

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

CAIO MARINHO AMERICO

MODELAGEM DE RAMOS CHAVEÁVEIS PARA FLUXO DE
POTÊNCIA EM NÍVEL DE SUBESTAÇÃO

NITERÓI

2021

CAIO MARINHO AMERICO

**MODELAGEM DE RAMOS CHAVEÁVEIS PARA FLUXO DE
POTÊNCIA EM NÍVEL DE SUBESTAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Corpo Docente do Departamento de Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal Fluminense, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheira(o) Eletricista.

Orientador(a):

Prof. Dr. Andre Abel Augusto

Niterói, RJ

2021

Ficha catalográfica automática - SDC/BEE
Gerada com informações fornecidas pelo autor

A512m Americo, Caio Marinho
Modelagem de ramos chaveáveis para fluxo de potência em nível de subestação / Caio Marinho Americo ; Andre Abel Augusto, orientador. Niterói, 2021.
128 f.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica)-Universidade Federal Fluminense, Escola de Engenharia, Niterói, 2021.

1. Fluxo de potência. 2. Subestação. 3. Python (Linguagem de programação de computador). 4. Produção intelectual. I. Augusto, Andre Abel, orientador. II. Universidade Federal Fluminense. Escola de Engenharia. III. Título.

CDD -

CAIO MARINHO AMERICO

**MODELAGEM DE RAMOS CHAVEÁVEIS PARA FLUXO DE
POTÊNCIA EM NÍVEL DE SUBESTAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Corpo Docente do Departa-
mento de Engenharia Elétrica da Escola de
Engenharia da Universidade Federal Flumi-
nense, como parte dos requisitos necessários
à obtenção do título de Engenheira(o) Ele-
tricista.

Aprovado em 08 de maio de 2021, com nota 8.9, pela banca examinadora.

BANCA EXAMINADORA

Andre Abel Augusto.

Prof. Dr. Andre Abel Augusto – Orientador

UFF

Rainer Zanghi

2021.05.10 16:31:
52-03'00'

Prof. Dr. Rainer Zanghi – Membro Convidado

Marcio Andre Ribeiro Guimaraens

Prof. Dr. Márcio André Ribeiro Guimaraens – Membro Convidado

UFF

Niterói

2021

À Deus que tem sido gracioso comigo, toda honra e glória a Seu nome.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus por sua graça e presença, por me dar a oportunidade de, por meio desse curso e desse trabalho, atuar em sua obra na criação.

Agradeço à minha mãe Andréa, à minha irmã Isabela e à meu irmão Vinícius, por me apoiarem no que foi necessário e serem companhia em todos os momentos, e de maneira especial à meu pai Marcio que me inspirou a seguir a área da engenharia elétrica.

Agradeço ao meu professor e orientador Andre Abel Augusto que muito me ensinou durante todo o meu percurso na faculdade.

Agradeço aos amigos que fiz durante este curso, por serem companhia e por me trazerem alegria em todos os momentos. Nesse âmbito, agradeço especialmente à Matheus Tardin, Thales Quintino, Daniel Tavares e Matheus Coutinho; eles trouxeram leveza para o meu dia-a-dia na faculdade, coisa que nem imagino como posso retribuir.

Agradeço aos meus amigos da Jordão Energia que contribuíram para meu crescimento. De maneira especial agradeço à Saulo José da Silva, a Lora Galeano e Vinicius Neves.

"Deus fez tudo formoso no seu devido tempo. Também pôs a eternidade no coração do ser humano, sem que este possa descobrir as obras que Deus fez desde o princípio até o fim. Sei que não há nada melhor para o ser humano do que alegrar-se e aproveitar a vida ao máximo."

