

Comparação de Metodologias para Representação de Regulação Primária de Frequência no Problema de Fluxo de Potência

PRISCILA CRISTINE CHAVES DOS SANTOS

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO APRESENTADO COMO AVALIAÇÃO PARCIAL
PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE ENGENHEIRO ELETRICISTA DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DE JUIZ DE FORA, SUBMETIDO À APROVAÇÃO DA BANCA EXAMINADORA
COMPOSTA PELOS SEGUINTE MEMBROS:

APROVADO POR:

Prof. João Alberto Passos Filho, D.Sc. (Orientador)
Universidade Federal de Juiz de Fora – UFJF

Prof. Ricardo Mota Henriques, D.Sc.
Universidade Federal de Juiz de Fora – UFJF

Eng^a. Paula de Oliveira Lagatta, M.Sc.
Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - CEPEL

JUIZ DE FORA, MG – BRASIL

MARÇO DE 2016

*Dedico esse trabalho aos meus pais Roberto e Silvana
e a minha avó Maria.*

Agradecimentos

*Primeiramente agradeço a Deus, que a todo o momento da minha vida me ilumina, me guia e me
intui.*

*Aos meus pais que sempre me incentivaram e me deram força para nunca desistir dos meus
objetivos.*

*E especialmente neste trabalho com muito carinho, agradeço ao professor orientador João Alberto
Passos Filho que com seus amplos conhecimentos me incentivou e me mostrou que eu seria capaz
de concluí-lo.*

O meu muito obrigado!

RESUMO

Resumo da Monografia apresentada à UFJF como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Comparação de Metodologias para Representação de Regulação Primária de Frequência no Problema de Fluxo de Potência

Priscila Cristine Chaves dos Santos

Março, 2016

Orientador: Prof. João Alberto Passos Filho.

O fluxo de potência é a ferramenta mais utilizada nos vários estudos feitos atualmente em Sistemas Elétricos de Potência. Consiste basicamente no cálculo das tensões nodais, em módulo e fase. Esta análise é extensivamente utilizada nas fases de projeto, planejamento da expansão, planejamento da operação e operação propriamente dita dos sistemas, podendo constituir o estudo em si, ou constar como parte de estudos mais complexos.

A partir deste contexto, este trabalho tem como objetivo principal a implementação e avaliação de quatro alternativas para representação da regulação primária de frequência no problema de fluxo de potência, resolvido pelo método de Newton. As quatro metodologias estudadas são apresentadas de forma detalhada, destacando principalmente seu equacionamento e a formação da matriz Jacobiana do problema.

Neste trabalho utilizou-se o ambiente MatLab[®] para implementação das metodologias avaliadas. As metodologias foram avaliadas a partir do estudo de dois sistemas teste, um de pequeno porte com objetivo tutorial contendo 9 barras e um de médio porte com 39 barras, o sistema *New England*. A partir dos estudos realizados foi possível identificar os pontos positivos e negativos de cada metodologia.

Palavras chave: regulação primária, análise de regime permanente, método de Newton, fluxo de potência.

Sumário

LISTA DE FIGURAS	4
LISTA DE TABELAS	5
CAPÍTULO I INTRODUÇÃO	6
I.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	6
I.2 OBJETIVO	7
I.3 ESTRUTURA DO TRABALHO	8
CAPÍTULO II REGULAÇÃO PRIMÁRIA.....	9
II.1 MODELO DE REGULADOR.....	9
II.1.1 Regulador Isócrono	10
II.1.2 Regulador com queda de velocidade	11
II.2 MODELO TIE-LINE	12
II.3 CONTROLE DE GERAÇÃO.....	14
II.4 EXEMPLO.....	16
II.5 SUMÁRIO DO CAPÍTULO	18
CAPÍTULO III.....	19
COMPARAÇÃO DE METODOLOGIAS.....	19
III.1 IMPLEMENTAÇÃO DO MÉTODO	19
III.2 FLUXO 1	20
III.2 FLUXO 2.....	23
III.3 FLUXO 3.....	25
III.4 FLUXO 4.....	27
III.5 SUMÁRIO DO CAPÍTULO.....	28
CAPÍTULO IV	30
FATORAÇÃO E ELIMINAÇÃO DE GAUSS	30
IV.1 ELIMINAÇÃO DE GAUSS	30
IV.2 PERMUTAÇÃO	34
IV.3 FATORAÇÃO	35
IV.4 SUMÁRIO DO CAPÍTULO	38
CAPÍTULO V.....	39
RESULTADOS.....	39
V.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	39
V.2 ANÁLISES DA TENSÃO	39
V.2.1 Análise 9 barras.....	39
V.2.2 Análise 39 barras.....	43
V.3 ANÁLISE DO PIVOTEAMENTO	48
V.3.1 Análise 9 barras.....	48
V.3.2 Análise 39 barras.....	49
V.4 SUMÁRIO DO CAPÍTULO.....	51

CAPÍTULO VI	52
CONCLUSÕES	52
VI.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS	52
VI.2 CONSIDERAÇÕES FUTURAS	52
BIBLIOGRAFIA	54
APÊNDICE A	55
DADOS DO SISTEMA	55
A.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS	55
A.2 SISTEMA 9 BARRAS	55
A.3 SISTEMA 39 BARRAS	56

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Regulador Isócrono	10
Figura 2 – Regulador com queda de velocidade.....	11
Figura 3 – Topologia do sistema	16
Figura 4 – Fluxo de Potência para o sistema 9 barras	19
Figura 5 – Trajetória de convergência do FP - 9 barras sem perdas	41
Figura 6 – Trajetória de convergência do FP - 9 barras.....	42
Figura 7 – Fluxo de Potência para o sistema 39 barras	43
Figura 8 – Trajetória de convergência do FP - 39 barras.....	45
Figura 9 – Trajetória de convergência do FP (Carga modificada) - 39 barras.....	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Submatriz da Potência ativa da Jacobiana do Fluxo 1.....	37
Tabela 2 – Submatriz da Potência reativa da Jacobiana do Fluxo 1	38
Tabela 3 – Comparação dos resultados de tensão - 9 barras sem perdas	40
Tabela 4 – Comparação dos resultados da trajetória de convergência – 9 barras sem perdas..	40
Tabela 5 – Comparação dos resultados de tensão - 9 barras.....	41
Tabela 6 – Comparação dos resultados da trajetória de convergência – 9 barras	42
Tabela 7 – Comparação dos resultados de tensão - 39 barras.....	44
Tabela 8 – Comparação dos resultados da trajetória de convergência - 39 barras.....	45
Tabela 9 – Comparação dos dados de carga.....	46
Tabela 10 – Comparação dos resultados de tensão (Carga modificada) - 39 barras.....	46
Tabela 11 – Comparação dos resultados da trajetória de convergência (Carga modificada) – 39 barras.....	47

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

I.1 Considerações Iniciais

O Sistema Interligado Nacional (SIN) diariamente enfrenta problemas para solucionar as exigências que o país impõe para um melhor funcionamento do setor. Problemas esses, não somente relacionados às dimensões continentais do Brasil, mas também à demanda de energia elétrica, condições climáticas, problemas econômicos, entre outros. Com isso, é sempre necessário o desenvolvimento de novas ferramentas computacionais para um melhor planejamento e funcionamento do setor.

Para que o ponto de operação de um sistema elétrico, obtido através da solução de um fluxo de potência, corresponda da forma mais próxima possível à realidade, torna-se necessária a inclusão nos métodos de solução de técnicas que permitam simular a operação de dispositivos de controle que normalmente existem no sistema.

Atualmente, a maioria dos programas comerciais de fluxos de potência são desenvolvidos a partir da utilização do método de Newton-Raphson, apesar deste método possuir um algoritmo complexo na sua implementação, quando comparado a outros métodos. Esse modelo possui um bom desempenho computacional quando utilizado em sistemas reais de grande porte, pois possui técnicas de eliminação ordenada, reduzindo o tempo das poucas iterações necessárias.

O trabalho atual teve como ponto de partida o estudo de um novo modelo de representação da regulação primária de frequência no problema de fluxo de potência, conforme detalhado em [1]. A partir deste modelo foi possível analisar o desempenho da frequência do sistema em regime permanente. Tal metodologia é baseada na inclusão de equações adicionais ao problema de fluxo de potência, que são as equações que regem o comportamento da variação de potência ativa dos geradores com a frequência do sistema.

Desta forma, a primeira metodologia estudada foi à reprodução da formulação do fluxo de potência proposto em [1], que incorpora equações em sua matriz jacobiana original, formando um sistema de equações de ordem $(2nb + 2ng + ref)$. Durante a implementação e estudo desta metodologia

verificou-se a necessidade de permutação de equações durante o processo de fatoração LU. Esta permutação é necessária para evitar o aparecimento de um pivô nulo, conforme será explicado posteriormente.

Desta forma, foram implementadas três alternativas adicionais de inclusão das equações de regime permanente da regulação primária de frequência no fluxo de potência. Tais alternativas são baseadas na troca de variáveis de estado do problema. Destaca-se que a segunda e terceira alternativas foram propostas no contexto deste trabalho e que a quarta metodologia foi baseada em [2].

1.2 Objetivo

A partir deste contexto, este trabalho tem como objetivo principal a implementação e avaliação de quatro alternativas para representação da regulação primária de frequência no problema de fluxo de potência, resolvido pelo método de Newton. As quatro metodologias estudadas são apresentadas de forma detalhada, destacando principalmente seu equacionamento e a formação da matriz Jacobiana do problema.

Neste trabalho utilizou-se o ambiente MatLab[®] para implementação das metodologias avaliadas. As metodologias foram avaliadas a partir do estudo de dois sistemas teste, um de pequeno porte com objetivo tutorial contendo 9 barras e um de médio porte com 39 barras, o sistema *New England*. A partir dos estudos realizados foi possível identificar os pontos positivos e negativos de cada metodologia.

Este trabalho tem como motivação compreender o processo de construção de um fluxo de potência estendido e os problemas enfrentados no desenvolvimento de novas metodologias. Além disso, com os recursos computacionais do programa MatLab[®], o trabalho tem como objetivo desenvolver e implementar uma nova metodologia para a representação da regulação primária do fluxo de potência para simular de maneira mais eficiente o Sistema Elétrico de Potência.

Espera-se que o modelo proposto possa de algum modo facilitar os estudos de simulação, para que de maneira mais didática consiga contribuir no aprendizado do SEPs. Essa avaliação de sistemas de menor porte pode ser de grande aproveitamento para que em um futuro próximo o processo de análise e conseqüentemente de tomadas de decisões se reduza não somente nessas situações específicas, mas também em sistemas de grande porte.

I.3 Estrutura do Trabalho

O trabalho está dividido em cinco capítulos e um Apêndice, que serão brevemente resumidos nessa sessão.

O Capítulo 2 apresenta uma revisão dos principais conceitos referentes à regulação primária da malha de controle de potência e frequência em SEPs, além de apresentar modelos de reguladores que ajudaram a compor a metodologia aplicada.

No Capítulo 3 descreve as quatro metodologias de fluxo de potência desenvolvidos com as análises comparativas e suas formulações matemáticas. Para cada modelo proposto é indicado a matriz Jacobiana com suas modificações e as descrições da modelagem.

O Capítulo 4 revisa a teoria de fatoração e eliminação de Gauss para dar continuidade ao desenvolvimento de novas formulações de fluxos de potência, para assim compreender e solucionar os problemas encontrados durante o trabalho.

O Capítulo 5 reúne os resultados de cada modelo, englobando os principais valores para determinar a melhor proposta a ser utilizado em [3]. Apesar de o estudo ter utilizado o sistema 9 barras como base de desenvolvimento do trabalho, também foi simulado os resultados para um sistema de 39 barras para comprovar a veracidade da modelagem proposta.

Para finalizar, o Capítulo 6 apresenta as conclusões e propõe sugestões de trabalhos futuros com intensão de dar continuidade ao presente trabalho.

Para complementar as informações, o Apêndice A apresenta dados dos sistemas utilizados para desenvolver o trabalho.

CAPÍTULO II

REGULAÇÃO PRIMÁRIA

O objetivo principal deste capítulo é apresentar uma breve revisão da teoria acerca da regulação primária (atuação dos reguladores de velocidade). Além de uma explicação teórica desses conceitos, para um melhor entendimento, será apresentado um exemplo baseado na referência [4] aplicando a teoria já estudada.

A atuação em resposta a uma variação instantânea da potência gerada com relação à potência consumida recebe o nome de “Regulação Própria do Sistema”. Esse comportamento pode ocorrer porque, como as cargas normalmente variam com a frequência, se esta cai, o valor absoluto das cargas também cai, indicando uma “tendência” do próprio sistema, através de suas características próprias de carga, de se autorregular, atingindo assim, um novo estado de equilíbrio [1]. Vale ser destacado que a participação dos reguladores de velocidade dos geradores deve ser desprezada para que essa situação se de como verdade.

Porém, levar em consideração apenas a regulação própria dos SEPs pode levar o sistema a operar com grandes variações de frequência, o que se torna bastante indesejável na prática. Exatamente por essa razão, as unidades geradoras são dotadas de mecanismos de regulação de velocidade automática, que atuam no sentido de elevar ou reduzir a potência do gerador, quando a velocidade (ou a frequência) se afasta de seu valor de referência [4].

Para atingir os objetivos da regulação primária de manter a velocidade de rotação do gerador próxima à velocidade nominal e modificar a potência ativa gerada de acordo com as necessidades do sistema, é necessário compreender as propriedades dos SEPs e assim encontrar métodos mais otimizados do sistema, de acordo com [5].

II.1 Modelo de Regulador

Durante o dia as cargas no SEP variam de forma aleatória. Supondo o exemplo de um súbito aumento de carga no sistema, instantaneamente haverá um déficit de geração para suprir essa nova demanda. Neste primeiro momento, este aumento da demanda é suprido através da energia cinética das massas girantes das máquinas contidas no sistema, diminuindo a velocidade de rotação das mesmas e, conseqüentemente, da frequência elétrica do sistema [4].

Apesar dessa capacidade de se regularem, se faz necessário utilizar mecanismos de regulação de velocidade automática para reduzir ao máximo essa variação e manter o sistema o mais estável possível.

II.1.1 Regulador Isócrono

Utilizados para manter a velocidade de rotação do gerador próxima à velocidade nominal e modificar a potencia ativa gerada, foram desenvolvidos vários tipos de reguladores e um dos mais simples são os Reguladores Isócronos.

Esses reguladores ajustam os valores da entrada para manter sempre a frequência no valor nominal, mas para que isso aconteça, é utilizado o controle de ação de reset. Caso a ligação fosse diretamente ligada à saída do mecanismo de detecção de velocidade à válvula, não seria possível manter a frequência desejada.

O controle de ação de reset é realizado pela integração do erro da frequência, ou seja, a saída do dispositivo de medição de velocidade é comparada com uma referência para produzir um sinal de erro $\Delta\omega$. O erro é ampliado por um ganho K_G e integrado para produzir um sinal de controle, fazendo com que a válvula de alimentação do vapor principal se abra quando $\Delta\omega$ for negativo.

