

RAIMUNDO RIBEIRO PINTO JÚNIOR

Fluxo de Potência em Redes Modeladas no Nível de Subestação.

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica – PPGEE, Departamento de Engenharia Elétrica, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

Orientadora: Profa. Elizete Maria Lourenço, Dr.

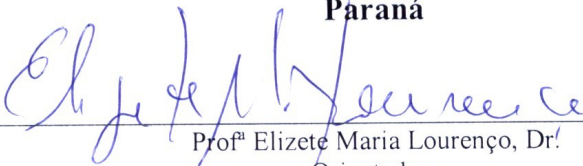
CURITIBA
2005


Fluxo de Potência em Redes Modeladas no Nível de Subestação

Raimundo Ribeiro Pinto Júnior


Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do

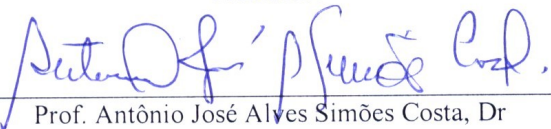
Paraná

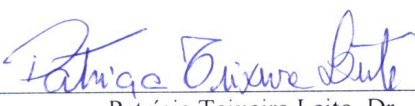

Prof.^a Elizete Maria Lourenço, Dr.
Orientadora

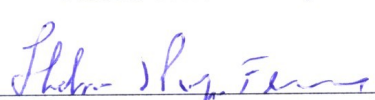

Prof. Oscar da Costa Gouveia Filho, Dr.
Coordenador do Programa em Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Banca Examinadora


Prof.^a Elizete Maria Lourenço, Dr.
Presidente


Prof. Antônio José Alves Simões Costa, Dr.


Patrícia Teixeira Leite, Dr.


Prof.^a Thelma Solange Piazza Fernandes, Dr.

Curitiba, 21 de Setembro de 2005

AGRADECIMENTOS

A meu pai Raymundo e minha mãe Zuleica minha eterna gratidão por ter me proporcionado o caminho do estudo.

A minha esposa Rosângela e a meus filhos Renato, Ricardo e Raquel pelo incentivo e apoio nos momentos difíceis desta empreitada.

Aos professores Marcus Vinícius Lamar e Evélio Martín García Fernández pela ajuda nos problemas de informática.

À minha orientadora, prof. Elizete Maria Lourenço, pelo incentivo, dedicação, motivação e orientação sem os quais não seria possível a conclusão des te trabalho.

Sumário

Lista de Figuras por Capítulo	vi	
Lista de Tabelas por Capítulo	vii	
Capítulo 1	Introdução	1
	1.1 Revisão Bibliográfica.....	3
	1.2 Contribuições do Trabalho.....	6
	1.3 Estrutura da Dissertação.....	6
Capítulo 2	Modelagem de Rede Elétrica para Estudo de Fluxos de Carga em Sistemas Elétricos de Potência	8
	2.1 Componentes Básicos de Sistemas de Potência.....	8
	2.1.1 Modelagem de Gerador e Carga.....	10
	2.1.2 Modelagem de Linhas de Transmissão.....	11
	2.1.3 Modelagem de Transformadores.....	13
	2.2 Fluxo de Potência Complexa numa Linha de Transmissão..	16
	2.3 Capacidade de uma linha de Transmissão.....	18
	2.4 Perdas nas Linhas de Transmissão.....	19
	2.5 Expressões Gerais para os Fluxos de Potência.....	20
	2.6 Representação Matricial.....	20
Capítulo 3	Solução de Fluxo de carga: Abordagem Linearizada e Método de Newton-Raphson	25
	3.1 Abordagem Linearizada.....	26
	3.2 Fluxo de Carga Não-Linear.....	28
	3.2.1 Formulação Básica e Resolução pelo Método de Newton-Raphson.....	31

Capítulo 4	Modelagem de Subestações em Fluxo de Carga	36
	4.1 A Metodologia.....	37
	4.2 Fluxo de Carga Linearizado no Nível de Subestação.....	39
	4.2.1 Exemplo Ilustrativo.....	41
	4.3 Fluxo de Carga Não-Linear no Nível de Subestação Utilizando o Método de Newton-Raphson.....	44
	4.3.1 Exemplo Ilustrativo.....	50
	4.4 Considerações sobre a Metodologia.....	51
Capítulo 5	Resultados	52
	5.1 Resultados da Abordagem Linearizada.....	56
	5.2 Resultados da Abordagem Não-Linear.....	62
Capítulo 6	Conclusões e Trabalhos Futuros	73
Anexos		76
	Anexo I Dados e Resultados do Sistema de 30 Barras do IEEE na Modelagem Nível Convencional e Nível de Seção de Barramento.....	76
	Anexo II Dados e Resultados do Sistema de 24 Barras do IEEE na Modelagem Nível Convencional e Nível de Seção de Barramento.....	82
	Referências Bibliográficas	88

Lista de figuras por Capítulo

Capítulo 2

Figura 2.1	Representação monofásica de um sistema de potência.....	9
Figura 2.2	Representação do SEP no sistema barra-ramo.....	10
Figura 2.3	Modelo equivalente π de uma linha de transmissão.....	12
Figura 2.4	Modelo de transformador YY de dois enrolamentos.....	14
Figura 2.5	Representação do transformador pelo modelo π equivalente.....	15
Figura 2.6	Injeção de correntes na barra k.....	21

Capítulo 3

Figura 3.1	Representação de duas barras com variáveis envolvidas.....	28
------------	--	----

Capítulo 4

Figura 4.1	SEP de 5 barras com ramos chaveáveis.....	41
Figura 4.2	Estrutura da nova matriz Jacobiana.....	48

Capítulo 5

Figura 5.1	Representação de uma parte do unifilar do SEP de 30 barras.....	53
Figura 5.2	Representação de uma parte do SEP de 30 barras com as SE's 12 e 15 modeladas com ramos chaveáveis.....	54
Figura 5.3	Representação de uma parte do sistema de 24 barras com as SE's 14 e modeladas no nível de seção de barras.....	55
Figura 5.4	Subestação 12 modelada no nível de seção de barras.....	60
Figura 5.5	Subestação 15 modelada no nível de seção de barras.....	61
Figura 5.6	Subestação 12 do sistema de 30 barras do IEEE modelada no nível de de barras.....	66

Figura 5.7	Subestação 15 do sistema de 30 barras do IEEE modelada no nível de seção de barras.....	67
Figura 5.8	Subestação 14 do Sistema de 24 barras do IEEE, modelada no nível de seção de barras.....	71
Figura 5.9	Subestação 16 do Sistema de 24 barras do IEEE, modelada no nível de seção de barras.....	72

Lista de Tabelas por Capítulo

Capítulo 5

Tabela 5.1	Ângulos das tensões das barras.....	56
Tabela 5.2	Fluxo de potência ativa nos ramos.....	58
Tabela 5.3	Módulo e ângulo de tensões das barras sistema de 30 barras do IEEE.....	62
Tabela 5.4	Fluxos de ativo e reativo nos ramos sistema de 30 barras do IEEE.....	64
Tabela 5.5	Resultados de módulo e ângulo do sistema de 24 barras do IEEE.....	68
Tabela 5.6	Resultados de fluxo de potência ativa e reativa nos ramos do sistema de 24 barras do IEEE.....	69

Anexo I

Tabela A.1	Dados de barras sistema 30 barras	75
Tabela A.2	Dados das Linhas sistema 30 barras	76
Tabela A.3	Resultados das grandezas das barras do modelo convencional sistema 30 barras.....	77
Tabela A.4	Resultatdo do fluxo de potência nos ramos no modelo convencional sistema 30 barras.....	78
Tabela A.5	Resultados das grandezas das barras do modelo seção de barramento sistema 30 barras.....	79
Tabela A.6	Resultado do fluxo de potência nos ramos no modelo de seção de barramento sistema de 30 barras.....	80

Anexo II

Tabela A.7	Dados das barras sistema 24 barras	82
Tabela A.8	Dados das Linhas sistema 24 barras	83

Tabela A.9	Resultado de grandeza das barras no modelo convencional sistema de 24 barras.....	84
Tabela A.10	Resultado do fluxo de potência nos ramos no modelo convencional sistema 24 barras.....	84
Tabela A.11	Resultado de grandeza das barras no modelo seção de barramento sistema 24 barras.....	85
Tabela A.12	Resultado do fluxo de potência no modelo seção de barramento sistema 24 barras.....	86

RESUMO

Este trabalho apresenta uma metodologia que introduz os conceitos de representação de ramos chaveáveis na formulação do problema de fluxo de carga em sistemas elétricos de potência.

Atualmente os algoritmos para estudo de fluxo de carga não representam as chaves e disjuntores, denominados ramos chaveáveis, na modelagem da rede elétrica, em virtude das dificuldades em modelar ramos de impedância nula quando as variáveis de estado consistem apenas das tensões complexas nas barras. Com isto, os fluxos de potência através dos equipamentos das subestações não são obtidos diretamente com os algoritmos de fluxo de carga convencional.

O algoritmo proposto e seus conceitos incorporam a representação de ramos de impedância nula, proposta para o problema de estimação de estado, na formulação do problema de fluxo de carga, tornando-se uma ferramenta de trabalho importante para analistas e operadores de Sistemas Elétricos de Potência.

Palavras chaves: ramos chaveáveis, fluxo de potência, sistemas de potência,

ABSTRACT

This work presents a methodology to introduce the concepts of switching branches representation in the load flow study in electrical power system.

Conventional load flow algorithm do not represent the switches and circuit breakers, referred to as switching branches, in the network model, due to difficult of modeling zero impedance branches when the states variables consist of bus complex voltages only. As a consequence, the power flow through substation devices are not directly obtained from de conventional load flow algorithms.

The proposed algorithm and its concepts incorporate the zero impedance branches representation, proposed to the state estimation problem, in the formulation of the load flow problem, thus becoming a very important tool to the work for analysts and operators of Electrical Power Systems.

Key words: switching branches, load flow, power systems

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Os estudos de fluxo de potência em regime permanente desempenham papel fundamental na operação e no planejamento da expansão de sistemas elétricos de potência, pois permitem determinar o estado de operação do sistema a partir de uma dada topologia e condição de carga.

As informações obtidas são as tensões complexas em todas as barras do sistema, com as quais se determina a distribuição de fluxos de potência ativa e reativa através de linhas de transmissão e transformadores e as perdas do sistema.

A avaliação da potência reativa necessária para manter os níveis de tensão dentro de limites pré-estabelecidos para um dado cenário e lista de contingências é também um dos objetivos dos estudos de fluxo de potência.

O problema de fluxo de potência, ou fluxo de carga, é formulado considerando a modelagem estática da rede elétrica, portanto, pode ser representado por um conjunto de equações algébricas não lineares sujeito a um conjunto de restrições operacionais da rede e de seus componentes.

A análise tradicional de fluxo de potência se baseia na modelagem convencional da rede elétrica conhecida como modelagem barra-ramo, onde os arranjos das subestações são previamente determinados e as seções de barras de cada subestação são agrupadas, formando uma única barra ou nó. Este procedimento evita a representação explícita de chaves e disjuntores e os consequentes problemas numéricos causados pela utilização de valores muito pequenos ou muito grandes de impedância para representar os status aberto

e fechado de tais dispositivos. Portanto, na modelagem barra-ramo os arranjos das subestações e todas as informações contidas dentro das subestações são perdidos.

A formulação convencional de fluxo de potência utiliza a modelagem barra-ramo da rede elétrica. Com isto, a distribuição de fluxo através dos equipamentos das subestações não pode ser obtida diretamente com esta ferramenta e o operador tem que lançar mão de procedimentos manuais para sua determinação.

Os algoritmos disponíveis na literatura bem como os pacotes computacionais utilizados pelas concessionárias de energia elétrica para análise de fluxo de carga utilizam a formulação convencional. Como consequência, a verificação dos carregamentos dos equipamentos que compõem as subestações é usualmente feita através da montagem manual, a partir do diagrama unifilar da mesma, da colocação dos valores dos fluxos obtidos nos estudos convencionais de fluxo de carga e então a análise dos resultados, com uma demanda de tempo significativa aos operadores.

A estimação de estado é uma ferramenta fundamental para a modelagem em tempo real de sistemas elétricos de potência. A partir de um conjunto redundante de medidas, adequadamente distribuídas pelo sistema, a estimação de estado permite estimar as tensões complexas em todas as barras desse sistema. Uma característica importante desta ferramenta é a sua capacidade de detectar e identificar erros nos dados processados, que auxilia na sua principal função, qual seja a construção de uma base de dados completa e confiável. Como parte do processo de estimação, determina-se também a configuração atual da rede elétrica e sua observabilidade.

Na última década iniciou-se uma tendência no sentido de se aplicar a estimação de estados para validação de dados no nível de subestação, com o objetivo principal de possibilitar o processamento de erros de topologia oriundos de falhas de modelagem de

configuração de subestações. Essa tendência iniciou-se com uma nova proposição de representação de chaves e disjuntores na estimação de estados que elimina a representação explícita da impedância desses elementos na formulação matemática do problema [11], [12] e [13]. A partir dessa nova abordagem surgiu a estimação de estados generalizada [1] e uma série de novos algoritmos de processamento de erros de topologia que tem confirmado a viabilidade e eficiência da representação de chaves e disjuntores nos estudos de estimação de estado [2], [7].

A principal contribuição deste trabalho consiste em propor uma extensão da formulação convencional de fluxo de potência de forma a torná-la capaz de processar redes modeladas no nível subestação e, assim, possibilitar o cálculo direto dos fluxos de potência através de chaves e disjuntores. Para evitar os problemas numéricos advindos da representação de chaves e disjuntores por suas impedâncias, a representação de ramos chaveáveis proposta por MONTICELLI e GARCIA [11] para os estudos de estimação de estados será utilizada, através da adaptação da metodologia ao problema de fluxo de potência. Pretende-se assim, disponibilizar uma ferramenta importante para analistas de sistemas de potência das concessionárias de energia, para engenheiros industriais em estudos de carregamentos de barramentos, equipamentos de subestações e ramais alimentadores, bem como para estudantes de Engenharia Elétrica em disciplinas de Sistemas de Potência.

1.1 Revisão Bibliográfica

As primeiras investigações sobre os estudos de fluxo de potência surgiram por volta dos anos cinquenta [6]. Desde então o problema tem sido alvo de novas contribuições tanto por parte de pesquisadores como profissionais de concessionárias de

energia, universidades e centros de pesquisa. Esses estudos e pesquisas tornaram acessível o conhecimento da ferramenta de fluxo de potência [3],[4],[10] e [14], que é hoje repassada aos futuros profissionais da área através dos cursos de graduação e pós-graduação em Engenharia Elétrica.

A modelagem convencional dos sistemas de potência no nível de barramentos e ramos, modelagem barra-ramo, é adotada na formulação de fluxo de potência abordada pelos autores da literatura clássica na área, tais como, [3], [4], [10], [14] e [16]. A representação de chaves e disjuntores no modelo da rede elétrica teve início recentemente nos estudos de estimação de estados [11] e compõe a base da nova abordagem de fluxo de potência no nível de subestação proposta nesse trabalho. Por isso, uma breve revisão dos trabalhos na área de estimação de estados que inspiraram o presente trabalho será apresentada na seqüência.

No início da década de 90, MONTICELLI e GARCIA [11] propuseram uma modelagem exata dos ramos de impedância nula na estimação de estados de sistemas elétricos de potência. Na metodologia proposta, os status de chaves e disjuntores são incluídos no problema de estimação de estados como restrições de igualdade ou pseudomedidas, como é feito para representar as barras de injeção nula, e incluindo os fluxos de potência nesses ramos como novas variáveis de estado.

Em seguida, MONTICELLI analisa de forma mais genérica o impacto da modelagem dos ramos de impedância nula na estimação de estados [12]. O conceito de variáveis de estado é generalizado e uma extensão da análise de observabilidade numérica é proposta, de forma a torná-la capaz de processar ramos de impedância nula.

Utilizando a modelagem de ramos chaveáveis apresentada em [11], [12] e [13], ALSAÇ e outros [1], introduzem o conceito e a formulação da estimação de estados

generalizada, abordando a questão da observabilidade e o tratamento de regiões suspeitas da rede no nível de subestação para o processamento de erros de topologia.

CLEMENTS e SIMÕES COSTA [2] tratam a estimação de estados generalizada como um problema de otimização e propõem a utilização de multiplicadores de Lagrange para o processamento de erros de topologia. Esta abordagem deu origem a uma série de novos algoritmos de processamento de erros de topologia na estimação de estados generalizada.

Em 2001, LOURENÇO [7], em sua tese de doutorado, propõe uma nova metodologia para o processamento de erros nas configurações de subestações a partir da estimação de estados generalizada, que neste caso é tratada como um problema de otimização conforme proposto em [2]. Seguindo a nova abordagem, os fluxos através de ramos chaveáveis são incluídos como novas variáveis de estado e as informações provenientes da representação explícita de chaves e disjuntores são incluídas como restrições de igualdade. O trabalho de pesquisa estende também os conceitos de observabilidade e criticidade topológica em sistemas modelados no nível de subestação [15]. A partir daí novos algoritmos e técnicas de processamento de erros de topologia foram propostos, entre eles [8] e [9].

Com base na experiência de LOURENÇO [7] e nas dificuldades dos analistas de sistemas de concessionárias de energia, originou-se a idéia deste trabalho de se aplicar a metodologia de representação de ramos chaveáveis, até então restrita aos problemas de estimação de estados, para os estudos de fluxos de potência.

1.2 – Contribuições do Trabalho

A revisão bibliográfica apresentada na seção anterior mostra a viabilidade da representação explícita de chaves e disjuntores nos estudos de estimação de estados [11], [12] e o bom desempenho da aplicação desta modelagem no processamento de erros de topologia em configurações de subestações [2], [7], [13].

Este trabalho propõe a extensão da representação de ramos chaveáveis apresentada em [11] para os estudos de fluxo de potência, de forma a permitir a aplicação desta ferramenta em redes modeladas no nível de subestação. Desta forma, a distribuição de fluxos através dos equipamentos das subestações pode ser obtida diretamente como parte dos resultados do problema de fluxo de carga, eliminando a necessidade de procedimentos manuais, adotados atualmente pelas concessionárias de energia.

As diferentes características entre os algoritmos de fluxo de carga e de estimação de estados não permitem uma aplicação direta das técnicas propostas em [11] e utilizadas para o processamento de erros em [2] e [7]. No entanto, o problema de fluxo de carga pode ser reformulado, ou estendido, de forma a incorporar os novos conceitos e técnicas apresentadas na estimação de estado generalizada, conforme proposto neste trabalho.

1.3 – Estrutura da dissertação.

No Capítulo 2 os conceitos básicos de fluxo de carga de um Sistema Elétrico de Potência são revistos, objetivando o entendimento posterior das modificações a serem introduzidas pela nova metodologia.

No Capítulo 3 são apresentados os conceitos e a formulação do fluxo de carga linearizado e os conceitos de fluxo de carga não linear como uma revisão dos métodos convencionais, bem como a resolução do problema pelo método de Newton-Raphson.

No Capítulo 4 é apresentada a metodologia proposta no trabalho, tanto para a formulação do fluxo de potência linearizado como para a abordagem não-linear do problema. Um pequeno sistema teste é utilizado para ilustrar as modificações incluídas nas matrizes de coeficientes de ambos os problemas: linear e não-linear.

No Capítulo 5 são apresentados resultados de simulações com a aplicação da metodologia proposta para os sistemas de 30 e 24 barras do IEEE, nos quais duas subestações são modeladas no nível de seção de barras. A validação dos resultados é também comprovada comparando os resultados obtidos com as simulações em que se utilizou a modelagem barra-ramo para os mesmos sistemas-teste.

As conclusões gerais e sugestões para trabalhos futuros são apresentadas no Capítulo 6.

CAPÍTULO 2

MODELAGEM DE REDE ELÉTRICA PARA ESTUDO DE FLUXOS DE CARGA EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

Nesse capítulo serão apresentados os conceitos básicos e a modelagem dos principais componentes dos sistemas elétricos de potência utilizados nos estudos de fluxo de potência. As equações básicas e a representação do problema na forma matricial são também apresentadas.

2.1- Componentes Básicos de Sistemas de Potência

Os componentes básicos considerados nos estudos de fluxo de potência são gerador, carga, linha de transmissão, transformador e elemento shunt. A Figura 2.1 ilustra a representação monofásica de um sistema elétrico de potência (SEP), onde estão representados também chaves e disjuntores que compõe a configuração da subestação do sistema em foco.

Na formulação convencional de fluxo de potência, a rede elétrica é modelada no nível de barramentos e ramos, conhecida como modelagem barra-ramo, onde as subestações são representadas por barras, ou nós, e linhas de transmissão e transformadores são representados por ramos que interligam as barras do sistema. A representação simplificada de cada subestação é definida de acordo com a configuração e status das chaves e disjuntores que a compõe. Quando as chaves e disjuntores que

“ligam” duas ou mais seções de barra estão fechados, estas são consideradas como uma única barra. Por outro lado, quando qualquer dos dispositivos em série (disjuntor ou chave) estiver aberto, as seções de barra são representadas separadamente, por duas barras distintas.

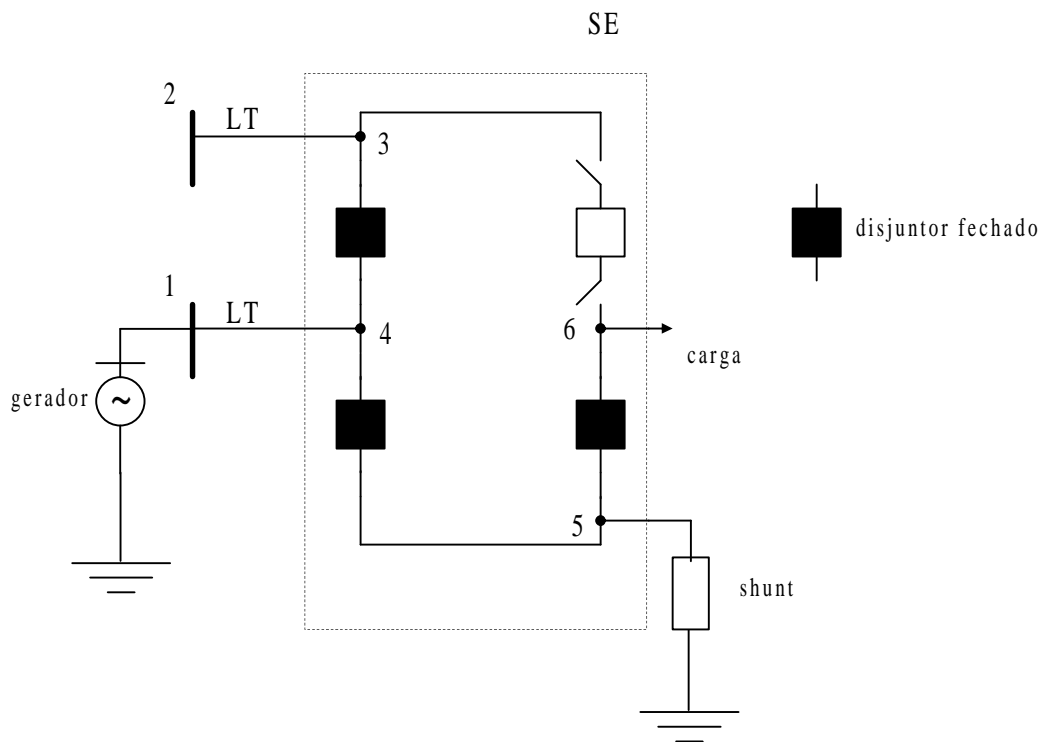


Figura 2.1 – Representação monofásica de um SEP.

