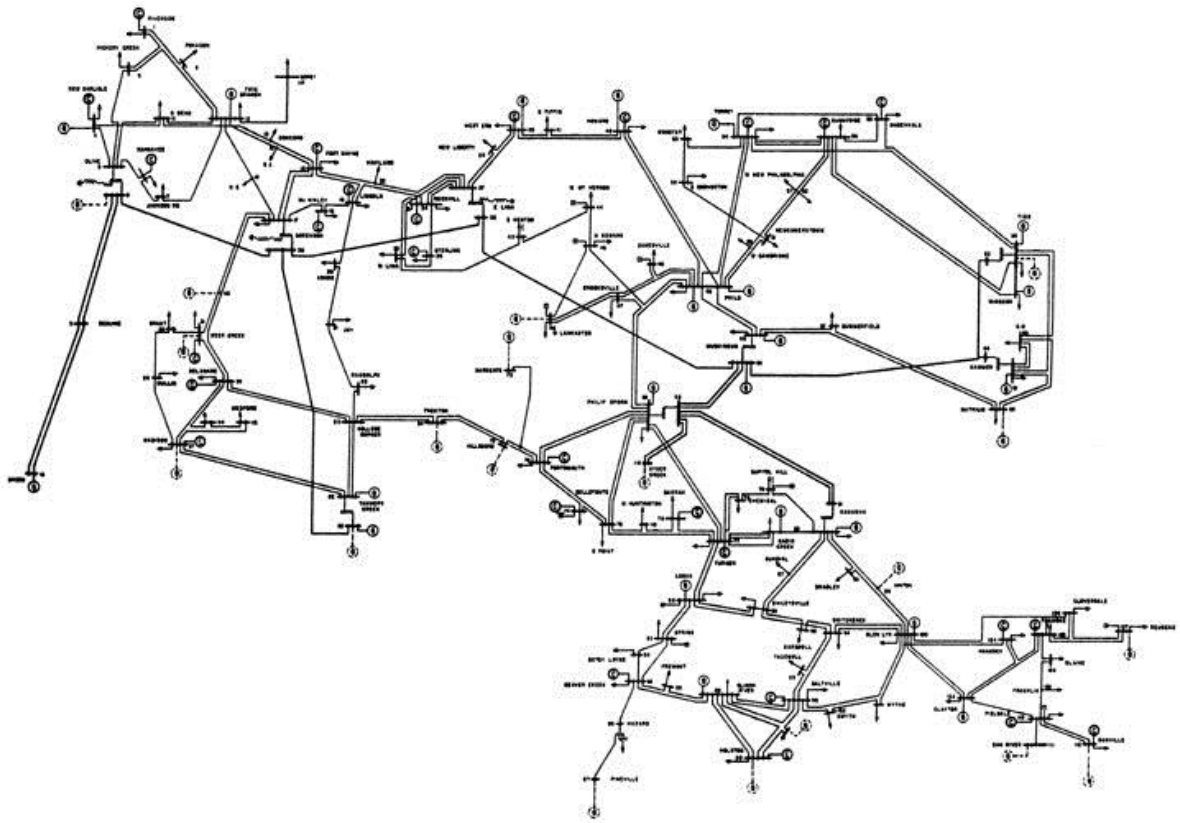


Figura 67 - Topologia do sistema IEEE 118 Barras

Tabela 25 - Dados de estatismo e base de potência do sistema teste 5

<i>Barra</i>	<i>Nome</i>	<i>Unidades Geradoras</i>	<i>Base de Potência (MVA)</i>	<i>Estatismo na base da máquina</i>	<i>Estatismo na base do sistema (100 MVA)</i>
10	Breed	2	450,0	0,05	0,0056
12	TwinBrch	2	85,0	0,05	0,0294
25	TannrsCk	2	220,0	0,05	0,0114
26	TannrsCk	2	314,0	0,05	0,0080
31	DeerCrk	2	7,0	0,05	0,3571
46	W.Lancst	2	19,0	0,05	0,1316
49	Philo	2	204,0	0,05	0,0123
54	Torrey	2	48,0	0,05	0,0521
59	Tidd	2	155,0	0,05	0,0161
61	W.Kammer	2	160,0	0,05	0,0156
65	Muskngum	2	391,0	0,05	0,0064
66	Muskngum	2	392,0	0,05	0,0064
69	Sporn	2	513,5	0,05	0,0049
80	CabinCrk	2	477,0	0,05	0,0052
87	Pinevllle	2	4,0	0,05	0,6250
89	ClinchRv	2	607,0	0,05	0,0041
100	GlenLyn	2	252,0	0,05	0,0099

<i>Barra</i>	<i>Nome</i>	<i>Unidades Geradoras</i>	<i>Base de Potência (MVA)</i>	<i>Estatismo na base da máquina</i>	<i>Estatismo na base do sistema (100 MVA)</i>
103	Claytor	2	40,0	0,05	0,0625
111	DanRiver	2	36,0	0,05	0,0694

O programa ANAREDE apesar de não considerar a frequência como uma das variáveis do Fluxo de Potência foi utilizado para validar os resultados encontrados com o FPRP. Para isso foi utilizado um artifício onde o fator de participação de cada gerador foi modelado de acordo com o estatismo de cada máquina segundo a equação (5.16).

$$fp(i) = \frac{\frac{1}{R_i}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}} \quad (5.16)$$

Os fatores de participação das unidades geradores do sistema IEEE 118 barras que foram utilizados no programa ANAREDE estão na Tabela 26.

Tabela 26 - Fatores de participação de cada unidade geradora do sistema teste 5

<i>Barra</i>	<i>Nome</i>	<i>Estatismo na base do sistema (100 MVA)</i>	<i>Fator de Participação (%)</i>
10	Breed	0,0056	10,29
12	TwinBrch	0,0294	1,94
25	TannrsCk	0,0114	5,03
26	TannrsCk	0,0080	7,18
31	DeerCrk	0,3571	0,16
46	W.Lancst	0,1316	0,43
49	Philo	0,0123	4,66
54	Torrey	0,0521	1,10
59	Tidd	0,0161	3,54
61	W.Kammer	0,0156	3,66
65	Muskngum	0,0064	8,94
66	Muskngum	0,0064	8,96
69	Sporn	0,0049	11,74
80	CabinCrk	0,0052	10,90
87	Pineville	0,6250	0,09
89	ClinchRv	0,0041	13,88
100	GlenLyn	0,0099	5,76
103	Claytor	0,0625	0,91
111	DanRiver	0,0694	0,82

As Figuras 68 e 69 mostram, respectivamente, a evolução das tensões nas barras 44 e 48, que são as barras com maior e menor declínio de tensão neste sistema. Esses gráficos

mostram a comparação entre os resultados do FPRP, do modelo proposto e os resultados obtidos utilizando o programa ANAREDE.

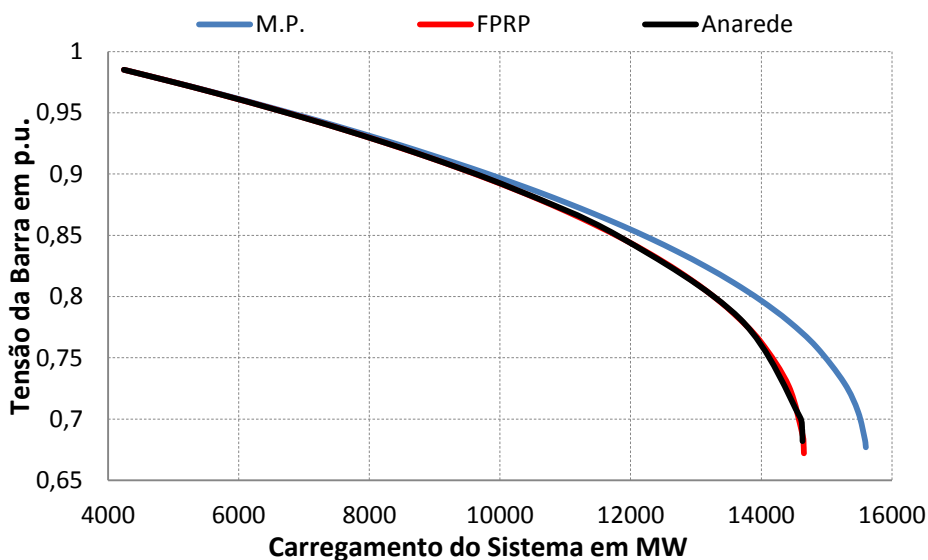


Figura 68 - Comparação da tensão na barra 44 (sistema teste 5)

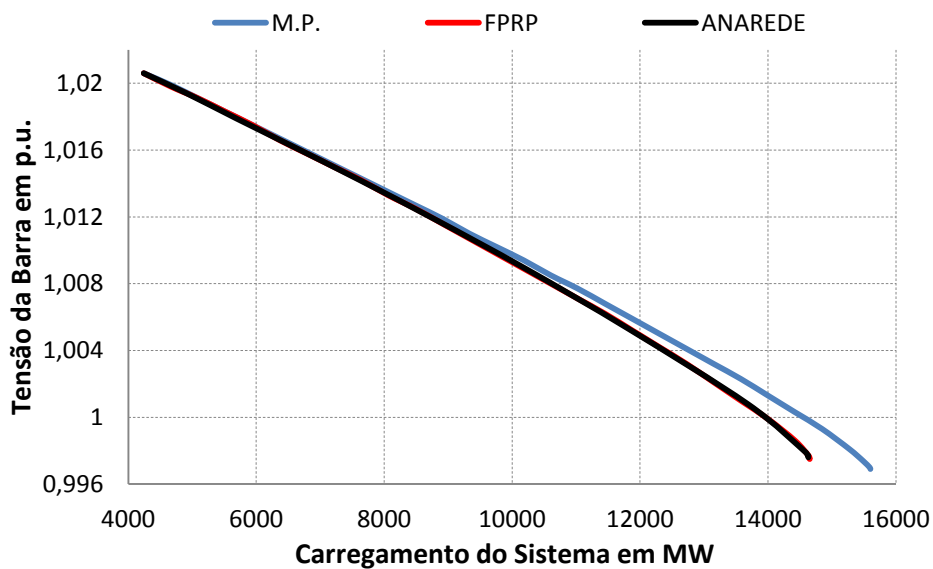


Figura 69 - Comparação da tensão na barra 48 (sistema teste 5)

A Figura 70 mostra a evolução da variação da frequência do sistema.

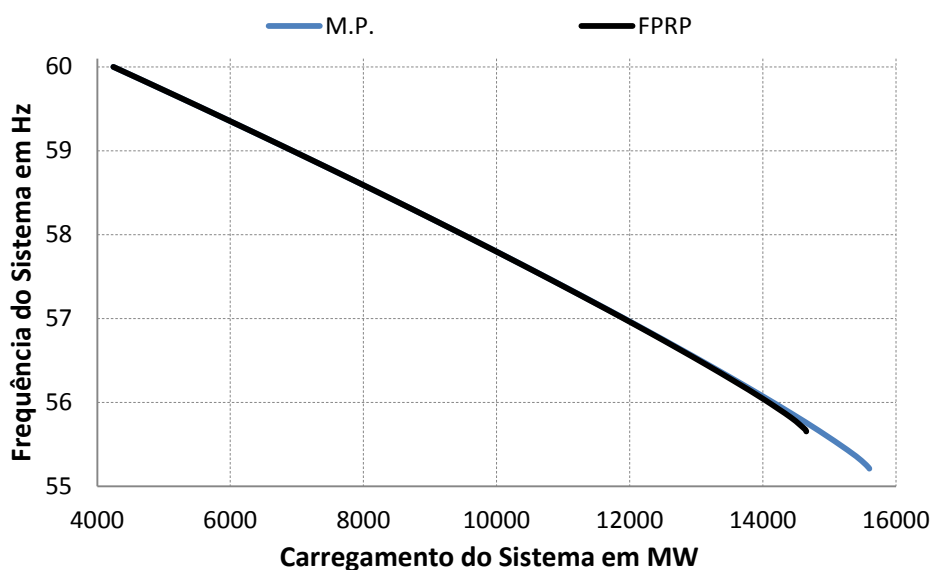


Figura 70 - Evolução da frequência do sistema (sistema teste 5)

No modelo proposto o máximo carregamento do sistema foi de 15.601 MW, com frequência de 55,2094 Hz enquanto que no FPRP o máximo carregamento foi de 14.653 MW, com frequência de 55,6527 Hz. O FPRP determinou de forma geral os mesmos resultados em comparação com o programa ANAREDE. Os gráficos das Figuras 71, 72, 73 e 74 mostram o perfil da geração ativa e reativa dos geradores conectados nas barras 69 e 89, que são os geradores mais sobrecarregados do sistema.