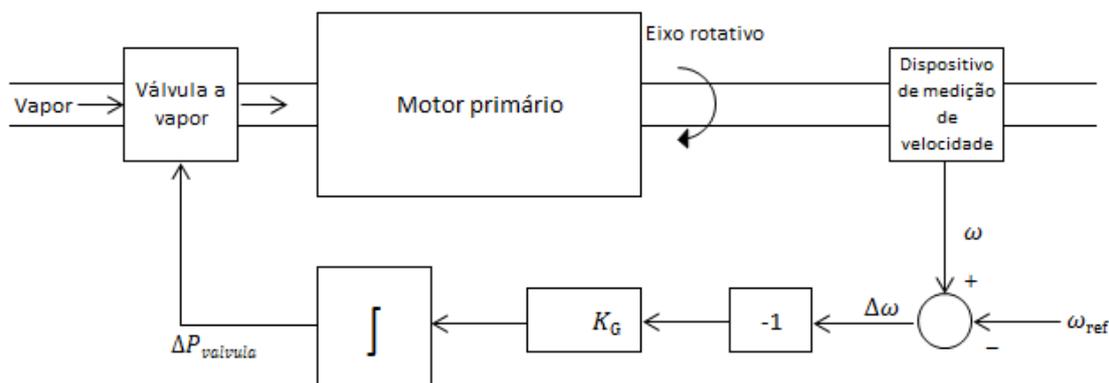


Figura 1 – Regulador Isócrono

Todo esse processo é projetado para que a carga demandada seja atendida de forma mais eficiente possível. Mas quando é desejável utilizar dois ou mais geradores com velocidades diferentes, o regulador isócrono não é mais recomendável, pois esse procedimento poderia acarretar em uma concorrência entre os geradores para definir qual a velocidade iria prevalecer.

II.1.2 Regulador com queda de velocidade

A dificuldade apresentada no regulador isócrono pode ser resolvida quando utilizado o regulador com queda de velocidade. De acordo com [5], para ser capaz de executar duas ou mais unidades geradoras em paralelo em um mesmo sistema, os reguladores são fornecidos com um sinal de retorno fazendo com que reduza o erro da velocidade a zero para diferentes valores de saída do gerador.

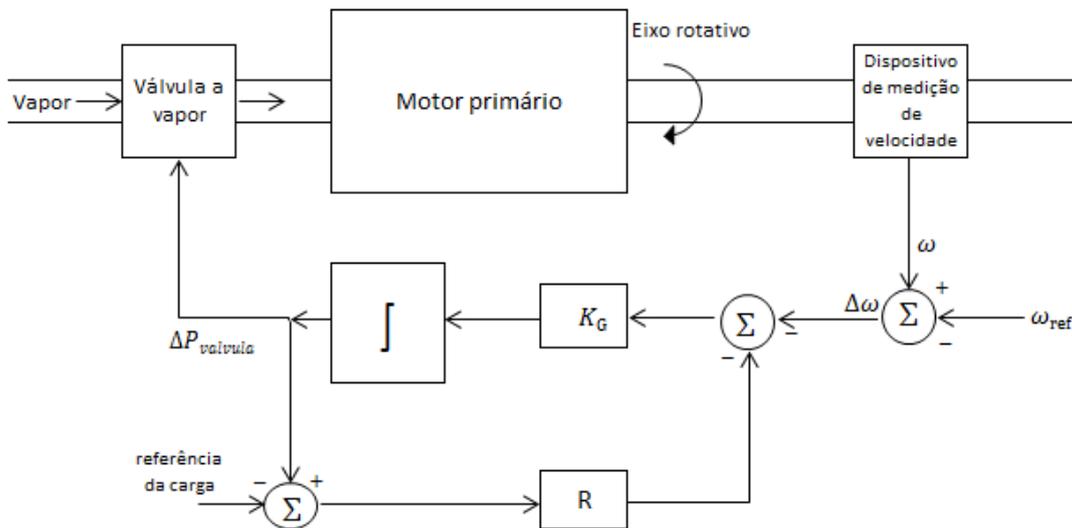


Figura 2 – Regulador com queda de velocidade

O controlador analisado é principalmente diferenciado pelo ganho proporcional de $1/R$, definido através do acréscimo do circuito de realimentação indicado na Figura 2.

Assumindo a entrada do diagrama de blocos como a variação da frequência $\Delta F(s)$ e a saída como a variação da potência ativa gerada $\Delta P_G(s)$, podemos definir a equação inicial [1].

$$\frac{\Delta P_G(s)}{\Delta F(s)} = \frac{-\frac{1}{R}}{1 + sT_G} \quad (1)$$

Admitindo T_G como uma constante de tempo de atuação do regulador, temos que:

$$T_G = \frac{1}{K_G R} \quad (2)$$

Supondo um degrau na variação da frequência Δf descrito em (3),

$$\Delta F(s) = \frac{\Delta f}{s} \quad (3)$$

E aplicando duas vezes o valor do teorema final, inicialmente no regulador e depois à função de transferência, representado em (1).

$$(\Delta P_G) = \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot \Delta P_G(s) \quad (4)$$

$$(\Delta P_G) = \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot \left(\frac{-\frac{1}{R}}{1 + sT_G} \right) \cdot \frac{\Delta f}{s} \quad (5)$$

$$(\Delta P_G) = -\frac{1}{R} \cdot \Delta f \quad (6)$$

Temos que a equação (6) pode ser reescrita como:

$$P_G - P_{G_0} = -\frac{1}{R} \cdot (f - f_0) \quad (7)$$

Considerando P_{G_0} como a potência ativa gerada para atender à demanda solicitada a uma frequência operacional inicial f_0 . E após a variação da carga, a geração da unidade será modificada para atender a nova demanda para um valor P_G em uma frequência de operação f .

Independente da variação da saída, o resultado da frequência irá permanecer constante, já que o processo tem como intenção a compensação do sistema de acordo com as alterações da carga.

Caso existirem dois geradores com diferentes características do regulador de inclinação conectadas a um único sistema de energia, os geradores iram compartilhar as cargas e manter a mesma frequência.

II.2 Modelo Tie-Line

O modelo Tie-Line representado pela interligação de sistemas pode ser utilizado por várias razões. Uma dessas razões é quando um sistema é capaz de comprar e vender energia com o outro, cujos custos operacionais geram operações rentáveis. Outra razão é representada pela possível condição de falta de energia sendo transmitida através de ligações com os sistemas vizinhos. Se um sistema

tem uma súbita perda de uma unidade geradora, todas as unidades ao longo da interconecção sofreram uma variação na frequência voltando assim à estabilidade desejada.

A energia que flui através da linha de transmissão entre esses sistemas pode ser modelada utilizando o método de fluxo de carga em corrente contínua, que representa a quantificação do estado estacionário [5].

$$P_{tie\ flow} = \frac{1}{X_{tie}} (\theta_1 - \theta_2) \quad (8)$$

Inicialmente, foi realizada uma simulação considerando um possível desvio de fluxo nominal.

$$P_{tie\ flow} + \Delta P_{tie\ flow} = \frac{1}{X_{tie}} [(\theta_1 + \Delta\theta_1) - (\theta_2 + \Delta\theta_2)]$$

$$P_{tie\ flow} + \Delta P_{tie\ flow} = \frac{1}{X_{tie}} [(\theta_1 + \theta_2) - \frac{1}{X_{tie}} (\Delta\theta_1 + \Delta\theta_2)] \quad (9)$$

$$\Delta P_{tie\ flow} = \frac{1}{X_{tie}} (\Delta\theta_1 - \Delta\theta_2)$$

Mas para uma completa análise do modelo, é necessário realizar essa simulação como uma função de desvios no ângulo de fase do valor nominal.

Assumindo que a máquina possui uma velocidade constante de ω e ângulo de fase δ . Se a velocidade da máquina em aceleração é:

$$\omega = \omega_0 + \alpha t \quad (10)$$

Então,

$$\Delta\delta = \int (\omega_0 + \alpha t) dt - \int \omega_0 dt$$

$$\Delta\delta = \omega_0 t + \frac{1}{2} \alpha t^2 - \omega_0 t \quad (11)$$

$$\Delta\delta = \frac{1}{2} \alpha t^2$$

Com isso, o desvio da velocidade nominal, $\Delta\omega$, pode ser expresso por:

$$\Delta\omega = \alpha t = \frac{d}{dt}(\Delta\delta) \quad (12)$$

Podendo assim definir a expressão (13),

$$\Delta P_{tie\ flow} = \frac{T}{S}(\Delta\omega_1 - \Delta\omega_2) \quad (13)$$

onde em um sistema de 60 Hz,

$$T = 377 * \frac{1}{X_{tie}} \quad (14)$$

Para analisar $\Delta P_{tie\ flow}$ em megawatts, os valores de θ devem ser calculados em radianos. Com isso o sistema elétrico interligado por uma única linha de transmissão e com dois geradores em cada área pode ser melhor representado.

II.3 Controle de Geração

Para melhor definir um sistema de controle automático de geração, é necessário analisar alguns objetivos do sistema:

1. Obter uma maior economia nas unidades de geração;
2. Obter um correto valor do intercâmbio entre o controle;
3. Manter a frequência do sistema o mais próximo possível do valor nominal especificado.

Para que essa relação de metas se realize, pode-se simular um sistema de geração isolado de fornecimento de carga. Como esperado, existirá uma variação na frequência quando houver uma interferência na carga. Essa variação da frequência é mensurada de acordo com as características do regulador e as características de frequência da carga do sistema. De acordo com [5], sabe-se que, se dois geradores com características de um regulador com queda de velocidade estiverem conectados em um sistema de energia, sempre haverá uma única frequência entre eles.

Como o controle se encontra desestabilizado, ou seja, o valor da frequência nominal não é o esperado, um controle suplementar deve ser inserido para reinicializar o sistema, forçando assim a zerar o erro da frequência de acordo com o valor da velocidade de referência.

Para manter a autenticidade do controle de geração, a alocação de geração também deve ser considerada. Como um sistema interligado não pode ser representado com uma única unidade de geração, mas com um sistema que possui várias gerações, é necessário calcular o despacho econômico da geração total de área a partir de cada unidade individual.

Para calcular o despacho econômico de cada unidade geradora e estabelecer um mecanismo de controle das saídas exato, é necessário encontrar o correto valor total de geração, fato esse que não será possível, uma vez que existe uma contínua variação de carga no sistema de potência.

Uma maneira de conhecer esse mecanismo de controle é utilizar computadores digitais capazes de realizar os cálculos em intervalos curtos ou quando a saída do cálculo é alimentado a um computador analógico. Independente do método a ser utilizado, deve-se proporcionar um meio para indicar as características da geração para a correta alocação dos valores calculados.

A partir dos resultados adquiridos, já se pode estipular um conjunto de pontos de geração que representa a produção econômica individual das unidades geradoras. A taxa de alteração de cada unidade de saída com relação a uma mudança na produção total é chamada de fator de participação das unidades como mostra na equação a seguir,

$$P_{ides} = P_{ibasc} + pfi * \Delta P_{total} \quad (15)$$

onde,

$$\Delta P_{total} = P_{total'} - \sum P_{ibasc} \quad (16)$$

P_{ides} = nova saída desejada da unidade i;

P_{ibasc} = ponto base de geração da unidade i;

pfi = fator de participação da unidade i;

ΔP_{total} = variação da geração total;

$P_{total'}$ = nova geração total.

Para implementar um sistema de controle de geração automática (ACG), são exigidas informações básicas do centro de controle, como a frequência do sistema, o fluxo sobre cada linha de interligação com os sistemas vizinhos e a potência de saída para cada unidade comprometida.

II.4 Exemplo

Para exemplificar a seção anterior, será utilizado o esquema da Figura 3, retirada de [4], para explicar o comportamento dos reguladores com queda de velocidade diante de uma súbita variação de carga a uma frequência nominal f_o . O sistema sem perdas é composto por nove barras e três unidades geradoras com estatismo (R) de 5%. Além deste exemplo, ainda nesse trabalho, o mesmo sistema será utilizado para comparação de resultados.

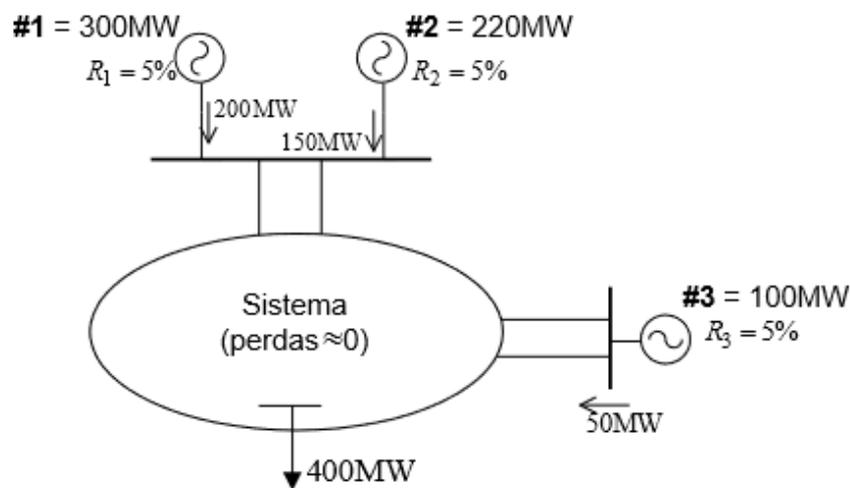


Figura 3 – Topologia do sistema

Conectadas a um sistema sem perdas, para suprir uma carga de 400 MW, foram utilizados três geradores com as potências nominais de 300 MW, 200 MW e 100 MW e trabalhando com frequência nominal de 60 Hz, as máquinas fornecem 200 MW, 150 MW e 50 MW de potência ao sistema, além disso, a carga é modelada com potência constante.

Trabalhando com uma base de sistema de 100 MVA, foi convertido o estatismo das máquinas para uma base comum, como representado a seguir.

$$\left(\frac{1}{R_1}\right)_{p.u}^{100MVA} = \left(\frac{1}{R_1}\right)_{p.u}^{300MW} \cdot \frac{P_{300MW}}{P_{100MW}} = \frac{1}{0,05} \cdot \frac{300}{100} = 60p.u \quad R_1 = 0,0167pu \quad (17)$$

$$\left(\frac{1}{R_2}\right)_{p.u}^{100MVA} = \left(\frac{1}{R_2}\right)_{p.u}^{220MW} \cdot \frac{P_{220MW}}{P_{100MW}} = \frac{1}{0,05} \cdot \frac{220}{100} = 44p.u \quad R_2 = 0,0227pu \quad (18)$$

$$\left(\frac{1}{R_3}\right)_{p.u}^{100MVA} = \left(\frac{1}{R_3}\right)_{p.u}^{100MW} \cdot \frac{P_{100MW}}{P_{100MW}} = \frac{1}{0,05} \cdot \frac{100}{100} = 20 p.u \quad R_3 = 0,05 pu \quad (19)$$

Baseados nos valores de geração de cada unidade foram calculados os fatores de participação de cada gerador. Essa fórmula é calculada através do valor da potência do gerador escolhido sob o somatório da potência de todos os geradores em frequência nominal. Assim, os fatores de participação de cada unidade geradora demonstrado a seguir são:

$$FP_1 = \frac{200}{200 + 150 + 50} = 0,500 \quad (20)$$

$$FP_2 = \frac{150}{200 + 150 + 50} = 0,375 \quad (21)$$

$$FP_3 = \frac{50}{200 + 150 + 50} = 0,125 \quad (22)$$

Após apresentar a participação de cada unidade geradora, o próximo passo é determinar o desvio de frequência e a variação de geração que cada máquina sofrerá diante de uma alteração na carga.