No caso do SEP da Figura 2.1, a configuração das chaves e disjuntores apresentada resulta na representação da subestação por uma única barra, ou seja, nesse caso os nós 3, 4, 5 e 6 do SEP original são unidos formando uma barra apenas, de número 3. A Figura 2.2. mostra a representação gráfica resultante da modelagem barra - ramo do SEP da Figura 2.1.

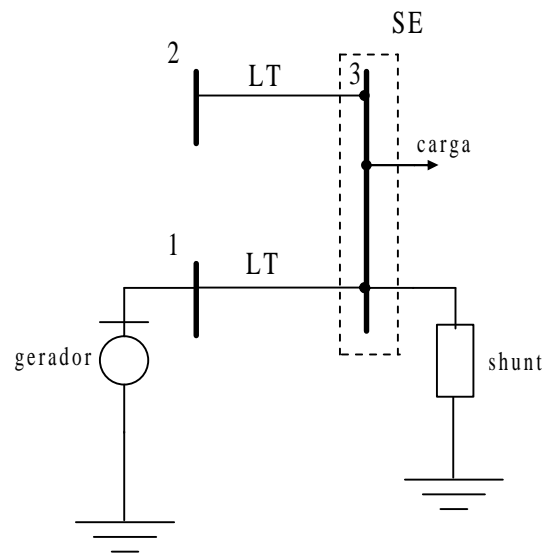


Figura 2.2 – Representação do SEP no sistema barra-ramo

2.1.1 – Modelagem de Gerador e Carga

Para efeitos de estudo de fluxo de potência, o nível da tensão gerada desejada para a operação do sistema é especificado e a injeção de potência reativa necessária é obtida a partir da solução do problema de fluxo de potência, obedecendo -se os limites máximo e mínimo de capacidade de geração de potência reativa de cada máquina. A geração de potência ativa é também especificada, sendo os valores definidos pelo estudo de despacho ótimo de geração.

A carga é um componente que oferece dificuldades de ser representada nas ferramentas de análise de sistemas de potência. Além da diversidade de elementos que a compõe, as variações nem sempre são previsíveis durante o dia. Porém, para estudos de fluxo de carga em regime permanente, pode -se considerar que as mesmas apresentam durante longas horas do dia valores constantes e pré -definidos. Consideram-se quatro períodos distintos de carga chamados de:

Carga mínima (das 0:00h às 6:00h e das 22:00h às 24:00h de Domingos e feriados);

Carga leve (das 0:00h às 6:00h e das 22:00h às 24:00h de dias úteis e das 6:00h às 18:00h de Domingos e feriados);

Carga média (das 6:00h às 17:00h de dias úteis e das 18:00h às 22:00h de Domingos e feriados); e

Carga pesada (das 17:00h às 22:00h de dias úteis).

A maneira usual de se modelar a carga nos estudos de fluxo de potência é representá-la como potências ativas e reativas constantes, cujos valores dependem dos períodos de carga de acordo com as considerações mencionadas acima. A carga sempre absorve potência ativa. No entanto, apesar da característica indutiva das cargas em geral (motores de indução e reatores de iluminação), a potência reativa pode ser positiva ou negativa, dependendo da potência capacitiva adicionada pelo elemento shunt, visando melhoria do fator de potência.

Basicamente, nos cálculos de fluxo de carga, trabalha-se com a injeção de potência líquida na barra, podendo a mesma ser positiva, caso a geração seja maior em magnitude do que a carga, negativa, caso a geração seja menor em magnitude do que a carga ou nula, quando não há geração ou carga conectada a barra ou as duas sejam equivalentes em grandeza.

2.1.2 – Modelagem de Linhas de Transmissão

As linhas de transmissão são os elementos básicos que constituem as redes elétricas e cuja função é o transporte da energia elétrica das fontes geradoras aos centros de consumo. As linhas de transmissão são usualmente representadas pelo modelo π equivalente [3], definido por uma impedância série, que representa as perdas ativas e reativas, e uma admitância em derivação, que modela o efeito capacitivo da

linha. O elemento série é composto de uma resistência série (r_{km}) e reatância série (x_{km}) e a admitância em derivação é normalmente representada apenas pela susceptância shunt (b_{km}^{sh}), que no modelo π é dividida em duas partes iguais representadas em cada extremo da linha, conforme mostrado na Figura 2.3. O limite de capacidade de transmissão das linhas deve também ser considerado (vide Seção 2.3).

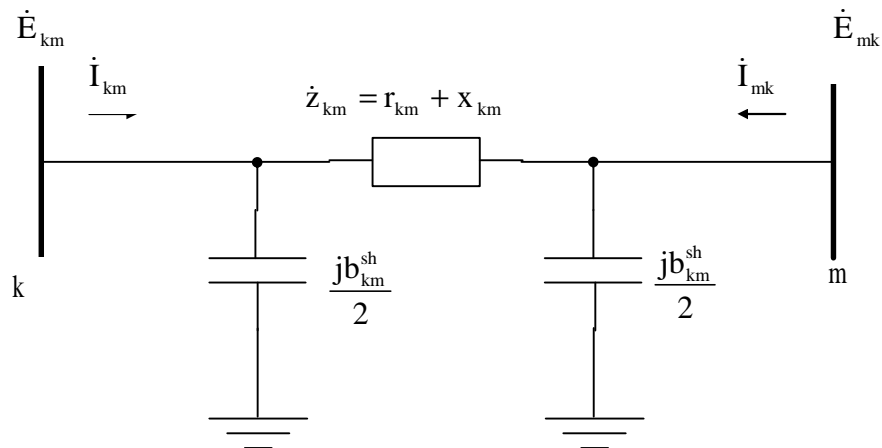


Figura 2.3: Modelo equivalente π de uma linha de transmissão.

Os parâmetros série do modelo π podem também ser representados pela admitância série (\dot{y}_{km}), definida por

$$\dot{y}_{km} = \dot{z}_{km}^{-1} = \frac{1}{r_{km} + jx_{km}} = g_{km} + jb_{km} \quad (2.1)$$

onde g_{km} e b_{km} são a condutância e susceptância série da linha de transmissão, respectivamente. Essas quantidades são normalmente expressas em termos da resistência e reatância série da linha, ou seja

$$g_{km} = \frac{r_{km}}{r_{km}^2 + x_{km}^2} \quad (2.2)$$

$$b_{km} = -\frac{x_{km}}{r_{km}^2 + x_{km}^2} \quad (2.3)$$

No modelo π da linha de transmissão os parâmetros série r_{km} e x_{km} são positivos, significando que a linha de transmissão dissipa potência ativa e que a reatância é do tipo indutiva, o que implica em g_{km} positivo e b_{km} negativo. Já o parâmetro b_{km}^{sh} é positivo, pois representa o efeito capacitivo da linha de transmissão.

O objetivo principal do estudo de fluxo de potência é a determinação das tensões complexas em todas as barras do sistema. Assim, aos barramentos terminais de cada linha de transmissão, k e m , são associados tensões complexas, representadas por

$$\dot{E}_k = V_k e^{j\theta_k} \quad (2.4)$$

$$\dot{E}_m = V_m e^{j\theta_m} \quad (2.5)$$

onde V é o módulo da tensão e θ o ângulo das barras referidos a uma referência comum (no caso a terra). A corrente que flui através de uma linha de transmissão, representada por \dot{I}_{km} na Figura 2.3, é calculada a partir das tensões terminais \dot{E}_k e \dot{E}_m sendo formada por uma componente série e uma componente shunt a saber:

$$\dot{I}_{km} = \dot{y}_{km} (\dot{E}_k - \dot{E}_m) + j b_{km}^{sh} \dot{E}_k \quad (2.6)$$

Da mesma maneira pode-se calcular a corrente \dot{I}_{mk} :

$$\dot{I}_{mk} = \dot{y}_{km} (\dot{E}_m - \dot{E}_k) + j b_{km}^{sh} \dot{E}_m \quad (2.7)$$

2.1.3 Modelagem de Transformadores

Os transformadores são elementos das redes elétricas utilizados para elevar, reduzir e regular os níveis de tensão das barras.

A modelagem de um transformador de dois enrolamentos estrela-estrela (YY), é representada por um transformador ideal com uma relação de 1:a em série com uma admitância \dot{y} [3], conforme ilustrado na Figura 2.4 .

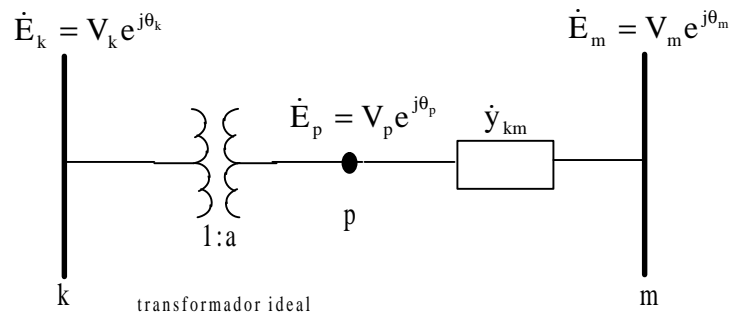


Figura 2.4 – Modelo de transformador YY de dois enrolamentos.

A relação de transformação, a , é definida pela razão entre as tensões complexas das barras p e m . No caso dos transformadores em fase, como $\theta_p = \theta_k$, a relação de transformação resulta na razão entre os módulos dessas duas tensões, ou seja

$$a = \frac{\dot{E}_p}{\dot{E}_k} = \frac{V_p e^{j\theta_p}}{V_k e^{j\theta_k}} = \frac{V_p}{V_k} \quad (2.8)$$

O fato do transformador entre as barras p e k ser ideal, a potência de entrada é igual à potência de saída, ou seja, não há perdas entre as duas barras.

Conseqüentemente as correntes \dot{I}_{km} e \dot{I}_{mk} estarão defasadas de 180° , pois

$$\dot{E}_p \dot{I}_{pk}^* + \dot{E}_k \dot{I}_{kp}^* = 0 \quad (2.9)$$

$$\frac{\dot{I}_{pk}}{\dot{I}_{kp}} = -\frac{\dot{E}_p}{\dot{E}_k} = -a \quad (2.10)$$

O transformador pode também ser representado por um circuito π equivalente similar ao utilizado para a linha de transmissão [3], conforme ilustrado na figura 2.5.

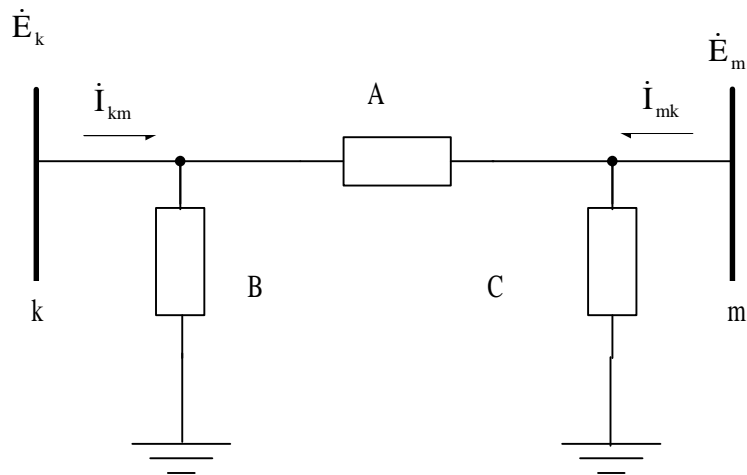


Figura 2.5 – Representação do transformador pelo modelo π equivalente.

A determinação das admitâncias A, B e C são feitas identificando as correntes \dot{I}_{km} e \dot{I}_{mk} dos circuitos representados pelas figuras 2.4 e 2.5 [9]. Da figura 2.4 verifica -se que

$$\dot{I}_{km} = -a\dot{y}_{km} (\dot{E}_m - \dot{E}_p) = (a^2\dot{y}_{km})\dot{E}_k - (a\dot{y}_{km})\dot{E}_m \quad (2.11)$$

$$\dot{I}_{mk} = \dot{y}_{km} (\dot{E}_m - \dot{E}_p) = (-a\dot{y}_{km})\dot{E}_k + (\dot{y}_{km})\dot{E}_m \quad (2.12)$$

Da figura 2.5 (modelo π) determina-se

$$\dot{I}_{km} = (A + B)\dot{E}_k - A\dot{E}_m \quad (2.13)$$

$$\dot{I}_{mk} = -A\dot{E}_k + (A + C)\dot{E}_m \quad (2.14)$$

Identificando os coeficientes de \dot{E}_k e \dot{E}_m nas equações (2.11), (2.12), (2.13) e (2.14) determinam-se as seguintes equações para as admitâncias do modelo π equivalente

$$A = a\dot{y}_{km} \quad (2.15)$$

$$B = a(a - 1)\dot{y}_{km} \quad (2.16)$$

$$C = (1 - a)\dot{y}_{km} \quad (2.17)$$

Com relação a relação de transformação a , pode-se fazer as seguintes considerações:

- a) se $a=1$, B e C serão nulos e A será igual a \dot{y}_{km} (relação de espiras iguais)
- b) para $a<1$, B terá sinal contrário de \dot{y}_{km} tendo efeito capacitivo enquanto C terá efeito indutivo, ou seja, haverá uma tendência de elevação da tensão V_k e redução da tensão V_m (transformador abaixador);
- c) para $a>1$, B terá mesmo sinal de \dot{y}_{km} tendo efeito indutivo enquanto C terá efeito capacitivo, ou seja, haverá uma tendência de redução da tensão V_k e aumento da tensão V_m (transformador elevador).

A utilização de transformador com relações de espiras variáveis é uma das maneiras utilizadas pelas Concessionárias de energia para regulação das tensões nas barras das subestações.

A modelagem de um transformador estrela-triângulo (Y- Δ), onde há um defasamento angular de $\pm 30^\circ$, consegue-se fazendo o parâmetro "a" no transformador ideal assumir um valor complexo dado por [1]

$$\dot{a} = ae^{\pm j\varphi} \quad (2.18)$$

onde φ pode valer $\pm 30^\circ$.

2.2- Fluxo de Potência Complexa numa Linha de Transmissão

Considerando o modelo π da linha de transmissão representado na Figura 2.3, pode-se definir o fluxo de potência complexa que flui da barra k para a barra m por

$$\dot{S}_{km} = \dot{E}_k \dot{I}_{km}^* \quad (2.19)$$

Substituindo a equação (2.6) em (2.19), tem-se

$$\dot{S}_{km} = \dot{E}_k [\dot{y}_{km} (\dot{E}_k - \dot{E}_m) + j\mathbf{b}_{km}^{\text{sh}} \dot{E}_k]^* \quad (2.20)$$

$$\dot{S}_{km} = \dot{E}_k [(\dot{y}_{km}^* (\dot{E}_k^* - \dot{E}_m^*) - j\mathbf{b}_{km}^{\text{sh}} \dot{E}_k^*)] \quad (2.21)$$

$$\dot{S}_{km} = \dot{E}_k (\dot{y}_{km}^* \dot{E}_k^* - \dot{y}_{km} \dot{E}_m^* - j\mathbf{b}_{km}^{\text{sh}} \dot{E}_k^*) \quad (2.22)$$

$$\dot{S}_{km} = E_k^2 \dot{y}_{km}^* - \dot{y}_{km} \dot{E}_k \dot{E}_m^* - j\mathbf{b}_{km}^{\text{sh}} E_k^2 \quad (2.23)$$

Substituindo as equações (2.1), (2.4) e (2.5) na equação (2.23), tem-se

$$\dot{S}_{km} = V_k^2 (\mathbf{g}_{km} - j\mathbf{b}_{km}) - V_k V_m e^{j\theta_k} e^{-j\theta_m} (\mathbf{g}_{km} - j\mathbf{b}_{km}) - jV_k^2 \mathbf{b}_{km}^{\text{sh}} \quad (2.24)$$

$$\dot{S}_{km} = V_k^2 \mathbf{g}_{km} - jV_k^2 \mathbf{b}_{km} - V_k V_m e^{j\theta_{km}} (\mathbf{g}_{km} - j\mathbf{b}_{km}) - jV_k^2 \mathbf{b}_{km}^{\text{sh}} \quad (2.25)$$

$$\dot{S}_{km} = V_k^2 \mathbf{g}_{km} - jV_k^2 \mathbf{b}_{km} - V_k V_m (\cos \theta_{km} + j\text{sen } \theta_{km}) (\mathbf{g}_{km} - j\mathbf{b}_{km}) - jV_k^2 \mathbf{b}_{km}^{\text{sh}} \quad (2.26)$$

$$\begin{aligned} \dot{S}_{km} = & V_k^2 \mathbf{g}_{km} - jV_k^2 \mathbf{b}_{km} - V_k V_m \cos \theta_{km} \mathbf{g}_{km} + jV_k V_m \cos \theta_{km} \mathbf{b}_{km} - jV_k V_m \text{sen } \theta_{km} \mathbf{g}_{km} + \\ & - V_k V_m \text{sen } \theta_{km} \mathbf{b}_{km} - jV_k^2 \mathbf{b}_{km}^{\text{sh}} \end{aligned} \quad (2.27)$$

Finalmente,

$$\begin{aligned} \dot{S}_{km} = & V_k^2 \mathbf{g}_{km} - V_k V_m \cos \theta_{km} \mathbf{g}_{km} - V_k V_m \text{sen } \theta_{km} \mathbf{b}_{km} + \\ & - jV_k^2 (\mathbf{b}_{km} + \mathbf{b}_{km}^{\text{sh}}) + jV_k V_m \cos \theta_{km} \mathbf{b}_{km} - jV_k V_m \text{sen } \theta_{km} \mathbf{g}_{km} \end{aligned} \quad (2.28)$$

Sabendo que a potência complexa pode ser representada na forma retangular por

$\dot{S}_{km} = P_{km} + jQ_{km}$, pode-se obter, a partir da equação (2.28), as expressões para os fluxos de potência ativa, P_{km} , e reativa, Q_{km} , que fluem da barra k para a barra m

$$P_{km} = V_k^2 \mathbf{g}_{km} - V_k V_m \cos \theta_{km} \mathbf{g}_{km} - V_k V_m \text{sen } \theta_{km} \mathbf{b}_{km} \quad (2.29)$$

$$Q_{km} = -V_k^2 (\mathbf{b}_{km} + \mathbf{b}_{km}^{\text{sh}}) + V_k V_m \cos \theta_{km} \mathbf{b}_{km} - V_k V_m \text{sen } \theta_{km} \mathbf{g}_{km} \quad (2.30)$$

Da mesma maneira pode-se determinar as expressões dos fluxos de potência ativa e reativa que fluem da barra m para a barra k , P_{mk} e Q_{mk} , respectivamente

$$P_{mk} = V_m^2 \mathbf{g}_{km} - V_m V_k \cos \theta_{mk} \mathbf{g}_{km} - V_m V_k \text{sen } \theta_{mk} \mathbf{b}_{km} \quad (2.33)$$

$$Q_{mk} = -V_m^2 (b_{km} + b_{km}^{sh}) + V_m V_k \cos \theta_{mk} b_{km} - V_m V_k \sin \theta_{mk} g_{km} \quad (2.34)$$

As equações (2.33) e (2.34) são normalmente representadas em termos de θ_{km} , neste caso tem-se

$$P_{mk} = V_m^2 g_{km} - V_m V_k \cos \theta_{km} g_{km} + V_m V_k \sin \theta_{km} b_{km} \quad (2.35)$$

$$Q_{mk} = -V_m^2 (b_{km} + b_{km}^{sh}) + V_m V_k \cos \theta_{km} b_{km} + V_m V_k \sin \theta_{km} g_{km} \quad (2.36)$$

2.3- Capacidade de uma Linha de Transmissão

O fluxo de potência ativa através de uma linha de transmissão entre duas barras k e m do sistema é dado pela equação (2.29), conforme descrito na seção anterior. Considerando que não haja perda ativa nesta linha, tem-se que $g_{km} = 0$ e com isto $P_{km} = -P_{mk}$, ficando a potência ativa transmitida definida por [3]

$$P_{km} = -V_k V_m \sin \theta_{km} b_{km} \quad (2.37)$$

Conservando os valores dos módulos das tensões das barras constantes (pela manipulação da potência reativa), pode-se dizer que o fluxo de potência ativa transmitida em uma linha de transmissão só pode ser alterado pela mudança do ângulo θ_{km} , ou seja, pela abertura angular das tensões entre as barras da linha e se desloca da barra com maior ângulo para a barra com menor ângulo. Teoricamente, o máximo fluxo de potência ativa que pode fluir na linha é quando $\theta_{km} = 90^\circ$. No entanto, é comum utilizar-se um limite prático bem inferior, pois operando próximo do limite teórico um incremento de carga força o ângulo θ_{km} para um valor maior que 90° , fazendo com que a potência transmitida comece a diminuir. Nesse ponto, chamado de limite de estabilidade estática, perde-se o sincronismo entre as barras k e m [3].

Outro ponto a ser considerado é o limite térmico da linha de transmissão que definirá o fluxo de potência máximo a ser considerado para a mesma, podendo variar conforme as estações do ano.

2.4- Perdas nas Linhas de Transmissão

A geração total de um SEP é igual à somatória das cargas mais as perdas no sistema de transmissão. Calcula-se a perda em uma linha de transmissão pela soma do fluxo de potência que sai da barra k e dirige-se para a barra m com o fluxo que sai da barra m e dirige-se para a barra k . A partir das equações (2.29) e (2.35) obtém-se a perda de potência ativa em uma linha de transmissão

$$P_{km} + P_{mk} = V_k^2 g_{km} - V_k V_m \cos \theta_{km} g_{km} - V_k V_m \sin \theta_{km} b_{km} + V_m^2 g_{km} - V_m V_k \cos \theta_{km} g_{km} + V_m V_k \sin \theta_{km} b_{km} \quad (2.38)$$

$$P_{km} + P_{mk} = g_{km} (V_k^2 + V_m^2 - 2V_k V_m \cos \theta_{km}) \quad (2.39)$$

As perdas de potência reativa em uma linha de transmissão podem ser obtidas a partir das equações (2.30) e (2.36)

$$Q_{km} + Q_{mk} = -V_k^2 (b_{km} + b_{km}^{sh}) + V_k V_m \cos \theta_{km} b_{km} - V_k V_m \sin \theta_{km} g_{km} + -V_m^2 (b_{km} + b_{km}^{sh}) + V_m V_k \cos \theta_{km} b_{km} + V_m V_k \sin \theta_{km} g_{km} \quad (2.40)$$

$$Q_{km} + Q_{mk} = -b_{km}^{sh} (V_k^2 + V_m^2) - b_{km} (V_k^2 + V_m^2 - 2V_k V_m \cos \theta_{km}) \quad (2.41)$$

Na segundo membro da equação (2.41), o primeiro termo corresponde a potência reativa gerada no elemento shunt da barra e o segundo termo corresponde a perda reativa no elemento série da linha.