Eclesiastes 3:11-12

RESUMO

A modelagem dos sistemas elétricos para os estudos de fluxo de potência contam com a representação das subestações de maneira simplificada, considerando-as apenas como uma barra. A natureza dos métodos numéricos utilizados para a resolução de um sistema não linear, que um problema de fluxo de potência original, faz com que a inclusão de impedâncias de valores extremos possa ocasionar problemas numéricos e de convergência; de maneira que a representação do arranjo interno de uma subestação com seus ramos chaveáveis (disjuntores e chaves seccionadoras) se torne pouco prático. Este trabalho apresenta as modificações necessárias na elaboração de um problema de fluxo de potência e na sua resolução, por meio do método de Newton-Raphson, para que seja possível representar uma subestação com seu arranjo interno sem incorrer em erros. A metodologia apresentada é implementada e testada por meio de um programa desenvolvido em Python.

Palavras-Chave: Sistema Elétrico de Potência, Fluxo de Potência, Fluxo de Potência em Nível de Subestação, Newton-Raphson, Subestação, Ramos Chaveáveis, Python

ABSTRACT

The modeling of electrical systems for power flow studies relies on the representation of substations in a simplified way, considering them as a single bus. The nature of the numerical methods used to solve a nonlinear system, which a power flow problem originates, means that the inclusion of impedances of extreme values can cause numerical and convergence problems; so that the representation of the internal model of a substation with its switching branches (circuit breakers and switches) becomes impractical. This work presents the necessary modifications in the elaboration of a power flow problem and in its resolution, using the Newton-Raphson method, so that it is possible to represent a substation with its internal model without incurring in errors. The presented methodology is implemented and tested through a program developed in Python.

Keywords: Electrical Power System, Power Flow, Power Flow at Substation Level, Newton-Raphson, Substation, Switching Branches, Python

LISTA DE FIGURAS

1	Modelo de uma Linha de Transmissão	4
2	Modelo de um Transformador em Fase	5
3	Modelo de um Transformador em Fase	6
4	Diagrama Unifilar de uma Subestação de Arranjo Barramento Simples . .	15
5	Diagrama Unifilar de uma Subestação de Arranjo Barramento Principal e de Transferência	15
6	Diagrama Unifilar de uma Subestação de Arranjo Anel	16
7	Diagrama Unifilar de uma Subestação de Arranjo Barramento Duplo a Quatro Chaves	17
8	Diagrama Unifilar de uma Subestação de Arranjo Disjuntor e Meio	17
9	Diagrama Unifilar de uma Subestação de Arranjo Barramento Dois Dis- juntores	18
10	Sistema de Exemplo	25
11	Sistema de Exemplo Expandido	26
12	Fluxograma da Aplicação Desenvolvida em Python	34
13	Diagrama Unifilar do Sistema IEEE 14 Barras	36
14	Diagrama Unifilar do Sistema IEEE 14 Barras - Subestação Detalhada . .	38
15	Diagrama Unifilar do Sistema IEEE 30 Barras	40
16	Diagrama Unifilar do Sistema IEEE 30 Barras - Subestações Detalhadas .	42
17	Diagrama Unifilar do Sistema IEEE 57 Barras	44
18	Diagrama Unifilar do Sistema IEEE 57 Barras - Subestações Detalhadas .	46
19	Exemplo de um caminho fechado formado por ramos chaveáveis	50
20	Diagrama Unifilar da Subestação 4	70
21	Diagrama Unifilar da Subestação 12	70
22	Diagrama Unifilar da Subestação 15	71
23	Diagrama Unifilar da Subestação 1	71
24	Diagrama Unifilar da Subestação 10	71
25	Diagrama Unifilar da Subestação 19	72
26	Diagrama Unifilar da Subestação 42	72