Com um súbito aumento de 80 MW de carga, ocorrerá um desvio de frequência em regime permanente e uma variação de geração nas máquinas para que o sistema consiga suprir essa nova carga, podendo assim reestabelecer o equilíbrio do sistema. Esse desvio de frequência deve ser calculado, para assim estabelecer a variação da potência cada unidade geradora.

$$\Delta f_{p.u} = \frac{\Delta P_L}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}} = \frac{0,8}{\frac{1}{60} + \frac{1}{44} + \frac{1}{20}} = 0,00645 p.u \quad (23)$$

$$\Delta f_{HZ} = 0,00645 \cdot 60 = 0,387 Hz$$

Com uma nova carga de 480 MW e uma variação negativa de 0,387 Hz, o sistema passou a operar sob frequência de 59,613Hz. Como citado anteriormente, cada gerador também sofreu modificações em sua potência, sendo calculadas a seguir:

$$\Delta P_{G_1} = \frac{1}{R_1} \cdot \Delta f_{p.u} = 60 \cdot 0,00645 = 0,387 p.u \quad \Delta P_{G_1} = 38,7 MW \quad (24)$$

$$\Delta P_{G_2} = \frac{1}{R_2} \cdot \Delta f_{p.u} = 44 \cdot 0,00645 = 0,2838 \text{ p.u} \quad \Delta P_{G_2} = 28,4 \text{ MW} \quad (25)$$

$$\Delta P_{G_3} = \frac{1}{R_3} \cdot \Delta f_{p.u} = 20 \cdot 0,00645 = 0,129 \text{ p.u} \quad \Delta P_{G_1} = 12,9 \text{ MW} \quad (26)$$

$$\Delta P_{G_1} + \Delta P_{G_2} + \Delta P_{G_3} = 38,7 + 28,4 + 12,9 = 80,0 = \Delta P_L \quad (27)$$

O somatório da variação da potência de cada unidade geradora representada em (27) resulta exatamente na variação inicial do sistema, justificado pela ausência de perdas. Outro ponto em destaque é a participação inversamente proporcional do estatismo R de cada máquina. A partir dos parâmetros informados, a nova participação da geração de potência ativa dos geradores **#1**, **#2**, **#3** são 238,7 MW, 178,4 MW e 62,9 MW respectivamente.

II.5 Sumário do capítulo

O Capítulo apresentou uma revisão da regulação primária de sistemas de controle de potência e frequência em SEPs, além de relatar os principais modelos de reguladores de velocidades existentes. Após o estudo de uma simulação de um sistema de nove barras e três geradores, foi confirmada a importância desses mecanismos para manter o sistema o mais estável possível.

CAPÍTULO III

COMPARAÇÃO DE METODOLOGIAS

III.1 Implementação do método

Neste capítulo serão propostas quatro metodologias de fluxo de potência, onde o sistema tutorial utilizado foi de 9-barras, representado na Figura 4, gerada por [3]. Apesar da proposta inicial do trabalho ser apenas replicar a metodologia encontrada em [1], foi necessário desenvolver mais três modelos para solucionar um problema encontrado durante o processo de fatoração na solução do sistema linear resolvido a cada iteração do método de Newton.

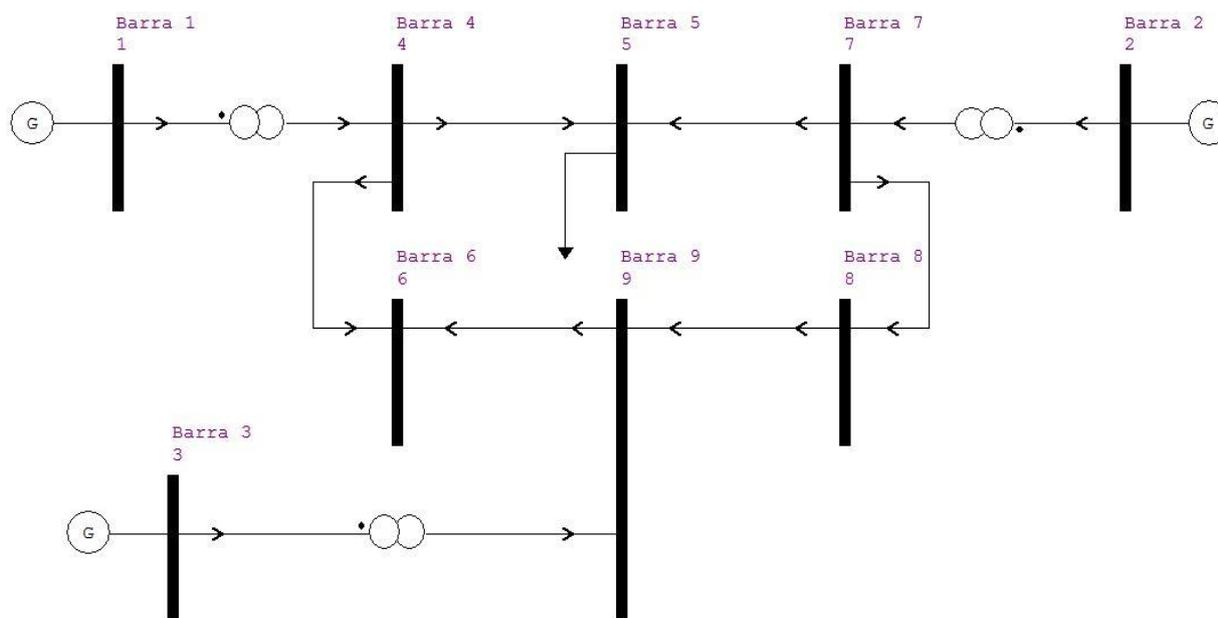


Figura 4 – Fluxo de Potência para o sistema 9 barras

A partir dos dados obtidos pelo programa, se faz possível modelar dispositivos de controle para melhor simular o sistema, e a metodologia aplicada nesse trabalho, foi através da incorporação dos modelos à matriz Jacobiana, resultando em um método *full* Newton do problema de fluxo de potência [1]. A equação (28) melhor representa a incorporação de equações na matriz Jacobiana original.

$$JAC = \begin{bmatrix} JAC_{original} & N \\ J & L \end{bmatrix} \quad (28)$$

III.2 Fluxo 1

O fluxo de potência é a ferramenta mais utilizada em problemas do SEP, por isso ela está sempre em processo de aperfeiçoamento. O primeiro modelo implementado nesse trabalho é baseado em uma metodologia genérica de representação de dispositivos de controle no problema de fluxo de potência pelo método de Newton-Raphson [6]. Ele propõe a expansão da matriz Jacobiana através da inclusão de equações de regime permanente e uma equação de referência angular. O sistema de ordem ($2 \cdot$ número de barras + $2 \cdot$ número de geradores + referência) representa uma metodologia mais realista para representar a regulação primária dos geradores no problema de fluxo de potência.

Essa inclusão de equações na matriz Jacobiana original exige novos cálculos de resíduos a cada iteração, como representado pelo vetor Δy em (29).

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ \dots \\ \Delta y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \theta} & \frac{\partial P}{\partial V} & \vdots & \frac{\partial P}{\partial x} \\ \frac{\partial Q}{\partial \theta} & \frac{\partial Q}{\partial V} & \vdots & \frac{\partial Q}{\partial x} \\ \dots & \dots & \vdots & \dots \\ \frac{\partial y}{\partial \theta} & \frac{\partial y}{\partial V} & \vdots & \frac{\partial y}{\partial x} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \\ \dots \\ \Delta x \end{bmatrix} \quad (29)$$

Além do vetor Δy contribuir com o critério de convergência, a variável de estado Δx é incluída para complementar a representação do controle a serem determinados pelo fluxo de potência.

Para que o método de Newton-Raphson seja utilizado, com um sistema de n barras e com o número de geradores menor que o número de barras, em cada barra de geração deve-se incluir a equação (30), que é referente à resposta em regime permanente do regulador de velocidade de geradores síncronos. Um aspecto importante a ser analisado é o parâmetro principal de controle proporcional, estatismo, que representa a efetiva participação de geração entre as máquinas.

$$\begin{aligned}
P_{G_1} - P_{G_1}^{esp} + \frac{1}{R_1} \cdot (f - f^{esp}) &= 0 \\
P_{G_2} - P_{G_2}^{esp} + \frac{1}{R_2} \cdot (f - f^{esp}) &= 0 \\
&\dots \\
P_{G_{ng}} - P_{G_{ng}}^{esp} + \frac{1}{R_{ng}} \cdot (f - f^{esp}) &= 0
\end{aligned} \tag{30}$$

Para garantir que mantenha a referência angular do sistema e manter fixa a tensão do gerador do sistema em seu valor especificado, incluem-se a equação (31) para cada linha elétrica do sistema.

$$\theta_n - \theta_n^{esp} = 0 \tag{31}$$

A modificação da matriz Jacobiana original, que inclui equações de potência ativa e reativa representada em (32) mostra de forma generalizada as equações para todos os tipos de barra, tanto para as de cargas, quanto de geração.

$$\begin{bmatrix} \vdots \\ \Delta P_k \\ \vdots \\ \Delta Q_k \\ \vdots \\ \Delta y_1 \\ \vdots \\ \Delta y'_1 \\ \vdots \\ \Delta y_2 \\ \vdots \\ \Delta y'_2 \\ \vdots \\ \Delta y_{ng} \\ \vdots \\ \Delta y'_{ng} \\ \vdots \\ \Delta \theta'_i \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \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_2} & \frac{\partial P_k}{\partial x'_1} & \frac{\partial P_k}{\partial x'_2} & \dots & \frac{\partial P_k}{\partial x_{ng}} & \frac{\partial P_k}{\partial x'_{ng}} & \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_2} & \frac{\partial Q_k}{\partial x'_1} & \frac{\partial Q_k}{\partial x'_2} & \dots & \frac{\partial Q_k}{\partial x_{ng}} & \frac{\partial Q_k}{\partial x'_{ng}} & \frac{\partial Q_k}{\partial x_{2ng+1}} & \dots \\ \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots \\ \dots & \frac{\partial y_1}{\partial y_1} & \frac{\partial y_1}{\partial y_1} & \dots & \frac{\partial y_1}{\partial y_1} & \frac{\partial y_1}{\partial y_1} & \frac{\partial y_1}{\partial y_1} & \frac{\partial y_1}{\partial y_1} & \dots & \frac{\partial y_1}{\partial y_1} & \frac{\partial y_1}{\partial y_1} & \frac{\partial y_1}{\partial y_1} & \dots \\ \dots & \frac{\partial \theta_k}{\partial y'_1} & \frac{\partial V_k}{\partial y'_1} & \dots & \frac{\partial x_1}{\partial y'_1} & \frac{\partial x_2}{\partial y'_1} & \frac{\partial x'_1}{\partial y'_1} & \frac{\partial x'_2}{\partial y'_1} & \dots & \frac{\partial x_{ng}}{\partial y'_1} & \frac{\partial x'_{ng}}{\partial y'_1} & \frac{\partial x_{2ng+1}}{\partial y'_1} & \dots \\ \dots & \frac{\partial \theta_k}{\partial y_2} & \frac{\partial V_k}{\partial y_2} & \dots & \frac{\partial x_1}{\partial y_2} & \frac{\partial x_2}{\partial y_2} & \frac{\partial x'_1}{\partial y_2} & \frac{\partial x'_2}{\partial y_2} & \dots & \frac{\partial x_{ng}}{\partial y_2} & \frac{\partial x'_{ng}}{\partial y_2} & \frac{\partial x_{2ng+1}}{\partial y_2} & \dots \\ \dots & \frac{\partial \theta_k}{\partial y'_2} & \frac{\partial V_k}{\partial y'_2} & \dots & \frac{\partial x_1}{\partial y'_2} & \frac{\partial x_2}{\partial y'_2} & \frac{\partial x'_1}{\partial y'_2} & \frac{\partial x'_2}{\partial y'_2} & \dots & \frac{\partial x_{ng}}{\partial y'_2} & \frac{\partial x'_{ng}}{\partial y'_2} & \frac{\partial x_{2ng+1}}{\partial y'_2} & \dots \\ \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots \\ \dots & \frac{\partial y_{ng}}{\partial y_{ng}} & \frac{\partial y_{ng}}{\partial y_{ng}} & \dots & \frac{\partial y_{ng}}{\partial y_{ng}} & \frac{\partial y_{ng}}{\partial y_{ng}} & \frac{\partial y_{ng}}{\partial y_{ng}} & \frac{\partial y_{ng}}{\partial y_{ng}} & \dots & \frac{\partial y_{ng}}{\partial y_{ng}} & \frac{\partial y_{ng}}{\partial y_{ng}} & \frac{\partial y_{ng}}{\partial y_{ng}} & \dots \\ \dots & \frac{\partial \theta_k}{\partial y'_{ng}} & \frac{\partial V_k}{\partial y'_{ng}} & \dots & \frac{\partial x_1}{\partial y'_{ng}} & \frac{\partial x_2}{\partial y'_{ng}} & \frac{\partial x'_1}{\partial y'_{ng}} & \frac{\partial x'_2}{\partial y'_{ng}} & \dots & \frac{\partial x_{ng}}{\partial y'_{ng}} & \frac{\partial x'_{ng}}{\partial y'_{ng}} & \frac{\partial x_{2ng+1}}{\partial y'_{ng}} & \dots \\ \dots & \frac{\partial \theta_k}{\partial \theta'_i} & \frac{\partial V_k}{\partial \theta'_i} & \dots & \frac{\partial x_1}{\partial \theta'_i} & \frac{\partial x_2}{\partial \theta'_i} & \frac{\partial x'_1}{\partial \theta'_i} & \frac{\partial x'_2}{\partial \theta'_i} & \dots & \frac{\partial x_{ng}}{\partial \theta'_i} & \frac{\partial x'_{ng}}{\partial \theta'_i} & \frac{\partial x_{2ng+1}}{\partial \theta'_i} & \dots \\ \dots & \frac{\partial \theta_k}{\partial \theta'_i} & \frac{\partial V_k}{\partial \theta'_i} & \dots & \frac{\partial x_1}{\partial \theta'_i} & \frac{\partial x_2}{\partial \theta'_i} & \frac{\partial x'_1}{\partial \theta'_i} & \frac{\partial x'_2}{\partial \theta'_i} & \dots & \frac{\partial x_{ng}}{\partial \theta'_i} & \frac{\partial x'_{ng}}{\partial \theta'_i} & \frac{\partial x_{2ng+1}}{\partial \theta'_i} & \dots \\ \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \vdots \\ \Delta \theta_k \\ \Delta V_k \\ \vdots \\ \Delta x_1 \\ \Delta x'_1 \\ \Delta x_2 \\ \Delta x'_2 \\ \vdots \\ \Delta x_{ng} \\ \Delta x'_{ng} \\ \vdots \\ \Delta x_{2ng+1} \\ \vdots \end{bmatrix} \tag{32}$$

Como citado anteriormente, é necessário calcular os resíduos em cada iteração, para assim concluir o processo de convergência com maior eficiência, mostrado em (33).