2.5 – Expressões Gerais para os Fluxos de Potência

Na seção 2.3, determinou-se as expressões dos fluxos de potência ativa e reativa através de uma linha de transmissão, definidos pelas equações (2.29) e (2.30). Estas expressões podem ser estendidas para representar um ramo qualquer do sistema, linha de transmissão ou transformador, substituindo-se o módulo da tensão na barra k , V_k , por

$$V_k = \dot{a}_{km} V_k \quad (2.42)$$

sendo

$$\dot{a}_{km} = ae^{j\pm\phi} \quad (2.43)$$

Na equação (2.43) a é a relação de transformação definida pela equação (2.8), que é igual 1 para linhas de transmissão, e ϕ é o ângulo de defasagem imposto por transformadores defasadores. Assim, as expressões para os fluxos de potência ativa e reativa podem ser definidas por

$$P_{km} = (\dot{a}_{km} V_k)^2 g_{km} - (\dot{a}_{km} V_k) V_m \cos \theta_{km} g_{km} - (\dot{a}_{km} V_k) V_m \sin \theta_{km} b_{km} \quad (2.44)$$

$$Q_{km} = -(\dot{a}_{km} V_k)^2 (b_{km} + b_{km}^{sh}) + (\dot{a}_{km} V_k) V_m \cos \theta_{km} b_{km} - (\dot{a}_{km} V_k) V_m \sin \theta_{km} g_{km} \quad (2.45)$$

2.6 – Representação Matricial

As equações de fluxo de corrente e potência através dos elementos de um sistema de potência são normalmente representadas na forma matricial, conforme descrito nesta seção. Seja a barra k mostrada na Figura 2.6

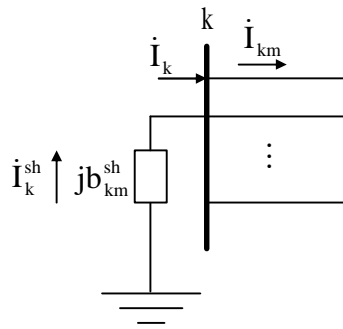


Figura 2.6 – Injeção de correntes na barra k .

A injeção líquida de corrente na barra k pode ser obtida pela aplicação da primeira Lei de Kirchhoff:

$$\dot{I}_k + \dot{I}_k^{sh} = \sum_{m \in \Omega_k} \dot{I}_{km} \quad (2.46)$$

onde, Ω_k representa o conjunto de todas as barras que se conectam a barra k .

A corrente que flui em uma linha de transmissão foi definida pela equação (2.6), e pode ser re-escrita na forma

$$\dot{I}_{km} = (\dot{y}_{km} + j\mathbf{b}_{km}^{sh})\dot{E}_k + (-\dot{y}_{km})\dot{E}_m \quad (2.47)$$

A partir das equações (2.13), (2.15), (2.16) e (2.17), pode -se descrever a corrente que flui através de um transformador por

$$\dot{I}_{km} = (\dot{a}_{km}\dot{y}_{km})(\dot{E}_k - \dot{E}_m) + [\dot{a}_{km}(\dot{a}_{km} - 1)\dot{y}_{km}]\dot{E}_k \quad (2.48)$$

$$\dot{I}_{km} = (\dot{a}_{km}^2\dot{y}_{km})\dot{E}_k + (-\dot{a}_{km}\dot{y}_{km})\dot{E}_m \quad (2.49)$$

As equações (2.47) e (2.49) podem ser agrupadas em uma única equação, a saber

$$\dot{I}_{km} = (\dot{a}_{km}^2\dot{y}_{km} + j\mathbf{b}_{km}^{sh})\dot{E}_k + (-\dot{a}_{km}\dot{y}_{km})\dot{E}_m \quad (2.50)$$

onde, $a_{km} = 1$ na representação de uma linha de transmissão; e $j\mathbf{b}_{km}^{sh} = 0$ quando se trata de um transformador.

A injeção de corrente na barra k é obtida a partir da equação (2.46)

$$\dot{\mathbf{I}}_k = -\dot{\mathbf{I}}_k^{\text{sh}} + \sum_{m \in \Omega_k} \dot{\mathbf{I}}_{km} \quad (2.51)$$

sendo

$$\dot{\mathbf{I}}_k^{\text{sh}} = \frac{\dot{\mathbf{E}}_k}{\mathbf{j}\mathbf{X}_k^{\text{sh}}} = -\mathbf{j}\mathbf{b}_k^{\text{sh}} \dot{\mathbf{E}}_k \quad (2.52)$$

Substituindo as equações (2.50) e (2.52) na equação (2.51), obtém-se

$$\dot{\mathbf{I}}_k = \mathbf{j}\mathbf{b}_k^{\text{sh}} \dot{\mathbf{E}}_k + \sum_{m \in \Omega_k} [(\hat{a}_{km}^2 \dot{y}_{km} + \mathbf{j}\mathbf{b}_{km}^{\text{sh}}) \dot{\mathbf{E}}_k + (-\hat{a}_{km} \dot{y}_{km}) \dot{\mathbf{E}}_m] \quad (2.53)$$

$$\dot{\mathbf{I}}_k = [\mathbf{j}\mathbf{b}_k^{\text{sh}} + \sum_{m \in \Omega_k} [(\hat{a}_{km}^2 \dot{y}_{km} + \mathbf{j}\mathbf{b}_{km}^{\text{sh}})] \dot{\mathbf{E}}_k + \sum_{m \in \Omega_k} [(-\hat{a}_{km} \dot{y}_{km})] \dot{\mathbf{E}}_m \quad (2.54)$$

Para um sistema composto por NB barras, a equação (2.54) pode ser representada na forma matricial

$$\underline{\dot{\mathbf{I}}} = \underline{\dot{\mathbf{Y}}} \underline{\dot{\mathbf{E}}} \quad (2.55)$$

onde:

$\underline{\dot{\mathbf{I}}}$ é o vetor das injeções de correntes com de dimensão (NBx1);

$\underline{\dot{\mathbf{Y}}}$ =matriz de admitâncias nodal, de dimensão (NBxNB) cujos elementos são

$$\dot{Y}_{km} = -\hat{a}_{km} \dot{y}_{km} \quad (2.56)$$

$$\dot{Y}_{kk} = \sum_{m \in \Omega_k} (\hat{a}_{km}^2 \dot{y}_{km} + \mathbf{j}\mathbf{b}_{km}^{\text{sh}}) \quad (2.57)$$

$\underline{\dot{\mathbf{E}}}$ é o vetor das tensões complexas nodais de dimensão (NBx1).

A matriz de admitância $\underline{\mathbf{Y}}$ é simétrica e esparsa, pois \dot{Y}_{km} é nula sempre que não houver ramo entre as barras k e m . A presença de transformadores defasadores no sistema elimina a simetria numérica da matriz $\underline{\mathbf{Y}}$, porém continua sendo esparsa e simétrica em estrutura.

A injeção de corrente numa barra k qualquer do sistema, que é a k -ésima componente do vetor $\underline{\dot{I}}$, pode ser escrita na forma

$$\dot{I}_k = \dot{Y}_{kk} \dot{E}_k + \sum_{m \in \Omega_k} \dot{Y}_{km} \dot{E}_m = \sum_{m \in \mathbf{K}} \dot{Y}_{km} \dot{E}_m \quad (2.58)$$

sendo \mathbf{K} o conjunto formado por Ω_k acrescido da própria barra k .

Considerando que os elementos da matriz de admitância podem ser representados na forma retangular por $\dot{Y}_{km} = G_{km} + jB_{km}$, a equação (2.58) pode ser reescrita por

$$\dot{I}_k = \sum_{m \in \mathbf{K}} [(G_{km} + jB_{km})(V_m e^{j\theta_m})] \quad (2.59)$$

A injeção de potência complexa na barra k é calculada como

$$\dot{S}_k = P_k + jQ_k = \dot{E}_k \dot{I}_k^* \quad (2.60)$$

sendo

$$\dot{I}_k^* = \sum_{m \in \mathbf{K}} [(G_{km} - jB_{km})(V_m e^{-j\theta_m})] \quad (2.61)$$

Substituindo a equação (2.61) na equação (2.60), obtém-se

$$\dot{S}_k = (V_k e^{j\theta_k}) \left\{ \sum_{m \in \mathbf{K}} [(G_{km} - jB_{km})(V_m e^{-j\theta_m})] \right\} \quad (2.62)$$

$$\dot{S}_k = (V_k e^{j\theta_k}) \left[\sum_{m \in \mathbf{K}} (G_{km} V_m e^{-j\theta_m}) - \sum_{m \in \mathbf{K}} (jB_{km} V_m e^{-j\theta_m}) \right] \quad (2.63)$$

$$\dot{S}_k = V_k \left[\sum_{m \in \mathbf{K}} (G_{km} V_m e^{j(\theta_k - \theta_m)}) - \sum_{m \in \mathbf{K}} (jB_{km} V_m e^{j(\theta_k - \theta_m)}) \right] \quad (2.64)$$

Fazendo $\theta_k - \theta_m = \theta_{km}$ e sabendo que $e^{j\theta_{km}} = \cos\theta_{km} + j\text{sen}\theta_{km}$ a equação (2.64) fica

$$\dot{S}_k = V_k \left\{ \sum_{m \in \mathbf{K}} [G_{km} V_m (\cos\theta_{km} + j\text{sen}\theta_{km})] - \sum_{m \in \mathbf{K}} [jB_{km} V_m (\cos\theta_{km} + j\text{sen}\theta_{km})] \right\} \quad (2.65)$$

$$\dot{S}_k = V_k \left\{ \sum_{m \in \mathbf{K}} [V_m (G_{km} \cos\theta_{km} + B_{km} \text{sen}\theta_{km})] + j \sum_{m \in \mathbf{K}} [V_m (G_{km} \text{sen}\theta_{km} - B_{km} \cos\theta_{km})] \right\} \quad (2.66)$$

As injeções de potência ativa e reativa podem ser obtidas identificando -se as partes real e imaginária da equação (2.66)

$$P_k = V_k \left\{ \sum_{m \in K} [V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km})] \right\} \quad (2.67)$$

$$Q_k = V_k \left\{ \sum_{m \in K} [V_m (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km})] \right\} \quad (2.68)$$

CAPÍTULO 3

SOLUÇÃO DO FLUXO DE CARGA: ABORDAGEM LINEARIZADA E MÉTODO DE NEWTON-RAPHSON

A principal função de um sistema de energia é a de fornecer as potências ativas e reativas, necessárias às diversas cargas a ele ligadas. Simultaneamente, as várias tensões de barra devem ser mantidas dentro de limites especificados, apesar das variações e até certo ponto imprevisíveis, que podem apresentar as demandas das cargas [3].

No Capítulo 2, apresentou-se o modelo matemático para a rede elétrica a partir do qual foram descritas as relações das injeções de potência ativa e reativa numa barra do sistema em função das tensões complexas nas barras, equações (2.67) e (2.68), que determinam o chamado estado da rede elétrica. Essas equações constituem a formulação básica do problema de fluxo de carga, cuja solução determina as tensões complexas em todas as barras do sistema. A partir dessa solução, obtém-se a distribuição de fluxos de potência ativa e reativa através de linhas de transmissão e transformadores e as perdas do sistema. A não-linearidade desse conjunto de equações implica na solução via métodos iterativos, porém resultados aproximados podem ser obtidos a partir de uma abordagem linearizada, que leva em conta características típicas dos sistemas de potência.

Neste capítulo são apresentadas a formulação linearizada do problema de fluxo de carga e a formulação e solução da abordagem não-linear pelo método de Newton-Raphson.

3.1 – Abordagem Linearizada

Baseado nos modelos dos elementos básicos do sistema de potência e do equacionamento de fluxo de potência através dos ramos, discutidos no Capítulo 2, pode-se desenvolver um modelo linearizado para estudo de fluxo de carga. Esta abordagem linearizada permite determinar de forma aproximada a distribuição de fluxo de potência ativa em uma rede de transmissão, sem a necessidade de recorrer a métodos iterativos.

Em função de características típicas dos sistemas elétricos de potência, são definidas as aproximações que determinam a formulação linearizada do fluxo de potência, como segue:

1. As tensões das barras operam próximas de seus valores nominais, portanto aplica-se o seguinte valor para os módulos das tensões nas barras

$$V_k = 1,0 \text{ p.u.} \quad \text{para } k = 1, \dots, \text{NB} \quad (3.1)$$

2. A abertura angular entre barras que se conectam é tipicamente pequena, portanto aplica-se

$$\sin\theta_{km} = \theta_{km} \quad (3.2)$$

3. As perdas ativas das linhas de transmissão são desprezadas, assim faz-se

$$b_{km} = -\frac{1}{X_{km}} \quad (3.3)$$

Com estas considerações, o fluxo de potência ativa entre as barras k e m , definido no Capítulo 2 pela Equação (2.37), passa a ser descrito pela relação linear

$$P_{km} = \frac{\theta_{km}}{X_{km}} \quad (3.4)$$

Como $\theta_{km} = \theta_k - \theta_m$, então

$$P_{km} = \frac{\theta_k - \theta_m}{X_{km}} \quad (3.5)$$

A injeção de potência ativa em uma barra k , definida no capítulo anterior como a soma dos fluxos de potência ativa que saem da referida barra, na abordagem linearizada, passa a ser descrita por

$$P_k = \sum_{m \in \Omega_k} P_{km} = \sum_{m \in \Omega_k} \frac{\theta_k - \theta_m}{X_{km}} = \sum_{m \in \Omega_k} \frac{\theta_k}{X_{km}} + \sum_{m \in \Omega_k} -\frac{\theta_m}{X_{km}} \quad (3.6)$$

A equação (3.6) pode se representada na forma matricial

$$\underline{P} = \underline{B}' \underline{\theta} \quad (3.7)$$

onde

\underline{P} : vetor de injeção de potência ativa líquida, com dimensão (NBx1);

\underline{B}' : matriz tipo admitância nodal, com dimensão (NBxNB), cujos elementos são

$$B'_{km} = -X_{km}^{-1} \quad (3.8)$$

$$B'_{km} = \sum_{m \in \Omega_k} X_{km}^{-1} \quad (3.9)$$

$\underline{\theta}$: vetor dos ângulos das tensões das barras, com dimensão (NBx1).

A condição em que se formulou o problema, desprezando as perdas ativas das linhas de transmissão, torna a matriz \underline{B}' singular, pois a soma dos componentes de \underline{P} é nula, isto é, a injeção de potência em uma barra qualquer pode ser obtida a partir da soma algébrica das demais [10], [14]. Este problema pode ser resolvido adotando -se uma barra como referência angular, de ângulo igual a zero, denominada barra de referência. Além disto, a rede deve ser conexa, ou seja, deve existir sempre um caminho entre duas barras quaisquer do sistema.

Convém observar que a abordagem linearizada do problema de fluxo de carga, em função das aproximações adotadas, não representa a parte reativa do sistema.

3.2 Fluxo de Carga Não-Linear

Nesta seção, será apresentada a formulação não linear do problema de fluxo de carga, que inclui a parte reativa do sistema, levando em consideração as perdas de potência ativa nas linhas de transmissão, as restrições operacionais de tensão nas barras e as limitações de geração de potência reativa.

A Figura 3.1 representa novamente um SEP de duas barras onde estão indicadas as variáveis envolvidas no problema de fluxo de potência.

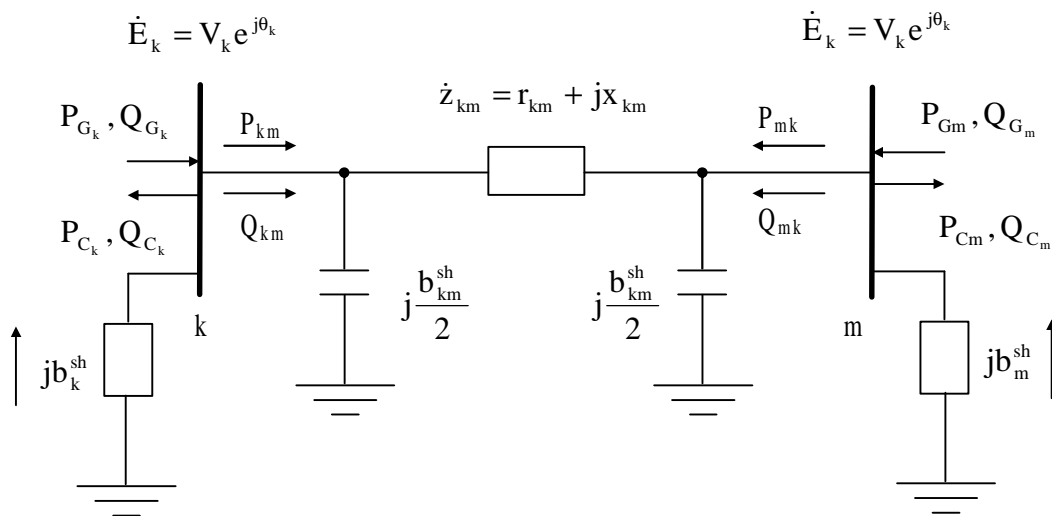


Figura 3.1 – Representação de duas barras com variáveis envolvidas.

onde:

P_G e Q_G - representam as potências ativa e reativa geradas nas barras

P_C e Q_C - representam as potências ativa e reativa consumidas nas barras

P_{km} e Q_{km} - representam os fluxos de potência ativa e reativa da barra k para a barra m .

P_{mk} e Q_{mk} - representam os fluxos de potência ativa e reativa da barra m para a barra k .

As equações básicas de fluxo de potência complexa através dos elementos de um sistema de potência foram deduzidas no Capítulo 2, resultando na representação das injeções de potência ativa e reativa numa barra qualquer

$$P_k^{\text{calc}} = V_k \left\{ \sum_{m \in K} [V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km})] \right\} \quad (3.10)$$

$$Q_k^{\text{calc}} = V_k \left\{ \sum_{m \in K} [V_m (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km})] \right\} \quad (3.11)$$

para $k=1, \dots, NB$.

Verifica-se a partir da Figura 3.1 que a cada barra estão associadas 6 variáveis, quais sejam V , θ , P_G , Q_G , P_C e Q_C . As potências ativas e reativas consumidas em cada barra, P_C e Q_C são conhecidas. Das quatro variáveis restantes duas devem ser especificadas para que o problema possa ser resolvido a partir das equações (3.10) e (3.11). Em função disso, define-se os tipos de barra do sistema, como segue:

Barra tipo PQ – são aquelas onde as cargas (P_C e Q_C) são especificadas e o módulo e ângulo da tensão na barra (V e θ) são calculados;

Barra tipo PV – são aquelas onde a potência ativa gerada (P_G) e o módulo da tensão na barra (V) são especificados, e a potência reativa gerada (Q_G) e o ângulo da tensão na barra (θ) são calculados;

Barra tipo $V\theta$ ou referência – são aquelas onde V e θ são especificados e P_G e Q_G são calculados.

Com as definições de barras apresentadas, verifica-se que para cada barra duas variáveis são especificadas e duas calculadas.

Pode-se agrupar estas variáveis em dois grupos distintos:

variáveis de estado – agrupadas no vetor $\underline{x} = [\underline{\theta} \underline{V}]^t$

variáveis de controle – agrupadas no vetor $\underline{u} = [\underline{P}_G \underline{Q}_G]^t$

Conforme discutido na Capítulo 2, os fluxos através dos elementos do sistema são expressos em função dos parâmetros desses elementos e das variáveis de estado do problema através das equações (2.29) e (2.30). Calculando -se então as variáveis de estado \underline{x} resolve-se o estudo de fluxo de carga, mas pode -se ainda defrontar com outro problema, as variáveis de estado $[\underline{V} \underline{\theta}]$ e de controle $[\underline{P}_G \underline{Q}_G]$, possuem algumas restrições ou limites.

Com relação às variáveis de estado observa -se as seguintes restrições:

$$V_k^{\min} < V_k < V_k^{\max} \text{ para } k = 1, \dots, NB \quad (3.12)$$

$$|\theta_k - \theta_m| < |\theta_k - \theta_m|^{\max} \quad (3.13)$$

A primeira restrição (3.3), mostra que o módulo de tensão das barras deve estar dentro de uma faixa especificada, normalmente entre 1,05 [pu] e 0,95 [pu].

A segunda restrição (3.4) especifica o ângulo de potência máximo para uma linha de transmissão entre as barras k e m , que corresponde ao limite de estabilidade estática da linha estabelecido na Seção 2.3.

Estas restrições devem ser avaliadas pelos analistas de sistemas após a resolução do fluxo de carga e caso as mesmas tenham sido violadas, medidas corretivas devem ser feitas no sistema, tais como, mudança de tap de transformadores, abertura de linhas, entre outras.

Para as variáveis de controle, as seguintes restrições devem ser observadas:

$$P_{G_k}^{\min} \leq P_{G_k} \leq P_{G_k}^{\max} \text{ para } k=1, \dots, NB \quad (3.14)$$

$$Q_{G_k}^{\min} \leq Q_{G_k} \leq Q_{G_k}^{\max} \text{ para } k=1, \dots, NB \quad (3.15)$$

A produção total de potência ativa e reativa do sistema deve ser igual a demanda mais as perdas. O sistema pode ser especificado para um funcionamento próximo do ótimo no sentido energético, definindo o limite máximo e mínimo de geração das variáveis de controle.

3.2.1 Formulação Básica e Resolução pelo Método de Newton - Raphson

Num sistema composto por NB barras, o problema de fluxo de carga pode ser decomposto em duas partes:

Na 1ª parte tem-se 2xNB equações para as barras do tipo PQ e NB equações para as barras tipo PV. Destas equações calculam-se as incógnitas V e θ para todas as barras.

Na 2ª parte tem-se NB equações para as barras tipo PV com as quais se determina as potências Q geradas e mais 2 equações para cada barra de referência onde calculam-se as potências P e Q geradas para contrabalançar as perdas no sistema.

Chamando resíduo de potência em uma barra por

$$\Delta P_k = P_k^{\text{esp}} - P_k^{\text{calc}} \quad (3.16)$$

$$\Delta Q_k = Q_k^{\text{esp}} - Q_k^{\text{calc}} \quad (3.17)$$

onde k representa todas as barras do sistema (NB), P_k^{esp} a potência líquida ativa injetada na barra k, P_k^{calc} a potência ativa calculada para a barra k através da equação (3.10), Q_k^{esp} a potência líquida reativa injetada na barra k e Q_k^{calc} a potência reativa calculada na barra k através da equação (3.11).

As incógnitas da primeira parte podem ser agrupadas no vetor \underline{x} dado por

$$\underline{x} = \begin{bmatrix} \underline{\theta} \\ \underline{V} \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

As equações (3.16) e (3.17) podem ser colocadas na forma vetorial

$$\underline{f}(\underline{x}) = \begin{bmatrix} \underline{\Delta P} \\ \underline{\Delta Q} \end{bmatrix} = 0 \quad (3.19)$$

A resolução da equação (3.19) sendo $\underline{f}(\underline{x})$ uma função vetorial (NBx1) e \underline{x} o vetor de incógnitas (NBx1) pode ser feita através da linearização da função vetorial $\underline{f}(\underline{x})$ para $\underline{x}=\underline{x}^{(v)}$.