LISTA DE TABELAS

1	Parâmetros de Barra - Sistema de Exemplo	25
2	Parâmetros de Circuito - Sistema de Exemplo	25
3	Parâmetros de Barra - Sistema de Exemplo Expandido	26
4	Parâmetros de Circuito - Sistema de Exemplo Expandido	26
5	Erros Relativos Máximos - IEEE 14 Barras	37
6	Erros Absolutos Máximos - IEEE 14 Barras	37
7	Erros Relativos Máximos - IEEE 14 Barras - Subestação Detalhada	39
8	Erros Absolutos Máximos - IEEE 14 Barras - Subestação Detalhada	39
9	Erros Relativos Máximos - IEEE 30 Barras	41
10	Erros Absolutos Máximos - IEEE 30 Barras	41
11	Erros Relativos Máximos - IEEE 30 Barras - Subestação Detalhada	43
12	Erros Absolutos Máximos - IEEE 30 Barras - Subestação Detalhada	43
13	Erros Relativos Máximos - IEEE 57 Barras	45
14	Erros Absolutos Máximos - IEEE 57 Barras	45
15	Erros Relativos Máximos - IEEE 57 Barras - Subestação Detalhada	47
16	Erros Absolutos Máximos - IEEE 57 Barras - Subestação Detalhada	47
17	Tamanho da Jacobiana - Casos Testes	48
18	Dados das Simulações	48
19	Parâmetros de Barra - IEEE 14 Barras	51
20	Parâmetros de Circuito - IEEE 14 Barras	51
21	Parâmetros de Barra - IEEE 14 Barras - Nível de Subestação	52
22	Parâmetros de Circuito - IEEE 14 Barras - Nível de Subestação	53
23	Parâmetros de Barra - IEEE 30 Barras	54
24	Parâmetros de Circuito - IEEE 30 Barras	55
25	Parâmetros de Barra - IEEE 30 Barras - Nível de Subestação	56
26	Parâmetros de Circuito - IEEE 30 Barras - Nível de Subestação	57
27	Parâmetros de Barra - IEEE 57 Barras	59
28	Parâmetros de Circuito - IEEE 57 Barras	61
29	Parâmetros de Barra - IEEE 57 Barras - Nível de Subestação	63
30	Parâmetros de Circuito - IEEE 57 Barras - Nível de Subestação	66

31	Resultados de Barra - IEEE 14 Barras	73
32	Resultados de Circuito - IEEE 14 Barras	73
33	Resultados de Barra - IEEE 14 Barras - ANAREDE	74
34	Resultados de Circuito - IEEE 14 Barras - ANAREDE	74
35	Resultados de Barra - IEEE 14 Barras - Nível de Subestação	75
36	Resultados de Circuito - IEEE 14 Barras - Nível de Subestação	76
37	Resultados de Barra - IEEE 14 Barras - Nível de Subestação - ANAREDE	77
38	Resultados de Circuito - IEEE 14 Barras - Nível de Subestação - ANAREDE	78
39	Resultados de Barra - IEEE 30 Barras	79
40	Resultados de Circuito - IEEE 30 Barras	80
41	Resultados de Barra - IEEE 30 Barras - ANAREDE	81
42	Resultados de Circuito - IEEE 30 Barras - ANAREDE	82
43	Resultados de Barra - IEEE 30 Barras - Nível de Subestação	83
44	Resultados de Circuito - IEEE 30 Barras - Nível de Subestação	85
45	Resultados de Barra - IEEE 30 Barras - Nível de Subestação - ANAREDE	86
46	Resultados de Circuito - IEEE 30 Barras - Nível de Subestação - ANAREDE	88
47	Resultados de Barra - IEEE 57 Barras	90
48	Resultados de Circuito - IEEE 57 Barras	91
49	Resultados de Barra - IEEE 57 Barras - ANAREDE	94
50	Resultados de Circuito - IEEE 57 Barras - ANAREDE	96
51	Resultados de Barra - IEEE 57 Barras - Nível de Subestação	98
52	Resultados de Circuito - IEEE 57 Barras - Nível de Subestação	100
53	Resultados de Barra - IEEE 57 Barras - Nível de Subestação - ANAREDE	104
54	Resultados de Circuito - IEEE 57 Barras - Nível de Subestação - ANAREDE	106