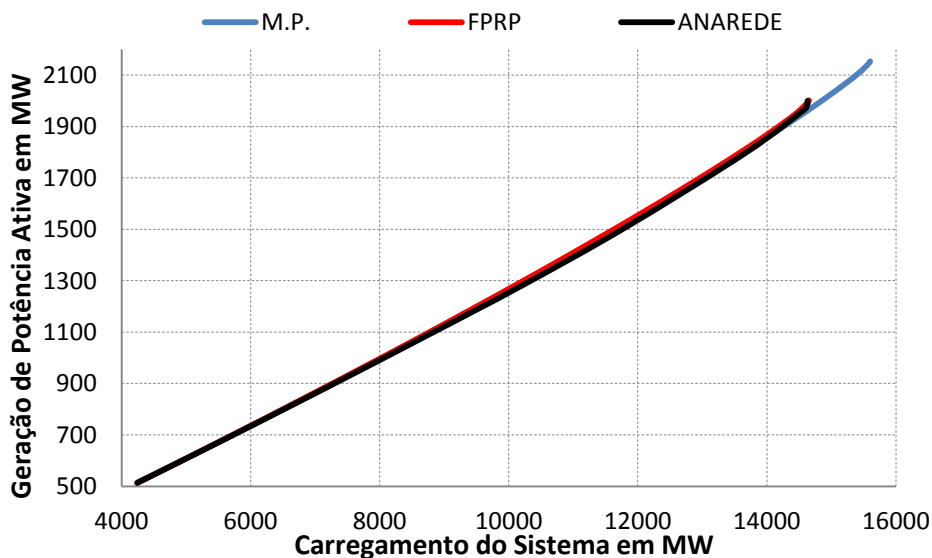


Figura 71 - Geração de potência ativa da barra 69 (sistema teste 5)

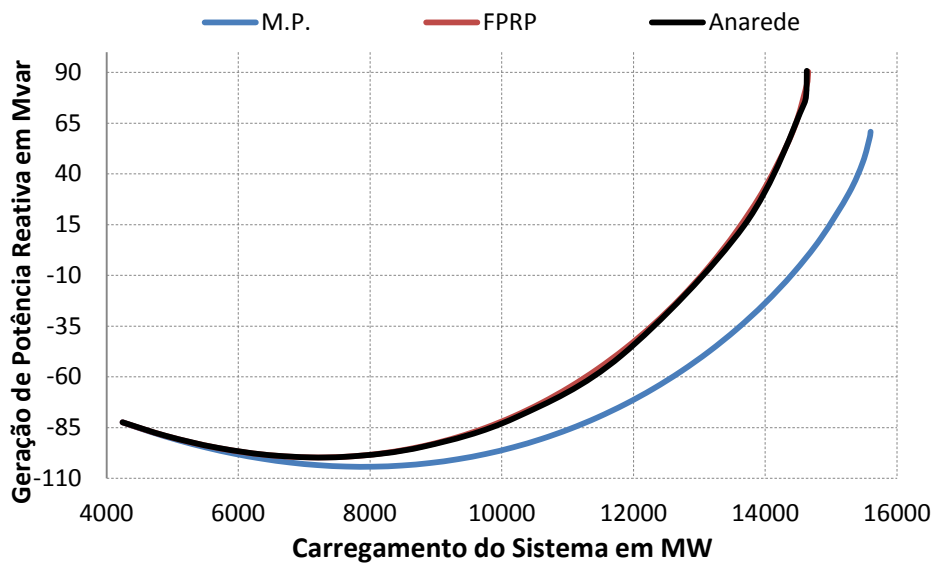


Figura 72 - Geração de potência reativa da barra 69 (sistema teste 5)

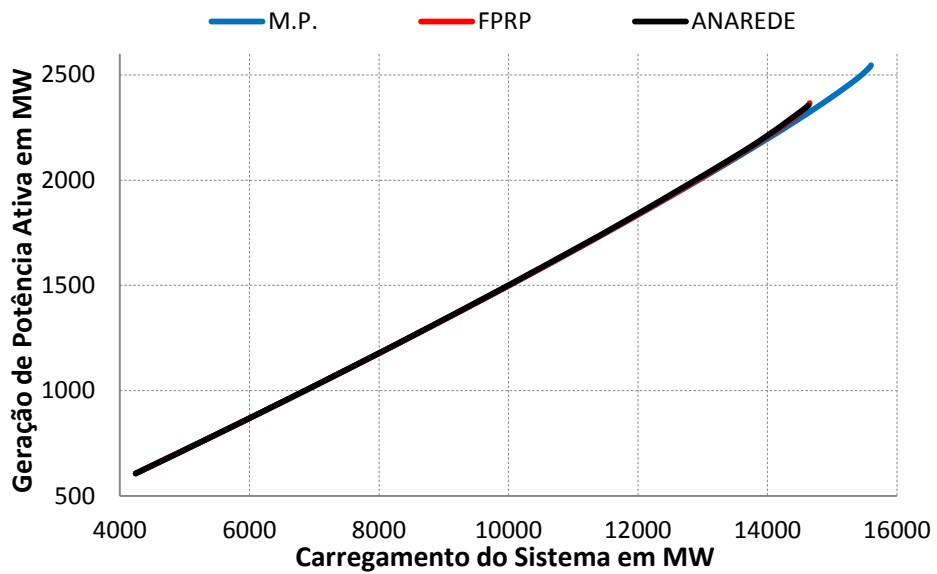


Figura 73 - Geração de potência ativa da barra 89 (sistema teste 5)

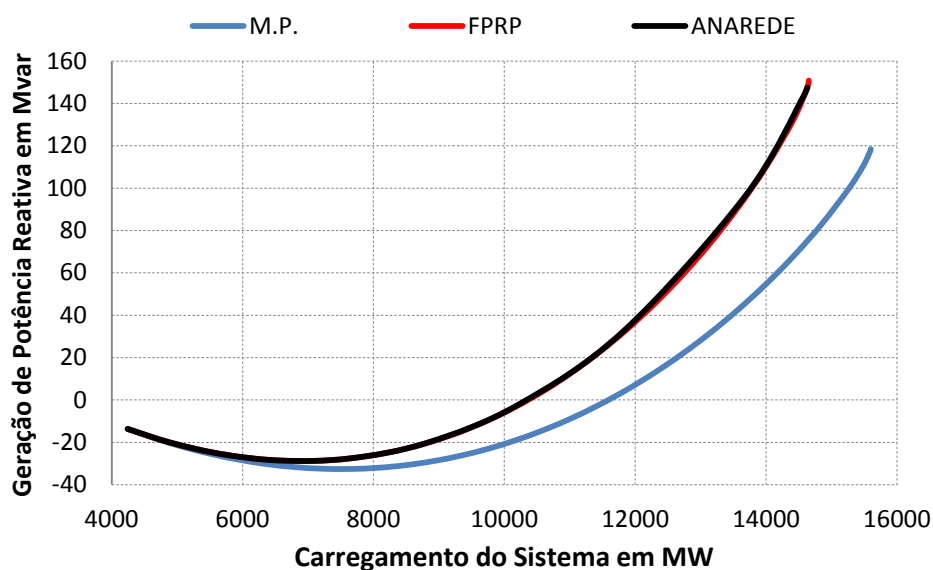


Figura 74 - Geração de potência reativa da barra 89 (sistema teste 5)

Nota-se que ao variar os parâmetros da rede com a frequência o carregamento do sistema é sempre maior. Neste teste o sistema teve um ganho de 948 MW (6,47 %) na margem de carregamento.

A medida que a frequência de operação do sistema diminui, as reatância das linhas vão ficando cada vez menores, fazendo que o sistema necessite cada vez menos de geração de potência reativa. Este fenômeno pode ser observado através das Figuras 72 e 74. Destaca-se também que, com o aumento do carregamento do sistema, a redução do perfil de tensão nas barras de carga é menor.

O FPO foi mais uma vez utilizado com o objetivo de validar os resultados obtidos pelo modelo proposto no ponto de máximo carregamento do sistema. Neste caso o FPO encontrou uma frequência de 55,1936 Hz, com fator de carregamento de 2,6788 enquanto que o modelo proposto obteve a frequência de 55,2094 Hz, com fator de carregamento de 2,6777. A Tabela 27 mostra a solução do problema no ponto de máximo carregamento, tanto pelo FPO quanto pelo modelo proposto.

Tabela 27 - Solução do máximo carregamento do sistema (sistema teste 5)

Barra	Tensão (p.u.)		Ângulo (°)		Geração Ativa (MW)		Geração Reativa (Mvar)	
	FPO	M.P.	FPO	M.P.	FPO	M.P.	FPO	M.P.
1	0,9550	0,9550	-76,3	-76,8	0,0	0,0	193,3	193,2
2	0,9543	0,9543	-73,4	-73,9	0,0	0,0	0,0	0,0
3	0,9447	0,9447	-72,1	-72,6	0,0	0,0	0,0	0,0
4	0,9980	0,9980	-57,6	-58,1	0,0	0,0	166,9	166,4
5	0,9967	0,9968	-55,7	-56,3	0,0	0,0	0,0	0,0
6	0,9900	0,9900	-66,3	-66,8	0,0	0,0	162,7	162,5
7	0,9871	0,9871	-67,9	-68,5	0,0	0,0	0,0	0,0
8	1,0150	1,0150	-37,2	-37,7	0,0	0,0	2058,0	2037,3
9	0,8468	0,8486	-1,5	-1,9	0,0	0,0	0,0	0,0
10	1,0500	1,0500	35,1	34,7	1891,9	1871,9	1086,6	1076,3
11	0,9554	0,9555	-67,3	-67,8	0,0	0,0	0,0	0,0
12	0,9900	0,9900	-69,4	-69,9	357,4	356,5	423,3	422,3
13	0,8979	0,8981	-73,5	-73,9	0,0	0,0	0,0	0,0
14	0,9737	0,9738	-73,1	-76,6	0,0	0,0	0,0	0,0
15	0,9700	0,9700	-77,8	-78,3	0,0	0,0	418,6	414,0
16	0,9410	0,9414	-71,1	-71,6	0,0	0,0	0,0	0,0
17	0,9442	0,9453	-66,1	-66,6	0,0	0,0	0,0	0,0
18	0,9730	0,9730	-76,6	-77,1	0,0	0,0	301,3	298,3
19	0,9630	0,9630	-79,2	-79,7	0,0	0,0	225,1	223,0
20	0,8093	0,8116	-75,4	-75,9	0,0	0,0	0,0	0,0
21	0,7313	0,7349	-67,0	-67,5	0,0	0,0	0,0	0,0
22	0,7269	0,7308	-51,8	-52,2	0,0	0,0	0,0	0,0
23	0,8970	0,8984	-26,7	-27,1	0,0	0,0	0,0	0,0
24	0,9920	0,9920	-25,8	-26,1	0,0	0,0	213,6	210,0
25	1,0500	1,0500	3,0	2,6	924,9	922,62	518,6	512,9
26	1,0150	1,0150	10,7	10,3	1320,1	1316,8	614,1	603,8
27	0,9680	0,9680	-59,8	-60,2	0,0	0,0	480,6	476,3
28	0,9388	0,9389	-66,0	-66,5	0,0	0,0	0,0	0,0
29	0,9497	0,9497	-69,9	-70,4	0,0	0,0	0,0	0,0
30	0,8041	0,8080	-43,4	-43,9	0,0	0,0	0,0	0,0
31	0,9670	0,9670	-69,7	-70,2	29,4	29,4	222,5	221,5
32	0,9640	0,9640	-61,8	-62,3	0,0	0,0	367,8	363,2
33	0,9154	0,9163	-80,5	-81,1	0,0	0,0	0,0	0,0
34	0,9860	0,9860	-80,0	-80,6	0,0	0,0	855,8	828,4
35	0,9676	0,9679	-81,5	-82,2	0,0	0,0	0,0	0,0
36	0,9800	0,9800	-81,7	-82,4	0,0	0,0	210,0	206,7
37	0,9387	0,9405	-77,2	-77,9	0,0	0,0	0,0	0,0
38	0,6927	0,7016	-51,6	-52,2	0,0	0,0	0,0	0,0
39	0,9195	0,9204	-90,9	-91,7	0,0	0,0	0,0	0,0
40	0,9700	0,9700	-95,4	-96,1	0,0	0,0	360,8	357,7
41	0,9440	0,9440	-96,2	-96,9	0,0	0,0	0,0	0,0
42	0,9850	0,9850	-89,0	-89,6	0,0	0,0	725,3	701,0
43	0,7798	0,7867	-75,6	-76,1	0,0	0,0	0,0	0,0
44	0,6652	0,6769	-50,2	-50,5	0,0	0,0	0,0	0,0
45	0,7250	0,7333	-35,1	-35,4	0,0	0,0	0,0	0,0
46	1,0050	1,0050	-22,2	-22,3	79,9	79,7	332,6	322,4
47	0,9690	0,9697	-10,6	-10,7	0,0	0,0	0,0	0,0