Admitindo-se que o vetor $\underline{x}^{(v)}$ tenha uma solução inicial $\underline{x}^{(0)}$ e sofra uma perturbação $\underline{\Delta x}^{(0)}$. Tem-se

$$\underline{f}(\underline{x}^{(0)} + \underline{\Delta x}^{(0)}) = 0 \quad \text{para } x = 1, \dots, \text{NB} \quad (3.20)$$

Expandindo-se \underline{f} numa série de Taylor [5], em torno do valor $x^{(0)}$ e desprezando-se os termos de ordem superior tem-se

$$\underline{f}(\underline{x}^{(0)} + \underline{\Delta x}^{(0)}) \cong \underline{f}(\underline{x}^{(0)}) + \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_1}\right)\Delta x_1^{(0)} + \dots + \left(\frac{\partial f_{\text{NB}}}{\partial x_{\text{NB}}}\right)\Delta x_{\text{NB}}^{(0)} \quad \text{para } x=1, \dots, \text{NB} \quad (3.21)$$

sendo que todas as derivadas parciais devem ser calculadas para o valor atual da variável ($x^{(0)}$).

Pode-se representar a equação acima na forma matricial

$$\underline{f}(\underline{x}^{(0)} + \underline{\Delta x}^{(0)}) \cong \underline{f}(\underline{x}^{(0)}) + \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_{\text{NB}}} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial f_{\text{NB}}}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_{\text{NB}}}{\partial x_{\text{NB}}} \end{bmatrix}^{(0)} \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \vdots \\ \Delta x_{\text{NB}} \end{bmatrix}^{(0)} \quad (3.22)$$

A matriz cujos elementos são derivadas parciais é chamada de Jacobiana (\underline{J}).

$$\underline{f}(\underline{x}^{(0)} + \underline{\Delta x}^{(0)}) = \underline{f}(\underline{x}^{(0)}) + \underline{J}^{(0)} \underline{\Delta x}^{(0)} \quad \text{para } x=1 \dots \text{NB} \quad (3.23)$$

onde o vetor $\underline{\Delta x}^{(0)}$ é chamado de vetor de perturbação e $\underline{J}^{(0)}$ significa que os elementos da matriz \underline{J} devem ser calculados para o valor $x^{(0)}$.

O vetor de perturbação $\Delta \underline{x}^{(0)}$ é calculado impondo-se a condição

$$\underline{f}(\underline{x}^{(0)}) + \underline{J}^{(0)} \Delta \underline{x}^{(0)} = 0 \text{ para } x=1, \dots, NB \quad (3.24)$$

que é a maneira linearizada de resolver o problema $\underline{f}(\underline{x}^{(0)} + \Delta \underline{x}^{(0)}) = 0$ onde

$$\Delta \underline{x}^{(0)} = -(\underline{J}^{(0)})^{-1} \underline{f}(\underline{x}^{(0)}) \text{ para } x=1, \dots, NB \quad (3.25)$$

para $\underline{x}^{(0)}$ ser a solução encontrada, $\Delta \underline{x}^{(0)}$ deverá ser o mais próximo possível de 0. Caso a solução não seja alcançada com $x^{(0)}$, deve-se encontrar um novo valor através de

$$\underline{x}^{(1)} = \underline{x}^{(0)} + \Delta \underline{x}^{(0)} \quad (3.26)$$

Aplicando o método de Newton para o sistema acima tem-se as seguintes etapas:

1ª - Faz-se $v=0$ e escolhe-se uma solução inicial para $\underline{x}^{(v)} = \underline{x}^{(0)}$.

2ª - Calcula-se $\underline{f}(\underline{x}^{(0)}) = \begin{bmatrix} \Delta \underline{P}^{(0)} \\ \Delta \underline{Q}^{(0)} \end{bmatrix}$

3ª - Testa-se a convergência se o módulo de $\underline{f}(\underline{x}^{(0)}) \leq \varepsilon$ for verdadeiro, o processo convergiu para a solução $x^{(0)}$, caso contrário, passa-se para o passo seguinte.

4ª - Calcula-se a matriz $\underline{J}^{(0)}$ para $x^{(0)}$.

A matriz Jacobiana pode ser calculada conforme considerações abaixo

Como

$$\underline{f} \underline{x}^{(u)} = \begin{bmatrix} \Delta \underline{P}^{(u)} \\ \Delta \underline{Q}^{(u)} \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

$$\Delta \underline{x}^{(u)} = \begin{bmatrix} \Delta \underline{\theta}^{(u)} \\ \Delta \underline{V}^{(u)} \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

e sendo P^{esp} e Q^{esp} valores constantes

$$\mathbf{J}^{(0)} = - \begin{bmatrix} \frac{\partial \underline{P}}{\partial \underline{\theta}} & \frac{\partial \underline{P}}{\partial \underline{V}} \\ \frac{\partial \underline{Q}}{\partial \underline{\theta}} & \frac{\partial \underline{Q}}{\partial \underline{V}} \end{bmatrix}^{(0)} \quad (3.29)$$

As submatrizes que representam a matriz Jacobiana, $\underline{\mathbf{J}}$, acima são geralmente definidas por

$$\underline{\mathbf{H}} = \frac{\partial \underline{P}}{\partial \underline{\theta}} \quad (3.30)$$

$$\underline{\mathbf{N}} = \frac{\partial \underline{P}}{\partial \underline{V}} \quad (3.31)$$

$$\underline{\mathbf{M}} = \frac{\partial \underline{Q}}{\partial \underline{\theta}} \quad (3.32)$$

$$\underline{\mathbf{L}} = \frac{\partial \underline{Q}}{\partial \underline{V}} \quad (3.33)$$

Como cada elemento do vetor \underline{P} é representado pela equação (2.67) e cada elemento do vetor \underline{Q} é representado pela equação (2.68), as derivadas parciais acima nos levam aos seguintes valores para os elementos das submatrizes $\underline{\mathbf{H}}$, $\underline{\mathbf{N}}$, $\underline{\mathbf{M}}$ e $\underline{\mathbf{L}}$

$$\mathbf{H}_{km} = V_k V_m (G_{km} \text{sen } \theta_{km} - B_{km} \text{cos } \theta_{km}) \quad (3.34)$$

$$\mathbf{H}_{kk} = -V_k^2 B_{kk} - V_k \sum_{m \in \mathbf{K}} V_m (G_{km} \text{sen } \theta_{km} - B_{km} \text{cos } \theta_{km}) \quad (3.35)$$

$$\mathbf{N}_{km} = V_k (G_{km} \text{cos } \theta_{km} + B_{km} \text{sen } \theta_{km}) \quad (3.36)$$

$$\mathbf{N}_{kk} = V_{kk} G_{kk} + \sum_{m \in \mathbf{K}} V_m (G_{km} \text{cos } \theta_{km} + B_{km} \text{sen } \theta_{km}) \quad (3.37)$$

$$\mathbf{M}_{km} = -V_k V_m (G_{km} \text{cos } \theta_{km} + B_{km} \text{sen } \theta_{km}) \quad (3.38)$$

$$\mathbf{M}_{kk} = -V_k^2 G_{kk} + V_k \sum_{m \in \mathbf{K}} V_m (G_{km} \text{cos } \theta_{km} + B_{km} \text{sen } \theta_{km}) \quad (3.39)$$

$$\mathbf{L}_{km} = V_k (G_{km} \text{sen } \theta_{km} - B_{km} \text{cos } \theta_{km}) \quad (3.40)$$

$$L_{kk} = -V_k B_{kk} + \sum_{m \in K} V_m (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}) \quad (3.41)$$

5ª - Determina-se $\Delta \underline{x}^{(0)}$ pela equação (3.25)

6ª - Faz-se $v=v+1$, $x^{(1)} = x^{(0)} + \Delta \underline{x}^{(0)}$ e,

7ª - Volta-se a 2ª etapa.

Capítulo 4

Modelagem de Subestações em Fluxo de Carga

A formulação convencional de fluxo de carga, considerando a abordagem linear e não-linear do problema, foi apresentada no Capítulo 3. Essas abordagens utilizam a modelagem barra-ramo da rede elétrica e, portanto, não permitem a representação de chaves e disjuntores que fazem parte de uma subestação. Com esta modelagem, evitam-se os problemas numéricos decorrentes da representação explícita de chaves e disjuntores por valores muito pequeno ou muito grande de impedância para representar os status aberto ou fechado de tais dispositivos. Por outro lado, este procedimento não permite representar os arranjos das subestações no modelo da rede, perdendo-se assim todas as informações contidas dentro destas. Em consequência disto, a distribuição de fluxo através dos equipamentos das subestações não é obtida diretamente pela solução do problema de fluxo de carga e o operador ou analista tem que lançar mão de procedimentos manuais para sua determinação.

Este trabalho vem no sentido de atender essa necessidade, propondo a extensão da formulação convencional de fluxo de potência de forma a torná-la capaz de processar redes modeladas no nível subestação e, assim, possibilitar a determinação direta dos fluxos de potência através de chaves e disjuntores. Os conceitos e equacionamento do problema de fluxo de carga, discutidos no capítulo anterior, e a modelagem de ramos de impedância nula na estimação de estados [11], [12] e [13] constituem a base sobre a qual foi desenvolvida a metodologia proposta neste trabalho, que será apresentada neste capítulo.

4.1 – A Metodologia

A extensão da formulação convencional de fluxo de carga de forma a possibilitar o processamento de sistemas modelados no nível de seção de barras e ao mesmo tempo evitar os problemas numéricos causados pela representação de chaves e disjuntores (ramos chaveáveis) por valores apropriados de impedância, se baseia na modelagem de ramos de impedância nula na estimação de estados [10], [11]. Neste sentido, a primeira modificação a ser introduzida na formulação básica do problema de fluxo de carga é considerar os fluxos de potência ativa e reativa através de ramos chaveáveis como novas variáveis de estado, em adição as variáveis de estado da formulação convencional, quais sejam: módulo e ângulo das tensões nas barras do sistema. Com isto, o fluxo de potência em ramos chaveáveis passa a ser representado diretamente pela variável de estado associada, e não como função das tensões complexas, evitando a utilização da impedância desses elementos no equacionamento do problema e, assim, contornando os problemas numéricos mencionados anteriormente.

O estudo de fluxo de carga é realizado para uma dada topologia da rede, de forma que os status de chaves e disjuntores são conhecidos. As informações provenientes da condição dos status de chaves e disjuntores que serão representados no modelo da rede em estudo devem também ser incluídas no problema estendido de fluxo de carga. Sabe-se que se um disjuntor estiver fechado, a diferença angular e a diferença de potencial entre seus terminais são nulas, ou seja, $\theta_k - \theta_m = 0$ e $V_k - V_m = 0$ (sendo k e m as barras terminais do disjuntor). Por outro lado, se o disjuntor estiver aberto, os fluxos de potência ativa, t_{km} , e reativa, u_{km} , através desses ramos são iguais a zero, ou seja, $t_{km} = 0$ e

$u_{km} = 0$. Essas equações são incluídas no problema de fluxo de potência, em adição às equações de desvio de potência da formulação básica convencional.

Além disso, a inclusão dos fluxos como novas variáveis de estado implica que as expressões relativas às injeções de potência ativa e reativa que envolvem ramos chaveáveis são também afetadas. Sabe-se que essas injeções podem ser expressas como a soma dos fluxos de potência nos ramos incidentes à barra em questão. Para os ramos convencionais, os fluxos são calculados da maneira usual, ou seja, em termos dos ângulos e magnitudes das tensões. Para os ramos chaveáveis, entretanto, os fluxos são expressos diretamente em função das novas variáveis de estado. Assim, as injeções de potência ativa P_k e reativa Q_k , podem ser expressas por

$$P_k = \sum_{m \in \Omega_k} P_{km}(\theta_k, \theta_m, V_k, V_m) + \sum_{l \in \Gamma_k} t_{kl} \quad (4.1)$$

$$Q_k = \sum_{m \in \Omega_k} Q_{km}(\theta_k, \theta_m, V_k, V_m) + \sum_{l \in \Gamma_k} u_{kl} \quad (4.2)$$

onde

P_{km} , Q_{km} : fluxos de potência ativa e reativa através do ramo convencional $k-m$, respectivamente;

t_{kl} , u_{kl} : fluxos de potência ativa e reativa através do ramo chaveável $k-l$, respectivamente;

Ω_k , Γ_k : conjuntos de ramos convencionais e chaveáveis incidentes à barra k , respectivamente.

As modificações propostas acima devem ser incorporadas na formulação básica do fluxo de potência, levando a modificações no equacionamento e, conseqüentemente, na matriz Jacobiana do problema. Inicialmente será considerado o modelo linearizado da rede elétrica e, posteriormente, as modificações serão estendidas para o modelo não-linear, que compõe o propósito maior deste trabalho.

4.2 – Fluxo de Carga Linearizado no Nível de Subestação

A incorporação da metodologia proposta na seção anterior na abordagem linearizada do problema de fluxo de carga é apresentada nesta seção.

Primeiramente, o vetor de estados deve ser estendido de forma a incluir o fluxo de potência ativa através dos ramos chaveáveis como novas variáveis de estado. Dessa forma o novo vetor de estados do problema estendido de fluxo de carga linearizado, $\underline{\theta}_{\text{mod}}$, passa a ser definido por:

$$\underline{\theta}_{\text{mod}} = \begin{bmatrix} \underline{\theta} \\ \underline{t} \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

onde $\underline{\theta}$ é o vetor de estados convencionais, composto pelos ângulos de todas as barras do sistema, e \underline{t} é o vetor contendo os fluxos de potência ativa através dos ramos chaveáveis modelados no sistema.

No caso linear, as informações referentes aos status de chaves e disjuntores se restringem as equações relativas às variáveis da parte ativa do problema de fluxo de carga.

Assim, para representar o status de um disjuntor fechado que conecta os nós k e m , a seguinte equação deve ser incluídas no problema de fluxo de carga linearizado

$$\theta_k - \theta_m = 0 \quad (4.4)$$

Se o disjuntor estiver aberto, o mesmo é modelado pela seguinte equação

$$t_{km} = 0 \quad (4.5)$$

Finalmente, as injeções de potência ativa nas barras são expressas em termos do novo vetor de estados, representado pela equação (4.1), ou seja

$$P_k = \sum_{m \in \Omega_k} P_{km}(\theta_k, \theta_m) + \sum_{l \in \Gamma_k} t_{kl} \quad (4.6)$$

Como consequência das modificações propostas, o problema de fluxo de carga, originalmente representado pela equação (3.7), passa a ser representado matricialmente por

$$\underline{P}_{\text{mod}} = \underline{B}_{\text{mod}} \underline{z}_{\text{mod}} \quad (4.7)$$

onde $\underline{P}_{\text{mod}}$ e $\underline{B}_{\text{mod}}$ são, respectivamente, o vetor e a matriz de coeficientes do problema estendido de fluxo de carga linearizado.

De acordo com a modelagem proposta, o vetor de coeficientes do problema (4.7) é definido por

$$\underline{P}_{\text{mod}} = \begin{bmatrix} \underline{P} \\ \underline{0}_r \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

onde

\underline{P} é o vetor convencional de potência líquida nas barras;

$\underline{0}_r$ é o vetor de zeros associados às equações de diferença angular e fluxo nulo dos ramos chaveáveis, descritas anteriormente.

Com relação à matriz de coeficientes, tem-se

$$\underline{B}_{\text{mod}} = \begin{bmatrix} \underline{B} & \underline{T} \\ \underline{?}_r & \underline{0}_1 \\ \underline{0}_2 & \underline{T}_1 \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

onde

$\underline{B}_{\text{mod}}$ é a matriz \underline{B} modificada ou aumentada;

$\underline{B}_{(NB \times NB)}$ - é a submatriz resultante da representação dos fluxos nos ramos convencionais nas equações de injeção de potência ativa nas barras, sendo NB o número da barras do sistema;

$\underline{\mathbf{I}}_{(NB \times nrd)}$ - é a submatriz resultante da representação dos fluxos nos ramos chaveáveis nas equações de injeção de potência ativa nas barras, sendo nrd número de disjuntores modelados.

$\underline{\mathbf{q}}_r$ ($nrf \times NB$) é a submatriz das equações de diferença angular nula nos disjuntores fechados, sendo nrf o número de disjuntores fechados do sistema.

$\underline{\mathbf{I}}_1$ ($nra \times nrd$) a submatriz que representa as equações de fluxo nulo em disjuntores abertos; sendo nra é o número de disjuntores abertos.

$\underline{\mathbf{Q}}_1$ ($nrf \times nrd$), $\underline{\mathbf{Q}}_2$ ($nra \times NB$) são submatrizes com todos os seus elementos nulos.

4.2.1 – Exemplo Ilustrativo

O problema de fluxo de carga linearizado no nível de subestação, proposto na seção anterior, é formulado para o exemplo básico de 5 barras e 6 ramos mostrado na Figura 4.1.

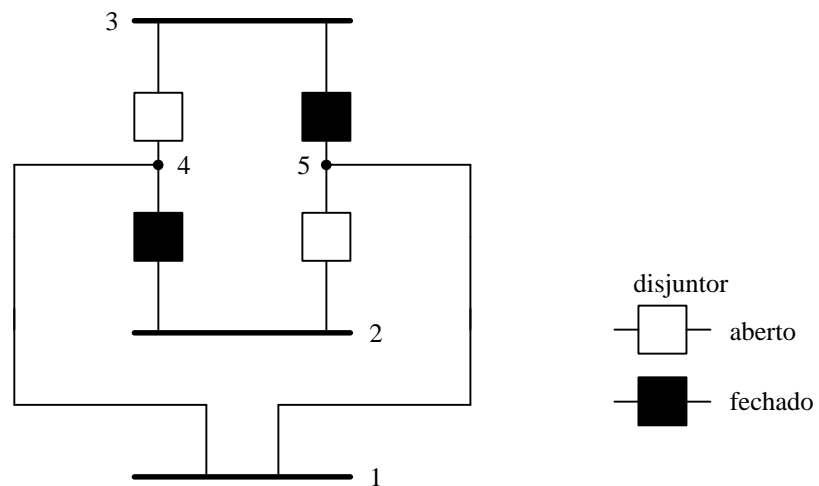


Figura 4.1 – SEP de 5 barras com ramos chaveáveis

Os ramos 1-4 e 1-5 são ramos convencionais, os ramos 2-4 e 3-5 são ramos chaveáveis correspondentes a disjuntores fechados e os ramos 2-5 e 3-4 são ramos chaveáveis correspondentes a disjuntores abertos.

Seguindo a metodologia proposta, o vetor de variáveis de estado é formado pelos ângulos nas 5 barras do sistema, juntamente com os fluxos de potência ativa através dos 4 disjuntores. Desta forma, o vetor $\underline{\theta}_{\text{mod}}$ é dado por:

$$\underline{\theta}_{\text{mod}} = [\theta_1 \quad \theta_2 \quad \theta_3 \quad \theta_4 \quad \theta_5 \quad t_{24} \quad t_{25} \quad t_{34} \quad t_{35}]^t \quad (4.10)$$

Os status dos disjuntores da Figura 4.1 são representados pelas seguintes equações: $\theta_2 - \theta_4 = 0$ e $\theta_3 - \theta_5 = 0$ (disjuntores fechados); e $t_{25} = t_{34} = 0$ (disjuntores abertos).

O vetor $\underline{P}_{\text{mod}}$ é definido por

$$\underline{P}_{\text{mod}} = [P_1 \quad P_2 \quad P_3 \quad P_4 \quad P_5 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0]^t \quad (4.11)$$

A submatriz $\underline{\mathbf{B}}$ que compõe a matriz de coeficientes do problema (4.9) é formada de forma similar ao método tradicional descrito no capítulo 3, cujos elementos são definidos pelas equações (3.8) e (3.9). Como apenas os ramos 1-4 e 1-5 são ramos convencionais, tem-se

$$\underline{\mathbf{B}} = \begin{bmatrix} x_{14}^{-1} + x_{15}^{-1} & 0 & 0 & -x_{14}^{-1} & -x_{15}^{-1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -x_{14}^{-1} & 0 & 0 & x_{14}^{-1} & 0 \\ -x_{15}^{-1} & 0 & 0 & 0 & x_{15}^{-1} \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

As submatriz $\underline{\mathbf{I}}$, $\underline{\mathbf{I}}_1$ e \underline{q}_r correspondentes são:

$$\begin{array}{c}
 (t_{24} \quad t_{25} \quad t_{34} \quad t_{35}) \\
 \mathbf{T} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ -1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & -1 \end{bmatrix}
 \end{array} \tag{4.13}$$

$$\mathbf{T}_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \tag{4.14}$$

$$\underline{z}_r = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{array}{l} (\theta_2 - \theta_4) \\ (\theta_3 - \theta_5) \end{array} \tag{4.15}$$

Finalmente, a matriz de coeficientes correspondente ao sistema da Figura 4 .1, modelado no nível de seção de barras, \mathbf{B}_{mod} , é dada por

$$\mathbf{B}_{\text{mod}} = \begin{bmatrix} x_{14}^{-1} + x_{15}^{-1} & 0 & 0 & -x_{14}^{-1} & -x_{15}^{-1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ -x_{14}^{-1} & 0 & 0 & x_{14}^{-1} & 0 & -1 & 0 & -1 & 0 \\ -x_{15}^{-1} & 0 & 0 & 0 & x_{15}^{-1} & 0 & -1 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \tag{4.16}$$

Para que a matriz \mathbf{B}_{mod} não seja singular, conforme discutido anteriormente, elege-se uma barra de referência, sendo neste caso a barra 1. Uma possibilidade de solução é substituir a equação de injeção de potência da barra 1 pela equação do ângulo de referência desta barra, ou seja $\theta_1 = 0$. Neste caso o vetor $\underline{P}_{\text{mod}}$ passa a ser representado pela equação

$$\underline{P}_{\text{mod}} = [0 \quad P_2 \quad P_3 \quad P_4 \quad P_5 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0]^t \tag{4.17}$$

Com relação a matriz $\underline{\mathbf{B}}_{\text{mod}}$, iguala-se a 1 o elemento da diagonal correspondente a barra de referência, sendo os demais elementos da linha e coluna igualados a zero. Desta forma tem-se

$$\underline{\mathbf{B}}_{\text{mod}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ -x_{14}^{-1} & 0 & 0 & x_{14}^{-1} & 0 & -1 & 0 & -1 & 0 \\ -x_{15}^{-1} & 0 & 0 & 0 & x_{15}^{-1} & 0 & -1 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

4.3 Fluxo de Carga Não-Linear no Nível de Subestação Utilizando o Método de Newton-Raphson

A metodologia proposta na Seção 4.1 pode ser incorporada ao problema original de fluxo de carga não-linear, tornando-o assim capaz de processar redes modeladas no nível de subestação. Nesta seção são apresentadas as modificações necessárias para solucionar o problema estendido de fluxo de carga não-linear pelo método de Newton-Raphson.