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
IEEE	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
CEPEL	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
ANAREDE	Programa Análise de Redes Elétricas
Y_{barra}	Matriz de Admitâncias
SE	Subestação
npq	Número de Barras PQ
npv	Número de Barras PV
nrc	Número de Ramos Chaveáveis
nrcf	Número de Ramos Chaveáveis Fechados
nrca	Número de Ramos Chaveáveis Abertos
fc	Fechado
ab	Aberto

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	OBJETIVOS	2
1.2	ESTRUTURA DO TRABALHO	3
2	FLUXO DE POTÊNCIA EM SISTEMAS ELÉTRICOS	4
2.1	MATRIZ DE ADMITÂNCIAS	4
2.2	FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DE FLUXO DE POTÊNCIA	6
2.3	MÉTODO DE NEWTON-RAPHSON PARA RESOLUÇÃO DE SISTEMAS NÃO-LINEARES	9
2.4	MÉTODO DE NEWTON-RAPHSON PARA RESOLUÇÃO DE FLUXO DE POTÊNCIA	11
3	FLUXO DE POTÊNCIA EM NÍVEL DE SUBESTAÇÃO	14
3.1	ARRANJOS POSSÍVEIS DE SUBESTAÇÕES	14
3.1.1	Barramento Simples	14
3.1.2	Barramento Principal e de Transferência	15
3.1.3	Anel	16
3.1.4	Barramento Duplo a Quatro Chaves	16
3.1.5	Disjuntor e Meio	17
3.1.6	Barramento Dois Disjuntores	18
3.2	RAMOS CHAVEÁVEIS	18
3.3	FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DE FLUXO DE POTÊNCIA EM NÍVEL DE SUBESTAÇÃO	19
3.4	MÉTODO DE NEWTON-RAPHSON PARA RESOLUÇÃO DE FLUXO DE POTÊNCIA EM NÍVEL DE SUBESTAÇÃO	21
3.5	EXEMPLO DE PROBLEMA DE FLUXO DE POTÊNCIA EM NÍVEL DE SUBESTAÇÃO	24

3.6	APLICAÇÃO DESENVOLVIDA EM PYTHON	32
4	TESTES E RESULTADOS	35
4.1	PRIMEIRO TESTE - IEEE 14 BARRAS	36
4.1.1	Sistema Elétrico Base	36
4.1.2	Sistema com Subestação Detalhada	38
4.2	SEGUNDO TESTE - IEEE 30 BARRAS	40
4.2.1	Sistema Elétrico Base	40
4.2.2	Sistema com Subestações Detalhadas	42
4.3	TERCEIRO TESTE - IEEE 57 BARRAS	44
4.3.1	Sistema Elétrico Base	44
4.3.2	Sistema com Subestações Detalhadas	46
4.4	ANÁLISE COMPUTACIONAL	47
5	CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS	49
5.1	TRABALHOS FUTUROS	49
	ANEXOS	51
A	PARÂMETROS DA REDE	51
A.1	IEEE 14 BARRAS - PARÂMETROS	51
A.2	IEEE 14 BARRAS - NÍVEL DE SUBESTAÇÃO - PARÂMETROS	52
A.3	IEEE 30 BARRAS - PARÂMETROS	54
A.4	IEEE 30 BARRAS - NÍVEL DE SUBESTAÇÃO - PARÂMETROS	56
A.5	IEEE 57 BARRAS - PARÂMETROS	59
A.6	IEEE 57 BARRAS - NÍVEL DE SUBESTAÇÃO - PARÂMETROS	63
B	DIAGRAMAS DAS SUBESTAÇÕES EXPANDIDAS	70
B.1	IEEE 14 BARRAS - NÍVEL DE SUBESTAÇÃO	70