<i>Barra</i>	<i>Tensão (p.u.)</i>		<i>Ângulo (°)</i>		<i>Geração Ativa (MW)</i>		<i>Geração Reativa (Mvar)</i>	
	<i>FPO</i>	<i>M.P.</i>	<i>FPO</i>	<i>M.P.</i>	<i>FPO</i>	<i>M.P.</i>	<i>FPO</i>	<i>M.P.</i>
48	0,9959	0,9969	-13,3	-13,5	0,0	0,0	0,0	0,0
49	1,0250	1,0250	-9,4	-9,5	857,7	855,5	1464,7	1427,5
50	0,9690	0,9688	-16,2	-16,3	0,0	0,0	0,0	0,0
51	0,8809	0,8806	-25,4	-25,5	0,0	0,0	0,0	0,0
52	0,8550	0,8547	-29,1	-29,2	0,0	0,0	0,0	0,0
53	0,8670	0,8669	-32,4	-32,5	0,0	0,0	0,0	0,0
54	0,9550	0,9550	-28,7	-28,8	201,8	201,3	262,2	262,7
55	0,9520	0,9520	-29,6	-29,7	0,0	0,0	136,5	136,2
56	0,9540	0,9540	-29,1	-29,2	0,0	0,0	272,9	272,7
57	0,9400	0,9400	-25,0	-25,1	0,0	0,0	0,0	0,0
58	0,9003	0,9004	-28,2	-28,2	0,0	0,0	0,0	0,0
59	0,9850	0,9850	-9,0	-9,0	651,7	650,0	620,8	619,6
60	0,9852	0,9852	5,8	5,8	0,0	0,0	0,0	0,0
61	0,9950	0,9950	9,1	9,0	672,68	671,0	27,5	27,3
62	0,9980	0,9980	6,5	6,5	0,0	0,0	148,2	148,3
63	0,9371	0,9372	3,7	3,7	0,0	0,0	0,0	0,0
64	0,9615	0,9616	10,6	10,6	0,0	0,0	0,0	0,0
65	1,0050	1,0050	22,4	22,4	1643,9	1639,8	982,6	955,0
66	1,0500	1,0500	20,5	20,5	1648,1	1644,0	155,4	152,4
67	1,0000	0,9929	11,5	11,4	0,0	0,0	0,0	0,0
68	1,0025	1,0025	22,4	22,5	0,0	0,0	0,0	0,0
69	1,0350	1,0350	30,0	30,0	2158,9	2153,5	64,6	60,8
70	0,9840	0,9840	-6,7	-6,7	0,0	0,0	363,1	357,3
71	0,9845	0,9846	-9,2	-9,3	0,0	0,0	0,0	0,0
72	0,9800	0,9800	-19,7	-19,9	0,0	0,0	11,2	10,3
73	0,9910	0,9910	-9,9	-10,0	0,0	0,0	19,7	19,4
74	0,9580	0,9580	-9,1	-9,2	0,0	0,0	283,9	280,8
75	0,9124	0,9128	-2,2	-2,2	0,0	0,0	0,0	0,0
76	0,9430	0,9430	-6,5	-6,5	0,0	0,0	311,5	310,3
77	1,006	1,0060	18,4	18,4	0,0	0,0	726,2	718,9
78	0,9798	0,9801	17,9	17,9	0,0	0,0	0,0	0,0
79	0,9679	0,9687	19,9	19,9	0,0	0,0	0,0	0,0
80	1,0400	1,0400	29,8	29,8	2005,4	2000,4	263,0	260,1
81	0,9961	0,9961	25,2	25,3	0,0	0,0	0,0	0,0
82	0,8732	0,8750	23,0	23,0	0,0	0,0	0,0	0,0
83	0,8728	0,8747	28,3	28,4	0,0	0,0	0,0	0,0
84	0,9220	0,9227	38,2	38,3	0,0	0,0	0,0	0,0
85	0,9850	0,9850	43,5	43,6	0,0	0,0	371,3	367,7
86	0,9535	0,9535	39,5	39,6	0,0	0,0	0,0	0,0
87	1,015	1,0150	40,9	41,0	16,8	16,8	28,3	28,3
88	0,9329	0,9331	56,9	57,0	0,0	0,0	0,0	0,0
89	1,0050	1,0050	73,0	73,1	2552,0	2545,6	119,9	118,5
90	0,9850	0,9850	48,3	48,4	0,0	0,0	434,3	433,9
91	0,9800	0,9800	47,7	47,9	0,0	0,0	-7,1	-7,1
92	0,9930	0,9930	49,4	49,5	0,0	0,0	558,7	555,5
93	0,9114	0,9119	38,4	38,5	0,0	0,0	0,0	0,0
94	0,8957	0,8963	29,6	29,7	0,0	0,0	0,0	0,0
95	0,8438	0,8447	25,4	25,5	0,0	0,0	0,0	0,0
96	0,8794	0,8805	24,6	24,7	0,0	0,0	0,0	0,0

Barra	Tensão (p.u.)		Ângulo (°)		Geração Ativa (MW)		Geração Reativa (Mvar)	
	FPO	M.P.	FPO	M.P.	FPO	M.P.	FPO	M.P.
97	0,9372	0,9377	26,0	26,1	0,0	0,0	0,0	0,0
98	0,9935	0,9935	24,7	24,7	0,0	0,0	0,0	0,0
99	1,0100	1,0100	23,2	23,3	0,0	0,0	15,1	15,1
100	1,0170	1,0170	27,1	27,3	1059,5	1057,8	441,4	440,6
101	0,9333	0,9335	33,5	33,6	0,0	0,0	0,0	0,0
102	0,9601	0,9602	44,0	44,1	0,0	0,0	0,0	0,0
103	1,001	1,0010	12,5	12,6	168,2	167,8	231,9	232,2
104	0,9710	0,9710	0,8	0,9	0,0	0,0	171,7	171,7
105	0,9650	0,9650	-3,7	-3,6	0,0	0,0	239,8	236,6
106	0,9090	0,9090	-4,2	-4,1	0,0	0,0	0,0	0,0
107	0,9520	0,9520	-15,6	-15,5	0,0	0,0	132,0	131,1
108	0,9567	0,9567	-7,6	-7,5	0,0	0,0	0,0	0,0
109	0,9561	0,9563	-9,1	-9,0	0,0	0,0	0,0	0,0
110	0,9730	0,9730	-11,9	-11,8	0,0	0,0	188,5	187,6
111	0,9800	0,9800	-5,2	-5,1	151,4	151,0	-29,5	-29,5
112	0,9750	0,9750	-22,9	-22,8	0,0	0,0	183,1	183,0
113	0,9930	0,9930	-66,8	-67,3	0,0	0,0	197,2	193,0
114	0,9456	0,9456	-62,9	-63,3	0,0	0,0	0,0	0,0
115	0,9442	0,9442	-62,9	-63,3	0,0	0,0	0,0	0,0
116	1,0050	1,0050	21,0	-21,0	0,0	0,0	129,3	129,0
117	0,9201	0,9201	-74,9	-75,4	0,0	0,0	0,0	0,0
118	0,9012	0,9014	-5,9	-5,9	0,0	0,0	0,0	0,0

A Figura 75 mostra o comportamento do menor autovalor da matriz Jacobiana reduzida à medida que o carregamento do sistema é aumentado. Notam-se pequenas modificações em seu valor para pontos próximos ao caso base de operação e grandes excursões quando o sistema está no ponto limite de carregamento.

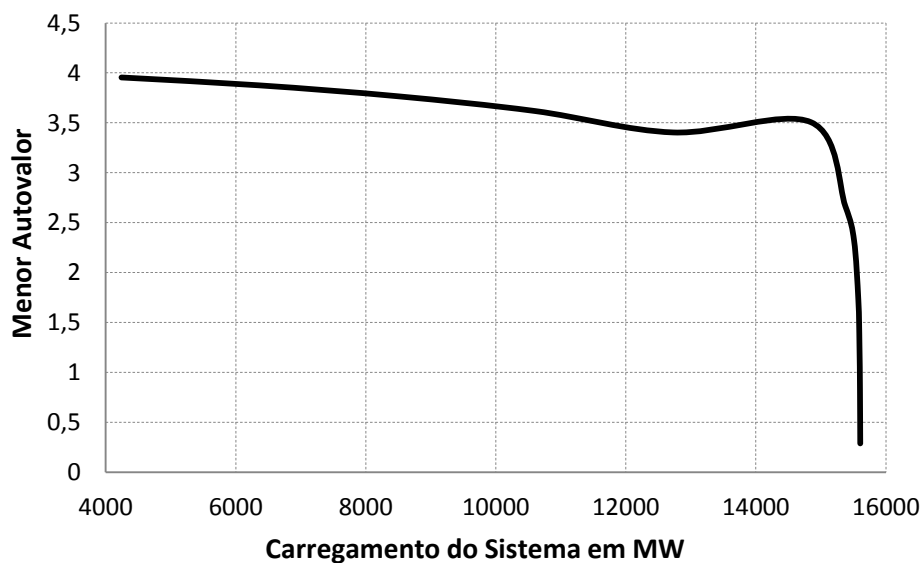


Figura 75 - Menor autovalor da matriz Jacobiana reduzida (sistema teste 5)

---

# Capítulo VI -

## Conclusões

### 6.1 Considerações Gerais

Este trabalho apresentou uma modelagem alternativa para o problema de Fluxo de Potência, onde é possível avaliar a influência da variação dos parâmetros da rede elétrica em função da variação da frequência de operação. O modelo proposto consiste em uma alteração da formulação denominada Fluxo de Potência com Regulação Primária. Tal formulação adota uma modelagem *full* Newton, onde a frequência de operação do sistema é estimada ao final do processo iterativo de solução. O desvio de frequência do sistema é obtido a partir da inclusão das equações de regime permanente da regulação primária de frequência dos geradores síncronos.