$$\begin{aligned}
\Delta_{y_1} &= -P_{G_1} + P_{G_1}^{esp} + \frac{1}{R_1} \cdot (f - f^{esp}) \\
&\Delta_{y'_1=V_1^{esp}-V_1} \\
\Delta_{y_2} &= -P_{G_2} + P_{G_2}^{esp} + \frac{1}{R_2} \cdot (f - f^{esp}) \\
&\Delta_{y'_2=V_2^{esp}-V_2} \\
&\dots \\
\Delta_{y_{ng}} &= -P_{G_{ng}} + P_{G_{ng}}^{esp} + \frac{1}{R_{ng}} \cdot (f - f^{esp}) = 0 \\
&\Delta_{y'_{ng}=V_{ng}^{esp}-V_{2ng}} \\
&\Delta_{\theta'_i=\theta_i^{esp}-\theta_i}
\end{aligned} \tag{33}$$

Esse cálculo associa a injeção de potência ativa e reativa de cada barra geradora e a frequência f do sistema, surgindo assim novas variáveis de estado (34).

$$\begin{aligned}
\Delta x_1 &= \Delta P_{G_1} \\
\Delta x'_1 &= \Delta Q_{G_1} \\
\Delta x_2 &= \Delta P_{G_2} \\
\Delta x'_2 &= \Delta Q_{G_2} \\
&\dots \\
\Delta x_{ng} &= \Delta P_{G_{ng}} \\
\Delta x'_{ng} &= \Delta Q_{G_{ng}} \\
\Delta x_{2ng+1} &= \Delta f
\end{aligned} \tag{34}$$

Continuando o processo iterativo, novos valores de potência ativa e reativa são calculados e a variável de frequência é atualizada até atingir a convergência.

$$\begin{aligned}
P_{G_1}^{h+1} &= P_{G_1}^h + \Delta P_{G_1}^h \\
Q_{G_1}^{h+1} &= Q_{G_1}^h + \Delta Q_{G_1}^h \\
P_{G_2}^{h+1} &= P_{G_2}^h + \Delta P_{G_2}^h \\
Q_{G_2}^{h+1} &= Q_{G_2}^h + \Delta Q_{G_2}^h \\
&\dots \\
P_{G_{ng}}^{h+1} &= P_{G_{ng}}^h + \Delta P_{G_{ng}}^h \\
Q_{G_{ng}}^{h+1} &= Q_{G_{ng}}^h + \Delta Q_{G_{ng}}^h \\
f^{h+1} &= f^h + \Delta f^h
\end{aligned} \tag{35}$$

É importante destacar que a metodologia apresentada nesta seção é baseada na referência [1]. Optou-se por apresentar a metodologia segundo sua forma original com as alterações relativas à potência ativa e representação do controle de tensão. Contudo, neste trabalho o foco foi apenas na representação da regulação primária de frequência e não foram representadas as equações do controle de tensão.

III.2 Fluxo 2

O segundo Fluxo de Potência representado em (36), também exige modificações na construção da Jacobiana, como em destaque a substituição da variável de referência angular pela frequência.

Inicialmente as submatrizes N, J e L foram ampliadas da seguinte maneira. A submatriz N, com expansão de ordem ($2 \cdot$ número de barras, número de geradores), a submatriz J (número de geradores, $2 \cdot$ número de barras) e a submatriz L, para completar uma matriz quadrada, (número de geradores, número de geradores).

Como o exemplo de um sistema de nove barras que possui apenas três geradores, a ordem de grandeza da submatriz acrescida N é de 18×3 , da submatriz J é 3×18 e da L é 3×3 , compondo assim a Jacobiana final de ordem (21×21) .

A lei de formação da matriz, como mostrado em (28), possui o acréscimo de novos cálculos de resíduos $\Delta y_1, \Delta y_2, \Delta y_3$. Para realizar esses cálculos, representados nas equações de (33), foram inseridos novas variáveis de estado ($\Delta P_1, \Delta P_2, \Delta P_3$).

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \Delta P_2 \\ \Delta P_3 \\ \Delta P_3 \\ \vdots \\ \Delta P_9 \\ \Delta Q_1 \\ \Delta Q_2 \\ \Delta Q_3 \\ \Delta Q_4 \\ \vdots \\ \Delta Q_9 \\ \Delta y_1 \\ \Delta y_2 \\ \Delta y_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{21} & H_{31} & \cdots & H_{91} & N_{101} & N_{111} & N_{121} & \cdots & N_{191} & D & 0 & 0 \\ H_{21} & H_{23} & H_{23} & \cdots & H_{29} & N_{210} & N_{211} & N_{212} & \cdots & N_{218} & 0 & E & 0 \\ H_{31} & H_{32} & H_{33} & \cdots & H_{39} & N_{310} & N_{311} & N_{312} & \cdots & N_{218} & 0 & 0 & F \\ H_{41} & H_{42} & H_{43} & \cdots & H_{49} & N_{410} & N_{411} & N_{412} & \cdots & N_{418} & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ H_{91} & H_{92} & H_{93} & \cdots & H_{99} & N_{910} & N_{911} & N_{912} & \cdots & N_{918} & 0 & 0 & 0 \\ J_{101} & J_{102} & J_{103} & \cdots & J_{109} & L_{1010} & L_{1011} & L_{1012} & \cdots & L_{1018} & 0 & 0 & 0 \\ J_{111} & J_{112} & J_{113} & \cdots & J_{119} & L_{1110} & L_{1111} & L_{1112} & \cdots & L_{1118} & 0 & 0 & 0 \\ J_{121} & J_{122} & J_{123} & \cdots & J_{129} & L_{1210} & L_{1211} & L_{1212} & \cdots & L_{1218} & 0 & 0 & 0 \\ J_{131} & J_{132} & J_{133} & \cdots & J_{139} & L_{1310} & L_{1311} & L_{1312} & \cdots & L_{1318} & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ J_{181} & J_{182} & J_{183} & \cdots & J_{189} & L_{1810} & L_{1811} & L_{1812} & \cdots & L_{1818} & 0 & 0 & 0 \\ A & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & G & 0 & 0 \\ B & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & H & 0 \\ C & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta f \\ \Delta \theta_2 \\ \Delta \theta_3 \\ \Delta \theta_4 \\ \vdots \\ \Delta \theta_9 \\ \Delta V_1 \\ \Delta V_2 \\ \Delta V_3 \\ \Delta V_4 \\ \vdots \\ \Delta V_9 \\ \Delta P_{G_1} \\ \Delta P_{G_2} \\ \Delta P_{G_3} \end{bmatrix} \quad (36)$$

As equações a seguir referem ao gerador 1, para os demais geradores serão desconsiderados, mas seguem o mesmo raciocínio.

Pelo fluxo de potência:

$$\Delta y_1 = - \left(P_{G_1} - P_{G_{01}} + \frac{1}{R_1} (f - f_0) \right) \quad (37)$$

Sendo,

$$P_G - P_{G_0} - \frac{1}{R} * (f - f_0) = 0 \quad (38)$$

A equação que representa a equação da potência ativa é demonstrada a seguir:

$$\Delta P = P^{ESP} - P^{CAL}$$

$$P^{ESP} = P_G - P_D \quad (39)$$

$$\Delta P = P_G - P_D - P^{CAL}$$

Sabendo que:

$$P^{CAL} - P_G + P_D = 0 \quad (40)$$

Os termos em destaque são representados por:

$$A = \frac{\partial y}{\partial f} = \frac{\partial(P_{G_1} - P_{G_0} + \frac{1}{R} * (f - f_0))}{\partial f} = \frac{1}{R} \quad (41)$$

$$G = \frac{\partial y}{\partial P_{G_1}} = \frac{\partial(P_G - P_{G_1}^{esp} + \frac{1}{R} * (f - f^{esp}))}{\partial P_{G_1}} = 1.0 \quad (42)$$

$$D = \frac{\partial P_1}{\partial P_{G_1}} = \frac{\partial(P_1^{cal} - (P_{G_1} - P_{L_1}))}{\partial P_{G_1}} = -1.0 \quad (43)$$

Após a expansão da matriz, foram determinados novos valores das variáveis ΔP_{G1} e Δf para que continue o processo iterativo até atingir a convergência. A cada iteração h , as variáveis são atualizadas de acordo com (44) e (45).

$$P_{G_1}^{h+1} = P_{G_1}^h + \Delta P_{G_1}^h \quad (44)$$

$$f^{h+1} = f^h + \Delta f^h \quad (45)$$

III.3 Fluxo 3

Na terceira metodologia analisada também foram acrescentadas as submatrizes N, J e L, como mostrado em (46). A submatriz N, com expansão de ordem (2* número de barras, 1), a submatriz J (1, 2* número de barras) e a submatriz L, para completar uma matriz quadrada, (1,1).

Além dessas alterações, as equações de estado foram substituídas nas equações de potência, formando assim uma matriz Jacobiana de ordem (2*número de barras+1; 2*número de barras+1).

Utilizando o sistema de nove barras (a barra 1 foi considerada como referência angular) para exemplificar a nova Jacobiana, a matriz ficara com ordem de (19x19).

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \Delta P_2 \\ \Delta P_3 \\ \vdots \\ \Delta P_9 \\ \Delta Q_1 \\ \Delta Q_2 \\ \Delta Q_3 \\ \vdots \\ \Delta Q_8 \\ \Delta y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} & H_{13} & \cdots & H_{19} & N_{110} & N_{111} & N_{112} & \cdots & N_{118} \\ H_{21} & H_{22} & H_{23} & \cdots & H_{29} & N_{210} & N_{211} & N_{212} & \cdots & N_{218} \\ H_{31} & H_{32} & H_{33} & \cdots & H_{39} & N_{310} & N_{311} & N_{312} & \cdots & N_{318} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ H_{91} & H_{92} & H_{93} & \cdots & H_{99} & N_{910} & N_{911} & N_{912} & \cdots & N_{918} \\ J_{101} & J_{102} & J_{103} & \cdots & J_{109} & L_{1010} & L_{1011} & L_{1012} & \cdots & L_{1018} \\ J_{111} & J_{112} & J_{113} & \cdots & J_{119} & L_{1110} & L_{1111} & L_{1112} & \cdots & L_{1118} \\ J_{121} & J_{122} & J_{123} & \cdots & J_{129} & L_{1210} & L_{1211} & L_{1212} & \cdots & L_{1218} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ J_{181} & J_{182} & J_{183} & \cdots & J_{189} & L_{1810} & L_{1811} & L_{1812} & \cdots & L_{1818} \\ \text{A} & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_1 \\ \Delta \theta_2 \\ \Delta \theta_3 \\ \vdots \\ \Delta \theta_9 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ C \\ D \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_1 \\ \Delta V_2 \\ \Delta V_3 \\ \vdots \\ \Delta V_9 \\ \Delta f \end{bmatrix} \quad (46)$$

As equações a seguir referem ao gerador 1, para os demais geradores serão desconsiderados, mas seguem o mesmo raciocínio.

As equações que compõem a matriz Jacobiana são baseadas no seguinte raciocínio:

$$P_G - P_{G_0} - \frac{1}{R} * (f - f_0) = 0 \quad (47)$$

Pelo fluxo de potência:

$$\begin{aligned} P^{CAL} - P^{ESP} &= 0 \\ Q^{CAL} - Q^{ESP} &= 0 \end{aligned} \quad (48)$$

Modificando assim a expressão:

$$\begin{aligned} \Delta P &= P^{ESP} - P^{CAL} \\ P^{ESP} &= P_G - P_D \\ \Delta P &= P_G - P_D - P^{CAL} \end{aligned} \quad (49)$$

Substituindo na equação (47),

$$\Delta P_1 = P_{G_0} - \frac{1}{R} * (f - f_0) - P_D - P^{CAL} \quad (50)$$

Sabendo que:

$$P^{CAL} - P_G + P_D = 0 \quad (51)$$

Como a expressão utilizada para a formação da matriz é o negativo de (50), então:

$$B = \frac{\partial P_1}{\partial f} = \frac{\partial (P^{CAL} - P_{G_0} + \frac{1}{R_1} \cdot (f - f^{esp}) + P_D)}{\partial f} = \frac{1}{R_1} \quad (52)$$

A equação a seguir é o resíduo da equação que representa a referência angular do sistema.

$$\Delta y = \theta_{ref} - \theta \quad (53)$$

A derivada da equação de referência angular com relação ao ângulo de referência é representada pela equação (54) :

$$A = \frac{\partial y}{\partial \theta} = \frac{\partial (\theta - \theta_{ref})}{\partial \theta} = 1 \quad (54)$$

III.4 Fluxo 4

O quarto fluxo testado [2] não possui expansão na Jacobiana, a única modificação ocorre na matriz Jacobiana original. Com essa representação, a matriz permanece de ordem (2*número de barras, 2*número de barras).

A equação que representa a modificação analisada está descrita em (55).

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \Delta P_2 \\ \Delta P_3 \\ \Delta P_4 \\ \vdots \\ \Delta P_9 \\ \Delta Q_1 \\ \Delta Q_2 \\ \Delta Q_3 \\ \vdots \\ \Delta Q_9 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & H_{12} & H_{13} & \cdots & H_{19} & N_{110} & N_{111} & N_{112} & \cdots & N_{118} \\ B & H_{22} & H_{23} & \cdots & H_{29} & N_{210} & N_{211} & N_{212} & \cdots & N_{218} \\ C & H_{32} & H_{33} & \cdots & H_{39} & N_{310} & N_{311} & N_{312} & \cdots & N_{318} \\ H_{41} & H_{42} & H_{43} & \cdots & H_{49} & N_{410} & N_{411} & N_{412} & \cdots & N_{418} \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ H_{91} & H_{92} & H_{93} & \cdots & H_{99} & N_{910} & N_{911} & N_{912} & \cdots & N_{918} \\ J_{101} & J_{102} & J_{103} & \cdots & J_{109} & L_{1010} & L_{1011} & L_{1012} & \cdots & L_{1018} \\ J_{111} & J_{112} & J_{113} & \cdots & J_{119} & L_{1110} & L_{1111} & L_{1112} & \cdots & L_{1118} \\ J_{121} & J_{122} & J_{123} & \cdots & J_{129} & L_{1210} & L_{1211} & L_{1212} & \cdots & L_{1218} \\ \vdots & \vdots \\ J_{181} & J_{182} & J_{183} & \cdots & J_{189} & L_{1810} & L_{1811} & L_{1812} & \cdots & L_{1818} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta f \\ \Delta \theta_2 \\ \Delta \theta_3 \\ \Delta \theta_4 \\ \vdots \\ \Delta \theta_9 \\ \Delta V_1 \\ \Delta V_2 \\ \Delta V_3 \\ \vdots \\ \Delta V_9 \end{bmatrix} \quad (55)$$

Também no fluxo 4, as equações a seguir referem somente ao gerador 1, para os demais geradores segue o mesmo raciocínio.

Com isso, os termos em destaque são representados pela equação (56).

$$A = \frac{\partial P_1}{\partial f} = \frac{\partial (P_1^{CAL} - P_{G_{01}} + \frac{1}{R_1} \cdot (f - f^{esp}) + P_{D_1})}{\partial f} = \frac{1}{R_1} \quad (56)$$

Seguindo que,

$$\Delta P_1 = P_{G_0} - \frac{1}{R} * (f - f_0) - P_D - P^{CAL} \quad (57)$$

$$f^{h+1} = f^h + \Delta f^h \quad (58)$$

III.5 Sumário do capítulo

O Capítulo apresentou quatro metodologias para solução do problema fluxo de potência com representação da regulação primária de frequência, onde o primeiro foi uma reprodução de [1] e a última baseada em [2]. Adicionalmente foram avaliadas duas metodologias alternativas, que foram elaboradas a partir de modificações destas referências. Cada fluxo teve como base a estrutura genérica da matriz Jacobiana e a partir dela incluída equações adicionais que deram forma a novas metodologias. Em todos os modelos foram mostradas a formação da matriz com as novas variáveis

de estado e todas as equações foram detalhadamente demonstradas para um melhor entendimento de toda a teoria aplicada.