Seguindo o mesmo procedimento adotado para a abordagem linearizada, as seguintes alterações são introduzidas na formulação básica do problema de fluxo de carga:

1º- Define-se os fluxos de potência ativa e reativa, t_{km} e u_{km} , no ramo chaveável k - m como variáveis de estado, ficando o novo vetor de variáveis de estado definido como

$$\underline{x} = \begin{bmatrix} \underline{\theta} \\ \underline{V} \\ \underline{t} \\ \underline{u} \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

onde:

$\underline{\theta}$ - é o vetor composto dos ângulos de tensões de todas as barras do sistema;

\underline{V} - é o vetor composto dos módulos de tensão de todas as barras do sistema;

\underline{t} - é o vetor do fluxo de potência ativa em todos os ramos chaveáveis;

\underline{u} - é o vetor do fluxo de potência reativa de todos os ramos chaveáveis.

2º- Consideram-se nulas a diferença angular, $\theta_{km} = \theta_k - \theta_m$, e a queda de tensão, $V_{km} = V_k - V_m$, relativas às tensões complexas nos extremos do ramo chaveável $k-m$, se o dispositivo estiver fechado; e $t_{km} = 0$ e $u_{km} = 0$ relativa aos fluxos de potência ativa e reativa através dos ramos chaveáveis, se o dispositivo estiver aberto. Estas informações são incluídas no problema convencional de forma que a equação (3.10) passa a ser representado por:

$$\underline{f}(\underline{x}) = \begin{bmatrix} \underline{\Delta P} \\ \underline{\Delta Q} \\ \underline{\Delta?}_{op} \\ \underline{\Delta V}_{op} \\ \underline{t}_{op} \\ \underline{u}_{op} \end{bmatrix} \quad (4.20)$$

onde:

$\underline{\Delta P}$ e $\underline{\Delta Q}$ - são os vetores das equações de desvio de potência ativa e reativa, conforme definido na formulação convencional;

$\underline{\Delta\theta}_{op}$ e $\underline{\Delta V}_{op}$ - são os vetores das equações operacionais que representam os status dos disjuntores fechados;

\underline{t}_{op} e \underline{u}_{op} - são os vetores das equações operacionais que representam os status dos disjuntores abertos.

Além disso, as expressões relativas às injeções de potência ativa e reativa nas barras com ramos chaveáveis devem ser modificadas, para incorporar as novas variáveis de estado, conforme discutido na seção 4.1. As injeções de potência podem ser expressas como a soma dos fluxos de potência nos ramos que incidem na barra em que a injeção é calculada. Para os ramos convencionais (não chaveáveis), os fluxos são calculados da maneira convencional dado pelas equações (2.66) e (2.67). Para os ramos chaveáveis a componente de fluxo é expressa diretamente em função das variáveis de estado t e u correspondentes. Assim, as injeções de potência nas barras passam a ser expressas como função de

$$\underline{P} = f_p(\underline{V} \quad \underline{\theta} \quad \underline{t}) \quad (4.21)$$

$$\underline{Q} = f_q(\underline{V} \quad \underline{\theta} \quad \underline{u}) \quad (4.22)$$

O fluxo de potência ativa e reativa nos ramos de uma barra k passa a ser calculado da seguinte maneira:

$$P_k^{calc} = \sum_{m \in \Omega_k} t_{km}(V, \theta) + \sum_{m \in \Omega_k} t_{km_D} \quad (4.23)$$

$$Q_k^{calc} = \sum_{m \in \Omega_k} u_{km}(V, \theta) + \sum_{m \in \Omega_k} u_{km_D} \quad (4.24)$$

Sendo:

$\sum_{m \in \Omega_k} t_{km}(V, \theta)$: Fluxo de potência ativa nos ramos convencionais

$\sum_{m \in \Omega_k} t_{km_D}$: Fluxo de potência ativa nos ramos de disjuntores

$\sum_{m \in \Omega_k} u_{km} (V, \theta)$: Fluxo de potência reativa nos ramos convencionais

$\sum_{m \in \Omega_k} u_{km_D}$: Fluxo de potência reativa nos ramos de disjuntores

Ω_k conjunto das barras vizinhas a barra k

Assim, o problema de fluxo de carga convencional é modificado, de forma que o sistema de equações a ser resolvido passa a ser composto não apenas pelas equações de desvio de potência, mas também pelas equações operacionais que representam a configuração dos ramos chaveáveis, ou seja:

$$\Delta \underline{P} = \underline{P}^{esp} - \underline{P}^{calc} = f_p(V, \theta, t) = 0 \quad (4.25)$$

$$\Delta \underline{Q} = \underline{Q}^{esp} - \underline{Q}^{calc} = f_q(V, \theta, u) = 0 \quad (4.26)$$

$$\theta_{op} = \theta_k - \theta_m = 0 \quad (4.27)$$

$$\theta_{V_{op}} = V_k - V_m = 0 \quad (4.28)$$

$$t_{op} = t_k - t_m = 0 \quad (4.29)$$

$$u_{op} = u_k - u_m = 0 \quad (4.30)$$

onde:

$\Delta \underline{P}$ é o vetor das equações de desvio de potência ativa para as barras do tipo PQ e PV

$\Delta \underline{Q}$ é o vetor das equações de desvio de potência reativa para as barras do tipo P Q

θ_{op} , $\theta_{V_{op}}$, t_{op} e u_{op} já definidos anteriormente

Para ilustrar o efeito das modificações introduzidas em decorrência das novas variáveis de estado e das equações que representam a configuração dos ramos chaveáveis na matriz Jacobiana, a estrutura da nova matriz é representada na Figura 4.2:

<u>H</u>	<u>N</u>	<u>I</u>	<u>Q</u> ₁
<u>M</u>	<u>L</u>	<u>Q</u> ₂	<u>U</u>
<u>L</u>	<u>Q</u> ₃		
<u>Q</u> ₄	<u>F</u>	<u>Q</u> ₅	
<u>Q</u> ₆		<u>I</u> ₁	<u>Q</u> ₇
<u>Q</u> ₈			<u>U</u> ₁

Figura 4.2 – Estrutura da nova matriz Jacobiana

As submatrizes H, N, M e L são similares aquelas da matriz Jacobiana convencional, definida no Capítulo 3 e cujos elementos são calculados pelas equações de (3.34) a (3.41).

A submatriz I ($nrd \times NB$), resultante da representação dos fluxos de potência ativa através de ramos chaveáveis nas equações de injeção de potência ativa nas barras, é definida por

$$\underline{\mathbf{I}} = \left[\frac{\partial \underline{\mathbf{P}}}{\partial \underline{\mathbf{t}}} \right] \quad (4.31)$$

A submatriz U ($nrd \times NB$), resultante da representação dos fluxos de potência reativa através de ramos chaveáveis nas equações de injeção de potência reativa nas barras, é definida por

$$\underline{\mathbf{U}} = \left[\frac{\partial \underline{\mathbf{Q}}}{\partial \underline{\mathbf{u}}} \right] \quad (4.32)$$

A submatriz ? ($nrf \times NB$), resultante da inclusão das equações de diferença angular nula em disjuntores fechados, é definida por

$$\underline{\mathbf{?}} = \left[\frac{\partial (\Delta \theta_{op})}{\partial \underline{\theta}} \right] \quad (4.33)$$

A submatriz $\underline{\mathbf{F}}_{(nrf \times NB)}$, resultante da inclusão das equações de diferença de potencial nula em disjuntores fechados, é definida por

$$\underline{\mathbf{F}} = \left[\frac{\partial(\Delta \underline{\mathbf{V}}_{op})}{\partial \underline{\mathbf{V}}} \right] \quad (4.34)$$

A submatriz $\underline{\mathbf{I}}_{1(nra \times nrd)}$, resultante da inclusão das equações de fluxo de potência ativa nulo em ramos chaveáveis de disjuntores abertos, é definida por

$$\underline{\mathbf{I}}_1 = \left[\frac{\partial \underline{\mathbf{t}}_{op}}{\partial \underline{\mathbf{t}}} \right] \quad (4.35)$$

A submatriz $\underline{\mathbf{U}}_{1(nra \times nrd)}$, resultante da inclusão das equações de fluxo de potência reativa nulo em disjuntores abertos, é definida por

$$\underline{\mathbf{U}}_1 = \left[\frac{\partial \underline{\mathbf{u}}_{op}}{\partial \underline{\mathbf{u}}} \right] \quad (4.36)$$

As submatrizes $\underline{\mathbf{0}}_{1\dots 8}$ tem todos os seus elementos nulos, de acordo com a definição descrita pelas equações (4.37) a (4.44)

$$\underline{\mathbf{0}}_1 = \left[\frac{\partial \underline{\mathbf{P}}}{\partial \underline{\mathbf{u}}} \right] \quad (4.37)$$

$$\underline{\mathbf{0}}_2 = \left[\frac{\partial \underline{\mathbf{Q}}}{\partial \underline{\mathbf{t}}} \right] \quad (4.38)$$

$$\underline{\mathbf{0}}_3 = \left[\begin{array}{ccc} \frac{\partial(\Delta \underline{\theta}_{op})}{\partial \underline{\mathbf{V}}} & \frac{\partial(\Delta \underline{\theta}_{op})}{\partial \underline{\mathbf{t}}} & \frac{\partial(\Delta \underline{\theta}_{op})}{\partial \underline{\mathbf{u}}} \end{array} \right] \quad (4.39)$$

$$\underline{\mathbf{0}}_4 = \left[\frac{\partial(\Delta \underline{\mathbf{V}}_{op})}{\partial \underline{\theta}} \right] \quad (4.40)$$

$$\underline{\mathbf{0}}_5 = \left[\begin{array}{cc} \frac{\partial(\Delta \underline{\mathbf{V}}_{op})}{\partial \underline{\mathbf{t}}} & \frac{\partial(\Delta \underline{\mathbf{V}}_{op})}{\partial \underline{\mathbf{u}}} \end{array} \right] \quad (4.41)$$

$$\underline{\mathbf{0}}_6 = \begin{bmatrix} \frac{\partial t_{op}}{\partial \underline{\theta}} & \frac{\partial t_{op}}{\partial \underline{V}} \end{bmatrix} \quad (4.42)$$

$$\underline{\mathbf{0}}_7 = \begin{bmatrix} \frac{\partial t_{op}}{\partial \underline{u}} \end{bmatrix} \quad (4.43)$$

$$\underline{\mathbf{0}}_8 = \begin{bmatrix} \frac{\partial u_{op}}{\partial \underline{\theta}} & \frac{\partial u_{op}}{\partial \underline{V}} & \frac{\partial u_{op}}{\partial \underline{t}} \end{bmatrix} \quad (4.44)$$

Assim, o sistema linear a ser resolvido a cada iteração passa a ser

$$\begin{bmatrix} \Delta \underline{P} \\ \Delta \underline{Q} \\ \Delta \underline{\theta}_{op} \\ \Delta \underline{V}_{op} \\ \underline{t}_{op} \\ \underline{u}_{op} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{\mathbf{H}} & \underline{\mathbf{N}} & \underline{\mathbf{T}} & \underline{\mathbf{0}} \\ \underline{\mathbf{M}} & \underline{\mathbf{L}} & \underline{\mathbf{0}} & \underline{\mathbf{U}} \\ \underline{\mathbf{?}} & \underline{\mathbf{0}} & \underline{\mathbf{0}} & \underline{\mathbf{0}} \\ \underline{\mathbf{0}} & \underline{\mathbf{F}} & \underline{\mathbf{0}} & \underline{\mathbf{0}} \\ \underline{\mathbf{0}} & \underline{\mathbf{0}} & \underline{\mathbf{T}}_1 & \underline{\mathbf{0}} \\ \underline{\mathbf{0}} & \underline{\mathbf{0}} & \underline{\mathbf{0}} & \underline{\mathbf{U}}_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \underline{\theta} \\ \Delta \underline{V} \\ \underline{t} \\ \underline{u} \end{bmatrix} \quad (4.45)$$

4.3.1 Exemplo Ilustrativo

O exemplo básico de 5 barras e 6 ramos da Figura 4.1, foi novamente utilizado para ilustrar a formulação não-linear proposta para o nível de subestação. As submatrizes $\underline{\mathbf{I}}$, $\underline{\mathbf{U}}$, $\underline{\mathbf{?}}$, $\underline{\mathbf{F}}$, $\underline{\mathbf{T}}_1$ e $\underline{\mathbf{U}}_1$ referentes a este exemplo são apresentadas a seguir.

$$\underline{\mathbf{T}} = \begin{matrix} & \begin{matrix} (t_{24} & t_{25} & t_{34} & t_{35}) \end{matrix} \\ \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ -1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (4.46)$$

$$\underline{\mathbf{U}} = \begin{matrix} & (u_{24} & u_{25} & u_{34} & u_{35}) \\ \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ -1 & 0 & -1 & 0 \\ -0 & -1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (4.47)$$

$$\underline{\mathbf{?}} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad \begin{matrix} (?_2 - ?_4) \\ (?_3 - ?_5) \end{matrix} \quad (4.48)$$

$$\underline{\mathbf{F}} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad \begin{matrix} (V_2 - V_4) \\ (V_3 - V_5) \end{matrix} \quad (4.49)$$

$$\underline{\mathbf{T}}_1 = \begin{matrix} & (t_{24} & t_{25} & t_{34} & t_{35}) \\ \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (4.50)$$

$$\underline{\mathbf{U}}_1 = \begin{matrix} & (u_{24} & u_{25} & u_{34} & u_{35}) \\ \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (4.51)$$

4.4 Considerações Sobre a Metodologia Proposta

Este Capítulo mostrou que a representação de chaves e disjuntores para estudos de estimação de estado, pode ser estendida para casos de estudo de fluxo de carga, conforme proposto neste trabalho.

As modificações introduzidas evitam que os valores nulos de impedâncias de disjuntores fechados ou valores extremamente altos de impedâncias de disjuntores abertos façam parte do equacionamento do problema.

Os fluxos de potência nos equipamentos de subestações podem ser diretamente verificados nos resultados do fluxo de carga, evitando as dificuldades que operadores e analistas de sistemas de potência encontram nos dias de hoje com os algoritmos atuais.

Capítulo 5

Resultados

A metodologia proposta para cálculo de fluxo de potência em redes modeladas no nível de subestação, apresentada no Capítulo 4, foi testada utilizando -se os sistemas teste de 24 e de 30 barras do IEEE. A atenção é focada nas subestações representadas pelas barras 12 e 15 do sistema original de 30 barras e pelas barras 14 e 16 do sistema de 24 barras, as quais são modeladas no nível de seção de barras. Desta forma, para validar a metodologia proposta, as simulações foram conduzidas utilizando-se inicialmente a modelagem barra-ramo dos sistemas teste e em seguida utilizando a modelagem do sistema com as subestações mencionadas modeladas no nível de seção de barras. A Figura 5.1 mostra a modelagem barra-ramo de uma sub-rede do sistema de 30 barras original, onde se verifica a conexão das barras 12 e 15 (subestações em foco) com o restante do sistema. Na Figura 5.2 o mesmo sistema é representado, porém com as subestações 12 e 15 modeladas no nível de seção de barras. O sistema de 24 barras é ilustrado pela Figura 5.3, que apresenta de forma simplificada uma sub-rede do sistema original contendo as subestações 14 e 16 modeladas no nível de seção de barras e as barras mais próximas dessas subestações.

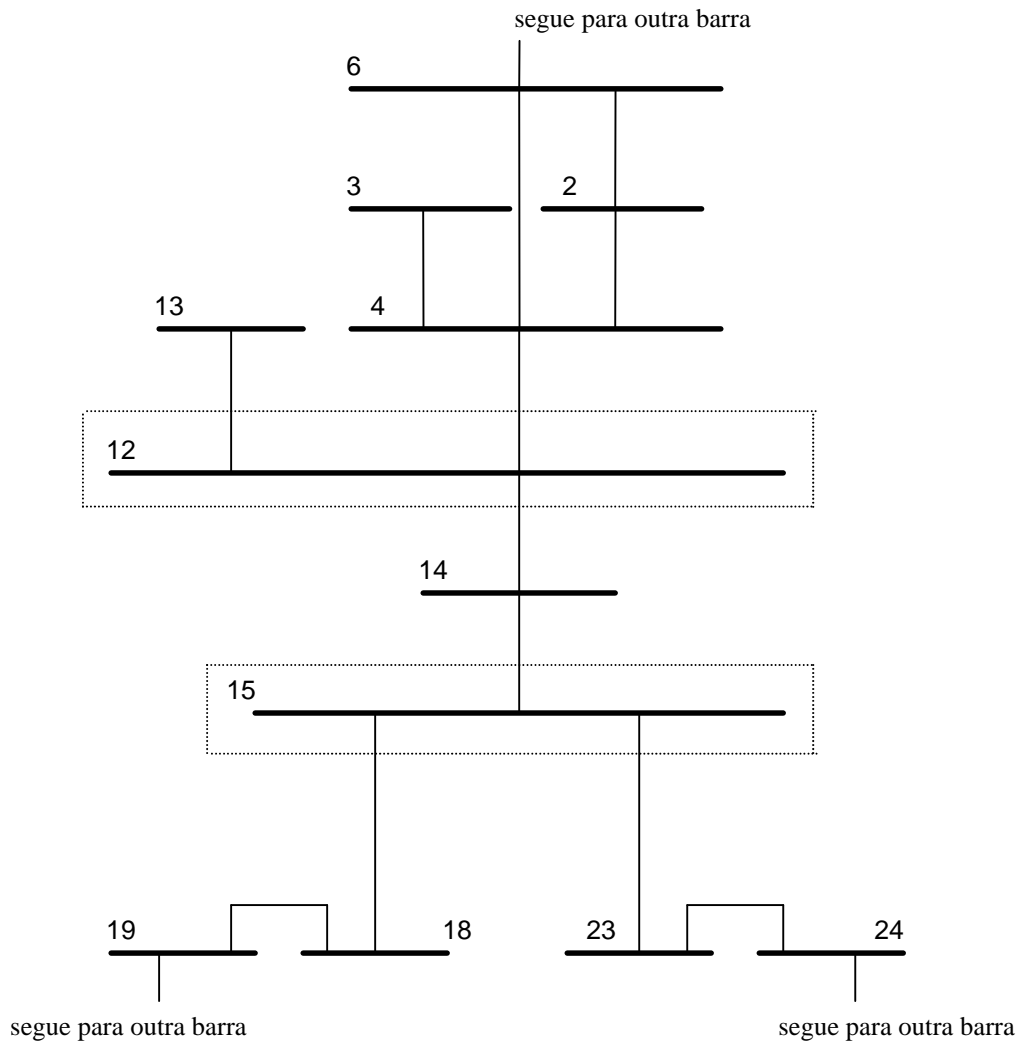


Figura 5.1 – Representação de uma parte do unifilar do SEP de 30 barras

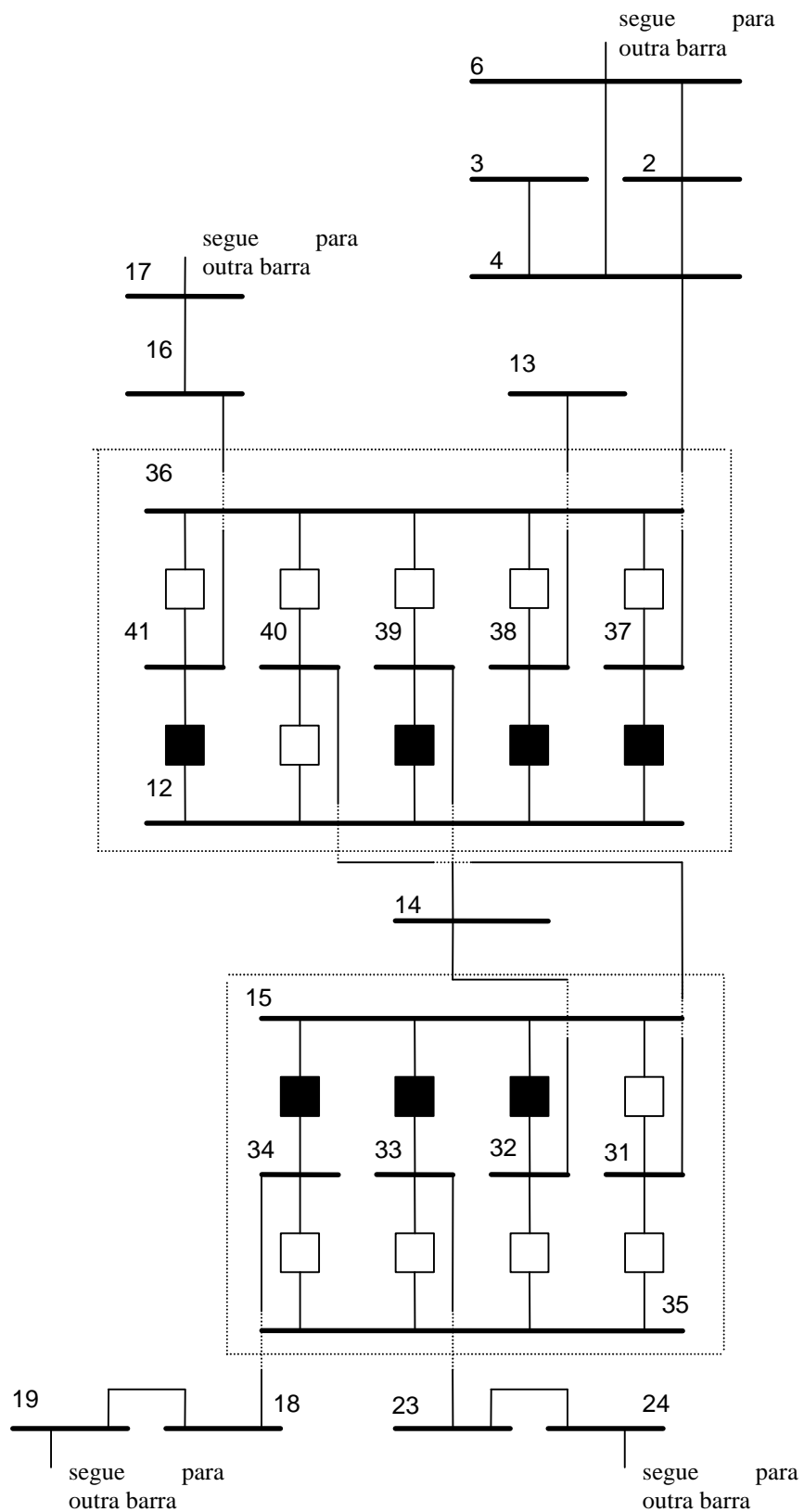


Figura 5.2 – Representação de uma parte do SEP de 30 barras com as SE's 12 e 15 modeladas com ramos chaveáveis

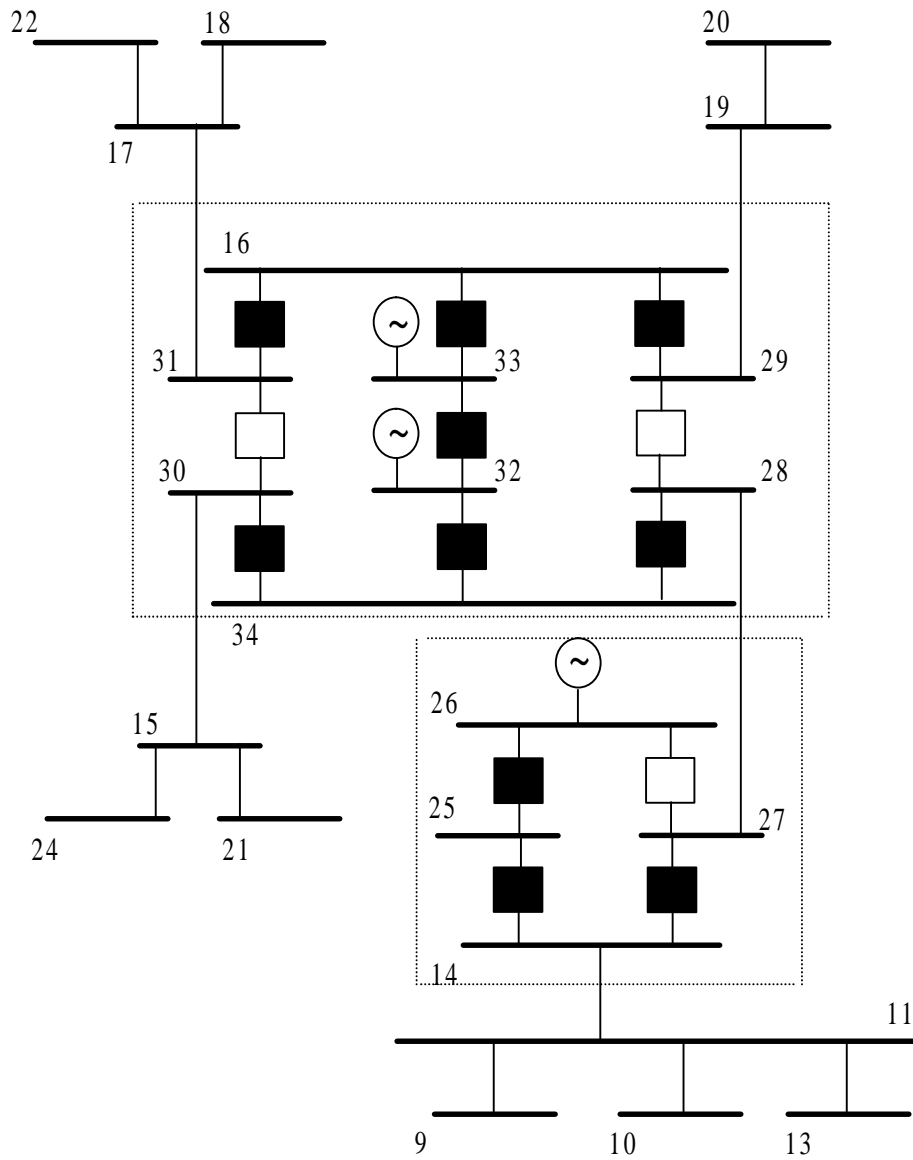


Figura 5.3 – Representação de uma parte do sistema de 24 barras com as SE's 14 e 16 modeladas no nível de seção de barras.