A partir deste contexto, considera-se na modelagem proposta neste trabalho que todos os parâmetros da rede que são dependentes da frequência do sistema são variáveis, tais como *shunt* de barra, *shunt* de linha e os modelos de linhas de transmissão e transformadores. Assim como os parâmetros da rede, os parâmetros do motor de indução (utilizado como modelo de carga) também sofrem modificações com a variação da frequência do sistema e, desta forma, tais parâmetros também são modificados.

Em seguida, utilizando a modelagem proposta de Fluxo de Potência foram realizados estudos envolvendo a avaliação da segurança de tensão através da implementação de uma ferramenta de Fluxo de Potência Continuado modificado. Nesta ferramenta, além de se avaliar a variação da frequência do sistema em função do incremento de carga, é possível obter o ponto de máximo carregamento do sistema e conseqüentemente a margem de carregamento (segurança). Também é importante ser destacado que foi desenvolvida uma formulação do problema de Fluxo de Potência Ótimo compatível com a modelagem proposta para o Fluxo de Potência, ou seja, os parâmetros da rede são descritos em função da frequência da rede através de restrições de igualdade adicionais.

---

Para validação da metodologia proposta foram utilizados os programas ANATEM e ANAREDE, ambos desenvolvidos pelo CEPEL. O programa ANATEM foi utilizado para validar qualitativamente os resultados obtidos variando-se os parâmetros da rede com a frequência, utilizando-se de uma Opção de Execução (FREQ), que considera as variações dos parâmetros da rede com a frequência na simulação no tempo. O programa ANAREDE foi utilizado para avaliar o Fluxo de Potência Continuado modificado. A validação da modelagem proposta foi feita através do estudo de 5 sistemas, são eles: dois sistemas tutoriais, o sistema 16 barras correspondendo a uma pequena parte do Sistema Interligado Nacional, os sistemas *New England* e IEEE-118 barras, que são sistemas testes normalmente utilizados na literatura especializada em análise de redes.

Avalia-se que a modelagem proposta pode ser uma ferramenta útil em determinados tipos de estudos, principalmente em situações onde exista a necessidade de avaliação dos desvios de frequência do sistema, como por exemplo, em sistemas isolados com a presença de geradores distribuídos (*Microgrids*) ou quando um sistema de grande porte tem que operar com a formação de ilhas elétricas na ocorrência de emergências (ilhamento por atuação da proteção). Em situações onde há variação significativa de frequência foram verificadas alterações importantes tanto no perfil de tensão quanto nas margens de segurança do sistema. Também foram observadas alterações no perfil de geração de potência reativa dos geradores. Por estes motivos estima-se que a modelagem desenvolvida pode se tornar uma ferramenta importante nos estudos relacionados a segurança de tensão deste tipo de sistema.

O trabalho também permite concluir que em Sistemas de Potência com alta capacidade de regulação de frequência, como o caso de sistemas de grande porte como o SIN, é aceitável a premissa de frequência constante, uma vez que variações de pequena magnitude pouco interferem na análise do problema. Isto pode ser observado nos resultados apresentados considerando-se os limites de frequência no intervalo entre 59,5 Hz e 60,5 Hz.

Em relação aos motores de indução, apesar de possuírem reatâncias elevadas, verificou-se que a solução do problema de Fluxo de Potência com cargas modeladas como motor de indução apresentaram menores desvios quando os parâmetros de rede são considerados dependentes com a frequência de operação.

Finalmente, também foram realizadas avaliações dos menores autovalores associados à matriz reduzida de sensibilidade QV. Procurou-se demonstrar que a metodologia proposta é

---

compatível (autovalor tendendo a zero) com as avaliações feitas normalmente com a formulação tradicional do problema. Em outras palavras, é possível utilizar a análise dos autovalores e autovetores em estudos de segurança de tensão.

De uma forma geral, conclui-se que a formulação proposta tem potencial para ser utilizada de forma complementar aos métodos tradicionais de análise de redes, flexibilizando as possibilidades de análise por parte dos engenheiros em situações onde são necessárias avaliações de condições operativas com desvios significativos de frequência. Também avalia-se que a metodologia proposta possa ser utilizada em uma fase preliminar de estudos elétricos de ilhamento e desvio de frequência, onde seja necessário a definição de cenários críticos.

## 6.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

A seguir, são apresentadas algumas sugestões de possíveis temas para trabalhos futuros, como uma forma de dar continuidade aos trabalhos iniciados na presente dissertação.

- Avaliação da inclusão de modelos de conversores que emulam o comportamento da regulação primária de frequência de geradores síncronos;
- Obtenção e estudo de um caso real de um *Microgrid*;
- Avaliação de outros índices de estabilidade de tensão;
- Estudo da inclusão da metodologia proposta em funções de planejamento de sistemas.

---

# Referências Bibliográficas

- [1] FALCÃO, D. M. **Smart Grids e Microrredes: O Futuro já é Presente**. Simpósio de Automação de Sistemas Elétricos 8, 2009.
- [2] FALCÃO, D. M. **Integração de tecnologias para viabilização da Smart Grid**. III Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos: 1-5, 2010.
- [3] SMITH, M.; TON, D. **Key Connections: The U.S. Department of Energy's Microgrid Initiative**, 2013.
- [4] MONTICELLI, A. J. **Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica**. 1ª. Ed. São Paulo: Editora Edgard Blucher LTDA, 1983
- [5] LOTFALIAN, M.; SCHLUETER, R.; D. **Inertial, governor, and AGC/economic dispatch load flow simulations of loss of generation contingencies**. Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on, n. 11, p. 3020-3028, 1985.
- [6] LA GATTA, P. O. **Um Novo Modelo para Representação da Regulação Primária e Secundária de Frequência no Problema de Fluxo de Potência e Fluxo de Potência Ótimo**: Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora 2012.
- [7] TAYLOR, C. W. **Power System Voltage Stability/EPRI-Power System Engineering Series**. 1 ed USA, McGraw-Hill Inc, 1994.
- [8] HENRIQUES, R. M. **Influência de Cargas Tipo Motor de Indução nas Margens de Estabilidade de Tensão de Sistemas de Grande Porte**: Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro 2002.
- [9] SEYDEL, From Equilibrium to Chaos: **Practical Bifurcation and Stability Analysis**. 2 ed. New York, NY, Elsevier Science Publishing Co, 1988.
- [10] FERRAZ, J. C. R. **Fluxo de Potência Continuado e Análise Modal na Avaliação da Estabilidade de Tensão de Sistemas de Grande Porte**: Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro 1998.
- [11] ZEINELDIN, H., EL-SAADANY, F., SALAMA, M. M. A. **Intentional Islanding of Distributed Generation in Power Engineering Society General Meeting**. IEEE, p. 1496-1502, 2005.

- 
- [12] OKAMURA M., OUMAR Y., HAYASHI S., VEMURA K., ISHIGURO F. **A New Power Flow Model and Solution Method**. IEE Trans, PAS-94, p. 1042-1050, 1975.
- [13] SAADAT, M. H. **Steady State Analysis of Power Systems Including the Effects of Control Devices**. Electr. Power Syst. Res. Vol 2 N° 2. p. 111-118, 1979.
- [14] CALOVIC M. S., STREZOSKI V.C. **Calculation of Steady-State Load Flows Incorporating System Control Effects and Consumer Self-Regulation Characteristics** 1PC Business Press, Vol 3 N°2 p. 0142-0615, 1981.
- [15] ALBELMAGEED M. M. A., FARAG H. E., EL-SAADANY E. F. ABDEL-RADY Y. **A Novel and Generalized Tree-Phase Power Flow Algorithm for Islanded Microgrids Using a Newton Trust Region Method** TPWRS-00662-2011, 2012.
- [16] Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). **Módulo 8 – Qualidade de Energia Elétrica dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Nacional – PRODIST**. Fevereiro, 2012.
- [17] LEE, S., LIM, S., AHN, B. **Service Restoration of Primary Distribution Systems based on Fuzzy evaluation of multi-criteria** IEEE Transactions Power System, vol 13, n° 3, pp. 1156-1163, 1998.
- [18] HYUNG, L. TARLOCHAN, S. S., MYEON-SONG, C., SEUNG-JAE, L., SUGWON, H., SEONG, L., SUNG-WOO, L. **Design and Implementation of Multiagent-Based Distributed Restoration System in DAS** TPWRD-00422-2011, 2013.
- [19] BLAABJERG, F., CHEN, Z. **Power Electronics for Modern Wind Turbines**. 1ª ed. EUA: Morgan & Claypool Publishers, 2006.
- [20] LIMA, F. K. A. **Aerogerador Baseado em Máquina de Indução Duplamente Alimentada – Suportabilidade para Afundamento de Tensão: Tese de Doutorado-COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.**
- [21] RANGEL, R. D., GOMES JR, S., FERRAZ, J. C. R. **Modelagem de Aerogeradores Baseados em Máquinas Síncronas de Velocidade Variável em Programas de Análise de Estabilidade Eletromecânica** XSEPOPE, Florianópolis, SC, 2006.
- [22] CASTRO, L. M., FUERTE-ESQUIVEL, C. R., TOVAR-HERNÁNDEZ, J. H. **Solution of Power Flow With Automatic Load-Frequênciay Control Devices Including Wing Farms** CONACYT TPWRS-00979-2011, 2011.

- 
- [23] VIEIRA FILHO, X. **Operação de Sistemas de Potência com Controle Automático de Geração**. 1ª. Ed. Rio de Janeiro: Editora Campus LTDA., 1984.
- [24] KUNDUR, P. **Power System Stability and Control**: McGraw-Hill Professional, 1994.
- [25] WOOK, A. J.; WOLLENBERG, B. F. **Power Generation, Operation, and Control**. 2. Ed.; Wiley-Interscience, 1996.
- [26] OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. 4ª Ed. São Paulo: Prentice Hall Brasil, 2003
- [27] MILANO, F. **Power System Modelling and Scripting**. 1<sup>st</sup> Editon: Springer, 2010
- [28] Operador Nacional do Sistema (ONS). **Submódulo 10.6 dos Procedimentos de Rede: Controle da Geração em Operação Normal**. Setembro, 2010b
- [29] Operador Nacional do Sistema (ONS). **Módulo 21 dos Procedimentos de Rede: Estudos para Reforço da Segurança Operacional Elétrica, Controle Sistêmico e Integração de Instalações**: Agosto, 2009
- [30] STEVENSON, W. D. J. **Elementos de Análise de Sistemas de Potência**. São Paulo: McGraw-Hill Book do Brasil, 1978.
- [31] CEPEL. **Programa de Análise de Redes - ANAREDE**. Manual do Usuário Versão 9.06.02, Rio de Janeiro, 2010b.
- [32] TINNEY, W. F., **Compensations Methods for Network Solution by Optimally Ordered Triangular Factorizations**. IEEE Transactions on Power Apparatus and System, PAS-98, n° 1:123-127, 1972.
- [33] PEDROSO, A. S. **Motor de Indução – Modelo Matemático Incluindo Efeitos Transitórios no Rotor**: Relatório Técnico CEPEL n°. 305, Rio de Janeiro, 1987
- [34] STOTT, B. **User's Manual for Load Flow Program**, UMIST, UK, 1974.
- [35] MARTINS, N. **Eigenvalue Analysis of Multimachine Power Systems**. Ph.D. Thesis, UMIST, Manchester, England, 1978
- [36] BOMPARD, E., CARPANETO, E., CHICCO, G., NAPOLI, R. **Asynchronous Motor Models for Voltage Stability Analysis**, Proceedings Bulk Power System Voltage Phenomena III – Voltage Stability Security and Control, ECC Inc., Davos, Switzerland, 1994.