CAPÍTULO IV

FATORAÇÃO E ELIMINAÇÃO DE GAUSS

Além da teoria da fatoração e eliminação de Gauss, este capítulo será dedicado a apresentar soluções referentes ao problema identificado nos três primeiros fluxos demonstrados na seção anterior. Com grande participação de [7] foi identificado à razão da necessidade de permutação durante o processo de fatoração da matriz Jacobiana e com isso foi possível replicar a metodologia proposta por [2] obtendo assim um resultado satisfatório.

IV.1 Eliminação de Gauss

Para resolver os problemas de análises de redes de energia elétrica que envolve sistemas algébricos lineares de grande dimensão, é necessário compreender métodos matemáticos que simplificam esses sistemas facilitando sua resolução.

Como qualquer método, a eliminação de Gauss possui vantagens e desvantagens quando se refere ao desempenho computacional. Apesar de utilizar um pequeno espaço de armazenamento e convergir em poucas iterações, esse processo de convergência é bastante lento.

Existem três possíveis soluções para o processo de eliminação, que são:

1. Bem condicionado;
2. Sem solução;
3. Mal condicionado.

O problema terá solução apenas quando a matriz de coeficiente for não-singular, resultando em um sistema bem condicionado. Quando a matriz for não-singular, mas também apresentar uma solução difícil devido a problemas de precisão, ele é dito mal condicionado, caso contrário, o sistema de equações é dito sem solução.

Para implementar algum processo iterativo na resolução do fluxo de potência, inicialmente é estipulado um “chute inicial” e somente a partir dele gerar aproximações sucessivas até uma solução com um erro consideravelmente aceitável, mas esse processo se torna impraticável quando

utilizado em matrizes com coeficientes elevados. Com isso, se faz necessário utilizar de outros métodos para resolver esse tipo de problema, como a decomposição LU. Com ela utiliza-se a fatoração triangular de matrizes esparsas, evitando a utilização da matriz inversa, que em geral é composta por uma matriz cheia.

O grau de esparsidade de uma matriz é definido como a porcentagem de elementos nulos dessa matriz, como mostra na equação (59).

$$GE = \frac{NB^2 - (NB + 2 * NR)}{NB^2} \quad (59)$$

onde,

NB: número de barras;

NR: número de ramos.

Como estamos utilizando matrizes com coeficientes altamente esparsos, nos problemas de análises de redes elétricas, os sistemas lineares são em geral representados pela equação (60):

$$A * x = b \quad (60)$$

em que,

A: matriz de coeficiente (n x n);

x: vetor dependente (n x 1);

b: vetor independente (n x 1).

A matriz A não-singular pode ser decomposta no produto de duas matrizes:

$$A = L.U \quad (61)$$

onde,

U: matriz triangular superior;

L: matriz triangular inferior com diagonal unitária.

Em [8] foi iniciada uma completa demonstração do método de eliminação de Gauss. Descrevendo assim o sistema algébrico linear (62):

$$\begin{bmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & a_{1,3} & \cdots & a_{1,n} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & a_{2,3} & \cdots & a_{2,n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{n,1} & a_{n,1} & a_{n,1} & \cdots & a_{n,n} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \cdots \\ x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \cdots \\ b_n \end{bmatrix} \quad (62)$$

Para desenvolver o método, é necessário seguir três etapas:

1. Os elementos do triangulo inferior da matriz é zerado utilizando combinações lineares efetuadas com equações que constitui o sistema (63);
2. Os elementos da diagonal principal são feitos igual a 1 dividindo cada equação pelo elemento correspondente a diagonal principal;
3. Os elementos do triangulo superior são zerados, transformando a matriz do coeficiente em uma matriz identidade.

A sequência das três etapas é descritas a seguir:

$$\begin{bmatrix} a'_{1,1} & a'_{1,2} & a'_{1,3} & \cdots & a'_{1,n} \\ 0 & a'_{2,2} & a'_{2,3} & \cdots & a'_{2,n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & a'_{n,n} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \cdots \\ x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b'_1 \\ b'_2 \\ \cdots \\ b'_n \end{bmatrix} \quad (63)$$

$$\begin{bmatrix} 1 & a''_{1,2} & a''_{1,3} & \cdots & a''_{1,n} \\ 0 & 1 & a''_{2,3} & \cdots & a''_{2,n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \cdots \\ x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b''_1 \\ b''_2 \\ \cdots \\ b''_n \end{bmatrix} \quad (64)$$

esse termo igual à zero, ainda é necessário satisfazer mais algumas condições para concluir em uma matriz singular.

De acordo com [7], para identificar a singularidade da matriz é necessário que pelo menos um evento ocorra:

$$\begin{aligned}
 a_{ii} = 0 \text{ e } a_{ij} = 0 \forall j > i \\
 a_{ii} = 0 \text{ e } a_{ji} = 0 \forall j > i
 \end{aligned}
 \tag{69}$$

Quando identificado um termo nulo na linha de U em (61), temos uma linha dependente, mas se o termo é encontrado em uma coluna de L, é um caso de dependência na coluna. Fato esse representado nas fórmulas a seguir, onde r são as linhas da matriz e o índice c é representado pela coluna.

$$\begin{aligned}
 \sum_{i=1}^n \delta_i r_i = 0 \\
 \sum_{i=1}^n \eta_i c_i = 0
 \end{aligned}
 \tag{70}$$

Com isso, deve-se modificar a ordenação da rotina para garantir que a entrada da diagonal não seja mais zero quando a coluna correspondente for eliminada.

IV.2 Permutação

A primeira condição para haver a troca de linha é quando um dos elementos pivô $a_{kk}^{(k)}$ for zero. Satisfeita a condição, a troca tem a forma $(E_k) \leftrightarrow (E_p)$, em que p é o menor número inteiro maior que k com $a_{pk}^{(k)} \neq 0$. O algoritmo também utiliza o método da permutação de linhas quando é necessário reduzir o erro de arredondamento e truncamento. Quando o pivô $a_{kk}^{(k)}$ assumir um valor pequeno em módulo comparado ao módulo de $a_{jk}^{(k)}$, ele utiliza um multiplicador(71) que será maior que 1 em módulo [9].

$$m_{jk} = \frac{a_{jk}^{(k)}}{a_{kk}^{(k)}} \quad (71)$$

Ao efetuar uma subtração regressiva, como mostrado em (72), qualquer erro no numerador pode ser radicalmente aumentado por causa da divisão $a_{kk}^{(k)}$.

$$x_k = \frac{a_{k,n+1}^{(k)} - \sum_{j=k+1}^n a_{jk}^{(k)}}{a_{kk}^{(k)}} \quad (72)$$

Com isso, observa-se que a escolha do maior elemento em módulo entre os candidatos a pivô faz com que os multiplicadores, em módulo, estejam entre zero e um, o que evita a ampliação dos erros de arredondamento.

IV.3 Fatoração

Baseado no item anterior se faz necessário encontrar a explicação dessa dependência linear entre as linhas ou colunas dessa matriz Jacobiana durante o processo de fatoração. O método proposto em [7] apresenta uma simples solução para investigar a ocorrência de uma separação da rede, ou seja, singularidade da matriz.

Quando se utiliza o método de Newton-Raphson no algoritmo para solucionar tais problemas, o artigo inicialmente propõe a seguinte relação do somatório das derivadas de Potência ativa e reativa:

$$\sum_{j \in S} \frac{\partial P_i}{\partial \theta_j} = 0 \quad \sum_{j \in S} \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_j} = 0 \quad (73)$$

Em que P é potência ativa, Q representa a potência reativa, i é a barra analisada, θ é tensão de fase na barra j e S é o conjunto das barras que fazem parte do ilhamento.

Apesar da teoria em [7] ser referente ao surgimento de ilhamento no sistema, esse mesmo conceito pode ser aplicado ao estudo desse trabalho, explicando a dependência das colunas nas matrizes jacobianas nos três primeiros fluxos.

Para analisar a dependência das colunas da matriz, a condição (74) deve ser seguida.

$$c_k = \sum_{i=1}^{k-1} \eta_i c_i \quad \eta_i = \{0; 1\} \quad (74)$$

Se uma das colunas da matriz Jacobiana denominada c_k é linearmente dependente das demais colunas então se pode observar que a equação (74) é válida, sendo que η_i é diferente de zero. Outra condição que leva a mesma situação anterior é quando o c_k é uma coluna das derivadas em relação a V , onde na equação (74) resulta apenas em valores zerados.

Para melhor esclarecer o artigo, a explicação que justifica a singularidade da matriz também é encontrada em [8]. Como a Jacobiana original é composta por:

$$JAC_{original} = \begin{bmatrix} H & N \\ J & L \end{bmatrix} \quad (75)$$

Onde as componentes das submatrizes Jacobianas são dadas pelas equações (76) a (83).

$$H_{km} = \frac{\partial P_k}{\partial \theta_m} = V_k * V_m * (G_{km} * \text{sen}(\theta_{km}) - B_{km} * \text{cos}(\theta_{km})) \quad (76)$$

$$H_{kk} = \frac{\partial P_k}{\partial \theta_m} = -V_k^2 * B_{kk} - V_k \sum_{m \in K} V_m * (G_{km} * \text{sen}(\theta_{km}) - B_{km} * \text{cos}(\theta_{km})) \quad (77)$$

$$N_{km} = \frac{\partial P_k}{\partial V_m} = V_k * (G_{km} * \text{cos}(\theta_{km}) + B_{km} * \text{sen}(\theta_{km})) \quad (78)$$

$$N_{kk} = \frac{\partial P_k}{\partial V_k} = V_k * G_{kk} + \sum_{m \in K} V_m * ((G_{km} * \text{cos}(\theta_{km}) + B_{km} * \text{sen}(\theta_{km})) \quad (79)$$

$$J_{km} = \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_m} = -V_k * V_m * (G_{km} * \text{cos}(\theta_{km}) + B_{km} * \text{sen}(\theta_{km})) \quad (80)$$

$$J_{kk} = \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_k} = -V_k^2 * G_{kk} + V_k \sum_{m \in K} V_m * (G_{km} * \text{cos}(\theta_{km}) + B_{km} * \text{sen}(\theta_{km})) \quad (81)$$

$$L_{km} = \frac{\partial Q_k}{\partial V_m} = V_k * (G_{km} * \text{sen}(\theta_{km}) - B_{km} * \text{cos}(\theta_{km})) \quad (82)$$

$$L_{kk} = \frac{\partial Q_k}{\partial V_k} = -V_k * B_{kk} + \sum_{m \in K} V_m * ((G_{km} * \text{sen}(\theta_{km}) - B_{km} * \text{cos}(\theta_{km})) \quad (83)$$

É fácil demonstrar que as componentes das submatrizes H_{km} , H_{kk} e J_{km} , J_{kk} se anulam entre si, resultando em:

$$H_{km} + H_{kk} = -V_k * V_m * B_{km} - V_k^2 * B_{kk} + V_k * V_m * B_{km} + V_k^2 * B_{kk} = 0 \quad (84)$$

$$J_{km} + J_{kk} = -V_k * V_m * G_{km} - V_k^2 * G_{kk} + V_k * V_m * G_{km} + V_k^2 * G_{kk} = 0 \quad (85)$$

Como exemplo, a submatriz de ordem (número de barras, 2* número de barras) do fluxo 1 representada na Tabela 4 comprova que o somatório das colunas das duas submatrizes H e J se anulam causando a inversão nas equações referentes à potência ativa.

Tabela 1 – Submatriz da Potência ativa da Jacobiana do Fluxo 1

									<i>Soma</i>
17,5902	0	0	-17,5902	0	0	0	0	0	0
0	16,07027	0	0	0	0	-16,0703	0	0	0
0	0	17,55161	0	0	0	0	0	-17,5516	0
-16,7835	0	0	38,2171	-10,6685	-10,7651	0	0	0	1,01E-13
0	0	0	-10,0118	15,26962	0	-5,25778	0	0	-2,1E-14
0	0	0	-10,8601	0	16,94139	0	0	-6,0813	0
0	-15,5025	0	0	-5,50374	0	34,72649	-13,7203	0	5,15E-14
0	0	0	0	0	0	-13,7613	23,98081	-10,2195	-9,9E-14
0	0	-17,3226	0	0	-6,13657	0	-10,2549	33,71401	0
-0,66039	0	0	0,660392	0	0	0	0	0	0
0	-0,75149	0	0	0	0	0,751491	0	0	-1E-15
0	0	-2,30451	0	0	0	0	0	2,304515	0
5,307256	0	0	-5,34496	-1,57448	1,612183	0	0	0	2,22E-16
0	0	0	4,007464	-6,32161	0	2,314142	0	0	0
0	0	0	0,738383	0	-1,56754	0	0	0,829152	2E-15
0	4,300151	0	0	-1,64572	0	-4,71072	2,056296	0	-1E-14
0	0	0	0	0	0	1,760591	-2,95455	1,193963	0
0	0	3,64671	0	0	-0,11045	0	0,837223	-4,37348	0

Situação essa que não ocorre na matriz referente à potência reativa da Jacobiana, representada pelas submatrizes N e L.

Tabela 2 – Submatriz da Potência reativa da Jacobiana do Fluxo 1

										<i>Soma</i>
5,450865	0	0	-0,6674	0	0	0	0	0	0	4,783463
0	4,383843	0	0	0	0	-0,75645	0	0	0	3,627392
0	0	3,552551	0	0	0	0	0	-2,24463	0	1,307925
-5,10313	0	0	5,401142	1,687967	-1,58363	0	0	0	0	0,402343
0	0	0	-4,05001	-3,51352	0	-2,32942	0	0	0	-9,89294
0	0	0	-0,74622	0	1,539768	0	0	-0,8076	0	-0,01406
0	-4,19527	0	0	1,764346	0	4,741408	-2,02563	0	0	0,28485
0	0	0	0	0	0	-1,77221	2,910505	-1,16294	0	-0,02464
0	0	-3,55777	0	0	0,108498	0	-0,82474	4,259808	0	-0,0142
1E+10	0	0	-17,7769	0	0	0	0	0	0	1E+10
0	1E+10	0	0	0	0	-16,1763	0	0	0	1E+10
0	0	1E+10	0	0	0	0	0	-17,0955	0	1E+10
-16,1379	0	0	38,62297	-11,4375	-10,5745	0	0	0	0	0,473036
0	0	0	-10,1181	16,37065	0	-5,29249	0	0	0	0,960045
0	0	0	-10,9754	0	16,6414	0	0	-5,92326	0	-0,25724
0	-15,1244	0	0	-5,90044	0	34,95578	-13,5157	0	0	0,41528
0	0	0	0	0	0	-13,8522	23,62324	-9,9539	0	-0,18283
0	0	-16,9001	0	0	-6,0279	0	-10,102	32,83786	0	-0,19207

A utilização prática deste procedimento comprova a teoria do artigo [7], justificando os problemas encontrados durante o desenvolvimento dos três primeiros fluxos do trabalho.