5.1 Resultados da Abordagem Linearizada

As Tabelas 5.1 e 5.2 apresentam os resultados das simulações do fluxo de carga linearizado proposto para o sistema de 30 barras do IEEE, considerando as modelagens barra-ramo e nível de SE, representadas respectivamente nas Figuras 5.1 e 5.2.

A Tabela 5.1 apresenta os resultados relativos aos ângulos nas barras do sistema. Na coluna “convencional” estão representados os resultados obtidos para o sistema modelado no nível barra-ramo (equivalente a formulação convencional). Na coluna “nível SE” estão os resultados para a modelagem no nível de seção de barras proposta neste trabalho.

Tabela 5.1 Ângulos das tensões das barras:

Barras	Ângulos [graus]	
	Convencional	Nível-SE
1	0	0
2	-0,928	-0,928
3	-0,1356	-0,1356
4	-0,1658	-0,1658
5	-0,2478	-0,2478
6	-0,1975	-0,1975
7	-0,2293	-0,2293
8	-0,21	-0,21
9	-0,2593	-0,2593
10	-0,292	-0,292
11	-0,2593	-0,2593
12	-0,2621	-0,2621
13	-0,2621	-0,2621
14	-0,3044	-0,3044
15	-0,3250	-0,3250
16	-0,2818	-0,2818
17	-0,2942	-0,2942
18	-0,3288	-0,3288
19	-0,3269	-0,3269
20	-0,3195	-0,3195
21	-0,3046	-0,3046
22	-0,3045	-0,3045
23	-0,3258	-0,3258
24	-0,3182	-0,3182
25	-0,3056	-0,3056

26	-0,3189	-0,3189
27	-0,2903	-0,2903
28	-0,2097	-0,2097
29	-0,3154	-0,3154
30	-0,3321	-0,3321
Barras terminais dos ramos chaveáveis		
31	-	0
32	-	-0,3250
33	-	-0,3250
34	-	-0,3250
35	-	0
36	-	0
37	-	-0,2621
38	-	-0,2621
39	-	-0,2621
40	-	0
41	-	-0,2621

Verifica-se pela tabela que não ocorreu variação entre os ângulos das barras para as duas simulações. Os ângulos das barras interligadas por ramos chaveáveis com disjuntores fechados resultaram iguais, como pode ser verificado para as barras 32, 33 e 34 que se interligam com a barra 15 original e com as barras 37, 38, 39 e 41 que se interligam com a barra 12 original. Algumas barras apresentaram ângulo 0 (zero), em virtude de, conforme o arranjo da SE, disjuntores abertos podem deixar algumas barras do sistema isoladas. Na coluna “nível SE” pode-se ver que o ângulo das barras

A Tabela 5.2 apresenta os resultados relativos aos fluxos de potência através dos ramos do sistema. Na coluna “Convencional” estão representados os resultados obtidos para o sistema modelado no nível barra-ramo (equivalente à formulação convencional). Na coluna “Nível SE” estão os resultados para a modelagem no nível de seção de barras. Na coluna “Para” os números de barras entre parênteses representam as barras criadas na modelagem no nível de SE.

Tabela 5.2 – Fluxo de potência ativa nos ramos

Barras		Fluxos [MW]	
De	Para	Convencionais	Nível SE
1	2	1,6132	1,6132
1	3	0,8208	0,8208
2	4	0,4204	0,4204
3	4	0,7968	0,7968
2	5	0,7802	0,7802
2	6	0,5938	0,5938
4	6	0,7648	0,7648
5	7	-0,1600	-0,1600
6	7	0,388	0,388
6	8	0,2986	0,2986
6	9	0,2973	0,2973
6	10	0,17	0,17
9	11	0	0
9	10	0,2973	0,2973
4	12(37)	0,3764	0,3764
13	12(38)	0	0
14	12(39)	-0,1652	-0,1652
16	12(41)	-0,991	-0,991
14	15	0,1032	0,1032
16	17	0,0641	0,0641
18	15	-0,0174	-0,0174
18	19	-0,0146	-0,0146
19	20	-0,1096	-0,1096
10	20	0,1316	0,1316
17	17	0,0259	0,0259
10	21	0,1686	0,1686
10	22	0,0832	0,0832
21	22	-0,0064	-0,0064
23	15	-0,0038	-0,0038
22	24	0,0768	0,0768
23	24	-0,0282	-0,0282
24	25	-0,0384	-0,0384
25	26	0,035	0,035
25	27	-0,0734	-0,0734
28	27	0,0234	0,0234
27	29	0,0606	0,0606
27	30	0,0694	0,0694
29	30	0,0366	0,0366
8	28	-0,0014	-0,0014

6	28	0,0248	0,0248
Fluxo nos ramos chaveáveis			
15	31	-	0
15	32	-	-0,1032
15	33	-	0,0174
15	34	-	0,0038
31	35	-	0
32	35	-	0
33	35	-	0
34	35	-	0
12	37	-	-0,3764
12	38	-	0
12	39	-	0,1652
12	40	-	0
12	41	-	0,0991
36	37	-	0
36	38	-	0
36	39	-	0
35	40	-	0
36	41	-	0

Para melhor visualização dos resultados das simulações para a nova modelagem, as Figuras 5.4 e 5.5 a seguir, apresentam as Subestações 12 e 15 modeladas no nível de seção de barras, onde são apresentados os valores dos ângulos das barras e os fluxos de potência ativa nos diversos ramos para o caso em estudo .

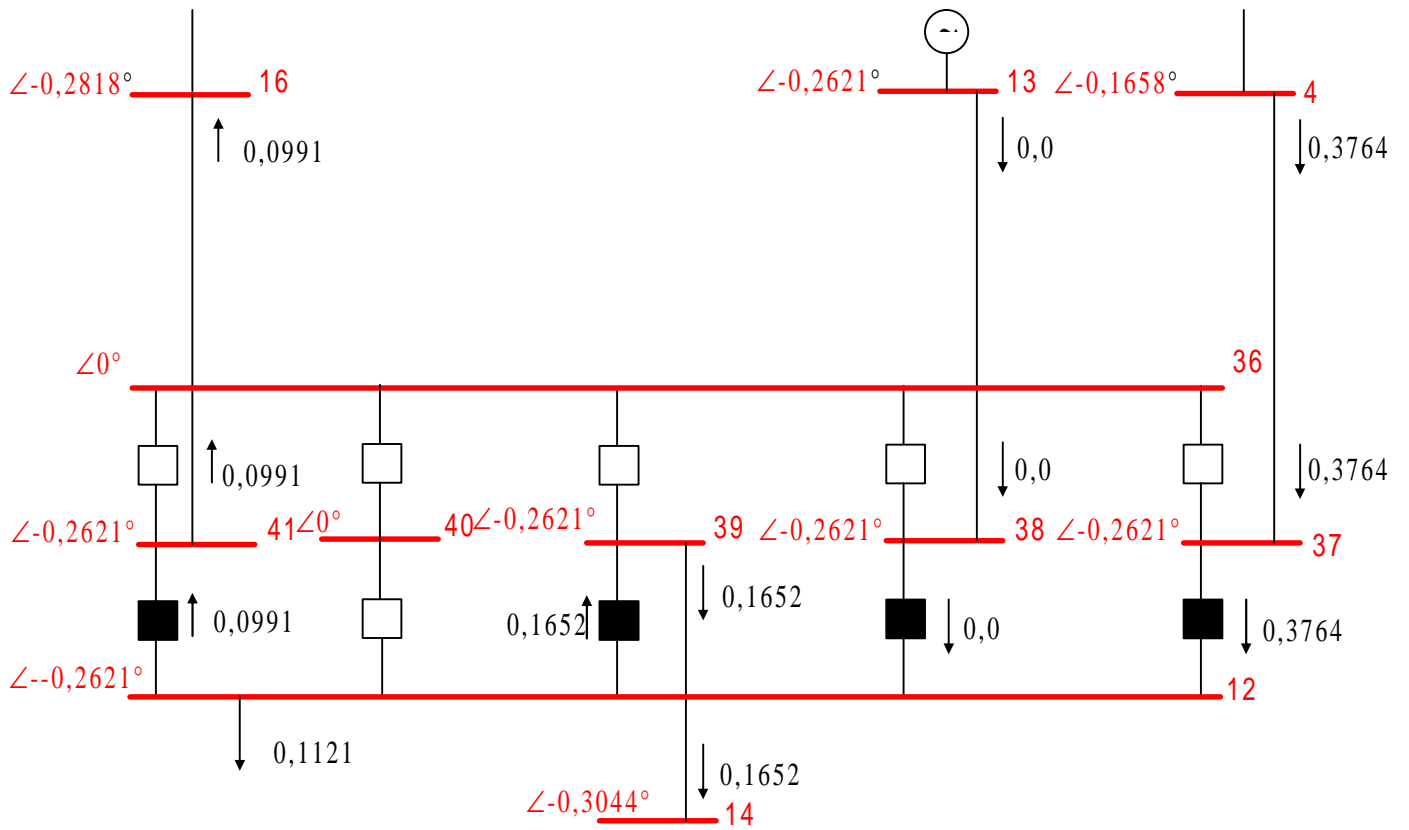


Figura 5.4- Subestação 12 modelada no nível de seção de barras.

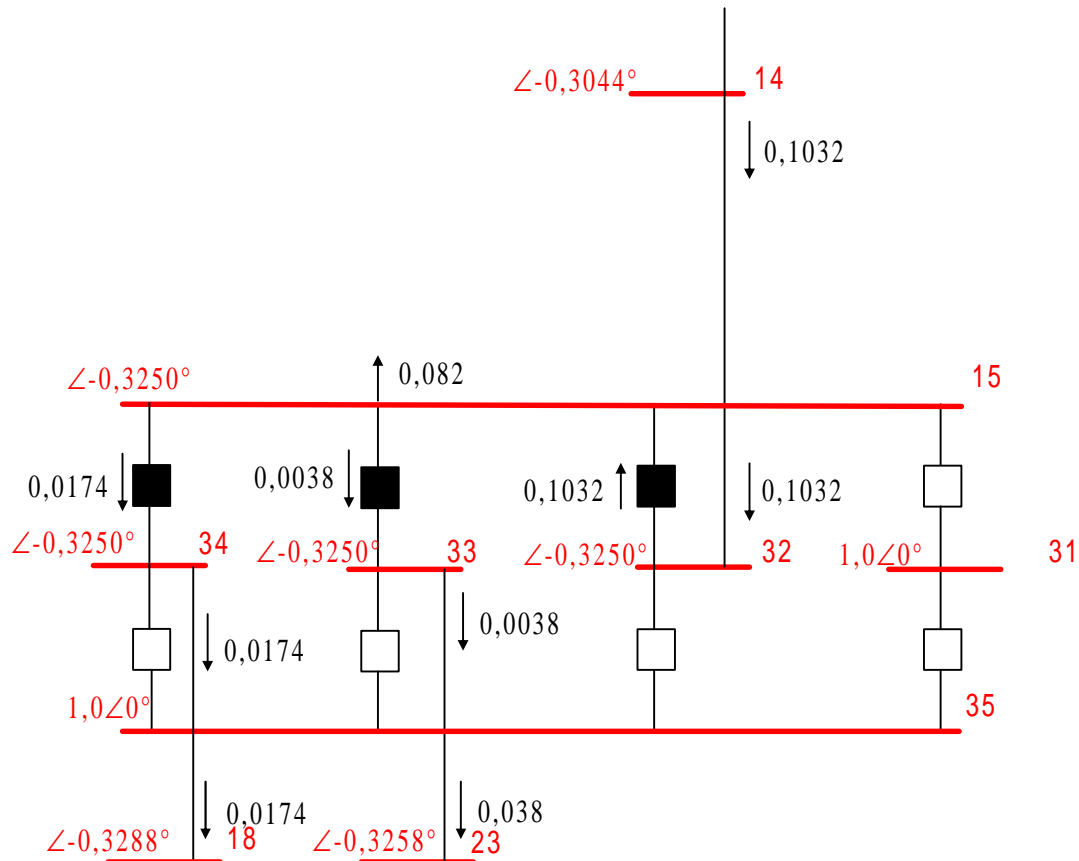


Figura 5.5- Subestação 15 modelada no nível de seção de barras

Observa-se que os fluxos através dos disjuntores fechados, obtidos diretamente com a solução do problema de fluxo de carga da nova abordagem, foram calculados corretamente, como se pode verificar na Figura 5.4 nos ramos chaveáveis 12 -37, 12-38, 12-39, 12-41 e na Figura 5.5 para os ramos chaveáveis 15 -34, 15-33, e 15-32.

Para disjuntores abertos obteve-se fluxos nulos conforme Figura 5.4 para os ramos 36-37, 36-38, 36-39, 36-40, 36-41 e na Figura 5.5 para os ramos 15 -31, 35-31, 35-32, 35-33 e 35-34.

5.2 Resultados Da Abordagem Não-Linear

O sistema de 30 barras do IEEE representados pelas Figuras 5.1 e 5.2 é novamente utilizado para validar a metodologia proposta para a versão não-linear do problema de fluxo de carga no nível de subestação.

As tabelas 5.4 e 5.5 apresentam os resultados obtidos com as simulações equivalentes àquelas realizadas para a versão linearizada, cujos resultados foram apresentados na seção 5.1. Na coluna “convencional” da Tabela 5.4 estão apresentados os resultados dos ângulos e dos módulos das tensões das barras obtidos para o sistema modelado no nível barra-ramo e na coluna “Nível SE” estão os resultados correspondentes, porém com as SE's 12 e 15 modeladas no nível de seção de barras.

Tabela 5.3 – Módulo e ângulo de tensões das barras sistema de 30 barras do IEEE

Barras	Módulo		Ângulo[graus]	
	Convencional	Nível SE	Convencional	Nível SE
1	1,06	1,06	0	0
2	1,043	1,043	-5,04	-5,04
3	1,0141	1,0141	-8,75	-8,75
4	1,0041	1,0041	-10,81	-10,81
5	1,01	1,01	-14,65	-14,65
6	1,0046	1,0046	-12,25	-12,25
7	0,9989	0,9989	-13,77	-13,77
8	1,01	1,01	-13,11	-13,11
9	1,0123	1,0123	-15,81	-15,81
10	0,9811	0,9811	-17,73	-17,73
11	1,082	1,082	-15,81	-15,81
12	1,023	1,023	-16,52	-16,52
13	1,0710	1,0710	-16,52	-16,52
14	0,9779	0,9779	-18,49	-18,49
15	0,938	0,938	-18,96	-18,96
16	0,9967	0,9967	-17,25	-17,25
17	0,9808	0,9808	-17,84	-17,84

18	0,9275	0,9275	-18,99	-18,99
19	0,9360	0,9360	-19,12	-19,12
20	0,9464	0,9464	-18,85	-18,85
21	0,9655	0,9655	-18,26	-18,26
22	0,9653	0,9653	-18,25	-18,25
23	0,9361	0,9361	-19,02	-19,02
24	0,9426	0,9426	-18,69	-18,69
25	0,9526	0,9526	-18,20	-18,20
26	0,9337	0,9337	-18,68	-18,68
27	0,9680	0,9680	-17,60	-17,60
28	1,0003	1,0003	-12,93	-12,93
29	0,9469	0,9469	-18,98	-18,98
30	0,9347	0,9347	-19,97	-19,97
Ângulos nas barras com ramos chaveáveis				
31	-	1,0	-	0
32	-	0,938	-	-18,96
33	-	0,938	-	-18,96
34	-	0,938	-	-18,96
35	-	1,0	-	0
36	-	1,0	-	0
37	-	1,0230	-	-16,52
38	-	1,0230	-	-16,52
39	-	1,0230	-	-16,52
40	-	1,0	-	0
41	-	1,023	-	-16,52

Verifica-se pela tabela que os valores dos ângulos e dos módulos das tensões das barras são iguais nas duas simulações. Os ângulos e módulos calculados para as barras interligadas por disjuntores fechados resultaram iguais, vide conjunto das barras 32, 33, 34 com a barra 15 e 37, 38, 39 e 41 com a barra 12, como era esperado. As barras que apresentaram ângulos 0 (zero) e módulos de tensão 1,0, ocorrem devido à estarem isoladas.

A tabela 5.5 apresenta o resultado dos fluxos de potência nos ramos utilizando a abordagem convencional da rede (coluna convencional) e para a rede modelada no nível de seção de barras (coluna chaveável).

Tabela 5.4 – Fluxos de ativo e reativo nos ramos sistema de 30 barras do IEEE

Barras		Ativo (MW)		Reativo(Mvar)	
de	para	Convencional	Nível SE	Convencional	Nível SE
1	2	163,74	163,74	-18,858	-18,858
1	3	101,48	101,48	6,99	6,99
2	4	12,508	12,508	-16,63	-16,63
3	4	94,909	94,909	-5,09	-5,09
2	5	89,469	89,469	1,234	1,234
2	6	75,444	75,444	0,55	0,55
4	6	56,793	56,793	-17,124	-17,124
5	7	-8,21	-8,21	11,964	11,964
6	7	31,379	31,379	-3,572	-3,752
6	8	30,078	30,078	-21,811	-21,811
6	9	30,312	30,312	-2,8	-2,8
6	10	16,924	16,924	5,046	5,046
9	11	0	0	-33,924	-33,924
9	10	30,312	30,312	29,214	29,214
12(37)	4	-39,923	-39,923	+9,531	+9,531
12(38)	13	0	0	-35,105	-35,105
12(39)	14	18,075	18,075	9,556	9,556
12(41)	16	10,648	10,648	8,518	8,518
15(32)	14	-10,972	-10,972	-6,562	-6,562
16	17	6,98	6,98	6,365	6,365
15(33)	18	2,003	2,003	3,541	3,541
18	19	-1,217	-1,217	-5,5	-5,5
19	20	-10,74	-10,74	-8,948	-8,948
10	20	13,924	13,924	10,419	10,419
10	17	2,068	2,068	-0,389	-0,389
10	21	17,394	17,394	12,444	12,444
10	22	8,679	8,679	6,166	6,166
21	22	-0,271	-0,271	0,888	0,888
15(34)	23	0,769	0,769	0,521	0,521
22	24	8,322	8,322	6,877	6,877
23	24	-2,432	-2,432	-1,081	-1,081
24	25	-2,964	-2,964	-1,149	-1,149
25	26	3,551	3,551	2,376	2,376
25	27	-6,537	-6,537	-3,536	-3,536
28	27	19,921	19,921	8,979	8,979
27	29	6,206	6,206	1,699	1,699
27	30	7,112	7,112	1,7	1,7
29	30	3,709	3,709	0,616	0,616
8	28	-0,084	-0,084	2,738	2,738
6	28	20,088	20,088	0,898	0,898
Fluxo nos ramos com disjuntores					

15	31	-	0	-	0
15	32	-	-10,972	-	-6,562
15	33	-	2,003	-	3,541
15	34	-	0,769	-	0,521
31	35	-	0	-	0
32	35	-	0	-	0
33	35	-	0	-	0
34	35	-	0	-	0
12	37	-	-39,923	-	9,531
12	38	-	0	-	-35,105
12	39	-	18,075	-	9,556
12	40	-	0	-	0
12	41	-	10,648	-	8,518
36	37	-	0	-	0
36	38	--	0	-	0
36	39	-	0	-	0
36	40	-	0	-	0
36	41	-	0	-	0

As Figuras 5.6 e 5.7 apresentam as configurações das Subestações 12 e 15 para melhor visualizar o resultado da simulação no nível de seção de barras.