B.2	IEEE 30 BARRAS - NÍVEL DE SUBESTAÇÃO	70
B.3	IEEE 57 BARRAS - NÍVEL DE SUBESTAÇÃO	71
C	RESULTADOS COMPLETOS DOS TESTES	73
C.1	IEEE 14 BARRAS - RESULTADOS	73
C.2	IEEE 14 BARRAS - NÍVEL DE SUBESTAÇÃO - RESULTADOS	75
C.3	IEEE 30 BARRAS - RESULTADOS	78
C.4	IEEE 30 BARRAS - NÍVEL DE SUBESTAÇÃO - RESULTADOS	83
C.5	IEEE 57 BARRAS - RESULTADOS	89
C.6	IEEE 57 BARRAS - NÍVEL DE SUBESTAÇÃO - RESULTADOS	98
	REFERÊNCIAS	111

1 INTRODUÇÃO

No contexto de sistemas elétricos de potência, o estudo de fluxo de potência é de extrema importância para conhecer as condições operativas da rede. A modelagem utilizada nesse tipo de problema considera cada subestação como uma única barra do sistema, fornecendo informações concisas sobre a mesma, como um valor geral para o módulo e ângulo de tensão da subestação e apenas as entradas e saídas de potência ativa e reativa.

Cada subestação, porém, é constituída de um arranjo próprio. Esses arranjos são compostos por ramos chaveáveis, disjuntores e chaves seccionadoras, que conectam entradas, saídas, gerações, cargas, equipamentos e trechos de barramentos entre si. Caso a subestação seja representada com esses detalhes no problema de fluxo, será possível monitorar os valores de módulo e ângulo de tensão e potência ativa e reativa de cada local interno da mesma. Porém, os ramos chaveáveis devem ser descritos como impedâncias nula, quando fechados, ou infinita, quando abertos; valores assim, se inclusos na formulação de fluxo de potência, originam problemas numéricos.

No âmbito dos estudos de projeto básico do ONS (ONS, 2013), uma análise necessária é a de fluxo de barramento, com o intuito de verificar a máxima potência que flui pelos ramos internos da subestação, com a finalidade de dimensionar seus condutores. Esse tipo de estudo exige a representação de ramos chaveáveis no contexto de fluxo de potência. Em geral, utiliza-se ramos com impedâncias baixas (próximas a 0.00001 pu de reatância) para ramos fechados, e circuitos desligados para ramos abertos. Uma modelagem, porém, que de fato modela os ramos chaveáveis forneceria um resultado de maneira correta, sem o risco de problema numéricos e sem a necessidade de modificações na matriz de admitâncias da rede em cada situação de chaveamento.

Em outro âmbito, estudos de chaveamento corretivo levam em consideração a possibilidade de abertura ou fechamento de ramos chaveáveis de subestações para resolução de problemas de sobrecarga de linhas de transmissão e transformadores. Nesse casos, os disjuntores são representados como duas reatâncias de impedâncias opostas em série, com a adição de uma barra entre essas reatâncias (Mazi, Wollenberg, e Hesse, 1986); dessa forma, cada disjuntor da rede levará a inclusão de mais uma barra no sistema. Caso esse estudo fosse feito a partir de um fluxo de potência que já considera os ramos chaveáveis da rede, esse tipo de problema não ocorreria.

Dessa forma, uma metodologia que engloba no problema de fluxo os ramos chaveáveis de uma subestação, sem incorrer em problemas numéricos, é apresentada. Essa metodologia não inclui os valores de impedância desses ramos no problema, mas considera seus valores de fluxo de potência ativa e reativa como novas variáveis de estado do sistema.

No contexto de estimação de estado, na década de 90, há as primeiras propostas de modelagem de ramos de impedância nula, (Monticelli e Garcia, 1991) e (Monticelli, 1993). Essa modelagem considera as potências ativa e reativa desses ramos como variáveis de estado do problema e adiciona equações de diferença angular e queda de tensão, entre as barras que são conectadas por esses ramos, como medições nulas.