IV.4 Sumário do capítulo

Este capítulo teve como objetivo principal revisar a teoria de fatoração e eliminação de Gauss, tendo como objetivo solucionar os problemas encontrados durante a fatoração do pivoteamento. A inversão das linhas teve como empecilho a implementação dos três primeiros fluxos de potência no programa ANAREDE. Com o estudo dessa teoria e com o conhecimento adquirido em [7] foi identificado o problema obtendo, portanto, um resultado satisfatório.

CAPÍTULO V

RESULTADOS

V.1 Considerações iniciais

Este capítulo tem como objetivo apresentar os resultados das quatro metodologias avaliadas. Nele foi feita comparações em dois sistemas teste, um de pequeno porte com objetivo tutorial contendo 9 barras e um de médio porte com 39 barras, o sistema *New England*. Com os resultados de tensão e pivoteamento foi possível identificar o método que mais se adequa em [3].

V.2 Análises da tensão

Um dos objetivos do trabalho foi provar que independente do método escolhido, não existiu interferência na tensão, ou seja, a relação de módulo e ângulo de todos os fluxos implementados permaneceram os mesmos. Para uma melhor comparação nesse capítulo, segue a ordem de cada metodologia utilizada.

- Metodologia 1: sistema de ordem ($2 * \text{número de barras} + 2 * \text{número de geradores} + \text{referência}$);
- Metodologia 2: sistema de ordem ($2 * \text{número de barras} + \text{número de geradores}$);
- Metodologia 3: sistema de ordem ($2 * \text{número de barras} + 1$);
- Metodologia 4: sistema de ordem ($2 * \text{número de barras}$).

V.2.1 Análise 9 barras

Para comprovar a teoria estudada, inicialmente foi aplicado o sistema 9 barras em duas situações. O primeiro sem perdas e o segundo, para ter uma visão mais realista, foi simulado o sistema com perdas, ou seja, acrescentado uma resistência de 1%. Em ambas as formulações, foram apresentadas

comparações dos resultados de tensão e trajetória de convergência para variações de potência ativa e reativa nos quatro fluxos desenvolvidos.

A) Sistema sem perdas

A primeira comparação refere aos resultados de módulo e ângulo de tensão para os quatro fluxos.

Tabela 3 – Comparação dos resultados de tensão - 9 barras sem perdas

	Fluxo1		Fluxo2		Fluxo3		Fluxo4	
	Modulo	Ângulo	Modulo	Ângulo	Modulo	Ângulo	Modulo	Ângulo
1	1,0400	0	1,0400	0	1,0400	0	1,0400	0
2	1,0250	3,169	1,0250	3,169	1,0250	3,169	1,0250	3,169
3	1,0250	0,742	1,0250	0,742	1,0250	0,742	1,0250	0,742
4	1,0190	-7,742	1,0190	-7,742	1,0190	-7,742	1,0190	-7,742
5	0,9957	-21,168	0,9957	-21,168	0,9957	-21,168	0,9957	-21,168
6	1,0407	-5,245	1,0407	-5,245	1,0407	-5,245	1,0407	-5,245
7	1,0190	-2,959	1,0190	-2,959	1,0190	-2,959	1,0190	-2,959
8	1,0350	-2,2357	1,0350	-2,2357	1,0350	-2,2357	1,0350	-2,2357
9	1,0390	-1,2417	1,0390	-1,2417	1,0390	-1,2417	1,0390	-1,2417
Frequência (Hz)	59,6127		59,6127		59,6127		59,6127	

Como esperado, além dos resultados de tensão, a frequência nos quatro fluxos permaneceu em 59.6127 Hz. Esse resultado foi satisfatório quando comparado com o exemplo da seção II-4, pois a frequência encontrada foi de 59.613 Hz.

A Tabela 4 compara os fluxos em cada iteração da variação de potência ativa e reativa do erro de convergência.

Tabela 4 – Comparação dos resultados da trajetória de convergência – 9 barras sem perdas

Iterações	Fluxo 1		Fluxo 2		Fluxo 3		Fluxo 4	
	ΔP	ΔQ						
1	3,5708	0,7129	3,5708	0,7129	3,5708	0,7129	3,5708	0,7129
2	0,2105	0,3985	0,2105	0,3985	0,2105	0,3985	0,2105	0,3985
3	0,0045	0,0174	0,0045	0,0174	0,0045	0,0174	0,0045	0,0174
4	6,73E-05	4,97E-05	6,73E-05	4,97E-05	6,73E-05	4,97E-05	6,73E-05	4,97E-05
5	1,44E-09	7,37E-10	1,44E-09	7,37E-10	1,44E-09	7,37E-10	1,44E-09	7,37E-10

Ela também comprova que as formulações foram totalmente equivalentes em todos os fluxos, mas para melhor representar essa trajetória, o gráfico a seguir mostra os valores máximos por iteração dos resíduos de potência ativa e reativa.

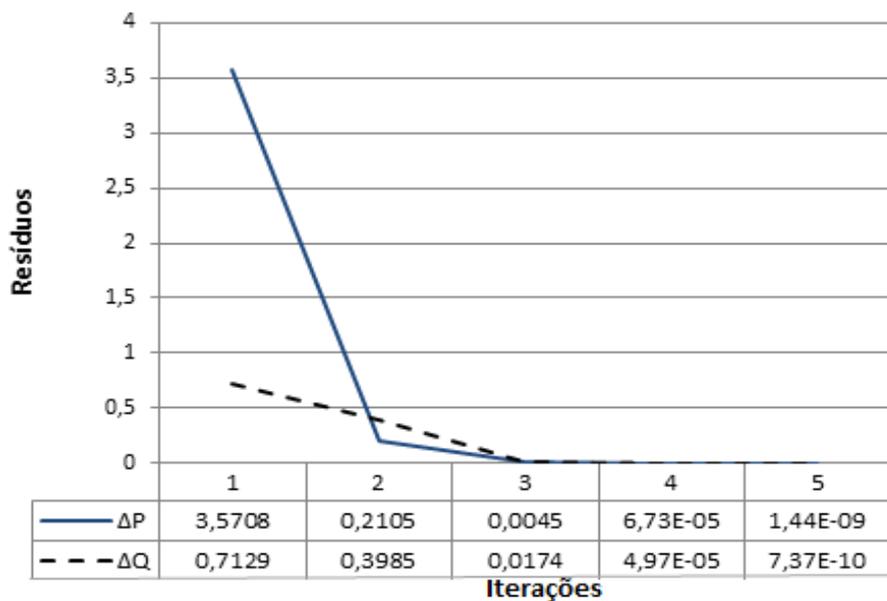


Figura 5 – Trajetória de convergência do FP - 9 barras sem perdas

Outra característica esperada nos programas desenvolvidos pelo método de Newton-Raphson, é a redução exponencial da trajetória de convergência, fato esse comprovado pela Figura 5.

B) Sistema com perdas

Para uma completa análise do sistema 9 barras, foram simulados os valores de tensão e a trajetória de convergência para o sistema com perdas, ou seja, com um acréscimo na resistência de 1% obtendo assim um cenário mais realista.

Tabela 5 – Comparação dos resultados de tensão - 9 barras

	Fluxo1		Fluxo2		Fluxo3		Fluxo4	
	Modulo	Ângulo	Modulo	Ângulo	Modulo	Ângulo	Modulo	Ângulo
1	1,0400	0	1,0400	0	1,0400	0	1,0400	0
2	1,0250	3,8116	1,0250	3,8116	1,0250	3,8116	1,0250	3,8116
3	1,0250	1,2171	1,0250	1,2171	1,0250	1,2171	1,0250	1,2171
4	0,9895	-7,6991	0,9895	-7,6991	0,9895	-7,6991	0,9895	-7,6991
5	0,9327	-22,8073	0,9327	-22,8073	0,9327	-22,8073	0,9327	-22,8073
6	1,0180	-5,3849	1,0180	-5,3849	1,0180	-5,3849	1,0180	-5,3849
7	0,9934	-2,6015	0,9934	-2,6015	0,9934	-2,6015	0,9934	-2,6015

	Fluxo1		Fluxo2		Fluxo3		Fluxo4	
	Modulo	Ângulo	Modulo	Ângulo	Modulo	Ângulo	Modulo	Ângulo
8	1,0151	-1,9850	1,0151	-1,9850	1,0151	-1,9850	1,0151	-1,9850
9	1,0267	-0,9869	1,0267	-0,9869	1,0267	-0,9869	1,0267	-0,9869
Frequência (Hz)	59,4947		59,4947		59,4947		59,4947	

Com o mesmo comportamento apresentado no sistema sem perdas, além dos resultados de tensão, a frequência foi mantida em 59,4947 Hz.

A Tabela 6 compara os fluxos em cada iteração da variação de potência ativa e reativa do erro de convergência.

Tabela 6 – Comparação dos resultados da trajetória de convergência – 9 barras

Iterações	Fluxo 1		Fluxo 2		Fluxo 3		Fluxo 4	
	ΔP	ΔQ						
1	3,5312	0,6112	3,5312	0,6112	3,5312	0,6112	3,5312	0,6112
2	0,0862	0,3554	0,0862	0,3554	0,0862	0,3554	0,0862	0,3554
3	0,0357	0,0196	0,0357	0,0196	0,0357	0,0196	0,0357	0,0196
4	5,48E-04	1,93E-04	5,48E-04	1,93E-04	5,48E-04	1,93E-04	5,48E-04	1,93E-04
5	9,11E-08	3,09E-08	9,11E-08	3,09E-08	9,11E-08	3,09E-08	9,11E-08	3,09E-08

O gráfico a seguir mostra os valores máximos por iteração dos resíduos de potência do sistema.

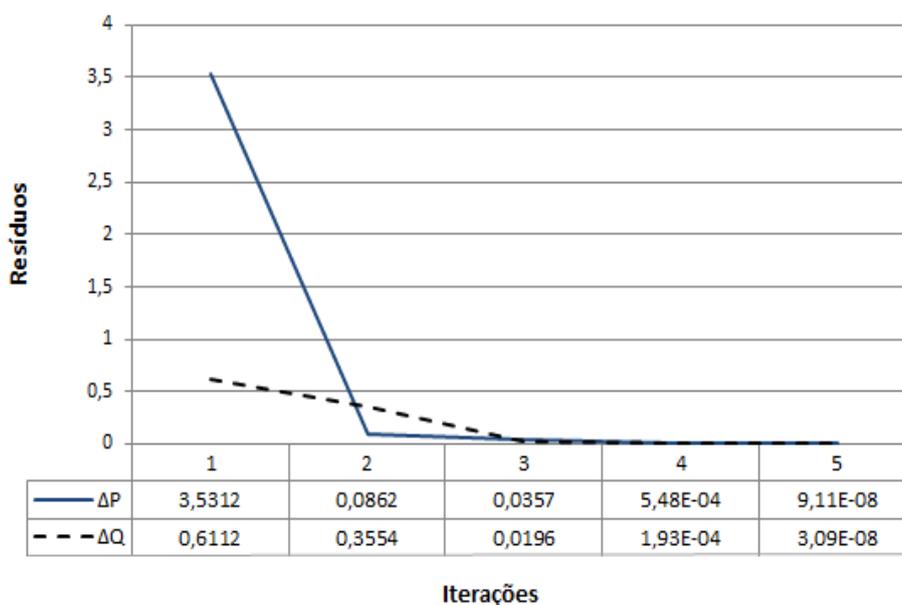


Figura 6 – Trajetória de convergência do FP - 9 barras

V.2.2 Análise 39 barras

Outra situação proposta no trabalho é a comparação dos resultados para o sistema *New England*, composto por 39 barras. Com 10 barras de geração, o sistema possui máquinas conectadas em cada barra que foi modelada como um gerador síncrono, com base de potência de 1000 MVA e regulador com queda de velocidade com ganho de 5 %. Além disso, existe um estatismo de 0,5 %, em todas as máquinas do sistema.

As metodologias propostas do Fluxo de Potência com regulação Primária terá como objetivo variar a carga do sistema de médio porte, analisando assim o comportamento da frequência em regime permanente determinada pelo ganho dos reguladores de velocidade [1]. Com ele pode-se comprovar a veracidade das metodologias propostas e apresentar resultados de comparação para futuras análises. A Figura 7 mostra a topologia do sistema gerado pelo ANAREDE.

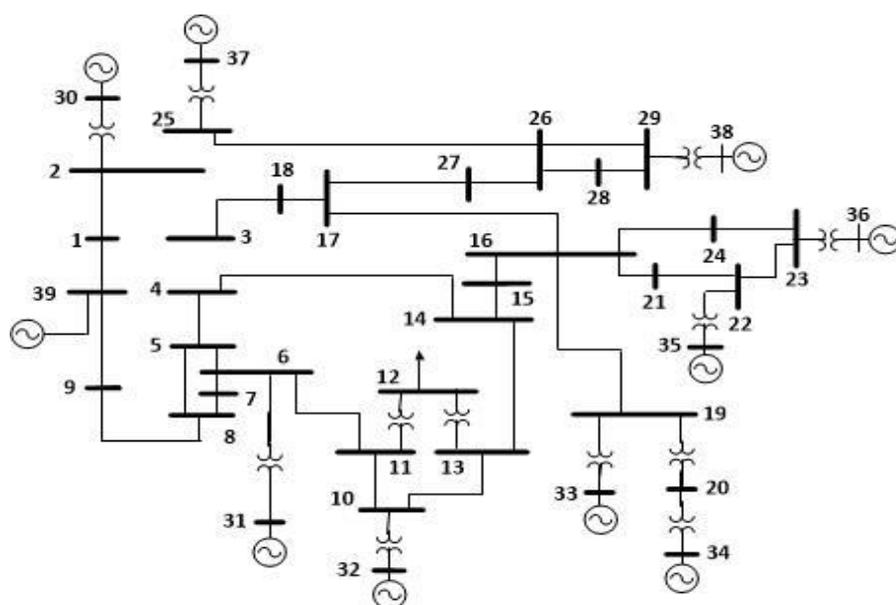


Figura 7 – Fluxo de Potência para o sistema 39 barras

Inicialmente essa seção irá apresentar uma simulação do sistema original, expondo os resultados de tensão em todas as barras nos quatros fluxos desenvolvidos.

Após essa etapa, será modificada a estrutura do sistema com uma variação de 100% em algumas barras, podendo assim ser comparado com os demais resultados.

A) Sistema original

A Tabela 7 compara os valores de módulo e ângulo das tensões nas barras dos quatros fluxos de potência.