- 
- [37] AJJARAPU, V., CHRISTY, C. **The continuation Power flow: a tool for steady state voltage stability analysis**. Power Systems, IEEE Transactions on 7, n°. 1, 416-423, 1992.
- [38] TAYLOR, C. W. **Maybe I Can't Define Stability, but I Know It When I See It**: Presented at IEEE/PES Panel on Stability Terms and Definitions, New York, USA, 1997.
- [39] TAYLOR, C. W. **Power System Voltage Stability/EPRI-Power System Engineering Series**. 1 ed. USA, McGraw-Hill Inc, 1994.
- [40] GAO, B., MORISON, G. K., KUNDUR, P. **Voltage Stability Evaluation Using Modal Analysis: IEEE Transactions on Power Systems**, v. 7, n° 4, pp. 1529-1542, 1992.
- [41] PINTO, H. J. C. P., MARTINS, N., VIEIRA Fº., X., BIANCO, **Modal Analysis for Voltage Stability Applications at Base Case and Point of Collapse**, Proceedings of Bulk Power Systems Voltage Phenomena III: Voltage Stability Security and Control, pp. 215-228, Davos, Switzerland, 1994.
- [42] MATHWORKS. **Matlab: User's Guide. Versão R2010b**, 2010.
- [43] LINGO. **LINGO – User's Guide**, 2008.
- [44] CEPTEL. **Análise de Transitórios Eletromecânicos – ANATEM**. Manual do Usuário Versão 10.4.4a. Rio de Janeiro, 2010.
- [45] ALMEIDA, L. P. **Análise de desempenho do Controle Automático de Geração e do Controle Secundário de Tensão**. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2004.
- [46] ALVES, W. F., **Proposição de Sistemas testes para Análise Computacional de Sistemas de Potência**: Dissertação de Mestrado, Universidade Federal Fluminense, Niterói, RJ, 2007.
- [47] PAI. M. A. **Energy Function Analysis For Power System Stability**. Kluwer Academic Publishers, 1991.
- [48] University of Washington Electrical Engineering. Disponível em: <http://www.ee.washington.edu/research/pstca/>. Acesso em 15 de Outubro de 2013.

- 
- [49] PASSOS FILHO, J. A. **Representação e Avaliação do Desempenho de Dispositivos de Controle no Problema e Fluxo de Potência**: Tese de Doutorado-COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.
- [50] VAN CUTSEM, T., **Voltage Stability of Electric Powers Systems**. The Kluwer International Series in Engineering and Computer Science – Power Electronics and Power Systems Series, Kluwer Academic Publishers, 1998.

---

# Apêndice A -

## Equação Básica do Motor de Indução com Desvios de Frequência

### A.1 Considerações Iniciais

Na modelagem do motor de indução, são inseridas duas equações a mais na matriz Jacobiana do processo de solução do problema, estas equações representam uma nova barra PQ, que é a barra interna do modelo do motor de indução. Além destas duas equações, é necessário uma equação a mais que relaciona as variáveis da barra interna com as variáveis da barra terminal ( $E$ ,  $P_{mec}$  e  $P_{el}$ ). Esta equação representa o total da potência elétrica ( $P_{el}$ ) que vai ser consumida no motor de indução, ou seja, a potência mecânica  $P_{mec}$  para um dado valor de tensão  $E$  em sua barra interna.

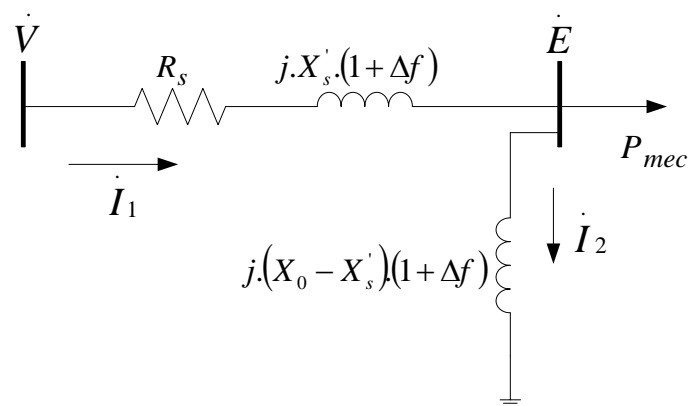


Figura 76 - Circuito equivalente do motor de indução para o FPRP

---

## A.2 Equação do Motor de Indução

A equação que relaciona as variáveis ( $E$ ,  $P_{mec}$  e  $P_{el}$ ), é deduzida a partir das equações básicas do circuito da Figura 80, que representa o circuito equivalente do motor de indução com desvios de frequência para o Fluxo de Potência. Desta figura tem-se as seguintes equações:

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{V} - \dot{E}}{R_s + j.X'.(1 + \Delta f)} \quad (A.1)$$

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{E}}{j.(X_0 - X')(1 + \Delta f)} \quad (A.2)$$

$$\dot{I}_3 = \dot{I}_1 - \dot{I}_2 \quad (A.3)$$

$$P_{el} = R_s . \dot{I}_1 . \dot{I}_2^* + P_{mec} \quad (A.4)$$

$$\dot{I}_3 = \frac{\dot{E}}{R_e} \quad (A.5)$$

$$R_e = \frac{E^2}{P_{mec}} \quad (A.6)$$

Destas equações, (A.3) representa a corrente consumida pela carga  $P_{mec}$ , que pode ser definida também por (A.5), onde  $R_e$  é a resistência que representa a carga mecânica no rotor..

Substituindo as equações (A.2) e (A.5) em (A.3) e utilizando a tensão  $E$  em sua forma retangular ( $E_r + j.E_i$ ), obtêm-se a seguinte expressão:

$$\dot{I}_1 = \frac{E_r + j.E_i}{j.(X_0 - X')(1 + \Delta f)} + \frac{E_r + j.E_i}{R_e} \quad (A.7)$$

Rearranjando a expressão (A.7) tem-se:

$$\dot{I}_1 = \frac{E_i - j.E_r}{(X_0 - X')(1 + \Delta f)} + \frac{E_r + j.E_i}{R_e} \quad (\text{A.8})$$

A equação (A.9) representa o conjugado de (A.8).

$$\dot{I}_1^* = \frac{E_i + j.E_r}{(X_0 - X')(1 + \Delta f)} + \frac{E_r - j.E_i}{R_e} \quad (\text{A.9})$$

Multiplicando as equações (A.8) e (A.9), chega-se na equação (A.14), onde o seu desenvolvimento está representado pelas equações abaixo.

$$\dot{I}_1 . \dot{I}_1^* = \left( \frac{E_i - j.E_r}{(X_0 - X')(1 + \Delta f)} + \frac{E_r + j.E_i}{R_e} \right) \left( \frac{E_i + j.E_r}{(X_0 - X')(1 + \Delta f)} + \frac{E_r - j.E_i}{R_e} \right) \quad (\text{A.10})$$

$$\dot{I}_1 . \dot{I}_1^* = \frac{E_r^2 + E_i^2}{(X_0 - X')^2 . (1 + \Delta f)^2} + \frac{E_r^2 + E_i^2}{R_e^2} \quad (\text{A.11})$$

$$\dot{I}_1 . \dot{I}_1^* = \frac{E_r^2 . R_e^2 + E_i^2 . R_e^2 + E_r^2 . (X_0 - X')^2 . (1 + \Delta f)^2 + E_i^2 . (X_0 - X')^2 . (1 + \Delta f)^2}{R_e^2 . (X_0 - X')^2 . (1 + \Delta f)^2} \quad (\text{A.12})$$

$$\dot{I}_1 . \dot{I}_1^* = \frac{(R_e^2 + (X_0 - X')^2 . (1 + \Delta f)^2)(E_r^2 + E_i^2)}{R_e^2 . (X_0 - X')^2 . (1 + \Delta f)^2} = \frac{(R_e^2 + (X_0 - X')^2 . (1 + \Delta f)^2)E^2}{R_e^2 . (X_0 - X')^2 . (1 + \Delta f)^2} \quad (\text{A.13})$$

$$\dot{I}_1 . \dot{I}_1^* = \frac{\left( \frac{E^4}{P_{mec}^2} + (X_0 - X')^2 . (1 + \Delta f)^2 \right) . E^2}{\frac{E^4}{P_{mec}^2} . (X_0 - X')^2 . (1 + \Delta f)^2} = \frac{E^4 + (X_0 - X')^2 . (1 + \Delta f)^2 . P_{mec}^2}{E^2 . (X_0 - X')^2 . (1 + \Delta f)^2} \quad (\text{A.14})$$

Substituindo (A.14) em (A.4) chega-se à expressão (A.15).

$$P_{el} = R_s . \frac{E^4 + (X_0 - X')^2 . (1 + \Delta f)^2 . P_{mec}^2}{E^2 . (X_0 - X')^2 . (1 + \Delta f)^2} + P_{mec} \quad (\text{A.15})$$

A expressão (A.15) pode ser reescrita da seguinte forma:

---


$$\begin{aligned}
P_{el} \cdot E^2 \cdot (X_0 - X')^2 \cdot (1 + \Delta f)^2 &= R_s \cdot (E^4 + (X_0 - X')^2 \cdot (1 + \Delta f)^2 \cdot P_{mec}^2) + \\
+ P_{mec} \cdot E^2 \cdot (X_0 - X')^2 \cdot (1 + \Delta f)^2 &
\end{aligned}
\tag{A.16}$$

Da equação (A.16) se obtêm a (A.17), que é a equação que relaciona as variáveis da barra interna com as variáveis da barra terminal.

$$\begin{aligned}
P_{mec}^2 \cdot R_s \cdot (X_0 - X')^2 \cdot (1 + \Delta f)^2 + P_{mec} \cdot E^2 \cdot (X_0 - X')^2 \cdot (1 + \Delta f)^2 + E^4 \cdot R_s - \\
- E^2 \cdot P_{el} \cdot (X_0 - X')^2 \cdot (1 + \Delta f)^2 &= 0
\end{aligned}
\tag{A.17}$$

---

# Apêndice B -

## Dados dos Sistemas

### B.1 Considerações Gerais

Neste Apêndice estão apresentados os parâmetros elétricos e modelos dinâmicos dos sistemas utilizados neste trabalho.