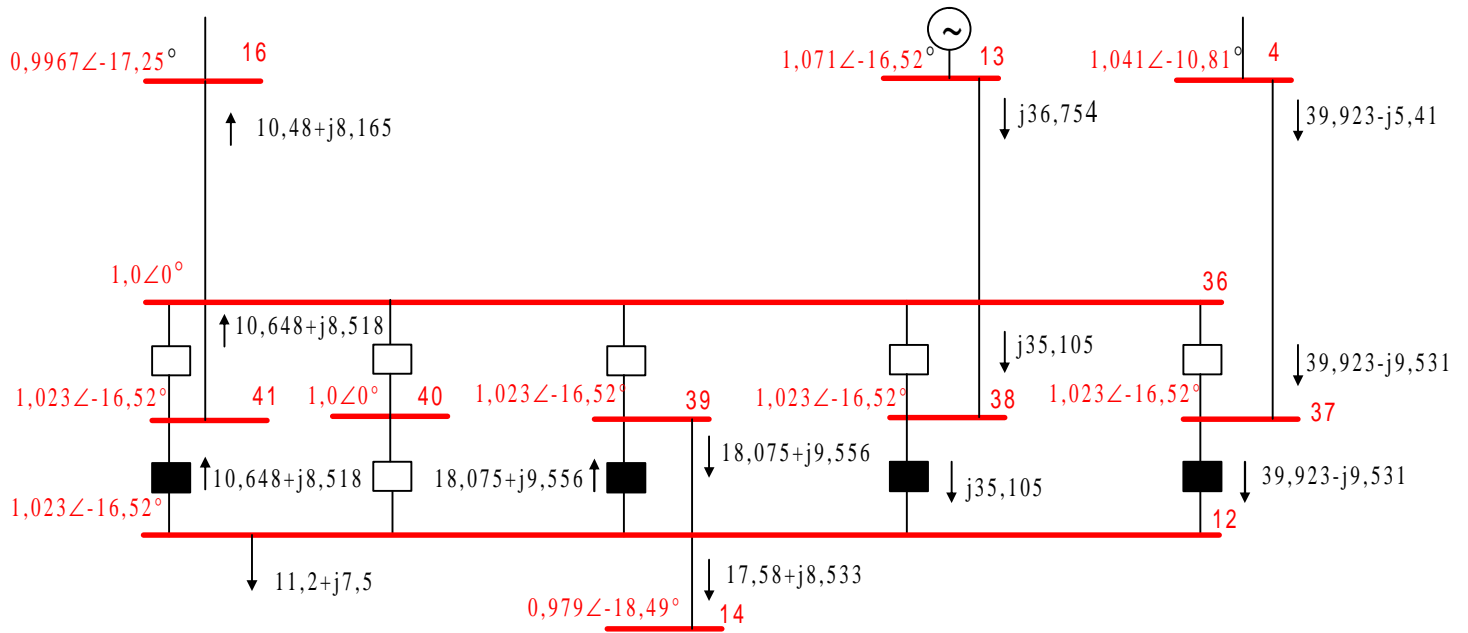


Figura 5.6 – Subestação 12 do sistema de 30 barras do IEEE modelada no nível de seção de barras

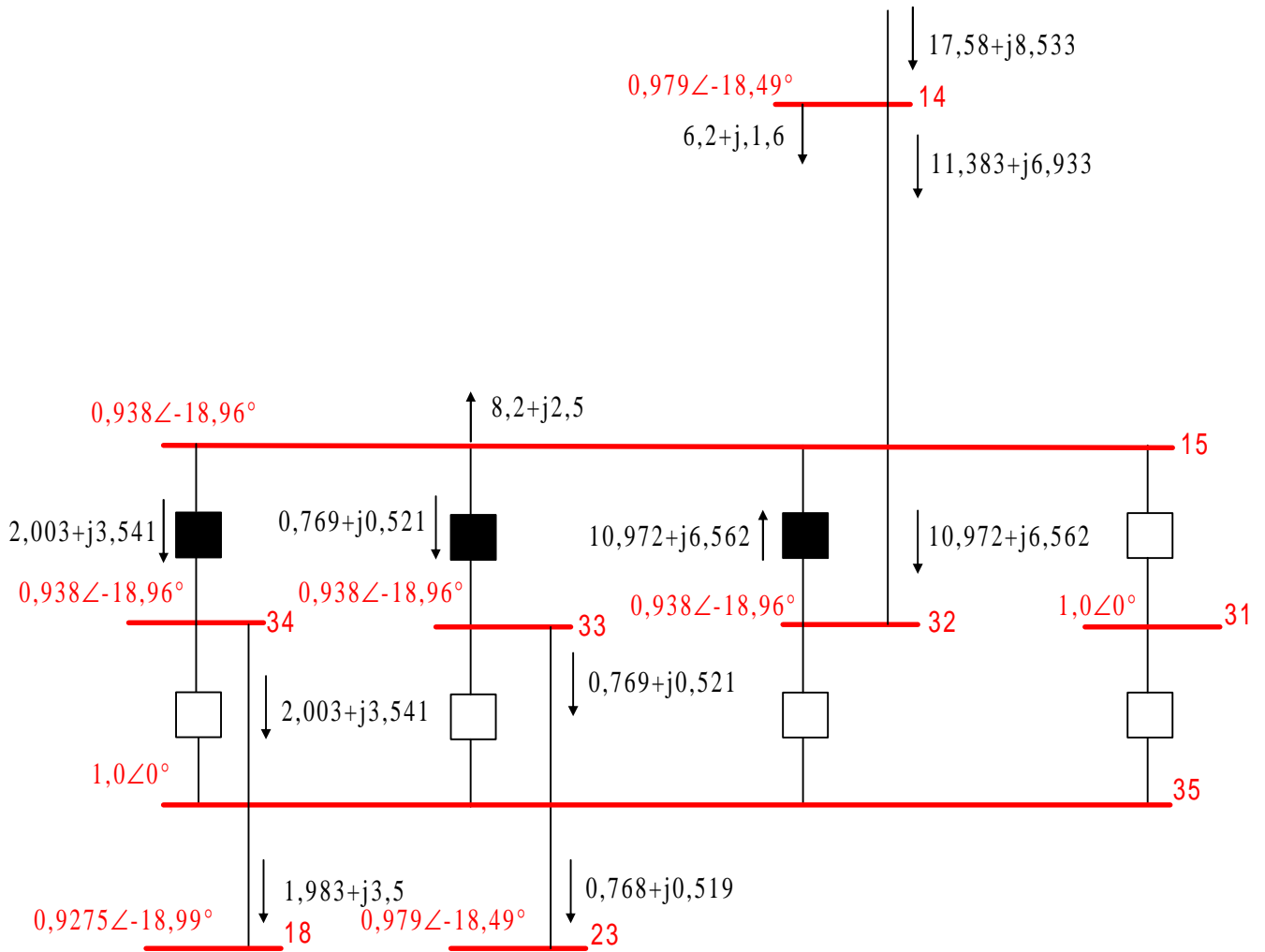


Figura 5.7 – Subestação 15 do sistema de 30 barras do IEEE modelada no nível de seção de barras

Verifica-se nas Figuras 5.6 e 5.7 que os fluxos através dos ramos chaveáveis com disjuntores fechados foram calculados corretamente e os fluxos através dos disjuntores abertos resultaram em valores nulos, como esperado.

Na Figura 5.6 analisando o ramo chaveável 12 -41, por exemplo, verifica-se que o fluxo através deste ramo é exatamente igual ao fluxo através do ramo 16 -41, que interliga

as barras 12 e 16 do sistema convencional. Pela análise do carregamento dos ramos chaveáveis 12-37, 12-38, 12-39 e 12-41 da Figura 5.6 ou 15-32, 15-33 e 15-34 da Figura 5.7, pode-se comprovar a eficiência do método proposto na determinação da distribuição dos fluxos através dos equipamentos da subestação, que não é obtido como solução direta no fluxo de carga convencional.

Nas duas simulações o número de iterações foi igual a 5, comprovando que a metodologia não modifica o processo de convergência do problema em estudo.

Para não se restringir somente a apresentação de um caso, simulou-se também um sistema de 24 barras do IEEE, cujos resultados estão apresentados nas Tabelas 5.6 (módulos e ângulos) e 5.7 (fluxos ativo e reativo nos ramos) para ambas as modelagens do sistema convencional e nível SE

Tabela 5.5 – Resultados de módulo e ângulo do sistema 24 barras do IEEE

Barra	Módulo		Ângulo	
	Convencional	Nível SE	Convencional	Nível SE
1	1,05	1,05	0	0
2	1,05	1,05	-0,21	-0,21
3	1,0095	1,0095	-0,07	-0,07
4	1,0213	1,0213	-2,34	-2,34
5	1,0524	1,0524	-2,38	-2,38
6	1,1020	1,1020	-5,01	-5,01
7	1,075	1,075	0,69	0,69
8	1,0352	1,0352	-2,92	-2,92
9	1,0173	1,0173	0,11	0,11
10	1,0709	1,0709	-1,62	-1,62
11	1,0204	1,0204	5,3	5,3
12	1,0237	1,0237	6,38	6,38
13	1,025	1,025	10,63	10,63
14	1,01	1,01	6,97	6,97
15	1,025	1,025	12,95	12,95
16	1,025	1,025	12,63	12,63
17	1,0245	1,0245	16,33	16,33
18	1,025	1,025	17,13	17,13
19	1,0155	1,0155	12,00	12,00

20	1,0186	1,0186	13,39	13,39
21	1,0250	1,0250	17,75	17,75
23	1,0250	1,0250	14,89	14,89
24	1,0091	1,0091	8,02	8,02
Ângulos nas barras com ramos chaveáveis				
25		1,01		6,97
26		1,01		6,97
27		1,01		6,97
28		1,025		12,63
29		1,025		12,63
30		1,025		12,63
31		1,025		12,63
32		1,025		12,63
33		1,025		12,63
34		1,025		12,63

Tabela 5.6 – Resultados do fluxo de potência ativa e reativa nos ramos do sistema de 24 barras do IEEE

Barras		Ativo (MW)		Reativo (Mvar)	
de	para	Convencional	Nível SE	Convencional	Nível SE
1	2	6,417	6,417	-37,307	-37,307
1	3	5,483	5,483	-12,829	-12,829
1	5	50,393	50,393	-16,142	-16,142
2	4	35,487	35,487	13,309	13,309
2	6	40,886	40,886	-39,709	-39,709
3	9	-4,12	-4,12	-7,14	-7,14
3	24	-170,585	-170,585	17,262	17,262
4	9	-38,956	-38,956	0,276	0,276
5	10	-21,153	-21,153	-29,728	-29,728
6	10	-96,482	-96,482	-67,061	-67,061
7	8	125,0	125,0	39,966	39,966
8	9	-28,651	-28,651	17,145	17,145
8	10	-19,729	-19,729	-19,522	-19,522
9	11	-111,999	-111,999	4,422	4,422
9	12	-135,669	-135,669	3,43	3,43
10	11	-154,843	-154,843	78,292	78,292
10	12	-179,781	-179,781	77,998	77,998
11	13	-200,511	-200,511	20,063	20,063
14	11	67,512	67,512	-37,194	-37,194
12	13	-159,961	-159,961	18,411	18,411
12	23	-156,669	-156,669	19,99	19,99
16(28)	14(27)	264,867	264,867	14,16	14,16

13	23	-88,387	-88,387	5,151	5,151
16(30)	15	-32,955	-32,955	2,371	2,371
15	21	-333,156	-333,156	100,727	100,727
15	24	173,178	173,178	10,599	10,599
16(31)	17	-256,227	-256,227	-40,317	-40,317
16(29)	19	54,315	54,315	32,633	32,633
17	18	-100,060	-100,060	7,887	7,887
17	22	-158,287	-158,287	21,509	21,509
18	21	-83,233	-83,233	16,821	16,821
19	20	-126,805	-126,805	-0,239	-0,239
20	23	-255,194	-255,194	-25,189	-25,189
21	22	-73,863	-73,863	102,238	102,238
Fluxo de Potência nos ramos chaveáveis					
14	25		194		33,722
14	27		-261,512		3,472
25	26		0		-5,278
26	27		0		0
16	29		54,315		32,633
16	31		-256,227		40,317
16	33		101,912		-92,95
28	34		-264,867		-14,16
30	34		32,955		-2,371
32	34		231,912		16,531
32	33		-166,912		38,209
28	29		0		0
30	31		0		0

As Figuras 5.8 e 5.9 apresentam as configurações das Subestações 14 e 16 para melhor visualizar o resultado da simulação no nível de seção de barras.

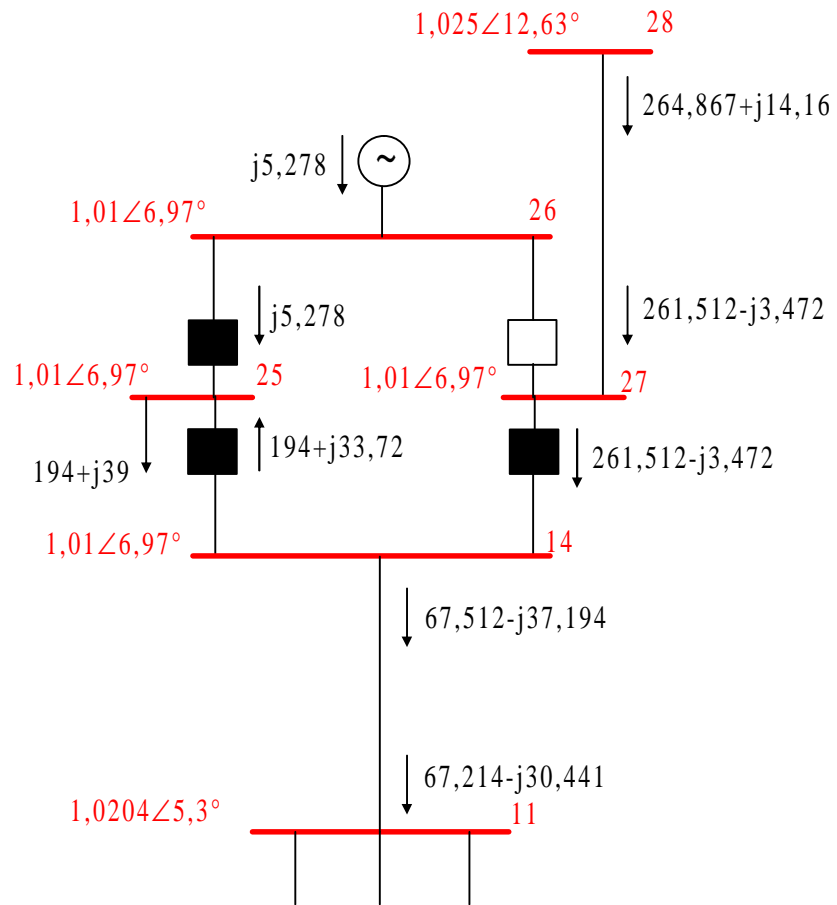


Figura 5.8 – Subestação 14 do Sistema de 24 barras do IEEE, modelada no nível de seção de barras

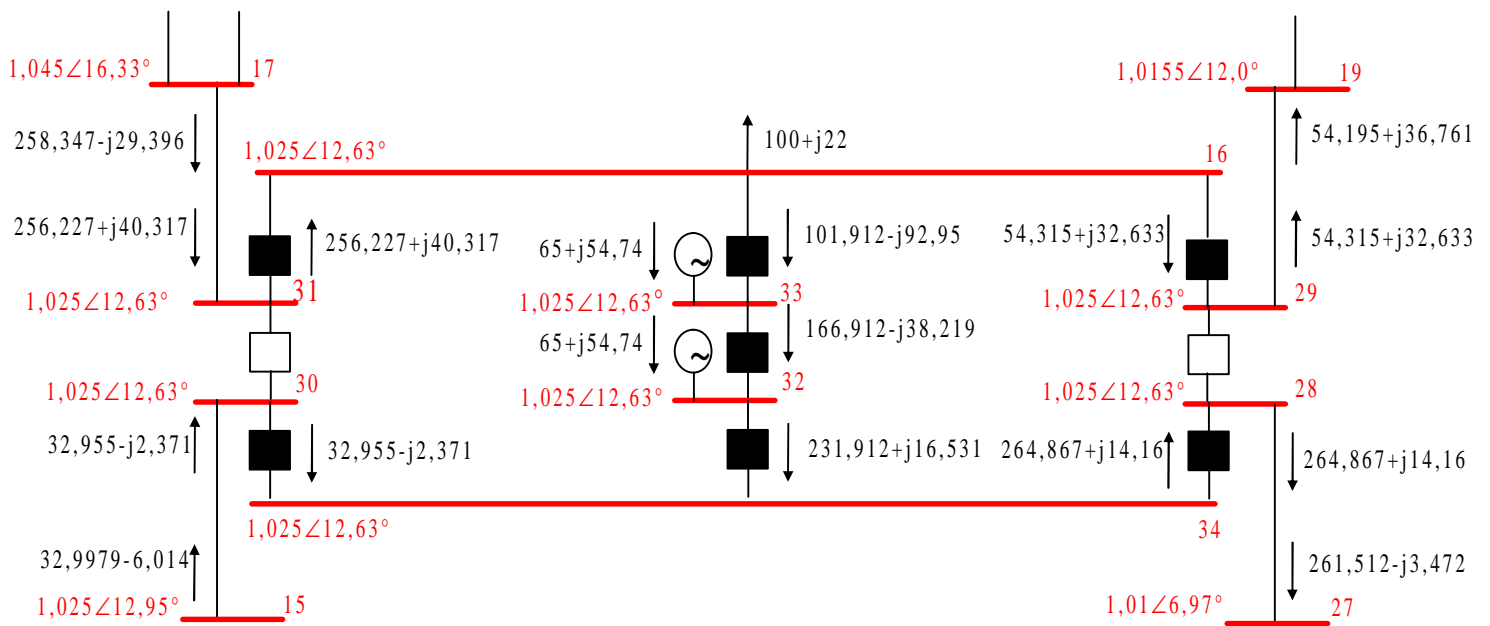


Figura 5.9 – Subestação 16 do Sistema de 24 barras do IEEE, modelada no nível de seção de barras

A análise das Figuras 5.8 e 5.9 mostra que para este sistema, os resultados das simulações comprovam novamente a eficiência do algoritmo proposto.

Para o sistema de 24 barras as duas simulações o número de iterações foi igual a 4, comprovando que a metodologia não modifica o processo de convergência do problema em estudo

Os dados de entrada e os resultados das simulações, para os sistemas simulados de 24 barras e de 30 barras do IEEE, são apresentados nos Anexos I e II.

Capítulo 6

Conclusões e Trabalhos Futuros

Os resultados das simulações apresentados no Capítulo 5, comprovam que a modelagem de ramos de impedância nula proposta por MONTICELLI e GARCIA para a formulação do problema de estimação de estados, pode ser estendida para cálculo de fluxos de potência, conforme metodologia apresentada no Capítulo 4, possibilitando assim o processamento de redes modeladas no nível de subestação.

O método proposto denominado neste trabalho de Fluxo de Potência em Redes Modeladas no Nível de Subestação servirá como ferramenta importante para analistas de sistemas, nos estudos de carregamentos de equipamentos de subestações e para operadores de sistemas, em avaliações de manobras em subestações, uma vez que atualmente nos estudos através da formulação convencional, estes resultados não são explícitos.

Além disso, o método soluciona os problemas de representações de impedâncias extremamente pequenas para representar disjuntores fechados, e extremamente elevadas para representar disjuntores abertos em estudos de fluxo de potência, que acarretam instabilidade e problemas de condicionamento numérico.

Nos casos simulados obteve-se o mesmo número de interações tanto para as simulações utilizando o método convencional quanto o método proposto. Este fato era esperado, pois as equações operacionais acrescentadas na nova formulação são lineares com relação às variáveis de estado do problema estendido.

Como continuidade do trabalho, sugere-se acrescentar ao algoritmo proposto para cálculo de fluxo de carga linearizado, bem como para o não linear, técnicas de

esparsidade e armazenamento compacto através de listas encadeadas. Além disso, propõe-se testar o método e seu desempenho para o fluxo de potência desacoplado rápido, para o qual a metodologia proposta pode ser implementada.

32	0	0	0	0	0	0	0	0
33	0	0	0	0	0	0	0	0
34	0	0	0	0	0	0	0	0
35	0	0	0	0	0	0	0	0
36	0	0	0	0	0	0	0	0
37	0	0	0	0	0	0	0	0
38	0	0	0	0	0	0	0	0
39	0	0	0	0	0	0	0	0
40	0	0	0	0	0	0	0	0
41	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabela A.2 – Dados das Linhas sistema 30 barras

na	nb	r[pu]	x[pu]	bshlin[pu]
1	2	0,0192	0,0575	0,0528
1	3	0,0452	0,1652	0,0408
2	4	0,57	0,1737	0,0368
3	4	0,0132	0,0379	0,0084
2	5	0,0472	0,1983	0,0418
2	6	0,0581	0,1763	0,0374
4	6	0,0119	0,0414	0,009
5	7	0,046	0,116	0,0204
6	7	0,0267	0,082	0,017
6	8	0,012	0,042	0,009
6	9	0	0,208	0
6	10	0	0,556	0
9	11	0	0,208	0
9	10	0	0,11	0
4	37	0	0,256	0
13	38	0	0,14	0
14	39	0,1231	0,2559	0
31	40	0,0662	0,1304	0
16	41	0,0945	0,1987	0
14	32	0,221	0,1997	0
16	17	0,0524	0,1923	0
18	34	0,1073	0,2185	0
18	19	0,0639	0,1292	0
19	20	0,034	0,068	0
10	20	0,0936	0,209	0
10	17	0,0324	0,0845	0
10	21	0,0348	0,0749	0
10	22	0,0727	0,1499	0
21	22	0,0116	0,0236	0
23	33	0,1	0,202	0
22	24	0,115	0,179	0
23	24	0,132	0,27	0

24	25	0,1885	0,3292	0
25	26	0,2544	0,38	0
25	27	0,1093	0,2087	0
28	27	0	0,396	0
27	29	0,2198	0,4153	0
27	30	0,3202	0,6027	0
29	30	0,2399	0,4533	0
8	28	0,0636	0,2	0,0428
6	28	0,0169	0,0599	0,013
15	31	0	9999,0	0
15	32	0	0	0
15	33	0	0	0
15	34	0	0	0
31	35	0	9999,0	0
32	35	0	9999,0	0
33	35	0	9999,0	0
34	35	0	9999,0	0
12	37	0	0	0
12	38	0	0	0
12	39	0	0	0
12	40	0	9999,0	0
12	41	0	0	0
36	37	0	9999,0	0
36	38	0	9999,0	0
36	39	0	9999,0	0
36	40	0	9999,0	0
36	41	0	9999,0	0

Os valores de reatância iguais a zero e 9999,0 são utilizados pelo programa para reconhecer quando um ramo chaveável está com disjuntor fechado e aberto respectivamente.