Tabela 7 – Comparação dos resultados de tensão - 39 barras

	Fluxo1		Fluxo2		Fluxo3		Fluxo4	
	<i>Modulo</i>	<i>Ângulo</i>	<i>Modulo</i>	<i>Ângulo</i>	<i>Modulo</i>	<i>Ângulo</i>	<i>Modulo</i>	<i>Ângulo</i>
1	1,0476	-9,4628	1,0476	-9,4628	1,0476	-9,4628	1,0476	-9,4628
2	1,0492	-6,9038	1,0492	-6,9038	1,0492	-6,9038	1,0492	-6,9038
3	1,0306	-9,7500	1,0306	-9,7500	1,0306	-9,7500	1,0306	-9,7500
4	1,0039	-10,548	1,0039	-10,548	1,0039	-10,548	1,0039	-10,548
5	1,0050	-9,3557	1,0050	-9,3557	1,0050	-9,3557	1,0050	-9,3557
6	1,0074	-8,6529	1,0074	-8,6529	1,0074	-8,6529	1,0074	-8,6529
7	0,9967	-10,859	0,9967	-10,859	0,9967	-10,859	0,9967	-10,859
8	0,9957	-11,366	0,9957	-11,366	0,9957	-11,366	0,9957	-11,366
9	1,0281	-11,190	1,0281	-11,190	1,0281	-11,190	1,0281	-11,190
10	1,0170	-6,2662	1,0170	-6,2662	1,0170	-6,2662	1,0170	-6,2662
11	1,0125	-7,0803	1,0125	-7,0803	1,0125	-7,0803	1,0125	-7,0803
12	1,0000	-7,0960	1,0000	-7,0960	1,0000	-7,0960	1,0000	-7,0960
13	1,0142	-6,9813	1,0142	-6,9813	1,0142	-6,9813	1,0142	-6,9813
14	1,0117	-8,6525	1,0117	-8,6525	1,0117	-8,6525	1,0117	-8,6525
15	1,0158	-9,0732	1,0158	-9,0732	1,0158	-9,0732	1,0158	-9,0732
16	1,0323	-7,6700	1,0323	-7,6700	1,0323	-7,6700	1,0323	-7,6700
17	1,0340	-8,6682	1,0340	-8,6682	1,0340	-8,6682	1,0340	-8,6682
18	1,0314	-9,5086	1,0314	-9,5086	1,0314	-9,5086	1,0314	-9,5086
19	1,0499	-3,0434	1,0499	-3,0434	1,0499	-3,0434	1,0499	-3,0434
20	0,9907	-4,4554	0,9907	-4,4554	0,9907	-4,4554	0,9907	-4,4554
21	1,0321	-5,2635	1,0321	-5,2635	1,0321	-5,2635	1,0321	-5,2635
22	1,0499	-0,8150	1,0499	-0,8150	1,0499	-0,8150	1,0499	-0,8150
23	1,0451	-1,0138	1,0451	-1,0138	1,0451	-1,0138	1,0451	-1,0138
24	1,0378	-7,5503	1,0378	-7,5503	1,0378	-7,5503	1,0378	-7,5503
25	1,0578	-5,5439	1,0578	-5,5439	1,0578	-5,5439	1,0578	-5,5439
26	1,0524	-6,8003	1,0524	-6,8003	1,0524	-6,8003	1,0524	-6,8003
27	1,0381	-8,8112	1,0381	-8,8112	1,0381	-8,8112	1,0381	-8,8112
28	1,0506	-3,2909	1,0506	-3,2909	1,0506	-3,2909	1,0506	-3,2909
29	1,0504	-0,5338	1,0504	-0,5338	1,0504	-0,5338	1,0504	-0,5338
30	1,0480	-4,4858	1,0480	-4,4858	1,0480	-4,4858	1,0480	-4,4858
31	0,9820	0,1251	0,9820	0,1251	0,9820	0,1251	0,9820	0,1251
32	0,9830	1,7361	0,9830	1,7361	0,9830	1,7361	0,9830	1,7361
33	0,9970	2,1761	0,9970	2,1761	0,9970	2,1761	0,9970	2,1761
34	1,0120	0,7379	1,0120	0,7379	1,0120	0,7379	1,0120	0,7379
35	1,0490	4,1482	1,0490	4,1482	1,0490	4,1482	1,0490	4,1482
36	1,0640	6,8340	1,0640	6,8340	1,0640	6,8340	1,0640	6,8340
37	1,0280	1,2388	1,0280	1,2388	1,0280	1,2388	1,0280	1,2388

	Fluxo1		Fluxo2		Fluxo3		Fluxo4	
	Modulo	Ângulo	Modulo	Ângulo	Modulo	Ângulo	Modulo	Ângulo
38	1,0270	6,5231	1,0270	6,5231	1,0270	6,5231	1,0270	6,5231
39	1,0300	-11,000	1,0300	-11,000	1,0300	-11,000	1,0300	-11,000
Frequência (Hz)	60,0		60,0		60,0		60,0	

Como esperado, todos os valores de tensão e frequência nos quatro fluxos foram iguais, comprovando assim a teoria aplicada.

A Tabela 8 compara os fluxos em cada iteração da variação de potência ativa e reativa do erro de convergência.

Tabela 8 – Comparação dos resultados da trajetória de convergência - 39 barras

Iterações	Fluxo 1		Fluxo 2		Fluxo 3		Fluxo 4	
	ΔP	ΔQ						
1	2,6087	0,3126	2,6087	0,3126	2,6087	0,3126	2,6087	0,3126
2	1,20E-03	1,08E-02	1,20E-03	1,08E-02	1,20E-03	1,08E-02	1,20E-03	1,08E-02
3	1,8366E-06	4,19E-06	1,84E-06	4,19E-06	1,84E-06	4,19E-06	1,84E-06	4,1867E-06

A Figura 8 mostra os valores máximos por iteração dos resíduos de potência ativa e reativa.

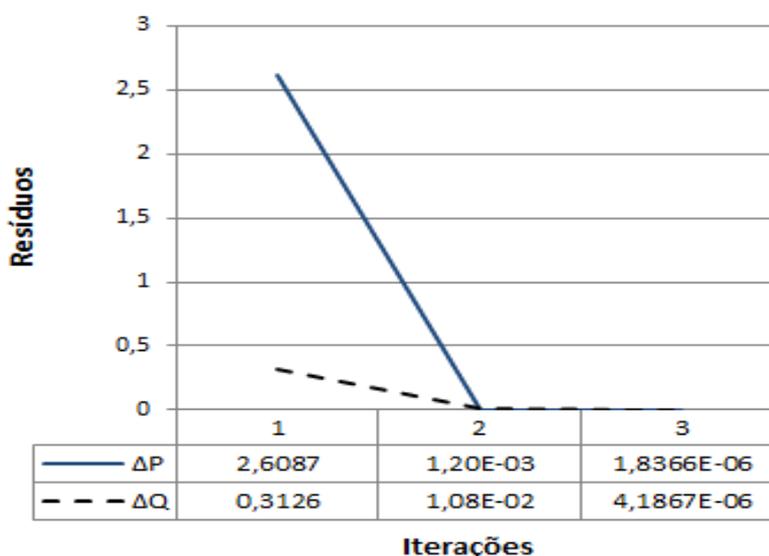


Figura 8 – Trajetória de convergência do FP - 39 barras

Apesar de comprovar a equivalência de todos os resultados da simulação, também se faz necessário analisar o sistema com uma variação na carga.

B) Sistema carga modificada

Com o objetivo de alterar o Fluxo de Potência, foi modificada a frequência de operação do sistema e como isso, optou-se pelo aumento das cargas conectadas nas barras 4, 8, 20 e 39 como indicado na tabela a seguir.

Tabela 9 – Comparação dos dados de carga

Barra	Carga original		Carga modificada	
	(MW)	(Mvar)	(MW)	(Mvar)
4	500,0	193,0	1000,0	386,0
8	522,0	176,0	1044,0	352,0
20	680,0	103,0	1360,0	206,0
39	1104,0	250,0	2208,0	500,0

A variação de 100% nas cargas resultou não somente uma redução na frequência do sistema para 59,1205 Hz, como também uma alteração nos resultados de tensão, indicados na Tabela 10.

Tabela 10 – Comparação dos resultados de tensão (Carga modificada) - 39 barras

	Fluxo1		Fluxo2		Fluxo3		Fluxo4	
	Modulo	Ângulo	Modulo	Ângulo	Modulo	Ângulo	Modulo	Ângulo
1	1,0007	-1,5274	1,0007	-1,5274	1,0007	-1,5274	1,0007	-1,5274
2	0,9993	14,9142	0,9993	14,9142	0,9993	14,9142	0,9993	14,9142
3	0,9594	10,6694	0,9594	10,6694	0,9594	10,6694	0,9594	10,6694
4	0,9034	4,4694	0,9034	4,4694	0,9034	4,4694	0,9034	4,4694
5	0,9122	4,5142	0,9122	4,5142	0,9122	4,5142	0,9122	4,5142
6	0,9196	5,7976	0,9196	5,7976	0,9196	5,7976	0,9196	5,7976
7	0,8972	0,7053	0,8972	0,7053	0,8972	0,7053	0,8972	0,7053
8	0,8923	-1,1585	0,8923	-1,1585	0,8923	-1,1585	0,8923	-1,1585
9	0,9811	-7,4087	0,9811	-7,4087	0,9811	-7,4087	0,9811	-7,4087
10	0,9471	11,3750	0,9471	11,3750	0,9471	11,3750	0,9471	11,3750
11	0,9356	9,5306	0,9356	9,5306	0,9356	9,5306	0,9356	9,5306
12	0,9223	10,0338	0,9223	10,0338	0,9223	10,0338	0,9223	10,0338
13	0,94	10,6869	0,94	10,6869	0,94	10,6869	0,94	10,6869
14	0,9281	9,1732	0,9281	9,1732	0,9281	9,1732	0,9281	9,1732
15	0,9488	13,4586	0,9488	13,4586	0,9488	13,4586	0,9488	13,4586
16	0,9769	17,0047	0,9769	17,0047	0,9769	17,0047	0,9769	17,0047
17	0,9753	15,2496	0,9753	15,2496	0,9753	15,2496	0,9753	15,2496
18	0,967	13,0344	0,967	13,0344	0,967	13,0344	0,967	13,0344

	Fluxo1		Fluxo2		Fluxo3		Fluxo4	
	Modulo	Ângulo	Modulo	Ângulo	Modulo	Ângulo	Modulo	Ângulo
19	1,018	20,7604	1,018	20,7604	1,018	20,7604	1,018	20,7604
20	0,9571	15,8749	0,9571	15,8749	0,9571	15,8749	0,9571	15,8749
21	0,9839	22,3685	0,9839	22,3685	0,9839	22,3685	0,9839	22,3685
22	1,0192	29,8648	1,0192	29,8648	1,0192	29,8648	1,0192	29,8648
23	1,0119	29,9251	1,0119	29,9251	1,0119	29,9251	1,0119	29,9251
24	0,9833	17,9702	0,9833	17,9702	0,9833	17,9702	0,9833	17,9702
25	1,0336	18,5328	1,0336	18,5328	1,0336	18,5328	1,0336	18,5328
26	1,0099	19,8191	1,0099	19,8191	1,0099	19,8191	1,0099	19,8191
27	0,9868	16,4808	0,9868	16,4808	0,9868	16,4808	0,9868	16,4808
28	1,0192	27,3250	1,0192	27,3250	1,0192	27,3250	1,0192	27,3250
29	1,0266	31,3971	1,0266	31,3971	1,0266	31,3971	1,0266	31,3971
30	1,048	20,4357	1,048	20,4357	1,048	20,4357	1,048	20,4357
31	0,982	20,5058	0,982	20,5058	0,982	20,5058	0,982	20,5058
32	0,983	23,8956	0,983	23,8956	0,983	23,8956	0,983	23,8956
33	0,997	28,5779	0,997	28,5779	0,997	28,5779	0,997	28,5779
34	1,012	24,3114	1,012	24,3114	1,012	24,3114	1,012	24,3114
35	1,049	37,2940	1,049	37,2940	1,049	37,2940	1,049	37,2940
36	1,064	42,2956	1,064	42,2956	1,064	42,2956	1,064	42,2956
37	1,028	29,2309	1,028	29,2309	1,028	29,2309	1,028	29,2309
38	1,027	41,1125	1,027	41,1125	1,027	41,1125	1,027	41,1125
39	1,03	-11,0000	1,03	-11,0000	1,03	-11,0000	1,03	-11,0000
Frequência (Hz)	59,1205		59,1205		59,1205		59,1205	

A Tabela 11 mostra uma comparação da trajetória de convergência do cálculo do fluxo de potência proposto.

Tabela 11 – Comparação dos resultados da trajetória de convergência (Carga modificada) – 39 barras

Iterações	Fluxo 1		Fluxo 2		Fluxo 3		Fluxo 4	
	ΔP	ΔQ						
1	10,9258	2,1434	10,9258	2,1434	10,9258	2,1434	10,9258	2,1434
2	1,1154	0,8674	1,1154	0,8674	1,1154	0,8674	1,1154	0,8674
3	0,1170	0,0288	0,1170	0,0288	0,1170	0,0288	0,1170	0,0288
4	8,22E-04	1,18E-04	8,22E-04	1,18E-04	8,22E-04	1,18E-04	8,22E-04	1,18E-04
5	3,17E-08	4,6E-09	3,17E-08	4,6E-09	3,17E-08	4,6E-09	3,17E-08	4,6E-09

A figura a seguir representa a mesma comparação para melhor entender os valores máximos por iteração dos resíduos de potência ativa e reativa.

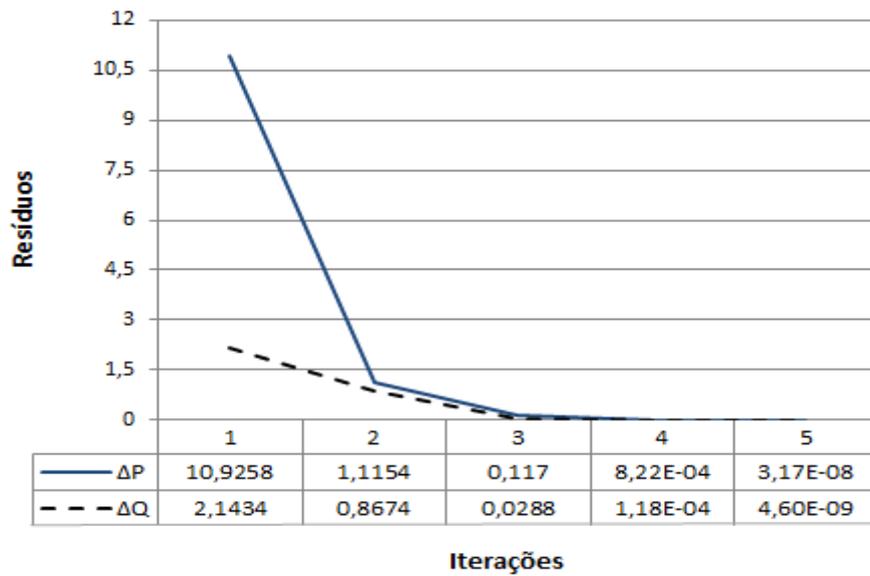


Figura 9 – Trajetória de convergência do FP (Carga modificada) - 39 barras

V.3 Análise do Pivoteamento

A análise do pivoteamento foi um fator decisivo para resultar em um modelo que mais se adapta nas condições do programa ANAREDE. A análise de tensão não foi suficiente para aplicar o método de maneira satisfatória, com isso, foi necessário comparar a sequência de pivoteamento para os sistemas de 9 e 39 barras.

A cada método testado, foi identificado um comportamento no pivoteamento, mas sempre houve uma relação na inversão da última linha de Potência Ativa com as equações adicionais, apesar de que cada um em específico apresentou uma sequência em particular.

V.3.1 Análise 9 barras

Em ambas as situações do sistema de 9 barras foram apresentados os mesmos comportamentos na sequência de fatoração, com isso os resultados a seguir podem ser relacionados tanto para o sistema sem perdas, quanto para o com perdas.

Para melhor visualizar a sequência de fatoração, foram destacados em vermelho as posições invertidas.