### B.2 Sistema Tutorial 2 Barras

#### B.2.1 Dados de Barras

Tabela 28 - Dados de barra - Sistema 2 Barras

<i>Barra</i>	<i>Nome</i>	<i>Tipo</i>	<i>Geração Ativa</i>	<i>Geração Reativa</i>	<i>Carga Ativa</i>	<i>Carga Reativa</i>	<i>Capacitor Reator</i>	<i>Área</i>
1	Gerador-1	$V\theta$	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1
2	Barra-2	PV	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	1

#### B.2.2 Dados de linha

Tabela 29 - Dados de linha - Sistema 2 Barras

<i>De</i>	<i>Para</i>	<i>Circuito</i>	<i>Resistência</i>	<i>Reatância</i>	<i>Susceptância</i>	<i>Tap</i>
1	2	1	0,0	20,0	0,0	-

#### B.2.3 Dados de Máquinas

Tabela 30 - Dados de Potência - Sistema 2 Barras

<i>Barra</i>	<i>Nome</i>	<i>Nº de Máquinas</i>	<i>Geração Máxima por Máquina (MVA)</i>	<i>Geração Máxima Total (MVA)</i>
1	Gerador-1	1	100,0	100,0

Tabela 31 - Modelo e dados dos geradores - Sistema 2 Barras

<i>Barra</i>	<i>Nome</i>	<i>X<sub>d</sub></i>	<i>X<sub>q</sub></i>	<i>X'<sub>d</sub></i>	<i>X''<sub>d</sub></i>	<i>X<sub>l</sub></i>	<i>T'<sub>d</sub></i>	<i>T''<sub>d</sub></i>	<i>T''<sub>q</sub></i>	<i>H</i>
1	Gerador-1	140	75	40	25	15	9	0,025	0,08	3

### B.3 Sistema 6 Barras

#### B.3.1 Dados de Barras

Tabela 32 - Dados de barra - Sistema 6 Barras

<i>Barra</i>	<i>Nome</i>	<i>Tipo</i>	<i>Geração Ativa</i>	<i>Geração Reativa</i>	<i>Carga Ativa</i>	<i>Carga Reativa</i>	<i>Capacitor Reator</i>	<i>Área</i>
1	Gerador-1	$v \theta$	50,0	7,534	0,0	0,0	0,0	1
2	Gerador-2	PV	90,0	22,6	0,0	0,0	0,0	1
3	Barra-3	PQ	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1
4	Barra-4	PQ	0,0	0,0	120,0	0,0	0,0	1
5	Barra-5	PQ	0,0	0,0	40,0	0,0	0,0	1
6	Gerador-3	PV	20,0	2,621	0,0	0,0	0,0	1

#### B.3.2 Dados de linha

Tabela 33 - Dados de linha - Sistema 6 Barras

<i>De</i>	<i>Para</i>	<i>Circuito</i>	<i>Resistência</i>	<i>Reatância</i>	<i>Susceptância</i>	<i>Tap</i>
1	3	1	0,0	20,0	0,0	-
2	3	1	0,0	7,0	0,0	-
3	4	1	0,0	18,0	0,0	-
3	4	2	0,0	18,0	0,0	-
4	5	1	0,0	90,0	0,0	-
5	6	1	0,0	20,0	0,0	-

#### B.3.3 Dados de Máquinas

Tabela 34 - Dados de Potência - Sistema 6 Barras

<i>Barra</i>	<i>Nome</i>	<i>Nº de Máquinas</i>	<i>Geração Máxima por Máquina (MVA)</i>	<i>Geração Máxima Total (MVA)</i>
1	Gerador-1	1	100,0	100,0
2	Gerador-2	1	200,0	200,0
6	Gerador-3	1	50,0	50,0



Tabela 35 - Modelo e dados dos geradores - Sistema 6 Barras

Barra	Nome	$X_d$	$X_q$	$X'd$	$X''d$	$X_l$	$T'd$	$T''d$	$T''q$	$H$
1	Gerador-1	140	75	40	25	15	9	0,025	0,08	3
2	Gerador-2	140	75	40	25	15	9	0,025	0,08	3
6	Gerador-3	140	75	40	25	15	9	0,025	0,08	3

## B.4 Sistema 16 Barras

### B.4.1 Dados de Barras

Tabela 36 - Dados de barra - Sistema 16 Barras

Barra	Nome	Tipo	Geração Ativa	Geração Reativa	Carga Ativa	Carga Reativa	Capacitor Reator	Área
1	Gerador-1	PV	200,0	-115,0	0,0	0,0	0,0	1
2	Barra-2	PQ	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1
3	Barra-3	PQ	0,0	0,0	26,0	16,0	-90,0	1
4	Barra-4	PQ	0,0	0,0	58,0	39,0	0,0	2
5	Barra-5	PQ	0,0	0,0	16,0	11,0	0,0	2
6	Barra-6	PQ	0,0	0,0	10,0	7,0	0,0	2
7	Barra-7	PQ	0,0	0,0	9,0	8,0	0,0	2
8	Barra-8	PQ	0,0	0,0	21,0	13,0	0,0	2
9	C. Síncrono	PV	0,0	-38,8	0,0	0,0	0,0	2
10	Barra-10	PQ	0,0	0,0	23,0	16,0	0,0	1
11	Barra-11	PQ	0,0	0,0	22,0	15,0	-30	1
12	Barra-12	PQ	0,0	0,0	56,0	31,0	0,0	1
13	Barra-13	PQ	0,0	0,0	33,0	19,0	0,0	1
14	Barra-14	PQ	0,0	0,0	32,0	21,0	0,0	1
15	Barra-15	PQ	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1
16	Barra-16	$\forall \theta$	108	-78,0	0,0	0,0	0,0	2

### B.4.2 Dados de linha

Tabela 37 - Dados de linha - Sistema 16 Barras

De	Para	Circuito	Resistência	Reatância	Susceptância	Tap
1	2	1	0,0	3,0	0,0	1,0
2	3	1	0,45	4,96	84,8	-
2	3	2	0,45	4,96	84,8	-
3	12	1	0,24	2,64	45,05	-
3	14	1	0,0	8,33	0,0	0,9882
3	15	1	0,79	8,38	30,63	-
3	15	2	0,79	8,38	30,63	-
4	5	1	0,69	7,37	26,95	-
4	15	1	0,0	6,67	0,0	1,068
5	6	1	0,5	5,36	19,6	1,068

<i>De</i>	<i>Para</i>	<i>Circuito</i>	<i>Resistência</i>	<i>Reatância</i>	<i>Susceptância</i>	<i>Tap</i>
5	7	1	0,6	6,37	23,28	-
5	16	1	0,0	5,0	0,0	1,0
7	8	1	0,47	5,03	18,38	-
8	9	1	0,0	12,5	0,0	1,0
10	8	1	0,0	10,0	0,0	0,945
10	11	1	0,34	3,72	63,6	-
11	12	1	0,39	4,34	74,2	-
12	13	1	0,22	2,48	42,4	-
12	13	2	0,22	2,48	42,4	-

### B.4.3 Dados de Máquinas

Tabela 38 - Dados de Potência - Sistema 16 Barras

<i>Barra</i>	<i>Nome</i>	<i>Nº de Máquinas</i>	<i>Geração Máxima por Máquina (MVA)</i>	<i>Geração Máxima Total (MVA)</i>
1	Gerador-1	1	422,0	422,0
9	C. Síncrono	1	70,0	70,0
16	Gerador-2	1	140,0	140,0

Tabela 39 - Modelo e dados dos geradores - Sistema 16 barras

<i>Barra</i>	<i>Nome</i>	<i>Nº</i>	<i>X<sub>d</sub></i>	<i>X<sub>q</sub></i>	<i>X'<sub>d</sub></i>	<i>X''<sub>d</sub></i>	<i>X<sub>l</sub></i>	<i>T'<sub>d</sub></i>	<i>T''<sub>d</sub></i>	<i>T''<sub>q</sub></i>	<i>H</i>	<i>FP</i>
1	Gerador-1	1	100,0	69,0	30,0	20,0	14,0	0,060	0,060	0,160	4,91	0,9
9	C. Síncrono	1	198,0	125,0	43,0	43,0	17,7	0,093	0,093	0,041	1,27	-
16	Gerador-2	1	102,0	67,0	32,0	32,0	18,0	0,07	0,070	0,170	2,17	0,9

Tabela 40 - Parâmetros do Regulador de Tensão - Sistema 16 barras

<i>Núm</i>	<i>Máq</i>	<i>K</i>	<i>T</i>	<i>T1</i>	<i>T2</i>	<i>Lmax</i>	<i>Lmin</i>
11	Gerador-1	50	0,003	1,0	5,0	5	-4
12	Gerador-2	50	0,003	1,0	5,0	5	-4
13	C. Síncrono	200	0,016	1,2	6,0	4	-3,4

Tabela 41 - Parâmetros do Regulador de Velocidade - Sistema 16 barras

<i>Núm</i>	<i>Máq</i>	<i>A<sub>t</sub></i>	<i>D</i>	<i>D<sub>t</sub></i>	<i>Lmax</i>	<i>Lmin</i>	<i>PBmaq</i>	<i>Pbtur</i>	<i>Qnl</i>	<i>R</i>	<i>R<sub>p</sub></i>	<i>T<sub>f</sub></i>	<i>T<sub>g</sub></i>	<i>T<sub>r</sub></i>	<i>T<sub>w</sub></i>
21	Ger-1	1,2	1,0	0,5	0,984	0,0	422	422	0,15	0,05	0,38	0,05	0,5	7,0	1,5
22	Ger-2	1,2	1,0	0,5	0,984	0,0	140	140	0,15	0,05	0,38	0,05	0,5	7,0	1,5

## B.5 Sistema *New England*

### B.5.1 Dados de Barras

Tabela 42 - Dados de barra - Sistema *New England*

<i>Barra</i>	<i>Nome</i>	<i>Tipo</i>	<i>Geração Ativa</i>	<i>Geração Reativa</i>	<i>Carga Ativa</i>	<i>Carga Reativa</i>	<i>Capacitor Reator</i>	<i>Área</i>
1	Barra-1	PQ	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1
2	Barra-2	PQ	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1
3	Barra-3	PQ	0,0	0,0	322,0	2,4	0,0	1
4	Barra-4	PQ	0,0	0,0	500,0	184,0	0,0	1
5	Barra-5	PQ	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1
6	Barra-6	PQ	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1
7	Barra-7	PQ	0,0	0,0	233,8	84,0	0,0	1
8	Barra-8	PQ	0,0	0,0	522,0	176,0	0,0	1
9	Barra-9	PQ	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1
10	Barra-10	PQ	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1
11	Barra-11	PQ	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1
12	Barra-12	PQ	0,0	0,0	8,5	88,0	0,0	1
13	Barra-13	PQ	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1
14	Barra-14	PQ	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1
15	Barra-15	PQ	0,0	0,0	320,0	153,0	0,0	1
16	Barra-16	PQ	0,0	0,0	329,4	32,3	0,0	1
17	Barra-17	PQ	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1
18	Barra-18	PQ	0,0	0,0	158,0	30,0	0,0	1
19	Barra-19	PQ	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1
20	Barra-20	PQ	0,0	0,0	680,0	103,0	0,0	1
21	Barra-21	PQ	0,0	0,0	274,0	115,0	0,0	1
22	Barra-22	PQ	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1
23	Barra-23	PQ	0,0	0,0	247,5	84,6	0,0	1
24	Barra-24	PQ	0,0	0,0	308,6	-92,2	0,0	1
25	Barra-25	PQ	0,0	0,0	224,0	47,2	0,0	1
26	Barra-26	PQ	0,0	0,0	139,0	17,0	0,0	1
27	Barra-27	PQ	0,0	0,0	281,0	75,5	0,0	1
28	Barra-28	PQ	0,0	0,0	206,0	27,6	0,0	1
29	Barra-29	PQ	0,0	0,0	283,5	26,9	0,0	1
30	Gerador-1	PV	250,0	146,3	0,0	0,0	0,0	1
31	Gerador-2	PV	573,2	207,1	9,2	4,6	0,0	1
32	Gerador-3	PV	650,0	205,3	0,0	0,0	0,0	1
33	Gerador-4	PV	632,0	108,6	0,0	0,0	0,0	1
34	Gerador-5	PV	508,0	166,5	0,0	0,0	0,0	1
35	Gerador-6	PV	650,0	209,3	0,0	0,0	0,0	1
36	Gerador-7	PV	560,0	102,1	0,0	0,0	0,0	1
37	Gerador-8	PV	540,0	0,4102	0,0	0,0	0,0	1
38	Gerador-9	PV	830,0	23,02	0,0	0,0	0,0	1
39	Gerador-10	$v \theta$	1000,0	87,43	1104,0	250,0	0,0	1