Tabela A.3 – Resultados das grandezas das barras do modelo convencional sistema 30 barras

barra	tipo	tensão [V]	ângulo[graus]	P [MW]	Q
1	2	1,06	0	265,233	-11,8679
2	1	1,043	-5,04	18,3	12,0185
3	0	1,0141	-8,75	-2,4	-1,2
4	0	1,0041	-10,81	-7,6	-1,6
5	1	1,01	-14,65	-94,2	20,938
6	0	1,0046	-12,25	0	0
7	0	0,9989	-13,77	-22,8	-10,9
8	1	1,01	-13,,1	-30,0	24,209
9	0	1,0123	-15,81	0	0
10	0	0,9811	-17,73	-5,8	-1,9999
11	1	1,0820	-15,81	0	36,2601

12	0	1,0230	-16,52	-11,2	-7,5
13	1	1,0710	-16,52	0	36,7538
14	0	0,9779	-18,49	-6,2	-1,6
15	0	0,938	-18,96	-8,2	-2,5
16	0	0,9967	-17,25	-3,5	-1,8
17	0	0,9808	-17,84	-9,0	-5,8
18	0	0,9275	-18,99	-3,2	-9,0
19	0	0,9360	-19,12	-9,5	-3,4
20	0	0,9464	-18,85	-2,2	-0,7
21	0	0,9655	-18,26	-17,5	-11,2
22	0	0,9653	-18,25	0	0
23	0	0,9361	-19,02	-3,2	-1,6
24	0	0,9426	-18,69	-8,7	-6,7
25	0	0,9526	-18,2	0	0
26	0	0,9337	-18,68	-5,5	-2,3
27	0	0,9680	-17,6	0	0
28	0	1,0003	-12,93	0	0
29	0	0,9464	-18,98	-2,4	-0,9
30	0	0,9347	-19,97	-10,6	-1,9

Tabela A..4 – Resultado do fluxo de potência nos ramos no modelo convencional sistema 30 barras

De	Para	P_{km} [MW]	P_{mk} [MW]	Q_{km} [Mvar]	Q_{mk} [Mvar]
1	2	163,746	-159,121	-18,858	26,87
1	3	101,487	-97,309	6,99	3,89
2	4	12,508	-10,566	-16,636	13,371
3	4	94,909	-93,750	-5,09	7,562
2	5	89,469	-85,99	1,234	8,974
2	6	75,444	-72,401	0,55	4,764
4	6	56,793	-56,380	-17,124	17,654
5	7	-8,21	8,316	11,964	-13,753
6	7	31,379	-31,116	-3,752	2,853
6	8	30,078	-29,916	-21,811	21,465
6	9	30,312	-30,312	-2,8	4,71
6	10	16,924	-16,924	5,046	-3,328
9	11	0	0	-33,924	36,260
9	10	30,312	-30,312	29,214	-27,312
4	12	39,923	-39,923	-5,41	9,531
13	12	0	0	36,754	-35,105
14	12	-17,583	18,075	-8,533	9,556
16	12	-10,48	10,648	-8,165	8,518
14	15	11,383	-10,972	6,933	-6,562
16	17	6,98	-6,933	6,365	-6,193
18	15	-1,983	2,003	-3,5	3,541
18	19	-1,217	1,241	-5,5	5,548
19	20	-10,741	10,816	-8,948	9,099

10	20	13,294	-13,016	10,419	-9,799
10	17	2,068	-2,067	-0,389	0,393
10	21	17,394	-17,299	12,444	-12,088
10	22	8,679	-8,593	6,166	-5,99
21	22	-0,271	0,271	0,888	-0,887
23	15	-0,768	0,769	-0,519	0,521
22	24	8,322	-8,178	6,877	-6,653
23	24	-2,432	2,442	-1,081	1,103
24	25	-2,964	2,986	-1,149	1,187
25	26	3,551	-3,5	2,376	-2,3
25	27	-6,537	6,604	-3,537	3,691
28	27	19,921	-19,921	8,979	-7,089
27	29	6,206	-6,109	1,699	-1,516
27	30	7,112	-6,929	1,7	-1,356
29	30	3,709	-3,671	0,616	-0,544
8	28	-0,084	0,099	2,738	-7,015
6	28	20,088	-20,02	0,898	-1,964

Tabela A.5 - Resultados das grandezas das barras do modelo seção de barramento sistema 30 barras

barra	tipo	tensão [V]	ângulo[graus]	P [MW]	Q[Mvar]
1	2	1,06	0	265,233	-11,8679
2	1	1,043	-5,04	18,3	12,0185
3	0	1,0141	-8,75	-2,4	-1,2
4	0	1,0041	-10,81	-7,6	-1,6
5	1	1,01	-14,65	-94,2	20,938
6	0	1,0046	-12,25	0	0
7	0	0,9989	-13,77	-22,8	-10,9
8	1	1,01	-13,,1	-30,0	24,209
9	0	1,0123	-15,81	0	0
10	0	0,9811	-17,73	-5,8	-1,9999
11	1	1,0820	-15,81	0	36,2601
12	0	1,0230	-16,52	-11,2	-7,5
13	1	1,0710	-16,52	0	36,7538
14	0	0,9779	-18,49	-6,2	-1,6
15	0	0,938	-18,96	-8,2	-2,5
16	0	0,9967	-17,25	-3,5	-1,8
17	0	0,9808	-17,84	-9,0	-5,8
18	0	0,9275	-18,99	-3,2	-9,0
19	0	0,9360	-19,12	-9,5	-3,4
20	0	0,9464	-18,85	-2,2	-0,7
21	0	0,9655	-18,26	-17,5	-11,2
22	0	0,9653	-18,25	0	0
23	0	0,9361	-19,02	-3,2	-1,6
24	0	0,9426	-18,69	-8,7	-6,7
25	0	0,9526	-18,2	0	0

26	0	0,9337	-18,68	-5,5	-2,3
27	0	0,9680	-17,6	0	0
28	0	1,0003	-12,93	0	0
29	0	0,9464	-18,98	-2,4	-0,9
30	0	0,9347	-19,97	-10,6	-1,9
31	0	1,0	0	0	0
32	0	0,938	-18,96	0	0
33	0	0,938	-18,96	0	0
34	0	0,938	-18,96	0	0
35	0	1,0	0	0	0
36	0	1,0	0	0	0
37	0	1,023	-16,52	0	0
38	0	1,023	-16,52	0	0
39	0	1,023	-16,52	0	0
40	0	1,0	0	0	0
41	0	1,023	-16,52	0	

Tabela A..6 – Resultado do fluxo de potência nos ramos no modelo de seção de barramento sistema 30 barras

De	Para	P_{km} [MW]	P_{mk} [MW]	Q_{km} [Mvar]	Q_{mk} [Mvar]
1	2	163,746	-159,121	-18,858	26,87
1	3	101,487	-97,309	6,99	3,89
2	4	12,508	-10,566	-16,636	13,371
3	4	94,909	-93,750	-5,09	7,562
2	5	89,469	-85,99	1,234	8,974
2	6	75,444	-72,401	0,55	4,764
4	6	56,793	-56,380	-17,124	17,654
5	7	-8,21	8,316	11,964	-13,753
6	7	31,379	-31,116	-3,752	2,853
6	8	30,078	-29,916	-21,811	21,465
6	9	30,312	-30,312	-2,8	4,71
6	10	16,924	-16,924	5,046	-3,328
9	11	0	0	-33,924	36,260
9	10	30,312	-30,312	29,214	-27,312
4	37	39,923	-39,923	-5,41	9,531
13	38	0	0	36,754	-35,105
14	39	-17,583	18,075	-8,533	9,556
31	40	0	0	0	0
16	41	-10,48	10,648	-8,165	8,518
14	32	11,383	-10,972	6,933	-6,562
16	17	6,98	-6,933	6,365	-6,193
18	33	-1,983	2,003	-3,5	3,541
18	19	-1,217	1,241	-5,5	5,548
19	20	-10,741	10,816	-8,948	9,099
10	20	13,294	-13,016	10,419	-9,799
10	17	2,068	-2,067	-0,389	0,393

10	21	17,394	-17,299	12,444	-12,088
10	22	8,679	-8,593	6,166	-5,99
21	22	-0,271	0,271	0,888	-0,887
23	34	-0,768	0,769	-0,519	0,521
22	24	8,322	-8,178	6,877	-6,653
23	24	-2,432	2,442	-1,081	1,103
24	25	-2,964	2,986	-1,149	1,187
25	26	3,551	-3,5	2,376	-2,3
25	27	-6,537	6,604	-3,537	3,691
28	27	19,921	-19,921	8,979	-7,089
27	29	6,206	-6,109	1,699	-1,516
27	30	7,112	-6,929	1,7	-1,356
29	30	3,709	-3,671	0,616	-0,544
8	28	-0,084	0,099	2,738	-7,015
6	28	20,088	-20,02	0,898	-1,964
Fluxo de Potência nos ramos chaveáveis					
15	31	0		0	
15	32	-10,972		-6,562	
15	33	2,003		3,541	
15	34	0,769		0,521	
31	35	0		0	
32	35	0		0	
33	35	0		0	
34	35	0		0	
12	37	-39,923		9,531	
12	38	0		-35,105	
12	39	18,075		9,556	
12	40	0		0	
12	41	10,648		8,518	
36	37	0		0	
36	38	0		0	
36	39	0		0	
36	40	0		0	
36	41	0		0	

Anexo II: Dados e Resultados do Sistema de 24 barras do IEEE na Modelagem Nível Convencional e Nível de Seção de Barramento.

Tabela A.7 – Dados das barras sistema 24 barras

barra	tipo	tensão	ângulo	Pd	Qd	Pg	Qg	bshbar
1	2	1,05	0	0	0	0	0	0
2	1	1,05	0	0,97	0,2	1,67	0	0
3	0	1,0	0	1,8	0,37	0	0	0
4	0	1,0	0	0,74	0,15	0	0	0
5	0	1,0	0	0,71	0,14	0	0	0
6	0	1,0	0	1,36	0,28	0	0	0
7	1	1,075	0	1,25	0,25	2,5	0	0
8	0	1,0	0	1,71	0,35	0	0	0
9	0	1,0	0	1,75	0,36	0	0	0
10	0	1,0	0	1,95	0,4	0	0	0
11	0	1,0	0	0	0	0	0	0
12	0	1,0	0	0	0	0	0	0
13	1	1,025	0	2,65	0,54	5,41	0	0
14	0	1,0	0	0	0	0	0	0
15	1	1,025	0	3,17	0,64	1,9	0	0
16	0	1,0	0	1,0	0,2	0	0	0
17	0	1,0	0	0	0	0	0	0
18	1	1,025	0	3,33	0,68	3,5	0	0
19	0	1,0	0	1,81	0,37	0	0	0
20	0	1,0	0	1,28	0,26	0	0	0
21	1	1,025	0	0	0	3,5	0	0
22	1	1,025	0	0	0	2,5	0	0
23	1	1,025	0	0	0	5,05	0	0
24	0	1,0	0	0	0	0	0	0
Seções de Barra SE 14								
25	0	1,0	0	1,94	0,39	0	0	0
26	1	1,01	0	0	0	0	0	0
27	1	1,01	0	0	0	0	0	0
Seções de barra SE 16								
28	0	1,025	0	0	0	0	0	0
29	0	1,025	0	0	0	0	0	0
30	0	1,025	0	0	0	0	0	0
31	0	1,025	0	0	0	0	0	0
32	1	1,025	0	0	0	0,65	0	0

33	1	1,025	0	0	0	0,65	0	0
34	0	1,025	0	0	0	0	0	0

Tabela A.8 – Dados das linhas sistema 24 barras

na	nb	r [pu]	x[pu]	bshlin
1	2	0,026	0,139	0,4601
1	3	0,0546	2,112	0,572
1	5	0,0218	0,845	0,0229
2	4	0,0328	1,267	0,0343
2	6	0,0497	1,92	0,052
3	9	0,0308	1,19	0,0322
3	24	0,0023	0,839	0
4	9	0,0268	1,037	0,281
5	10	0,0228	0,883	0,239
6	10	0,0139	0,605	2,459
7	8	0,0159	0,614	0,0166
8	9	0,0427	1,651	0,0447
8	10	0,0427	1,651	0,0447
9	11	0,0023	0,839	0
9	12	0,0023	0,839	0
10	11	0,0023	0,839	0
10	12	0,0023	0,839	0
11	13	0,0016	0,476	0,099
11	14	0,0054	0,418	0,0879
12	13	0,0061	0,476	0,0999
12	23	0,0124	0,966	0,203
14	16	0,005	0,389	0,0818
13	23	0,0111	0,865	0,1818
15	16	0,0022	0,173	0,0364
15	21	0,0063	0,245	0
15	24	0,0067	0,519	0,1091
17	16	0,0033	0,259	0,0545
16	19	0,003	0,231	0,0485
17	18	0,0018	0,144	0,0303
17	22	0,0135	1,053	0,2212
18	21	0,003	0,130	0,0545
19	20	0,0025	0,198	0,04
20	23	0,0014	0,108	0,025
21	22	0,087	0,678	0,1424
Ramos chaveáveis				
14	25	0	0	0
14	27	0	0	0
25	26	0	0	0
26	27	0	9999,0	0

16	29	0	0	0
16	31	0	0	0
16	33	0	0	0
28	34	0	0	0
30	34	0	0	0
32	34	0	0	0
28	29	0	9999,0	0
30	31	0	9999,0	0

Tabela A.9- Resultado de grandeza das barras no modelo convencional sistema 24 barras

barra	tipo	tensão [V]	ângulo[graus]	P [MW]	Q[Mvar]
1	2	1,05	0	62,2931	-66,2848
2	1	1,05	-0,21	70,0	-39,8799
3	0	1,0095	-0,07	-180,0	-37,0
4	0	1,0213	-2,34	-74,0	-15,0
5	0	1,0524	-2,38	-71,0	-14,0
6	0	1,102	-5,01	-136,0	-28,0
7	1	1,075	0,69	125,0	39,963
8	0	1,0352	-2,92	-171,0	-35,0
9	0	1,0173	0,11	-175,0	-36,0
10	0	1,0709	-1,62	-195,0	-40,0
11	0	1,0204	5,3	0	0
12	0	1,0237	6,38	0	0
13	1	1,0250	10,63	276,0	-23,6094
14	1	1,01	6,97	-194,0	-33,7219
15	1	1,025	12,95	-127,0	105,3124
16	1	1,025	12,63	30,0	89,481
17	0	1,0245	16,33	0	0
18	1	1,0250	17,13	17,0	7,1385
19	0	1,0155	12,00	-181,0	-37,0
20	0	1,0186	13,39	-128,0	-26,0
21	1	1,025	17,75	350,0	8,1182
22	1	1,0250	25,71	250,0	-124,409
23	1	1,0250	14,89	505,0	-6,0227
24	0	1,0091	8,02	0	0

Tabela A.10 - Resultado do fluxo de potência nos ramos no modelo convencional sistema 24 barras

De	Para	P _{km} [MW]	P _{mk} [MW]	Q _{km} [Mvar]	Q _{mk} [Mvar]
1	2	6,417	-6,373	-37,313	-13,39
1	3	5,483	-5,295	-12,829	-47,122
1	5	50,393	-49,847	-16,142	15,728
2	4	35,487	-35,044	13,309	-15,276
2	6	40,846	-39,518	-39,799	39,061

3	9	-4,12	4,134	-7,14	3,888
3	24	-170,585	171,248	17,262	6,938
4	9	-38,956	39,403	0,276	-27,739
5	10	-21,153	21,301	-29,728	3,361
6	10	-96,482	98,322	-67,061	-215,265
7	8	125,0	-122,62	39,966	-32,623
8	9	-28,651	29,130	17,145	-20,0
8	10	-19,729	20,001	-19,522	15,615
9	11	-111,999	112,278	4,422	5,764
9	12	-135,669	136,078	3,43	11,502
10	11	-154,843	155,447	78,292	-56,268
10	12	-179,781	180,552	77,998	-49,903
11	13	-200,511	202,904	20,063	-11,745
11	14	-67,214	67,512	30,441	-37,194
12	13	-159,961	161,483	18,411	-17,015
12	23	-156,669	159,684	19,99	-17,798
14	16	-261,512	264,867	3,472	14,16
13	23	-88,387	89,235	5,151	-17,642
15	16	32,979	-32,955	-6,014	2,371
15	21	-333,156	340,421	100,727	-72,478
15	24	173,178	-171,248	10,599	-6,938
16	17	-256,227	258,347	40,317	-29,396
16	19	54,315	-54,195	32,633	-36,761
17	18	-100,06	100,233	7,887	-9,863
17	22	-158,287	161,651	21,509	-18,499
18	21	-83,233	83,442	16,821	-21,642
19	20	-126,805	127,194	-0,239	-0,811
20	23	-255,194	256,081	-25,189	29,417
21	22	-73,863	88,349	102,238	-105,910

Tabela A.11- Resultado de grandeza das barras no modelo seção de barramento sistema 24 barras.

barra	tipo	tensão [V]	ângulo[graus]	P [MW]	Q[Mvar]
1	2	1,05	0	62,2931	-66,2848
2	1	1,05	-0,21	70,0	-39,8799
3	0	1,0095	-0,07	-180,0	-37,0
4	0	1,0213	-2,34	-74,0	-15,0
5	0	1,0524	-2,38	-71,0	-14,0
6	0	1,102	-5,01	-136,0	-28,0
7	1	1,075	0,69	125,0	39,963
8	0	1,0352	-2,92	-171,0	-35,0
9	0	1,0173	0,11	-175,0	-36,0
10	0	1,0709	-1,62	-195,0	-40,0
11	0	1,0204	5,3	0	0
12	0	1,0237	6,38	0	0
13	1	1,0250	10,63	276,0	-23,6094

14	1	1,01	6,97	-194,0	-33,7219
15	1	1,025	12,95	-127,0	105,3124
16	1	1,025	12,63	30,0	89,481
17	0	1,0245	16,33	0	0
18	1	1,0250	17,13	17,0	7,1385
19	0	1,0155	12,00	-181,0	-37,0
20	0	1,0186	13,39	-128,0	-26,0
21	1	1,025	17,75	350,0	8,1182
22	1	1,0250	25,71	250,0	-124,409
23	1	1,0250	14,89	505,0	-6,0227
24	0	1,0091	8,02	0	0
25	0	1,01	6,97	-194,0	-39,0
26	1	1,01	6,97	0	5,2781
27	0	1,01	6,97	0	0
28	0	1,025	12,63	0	0
29	0	1,025	12,63	0	0
30	0	1,0250	12,63	0	0
31	0	1,0250	12,63	0	0
32	1	1,0250	12,63	65,0	54,7406
33	1	1,0250	12,63	65,0	54,7406
34	0	1,0250	12,63	0	0

Tabela A.12 - Resultado do fluxo de potência nos ramos no modelo seção de barramento sistema 24 barras

De	Para	P_{km} [MW]	P_{mk} [MW]	Q_{km} [Mvar]	Q_{mk} [Mvar]
1	2	6,417	-6,373	-37,313	-13,39
1	3	5,483	-5,295	-12,829	-47,122
1	5	50,393	-49,847	-16,142	15,728
2	4	35,487	-35,044	13,309	-15,276
2	6	40,846	-39,518	-39,799	39,061
3	9	-4,12	4,134	-7,14	3,888
3	24	-170,585	171,248	17,262	6,938
4	9	-38,956	39,403	0,276	-27,739
5	10	-21,153	21,301	-29,728	3,361
6	10	-96,482	98,322	-67,061	-215,265
7	8	125,0	-122,62	39,966	-32,623
8	9	-28,651	29,130	17,145	-20,0
8	10	-19,729	20,001	-19,522	15,615
9	11	-111,999	112,278	4,422	5,764
9	12	-135,669	136,078	3,43	11,502
10	11	-154,843	155,447	78,292	-56,268
10	12	-179,781	180,552	77,998	-49,903
11	13	-200,511	202,904	20,063	-11,745
11	14	-67,214	67,512	30,441	-37,194
12	13	-159,961	161,483	18,411	-17,015
12	23	-156,669	159,684	19,99	-17,798

27	28	-261,512	264,867	3,472	14,16
13	23	-88,387	89,235	5,151	-17,642
15	30	32,979	-32,955	-6,014	2,371
15	21	-333,156	340,421	100,727	-72,478
15	24	173,178	-171,248	10,599	-6,938
31	17	-256,227	258,347	40,317	-29,396
29	19	54,315	-54,195	32,633	-36,761
17	18	-100,06	100,233	7,887	-9,863
17	22	-158,287	161,651	21,509	-18,499
18	21	-83,233	83,442	16,821	-21,642
19	20	-126,805	127,194	-0,239	-0,811
20	23	-255,194	256,081	-25,189	29,417
21	22	-73,863	88,349	102,238	-105,910
Fluxos de potência nos ramos chaveáveis					
14	25	194,0		33,722	
14	27	-261,512		3,472	
25	26	0		-5,278	
26	27	0		0	
16	29	54,315		32,633	
16	31	-256,227		40,317	
16	33	101,912		-92,95	
28	34	-264,867		-14,16	
30	34	32,955		-2,371	
32	34	231,912		16,531	
32	33	-166,912		38,209	
28	29	0		0	
30	31	0		0	

Referências Bibliográficas

- [1] Alsaç,O., Vempati, N., Stot, B., Monticelli, A, “ **Generalized State Estimation**”, IEEE Trans. on Power Systems, 13(3):1069-1075, Agosto, 1998.
- [2] Clements, K. A, Simões Costa, A. J., “ **Topology Error Identification Using Normalized Lagrange Multipliers**”, IEE Trans. on Power Systems, 13(2):347 -353, Maio , 1998.
- [3] Elgerd, Olle Ingemar, “ **Introdução a teoria de sistemas de energia elétrica** ”, McGraw-Hill do Brasil, 1977.
- [4] Gomez Expósito,A. et all, “ **Análisis y Operación de Si stemas de Energia Eléctrica**”, Editora McGraw Hill, 2002
- [5] Granville, W.A., Smith P.F., Longley, “ **Elementos de cálculo diferencial e Integral**”, Editora Científica, 1961.
- [6] Jardim,J.L.A., Takahata,A.Y., Taranto, G.N., Schilling, M.Th., “ **Fluxo de Potência Robusto:Formulação Dinâmica**” trabalho inscrito no XVIII SNPTEE, Outubro 2005.
- [7] Lourenço, E.M., “ **Análise de Observabilidade e Identificação de Erros de Topologia na Estimação de Estados Generalizada** ”, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, Dezembro ,2001.
- [8] Lourenço, E. M., Clements, K.A., Simões Costa, A.J., “ **Geometricallt-Based Hypothesis Testing fot Toplogy Error Identification** ”, Artigo aceito para apresentação no 14° PSCC – Power System Computation Conference, Setembro, 2002
- [9] Lourenço, E. M. and Simões Costa, A. J. A. and Clements, K. A.. “ **Bayesian-Based Hypothesis Testing for Topological Error Identification in Generalized State Estimation**”. IEEE Trans. on Power System, 19(2), pp 1206 -1215, Maio 2004.
- [10] Monticelli, Alcir José, “ **Fluxo de carga em redes de energia elétrica** ”, Edgard Blücher, 1983.
- [11] Monticelli,A., Garcia,A., “ **Modeling Zero Impedance Branches in Power Systems State Estimation**”, IEEE/PES Winter Meeting, 8(1):364-370, Jan.1991.
- [12] Monticelli,A., “ **The Impact of Modeling Short Circuits Branches in State Estimation**”. IEEE Trans. On Power Systems, 8(1):364-370, Feb. 1993.
- [13] Monticelli,A.,” **Modeling Circuit Breakers in Weightes Least Squares State Estimation**”, IEEE Transactions on Power Systems, 8(3):1143-1149, Agosto,1993.
- [14] Monticelli, A., Garcia, A., “ **Introdução a Sistemas de Energia Elétrica**”, Editora da Unicamp, 2003.

[15] Simões,A.C., Lourenço,E.M., Clements,A.K,. “ **Power System Topological Observability Analysis Including Switching Branches**”. IEEE Trans. on Power Systems, 17(2),pp.250-256, Maio 2001.

[16] Stevenson Jr.,W.D.”**Elementos de Análise de Sistemas de Potência** ”,Editora McGraw-Hill do Brasil,1978.