O primeiro fluxo de potência teve como resultado de pivoteamento a seguinte sequência:

$p = [1 \ 2 \ 3 \ 4 \ 5 \ 6 \ 7 \ 8 \ 22 \ 10 \ 11 \ 12 \ 13 \ 14 \ 15 \ 16 \ 17 \ 18 \ 19 \ 20$
 $21 \ 9]$

Como explicado no início da sessão, a nona linha da potência ativa foi invertida com a última equação adicional.

Já no segundo fluxo a inversão ocorreu em três posições, a primeira e a última equação de potência ativa com a primeira equação adicional, como mostrado a seguir:

$p = [19 \ 2 \ 3 \ 4 \ 5 \ 6 \ 7 \ 8 \ 1 \ 10 \ 11 \ 12 \ 13 \ 14 \ 15 \ 16 \ 17 \ 18 \ 9 \ 20$
 $21]$

O fluxo 3 teve praticamente o mesmo comportamento do primeiro fluxo, a última linha da potência ativa permutou com a única equação adicional.

$p = [1 \ 2 \ 3 \ 4 \ 5 \ 6 \ 7 \ 8 \ 19 \ 10 \ 11 \ 12 \ 13 \ 14 \ 15 \ 16 \ 17 \ 18 \ 9]$

Como representado a seguir, o quarto método foi o único que satisfez as condições do programa ANAREDE, onde a sequência de pivoteamento não possuiu inversão.

$p = [1 \ 2 \ 3 \ 4 \ 5 \ 6 \ 7 \ 8 \ 9 \ 10 \ 11 \ 12 \ 13 \ 14 \ 15 \ 16 \ 17 \ 18]$

Esse resultado se deve a estrutura do Fluxo 4. Como mostra em (55), não é mais utilizado $\Delta\theta$ como primeira variável de estado da matriz, a modificação para Δf fez com que a submatriz da potência ativa não mais zerasse, fazendo com que não houvesse mais a inversão na sequência do pivoteamento.

V.3.2 Análise 39 barras

Comparar mais de um sistema ao propor uma nova metodologia, torna a mesma mais confiável para estudos e aplicações posteriores. Com isso a verificação dos resultados da sequência do pivoteamento também é de grande importância neste trabalho.

Nas duas simulações do sistema *New Engand*, os resultados de pivoteamento permaneceram os mesmos.

O primeiro fluxo de potência teve como resultado a seguinte sequência:

p = [1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21
22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 89 40 41
42 43 44 45 46 47 48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 60 61
62 63 64 65 66 67 68 69 70 71 72 73 74 75 76 77 78 79 80 81
82 83 84 85 86 87 88 39]

Como representado no Anexo A.3, além das 39 barras, o sistema possui 10 geradores. Fato esse que justifica a inversão da fatoração ser na equação 39 com a última linha, referente à variável de estado f .

Já no segundo fluxo a inversão ocorreu também em três posições, como representado no sistema de 9 barras.

p = [1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20
21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 79 40
41 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 60
61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 71 72 73 74 75 76 77 78 80 39
81 82 83 84 85 86 87 88]

No Fluxo 3 a inversão também ocorreu com a última equação da potência ativa com a equação adicional.

p = [1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20
21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 79 40
41 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 60
61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 71 72 73 74 75 76 77 78 39]

O Fluxo 4, como demonstrado no sistema de 9 barras, teve como resultado uma sequência correta.

p = [1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21
22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42
43 44 45 46 47 48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 60 61 62
63 64 65 66 67 68 69 70 71 72 73 74 75 76 77 78]

Com isso, esse resultado valida a teoria aplicada, onde o modelo pode ser aplicado em qualquer sistema.

V.4 Sumário do capítulo

O capítulo apresentou os resultados de todos os modelos desenvolvidos no trabalho, englobando os principais valores para determinar o melhor modelo a ser utilizado em [3]. Nele foram demonstrados duas situações para o sistema de 9 barras, com e sem perdas, onde o segundo cenário também foi apresentado no Capítulo II de forma manual. Após apresentar os valores de tensão, de módulo e ângulo e a trajetória de convergência, foi também disponibilizado a sequência da fatoração de pivoteamento, utilizado nas análises finais para a implantação no ANAREDE. Após essa análise, para comprovar a veracidade da modelagem proposta, também foram simulados os mesmos resultados para um sistema de 39 barras.

CAPÍTULO VI

CONCLUSÕES

VI.1 Considerações Gerais

Esse trabalho teve como objeto principal a implementação e avaliação de quatro metodologias para representação do fluxo de potência com regulação primária no problema de fluxo de potência, resolvido pelo método de Newton. As metodologias estudadas são diferentes na consideração das variáveis de estado do problema e na representação explícita ou não das equações de regime permanente que descrevem o comportamento da atuação dos reguladores de velocidade.

A partir deste contexto, foi possível verificar que todas as metodologias são capazes de representar de forma adequada a regulação primária dos geradores do sistema. Em relação à trajetória de convergência pode-se verificar que todas apresentam o mesmo resultado. Contudo, devido à inclusão das equações de todas as equações de potência ativa no problema foi verificada a necessidade de permutação durante o processo de fatoração nas três primeiras metodologias. A quarta metodologia, que foi baseada na referência [2], apresentou o mesmo comportamento em termos de solução e não foi necessária a permutação durante o processo de fatoração. De uma forma resumida esta metodologia é baseada na substituição do ângulo da barra de referência pela frequência do sistema e as equações da regulação primária são representadas de forma similar à carga ZIP modelada, alterando a potência gerada em cada barra do tipo PV e de $V\theta$. Desta forma, conclui-se que esta metodologia seria adequada para implementação em programas computacionais que não têm o tratamento de pivôs nulos durante o processo de fatoração. A desvantagem nesta metodologia é que o valor da referência angular deve ser sempre inicializado com seu valor especificado.

VI.2 Considerações Futuras

Neste item, são apresentadas em linhas gerais, algumas sugestões de possíveis temas para desenvolvimentos futuros, visando dar continuidade aos assuntos estudados neste trabalho de conclusão de curso. As principais são:

- Estudo de estratégias de permutação;
- Avaliação de modelos de carga;
- Tratamento de limites de geração de potência ativa.

Bibliografia

- [1] P. O. L. Gatta, “Um novo modelo para representação de regulação primária e secundária de frequência no problema de fluxo de potência e Fluxo de Potência Ótimo,” 2011.
- [2] Y. Liu, Z. Wu, S. Lin e N. Brandon, “Application of the power flow calculation method to islanding micro grids,” em *Sustainable Power Generation and Supply, 2009. SUPERGEN'09. International Conference on*, 2009.
- [3] P. ANAREDE, *Manual do Usuário*, 9, 2010.
- [4] X. Vieira Filho, *Operação de sistemas de potência com controle automático de geração*, Campus, 1984.
- [5] A. J. Wood e B. F. Wollenberg, *Power generation, operation, and control*, John Wiley & Sons, 2012.
- [6] J. Passos Filho, “Modelagem e Incorporação de Dispositivos de Controle no Problema de Fluxo de Potência,” 2000.
- [7] M. Montagna e G. Granelli, “Detection of Jacobian singularity and network islanding in power flow computations,” *IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, vol. 142, n. 6, pp. 589-594, 1995.
- [8] A. J. Monticelli, *Fluxo de carga em redes de energia elétrica*, E. Blucher, 1983.
- [9] R. L. Burden, J. D. Faires e A. T. Kays, *Análise numérica*, Cengage Learning, 2008.
- [10] E. Theodoro, R. Benedito, J. London e L. Alberto, “Algebraic-graph method for identification of islanding in power system grids,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 35, n. 1, pp. 171-179, 2012.
- [11] I. MathWorks, *MATLAB: the language of technical computing, version 7*, vol. 9, MathWorks, 2005.

APÊNDICE A

DADOS DO SISTEMA

A.1 Considerações Gerais

Nesta seção serão disponibilizados os dados dos sistemas utilizados no capítulo de resultados.

A.2 Sistema 9 Barras

TITU

Exemplo Vieira Filho - RP - usar arquivo 6BAR.BLT para estatismo

DCTE

(Mn) (Val) (Mn) (Val)

TEPA .0001 TEPR .0001

99999

DBAR

(Num)	OETGb	(nome)	G1	(V)	(A)	(Pg)	(Qg)	(Qn)	(Qm)	(Bc)	(Pl)	(Ql)	(Sh)	Are	(Vf)
1	L2	Barra 1	1040	0.200.	25.9	-130.130.4									11000
2	L1	Barra 2	10259.27	150.5.557	-101.101.2										11000
3	L1	Barra 3	10254.66	50.	-12.-67.4	67.4									11000
4	L	Barra 4	1026	-2.2											11000
5	L	Barra 5	996	-4.						480.	00.				11000
6	L	Barra 6	1013	-3.7						0.	0.				11000
7	L	Barra 7	10263.71												11000
8	L	Barra 8	1016.725							0.	0.				11000
9	L	Barra 9	1033	0.											11000

99999

DLIN

(De)	d O	d(Pa)	NcEP	(R%)	(X%)	(Mvar)	(Tap)	(Tmn)	(Tmx)	(Phs)	(Bc)	(Cn)	(Ce)	Ns
1			4 1 T		5.76		1.0					247	247	
2			7 1 T		6.25		1.0					192	192	
3			9 1 T		5.86		1.0					128	128	
4			5 1 T		8.5	17.6						300	300	
4			6 1 T		9.2	15.8						300	300	
6			9 1 T		17.	35.8						200	200	
7			5 1 T		16.1	30.6						200	200	
7			8 1 T		7.2	14.9						300	300	
8			9 1 T		10.08	20.9						300	300	

99999

DGER

((No)	O	(Pmn)	(Pmx)	(Fp)	(FpR)	(FPn)	(Fa)	(Fr)	(Ag)	(Xq)	(Sno)	(R)
1		0.	999.4	5.	100.							1.67
2		0.	999.2	3.75	100.							2.27
3		0.	999.8	1.25	100.							5.00

99999

FIM

A.3 Sistema 39 Barras

TITU

Sistema Teste - New England Caso Base

DBAR

(Num)	OETGb (nome)	Gl (V) (A) (Pg) (Qg) (Qn) (Qm) (Bc) (Pl) (Ql) (Sh)	Are (Vf)
1	L BARRA-001	1048-9.5	11000
2	L BARRA-002	1049-6.9	11000
3	L BARRA-003	1031-9.8	322. 2.4 11000
4	L BARRA-004	1004-11.	500. 184. 21000
5	L BARRA-005	1005-9.4	11000
6	L BARRA-006	1007-8.7	11000
7	L BARRA-007	997-11.	233.8 84. 11000
8	L BARRA-008	996-11.	522. 176. 21000
9	L BARRA-009	1028-11.	11000
10	L BARRA-010	1017-6.3	11000
11	L BARRA-011	1013-7.1	11000
12	L BARRA-012	1000-7.1	8.5 88. 11000
13	L BARRA-013	1014 -7.	11000
14	L BARRA-014	1012-8.7	11000
15	L BARRA-015	1016-9.1	320. 153. 11000
16	L BARRA-016	1032-7.7	329.4 32.3 11000
17	L BARRA-017	1034-8.7	11000
18	L BARRA-018	1031-9.5	158. 30. 11000
19	L BARRA-019	1050 -3.	11000
20	L BARRA-020	991-4.5	680. 103. 21000
21	L BARRA-021	1032-5.3	274. 115. 11000
22	L BARRA-022	1050-.82	11000
23	L BARRA-023	1045 -1.	247.5 84.6 11000
24	L BARRA-024	1038-7.6	308.6-92.2 11000
25	L BARRA-025	1058-5.5	224. 47.2 11000
26	L BARRA-026	1052-6.8	139. 17. 11000
27	L BARRA-027	1038-8.8	281. 75.5 11000
28	L BARRA-028	1051-3.3	206. 27.6 11000
29	L BARRA-029	1050-.54	283.5 26.9 11000
30	L1 BARRA-030	1048-4.5 250.146.3-999999999	11000
31	L1 BARRA-031	982.115573.2207.1-999999999	9.2 4.6 11000
32	L1 BARRA-032	9831.73 650.205.3-999999999	11000
33	L1 BARRA-033	9972.17 632.108.6-999999999	11000
34	L1 BARRA-034	1012.734 508.166.5-999999999	11000
35	L1 BARRA-035	10494.14 650.209.3-999999999	11000
36	L1 BARRA-036	10646.83 560.102.1-999999999	11000
37	L1 BARRA-037	10281.24 540..4102-999999999	11000
38	L1 BARRA-038	10276.52 830.23.02-999999999	11000
39	L2 BARRA-039	1030-11.1000.87.43-999999999	1104. 250. 21000

99999

DLIN

(De)	d O d(Pa)	NcEP (R%) (X%)	(Mvar) (Tap) (Tmn) (Tmx) (Phs) (Bc) (Cn) (Ce)Ns
1	2 1	.35 4.11 69.87	
1	39 1	.1 2.5 75.	
2	3 1	.13 1.51 25.72	
2	25 1	.7 .86 14.6	
2	30 1	1.81	1.025
3	4 1	.13 2.13 22.14	
3	18 1	.11 1.33 21.38	
4	5 1	.08 1.28 13.42	
4	14 1	.08 1.29 13.82	
5	6 1	.02 .26 4.34	
5	8 1	.08 1.12 14.76	
6	7 1	.06 .92 11.3	

6	11	1	.07	.82	13.89							
6	31	1		2.5		1.07						
7	8	1	.04	.46	7.8							
8	9	1	.23	3.63	38.04							
9	39	1	.1	2.5	120.							
10	11	1	.04	.43	7.29							
10	13	1	.04	.43	7.29							
10	32	1		2.		1.07						
12	11	1	.16	4.35		1.006						
12	13	1	.16	4.35		1.006						
13	14	1	.09	1.01	17.23							
14	15	1	.18	2.17	36.6							
15	16	1	.09	.94	17.1							
16	17	1	.07	.89	13.42							
16	19	1	.16	1.95	30.4							
16	21	1	.08	1.35	25.48							
16	24	1	.03	.59	6.8							
17	18	1	.07	.82	13.19							
17	27	1	.13	1.73	32.16							
19	20	1	.07	1.38		1.06						
19	33	1	.07	1.42		1.07						
20	34	1	.09	1.8		1.009						
21	22	1	.08	1.4	25.65							
22	23	1	.06	.96	18.46							
22	35	1		1.43		1.025						
23	24	1	.22	3.5	36.1							
23	36	1	.05	2.72		1.						
25	26	1	.32	3.23	51.3							
25	37	1	.06	2.32		1.025						
26	27	1	.14	1.47	23.96							
26	28	1	.43	4.74	78.02							
26	29	1	.57	6.25	102.9							
28	29	1	.14	1.51	24.9							
29	38	1	.08	1.56		1.025						

99999

(

DGER

(No)	O	(Pmn)	(Pmx)	(Fp)	(FpR)	(FPn)	(Fa)	(Fr)	(Ag)	(Xq)	(Sno)	(R)
30		0.	9999.									0.5
31		0.	9999.									0.5
32		0.	9999.									0.5
33		0.	9999.									0.5
34		0.	9999.									0.5
35		0.	9999.									0.5
36		0.	9999.									0.5
37		0.	9999.									0.5
38		0.	9999.									0.5
39		0.	9999.									0.5

99999

(

FIM