## B.5.2 Dados de linha

Tabela 43 - Dados de linha - Sistema New England

<i>De</i>	<i>Para</i>	<i>Circuito</i>	<i>Resistência</i>	<i>Reatância</i>	<i>Susceptância</i>	<i>Tap</i>
1	2	1	0,35	4,11	69,87	-
1	39	1	0,10	2,50	75,0	-
2	3	1	0,13	1,15	25,72	-
2	25	1	0,70	0,86	14,60	-
2	30	1	0,0	1,81	0,0	1,025
3	4	1	0,13	2,13	22,14	-
3	18	1	0,11	1,33	21,38	-
4	5	1	0,08	1,28	13,42	-
4	14	1	0,08	1,29	13,82	-
5	6	1	0,02	0,26	4,34	-
5	8	1	0,08	1,12	14,76	-
6	11	1	0,07	0,82	13,89	-
6	31	1	0,0	2,5	0,0	1,07
7	8	1	0,04	0,46	7,80	-
8	9	1	0,23	3,63	38,04	-
9	39	1	0,10	2,50	120,0	-
10	11	1	0,04	0,43	7,29	-
10	13	1	0,04	0,43	7,29	-
10	32	1	0,0	2,00	0,0	1,07
12	11	1	0,16	4,35	0,0	1,006
12	13	1	0,16	4,35	0,0	1,006
13	14	1	0,09	1,01	17,23	-
14	15	1	0,18	2,17	36,60	-
15	16	1	0,09	0,94	17,10	-
16	17	1	0,07	0,89	13,42	-
16	19	1	0,16	1,95	30,40	-
16	21	1	0,08	1,35	25,48	-
16	24	1	0,03	0,59	6,80	-
17	18	1	0,07	0,82	13,19	-
17	27	1	0,13	1,73	32,16	-
19	20	1	0,07	1,38	0,0	1,06
19	33	1	0,07	1,42	0,0	1,07
20	34	1	0,09	1,80	0,0	1,009
21	22	1	0,08	1,40	25,65	-
22	23	1	0,06	0,96	18,46	-
22	35	1	0,0	1,43	0,0	1,025
23	24	1	0,22	3,50	36,1	-
23	36	1	0,05	2,72	0,0	1,0
25	26	1	0,32	3,23	51,3	-
25	37	1	0,06	2,32	0,0	1,025
26	27	1	0,14	1,47	23,96	-
26	28	1	0,43	4,74	78,02	-
26	29	1	0,57	6,25	102,90	-
28	29	1	0,14	1,51	24,90	-
29	38	1	0,08	1,56	0,0	1,025

### B.5.3 Dados de Máquinas

Tabela 44 - Dados de Potência - Sistema New England

Barra	Nome	Nº de Máquinas	Geração Máxima por Máquina (MVA)	Geração Máxima Total (MVA)
30	Gerador-1	1	1000	1000
31	Gerador-2	1	1000	1000
32	Gerador-3	1	1000	1000
33	Gerador-4	1	1000	1000
34	Gerador-5	1	1000	1000
35	Gerador-6	1	1000	1000
36	Gerador-7	1	1000	1000
37	Gerador-8	1	1000	1000
38	Gerador-9	1	1000	1000
39	Gerador-10	1	1000	1000

Tabela 45 - Modelo e dados dos geradores - Sistema New England

Barra	$X_d$	$X_q$	$X'd$	$X''d$	$X_l$	$T'd$	$T''d$	$T'q$	$H$	$R_a$
30	0,265	0,183	0,082	0,053	0,033	10,2	0,03	0,04	4,20	0,140
31	0,783	0,748	0,185	0,053	0,093	6,56	0,03	0,04	3,03	2,700
32	0,662	0,629	0,141	0,053	0,081	5,70	0,03	0,04	3,58	0,386
33	0,695	0,684	0,115	0,053	0,078	5,69	0,03	0,04	2,86	0,222
34	1,777	1,644	0,350	0,053	0,143	5,40	0,03	0,04	2,60	0,140
35	0,674	0,639	0,132	0,053	0,059	7,30	0,03	0,04	3,48	6,150
36	0,782	0,774	0,130	0,053	0,085	5,66	0,03	0,04	2,64	0,268
37	0,769	0,743	0,151	0,053	0,074	6,70	0,03	0,04	2,43	0,686
38	0,557	0,544	0,151	0,053	0,079	4,79	0,03	0,04	3,45	0,300
39	0,053	0,050	0,015	0,005	0,008	7,00	0,03	0,04	50,00	0,100

## B.6 Sistema IEEE 118 Barras

### B.5.1 Dados de Barras

Tabela 46 - Dados de barra - Sistema IEEE 118 Barras

Barra	Nome	Tipo	Tensão	Geração Ativa	Geração Reativa	Carga Ativa	Carga Reativa	Capacitor Reator	Área
1	Riversde	PV	0,955	0,0	0,0	51,0	27,0	0,0	1
2	Pokagon	PQ	0,971	0,0	0,0	20,0	9,0	0,0	1
3	HickryCk	PQ	0,968	0,0	0,0	39,0	10,0	0,0	1
4	MwCarlsl	PV	0,998	-9,0	0,0	30,0	12,0	0,0	1
5	Olive	PQ	1,002	0,0	0,0	0,0	0	-40,0	1
6	Kankakee	PV	0,990	0,0	0,0	52,0	22,0	0,0	1
7	JacksnRd	PQ	0,989	0,0	0,0	19,0	2,0	0,0	1
8	Olive	PV	1,015	-28,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1
9	Bequine	PQ	1,043	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1

Barra	Nome	Tipo	Tensão	Geração Ativa	Geração Reativa	Carga Ativa	Carga Reativa	Capacitor Reator	Área
10	Breed	PV	1,050	450,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1
11	SouthBnd	PQ	0,985	0,0	0,0	70,0	23,0	0,0	1
12	TwinBrch	PV	0,990	85,0	0,0	47,0	10,0	0,0	1
13	Concord	PQ	0,968	0,0	0,0	34,0	16,0	0,0	1
14	GoshenJt	PQ	0,984	0,0	0,0	14,0	1,0	0,0	1
15	FtWayne	PV	0,970	0,0	0,0	90,0	30,0	0,0	1
16	N.E.	PQ	0,984	0,0	0,0	25,0	10,0	0,0	1
17	Sorenson	PQ	0,995	0,0	0,0	11,0	3,0	0,0	1
18	McKinley	PV	0,973	0,0	0,0	60,0	34,0	0,0	1
19	Lincoln	PV	0,963	0,0	0,0	45,0	25,0	0,0	1
20	Adams	PQ	0,958	0,0	0,0	18,0	3,0	0,0	1
21	Jay	PQ	0,959	0,0	0,0	14,0	8,0	0,0	1
22	Randolph	PQ	0,970	0,0	0,0	10,0	5,0	0,0	1
23	CollCrnr	PQ	1,000	0,0	0,0	7,0	3,0	0,0	1
24	Trenton	PV	0,992	-13,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1
25	TannrsCk	PV	1,050	220,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1
26	TrnnrsCk	PV	1,015	314,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1
27	Madison	PV	0,968	-9,0	0,0	62,0	13,0	0,0	1
28	Mullin	PQ	0,962	0,0	0,0	17,0	7,0	0,0	1
29	Grant	PQ	0,963	0,0	0,0	24,0	4,0	0,0	1
30	Sorenson	PQ	0,968	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1
31	DeerCrk	PV	0,967	7,0	0,0	43,0	27,0	0,0	1
32	Delaware	PV	0,964	0,0	0,0	59,0	23,0	0,0	1
33	Haviland	PQ	0,972	0,0	0,0	23,0	9,0	0,0	1
34	Rockhill	PV	0,986	0,0	0,0	59,0	26,0	14,0	1
35	WestLima	PQ	0,981	0,0	0,0	33,0	9,0	0,0	1
36	Sterling	PV	0,980	0,0	0,0	31,0	17,0	0,0	1
37	EastLima	PQ	0,992	0,0	0,0	0,0	0,0	-25,0	1
38	EastLima	PQ	0,962	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1
39	NwLibrty	PQ	0,970	0,0	0,0	27,0	11,0	0,0	1
40	WestEnd	PV	0,970	-46,0	0,0	20,0	23,0	0,0	1
41	S.Tiffin	PQ	0,967	0,0	0,0	37,0	10,0	0,0	1
42	Howard	PV	0,985	-59,0	0,0	37,0	23,0	0,0	1
43	S.Kenton	PQ	0,978	0,0	0,0	18,0	7,0	0,0	1
44	WMVernon	PQ	0,985	0,0	0,0	16,0	8,0	10,0	1
45	N.Newark	PQ	0,987	0,0	0,0	53,0	22,0	10,0	1
46	W.Lancst	PV	1,005	19,0	0,0	28,0	10,0	10,0	1
47	Crooksvl	PQ	1,017	0,0	0,0	34,0	0	0,0	1
48	Znesvll	PQ	1,021	0,0	0,0	20,0	11,0	15,0	1
49	Philo	PV	1,025	204,0	0,0	87,0	30,0	0,0	1
50	WCambrdg	PQ	1,001	0,0	0,0	17,0	4,0	0,0	1
51	Newcmrst	PQ	0,967	0,0	0,0	17,0	8,0	0,0	1
52	SCoshoct	PQ	0,957	0,0	0,0	18,0	5,0	0,0	1
53	Wooster	PQ	0,946	0,0	0,0	23,0	11,0	0,0	1
54	Torrey	PV	0,955	48,0	0,0	113,0	32,0	0,0	1
55	Wagenhls	PV	0,952	0,0	0,0	63,0	22,0	0,0	1
56	Sunnysde	PV	0,954	0,0	0,0	84,0	18,0	0,0	1
57	WNwPhil1	PQ	0,971	0,0	0,0	12,0	3,0	0,0	1
58	WNwPhil2	PQ	0,959	0,0	0,0	12,0	3,0	0,0	1
59	Tidd	PV	0,985	155,0	0,0	277,0	113,0	0,0	1
60	SWKammer	PQ	0,993	0,0	0,0	78,0	3,0	0,0	1
61	W.Kammer	PV	0,995	160,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1
62	Natrium	PV	0,998	0,0	0,0	77,0	14,0	0,0	1
63	Tidd	PQ	0,969	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1
64	Kammer	PQ	0,984	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1
65	Muskngum	PV	1,005	391,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1

Barra	Nome	Tipo	Tensão	Geração Ativa	Geração Reativa	Carga Ativa	Carga Reativa	Capacitor Reator	Área
66	Muskngum	PV	1,050	392,0	0,0	39,0	18,0	0,0	1
67	Summerfl	PQ	1,020	0,0	0,0	28,0	7,0	0,0	1
68	Sporn	PQ	1,003	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1
69	Sporn	$\sqrt{\theta}$	1,035	513,5	0,0	0,0	0,0	0,0	1
70	Portsmth	PV	0,984	0,0	0,0	66,0	20,0	0,0	1
71	Nportsmt	PQ	0,987	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1
72	Hillsbro	PV	0,980	-12,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1
73	Sargents	PV	0,991	-6,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1
74	Bellefnt	PV	0,958	0,0	0,0	68,0	27,0	12,0	1
75	SthPoint	PQ	0,967	0,0	0,0	47,0	11,0	0,0	1
76	Darrah	PV	0,943	0,0	0,0	68,0	36,0	0,0	1
77	Turner	PV	1,006	0,0	0,0	61,0	28,0	0,0	1
78	Chemical	PQ	1,003	0,0	0,0	71,0	26,0	0,0	1
79	CapitlHl	PQ	1,009	0,0	0,0	39,0	32,0	20,0	1
80	CabinCrk	PV	1,040	477,0	0,0	130,0	26,0	0,0	1
81	Kanawha	PQ	0,997	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1
82	Logan	PQ	0,989	0,0	0,0	54,0	27,0	20,0	1
83	Sprigg	PQ	0,985	0,0	0,0	20,0	10,0	10,0	1
84	Betsylne	PQ	0,980	0,0	0,0	11,0	7,0	0,0	1
85	BeaverCk	PV	0,985	0,0	0,0	24,0	15,0	0,0	1
86	Hazard	PQ	0,987	0,0	0,0	21,0	10,0	0,0	1
87	Pineville	PV	1,015	4,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1
88	Fremont	PQ	0,987	0,0	0,0	48,0	10,0	0,0	1
89	ClinchRv	PV	1,005	607,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1
90	Holston	PV	0,985	-85,0	0,0	78,0	42,0	0,0	1
91	HolstonT	PV	0,980	-10,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1
92	Saltvile	PV	0,993	0,0	0,0	65,0	10,0	0,0	1
93	Tazewelle	PQ	0,987	0,0	0,0	12,0	7,0	0,0	1
94	Switchbk	PQ	0,991	0,0	0,0	30,0	16,0	0,0	1
95	Caldwell	PQ	0,981	0,0	0,0	42,0	31,0	0,0	1
96	Baileysv	PQ	0,993	0,0	0,0	38,0	15,0	0,0	1
97	Sundial	PQ	1,011	0,0	0,0	15,0	9,0	0,0	1
98	Bradley	PQ	1,024	0,0	0,0	34,0	8,0	0,0	1
99	Hinton	PV	1,010	-42,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1
100	GlenLyn	PV	1,017	252,0	0,0	37,0	18,0	0,0	1
101	Wythe	PQ	0,993	0,0	0,0	22,0	15,0	0,0	1
102	Smythe	PQ	0,991	0,0	0,0	5,0	3,0	0,0	1
103	Claytor	PV	1,001	40,0	0,0	23,0	16,0	0,0	1
104	Hancock	PV	0,971	0,0	0,0	38,0	25,0	0,0	1
105	Roanoke	PV	0,965	0,0	0,0	31,0	26,0	20,0	1
106	Cloverdl	PQ	0,962	0,0	0,0	43,0	16,0	0,0	1
107	Reusens	PV	0,952	-22,0	0,0	28,0	12,0	6,0	1
108	Blaine	PQ	0,967	0,0	0,0	2,0	1,0	0,0	1
109	Franklin	PQ	0,967	0,0	0,0	8,0	3,0	0,0	1
110	Fieldale	PV	0,973	0,0	0,0	39,0	30,0	0,0	1
111	DanRiver	PV	0,980	36,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1
112	Danville	PV	0,975	-43,0	0,0	25,0	13,0	0,0	1
113	DeerCrk	PV	0,993	-6,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1
114	WMedford	PQ	0,960	0,0	0,0	8,0	3,0	0,0	1
115	Medford	PQ	0,960	0,0	0,0	22,0	7,0	0,0	1
116	KygerCrk	PV	1,005	-184,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1
117	Cory	PQ	0,974	0,0	0,0	20,0	8,0	0,0	1
118	Whuntngd	PQ	0,949	0,0	0,0	33,0	15,0	0,0	1

## B.5.2 Dados de linha

Tabela 47 - Dados de linha - Sistema IEEE 118 Barras

De	Para	Circuito	Resistência	Reatância	Susceptância	Tap
1	2	1	3,030	9,990	2,540	-
1	3	1	1,290	4,240	1,082	-
4	5	1	0,176	0,798	0,210	-
3	5	1	2,410	10,800	2,840	-
5	6	1	1,190	5,400	1,426	-
6	7	1	0,459	2,080	0,550	-
8	9	1	0,244	3,050	116,20	-
8	5	1	0,000	2,670	0,000	0,985
9	10	1	0,258	3,220	123,00	-
4	11	1	2,090	6,880	1,748	-
5	11	1	2,030	6,820	1,738	-
11	12	1	0,595	1,960	0,502	-
2	12	1	1,870	6,160	1,572	-
3	12	1	4,840	16,000	4,060	-
7	12	1	0,862	3,400	0,874	-
11	13	1	2,225	7,310	1,876	-
12	14	1	2,150	7,070	1,816	-
13	15	1	7,440	24,440	6,268	-
14	15	1	5,950	19,500	5,020	-
12	16	1	2,120	8,340	2,140	-
15	17	1	1,320	4,370	4,440	-
16	17	1	4,540	18,010	4,660	-
17	18	1	1,230	5,050	1,298	-
18	19	1	1,119	4,930	1,142	-
19	20	1	2,520	11,700	2,980	-
15	19	1	1,200	3,940	1,010	-
20	21	1	1,830	8,490	2,160	-
21	22	1	2,090	9,700	2,460	-
22	23	1	3,420	15,900	4,040	-
23	24	1	1,350	4,920	4,980	-
23	25	1	1,560	8,000	8,640	-
26	25	1	0,000	3,820	0,000	0,960
25	27	1	3,180	16,300	17,640	-
27	28	1	1,913	8,550	2,160	-
28	29	1	2,370	9,430	2,380	-
30	17	1	0,000	3,880	0,000	0,960
8	30	1	0,431	5,040	51,400	-
26	30	1	0,799	8,600	90,800	-
17	31	1	4,740	15,630	3,990	-
29	31	1	1,080	3,310	0,830	-
23	32	1	3,170	11,530	11,730	-
31	32	1	2,980	9,850	2,510	-
27	32	1	2,290	7,550	1,926	-
15	33	1	3,800	12,440	3,194	-
19	34	1	7,520	24,700	6,320	-
35	36	1	0,224	1,020	0,268	-
35	37	1	1,100	4,970	1,318	-
33	37	1	4,150	14,200	3,660	-
34	36	1	0,871	2,680	0,568	-
34	37	1	0,256	0,940	0,984	-
38	37	1	0,000	3,750	0,000	0,935



De	Para	Circuito	Resistência	Reatância	Susceptância	Tap
37	39	1	3,210	10,600	2,700	-
37	40	1	5,930	16,800	4,200	-
30	38	1	0,464	5,400	42,200	-
39	40	1	1,840	6,050	1,552	-
40	41	1	1,450	4,870	1,222	-
40	42	1	5,550	18,300	4,660	-
41	42	1	4,100	13,500	3,440	-
43	44	1	6,080	24,540	6,068	-
34	43	1	4,130	16,810	4,226	-
44	45	1	2,240	9,010	2,240	-
45	46	1	4,000	13,560	3,320	-
46	47	1	3,800	12,700	3,160	-
46	48	1	6,010	18,900	4,720	-
47	49	1	1,910	6,250	1,604	-
42	49	1	7,150	32,300	8,600	-
42	49	1	7,150	32,300	8,600	-
45	49	1	6,840	18,600	4,440	-
48	49	1	1,790	5,050	1,258	-
49	50	1	2,670	7,520	1,874	-
49	51	1	4,860	13,700	3,420	-
51	52	1	2,030	5,880	1,396	-
52	53	1	4,050	16,350	4,058	-
53	54	1	2,630	12,200	3,100	-
49	54	1	7,300	28,900	7,380	-
49	54	1	8,690	29,100	7,300	-
54	55	1	1,690	7,070	2,020	-
54	56	1	0,275	0,955	0,732	-
55	56	1	0,488	1,510	0,374	-
56	57	1	3,430	9,660	2,420	-
50	57	1	4,740	13,400	3,320	-
56	58	1	3,430	9,660	2,420	-
51	58	1	2,550	7,190	1788	-
54	59	1	5,030	22,930	5,980	-
56	59	1	8,250	25,100	5,690	-
56	59	1	8,030	23,900	5,360	-
55	59	1	4,739	21,580	5,646	-
59	60	1	3,170	14,500	3,760	-
59	61	1	3,280	15,000	3,880	-
60	61	1	0,264	1,350	1,456	-
60	62	1	1,230	5,610	1,468	-
61	62	1	0,824	3,760	0,980	-
63	59	1	0,000	3,860	0,000	0,960
63	64	1	0,172	2,000	21,600	-
64	61	1	0,000	2,680	0,000	0,985
38	65	1	0,901	9,860	104,60	-
64	65	1	0,269	3,020	38,000	-
49	66	1	1,800	9,190	2,480	-
49	66	1	1,800	9,190	2,480	-
62	66	1	4,820	21,800	5,780	-
62	67	1	2,580	11,700	3,100	-
65	66	1	0,000	3,700	0,000	0,935
66	67	1	2,240	10,150	2,682	-
65	68	1	0,138	1,600	63,800	-
47	69	1	8,440	27,780	7,092	-
49	69	1	9,850	32,400	8,280	-
68	69	1	0,000	3,700	0,000	0,935
69	70	1	3,000	12,700	12,200	-

De	Para	Circuito	Resistência	Reatância	Susceptância	Tap
24	70	1	0,221	41,150	10,198	-
70	71	1	0,882	3,550	0,878	-
24	72	1	4,880	19,600	4,880	-
71	72	1	4,460	18,000	4,444	-
71	73	1	0,866	4,540	1,178	-
70	74	1	4,010	13,230	3,368	-
70	75	1	4,280	14,100	3,600	-
69	75	1	4,050	12,200	12,400	-
74	75	1	1,230	4,060	1,034	-
76	77	1	4,440	14,800	3,680	-
69	77	1	3,090	10,100	10,380	-
75	77	1	6,010	19,990	4,978	-
77	78	1	0,376	1,240	1,264	-
78	79	1	0,546	2,440	0,648	-
77	80	1	1,700	4,850	4,720	-
77	80	1	2,940	10,500	2,280	-
79	80	1	1,560	7,040	1,870	-
68	81	1	0,175	2,020	80,800	-
81	80	1	0,000	3,700	0,000	0,935
77	82	1	2,980	8,530	8,174	-
82	83	1	1,120	3,665	3,796	-
83	84	1	6,250	13,200	2,580	-
83	85	1	4,300	14,800	3,480	-
84	85	1	3,020	6,410	1,234	-
85	86	1	3,500	12,300	2,760	-
86	87	1	2,828	20,740	4,450	-
85	88	1	2,000	10,200	2,760	-
85	89	1	2,390	17,300	4,700	-
88	89	1	1,390	7,120	1,934	-
89	90	1	5,180	18,800	5,280	-
89	90	1	2,380	9,970	10,600	-
90	91	1	2,540	8,360	2,140	-
89	92	1	0,990	5,050	5,480	-
89	92	1	3,930	15,810	4,140	-
91	92	1	3,870	12,720	3,268	-
92	93	1	2,580	8,480	2,180	-
92	94	1	4,810	15,800	4,060	-
93	94	1	2,230	7,320	1,876	-
94	95	1	1,320	4,340	1,110	-
80	96	1	3,560	18,200	4,940	-
82	96	1	1,620	5,300	5,440	-
94	96	1	2,690	8,690	2,300	-
80	97	1	1,830	9,340	2,540	-
80	98	1	2380	10,800	2,860	-
80	99	1	4,540	20,600	5,460	-
92	100	1	6,480	29,500	4,720	-
94	100	1	1,780	5,800	6,040	-
95	96	1	1,710	5,470	1,474	-
96	97	1	1,730	8,850	2,400	-
98	100	1	3,970	17,900	4,760	-
99	100	1	1,800	8,130	2,160	-
100	101	1	2,770	12,620	3,280	-
92	102	1	1,230	5,590	1,464	-
101	102	1	2,460	11,200	2,940	-
100	103	1	1,600	5,250	5,360	-
100	104	1	4,510	20,400	5,410	-
103	104	1	4,660	15,840	4,070	-

De	Para	Circuito	Resistência	Reatância	Susceptância	Tap
103	105	1	5,350	16,250	4,080	-
100	106	1	6,050	22,900	6,200	-
104	105	1	0,994	3,780	0,986	-
105	106	1	1,400	5,470	1,434	-
105	107	1	5,300	18,300	4,720	-
105	108	1	2,610	7,030	1,844	-
106	107	1	5,300	18,300	4,720	-
108	109	1	1,050	2,880	0,760	-
103	110	1	3,906	18,130	4,610	-
109	110	1	2,780	7,620	2,020	-
110	111	1	2,200	7,550	2,000	-
110	112	1	2,470	6,400	6,200	-
17	113	1	0,913	3,010	0,768	-
32	113	1	6,150	20,300	5,180	-
32	114	1	1,350	6,120	1,628	-
27	115	1	1,640	7,410	1,972	-
114	115	1	0,230	1,040	0,276	-
68	116	1	0,034	0,405	16,400	-
12	117	1	3,290	14,000	3,580	-
75	118	1	1,450	4,810	1,198	-
76	118	1	1,640	5,440	1,356	-