Após alguns anos, um método de estimação de estado generalizada é proposto (Alsac, Vempati, Stott, e Monticelli, 1998), onde os ramos chaveáveis, de maneira geral são representados. Essa modelagem continua considerando as potências ativa e reativa desses ramos como variáveis de estado, porém, além das equações nulas de diferença angular e queda de tensão para ramos fechados (impedância zero), equações nulas de fluxo são acrescentadas como pseudo medições para ramos abertos.

Com base nisso, métodos de processamento de erros de topologia passam a ser desenvolvidos, (Korres e Katsikas, 2002), (Clements e Costa, 1998), (Exposito e de la Villa Jaen, 2001) e (Vempati, Silva, Alsac, e Stott, 2005). Subsequentemente, em (Lourenço, Simões Costa, e Ribeiro, 2010), essa mesma modelagem dos ramos chaveáveis é proposta para utilização em problema de fluxo de potência, sendo esta a principal inspiração desse trabalho.

1.1 OBJETIVOS

Esse trabalho tem como objetivo descrever, testar e validar a modelagem de ramos chaveáveis no sistema elétrico, em nível de subestação, para o problema de fluxo de potência. Para isso uma aplicação foi desenvolvida em Python, onde realizou-se testes nos sistemas IEEE 14, 30 e 57 barras. Para validar esse resultados, os mesmos casos foram modelados e testados no ANAREDE.

De maneira detalhada, este trabalho irá apresentar:

- A formulação básica do problema de fluxo de potência e sua resolução pelo método de Newton-Raphson;
- Diferentes tipos de arranjo de subestação onde os ramos chaveáveis são explícitos;

- A formulação estendida do problema de fluxo de potência considerando a inclusão de ramos chaveáveis com novas variáveis de estado;
- As modificações necessárias na construção da matriz jacobiana para resolução pelo método de Newton-Raphson;
- Um programa, desenvolvido em Python, para resolução de fluxo de potência normal e estendido;
- Testes com sistemas base, de maneira a validar o programa elaborado.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

O Capítulo 1 apresenta a introdução do problema a ser atacado por este trabalho, assim como seus objetivos e sua estrutura.

O Capítulo 2 apresenta a exposição e explicação do problema convencional de fluxo de potência, o método de Newton-Raphson para solução de sistemas não-lineares e sua aplicação ao problema de fluxo.

O Capítulo 3 apresenta a modelagem detalhada de subestações, seus principais arranjos, o que são os ramos chaveáveis e como serão representados, a formulação do problema de fluxo de potência em nível de subestação, as diferenças entre esse e o problema convencional e as adaptações que devem ser feitas no método de solução.

O Capítulo 4 apresenta os testes realizados de fluxo de potência em nível de subestação, considerando três casos testes diferente, e seus resultados.

O Capítulo 5 apresenta as conclusões desse trabalho assim como possibilidades de trabalhos futuros.

O Capítulo A apresenta a primeira parte dos anexos deste trabalho, onde estão apresentados todos os dados base dos sistemas teste utilizados.

O Capítulo B apresenta a segunda parte dos anexos deste trabalho, onde estão apresentadas as figuras das representações das subestações expandidas de cada caso teste.

O Capítulo C apresenta a terceira parte dos anexos deste trabalho, onde estão apresentados os resultados completos dos testes realizados no Capítulo 4.

2 FLUXO DE POTÊNCIA EM SISTEMAS ELÉTRICOS

Um sistema elétrico de potência é constituído por subestações, sejam elas geradoras ou apenas de transmissão, e suas conexões. A modelagem padrão para tais sistemas, (Grainger e Stevenson, 1994), representa cada subestação como um único barramento (ou apenas barra) e suas conexões como linhas de transmissão ou transformadores que conectam dois barramentos entre si.

O problema de fluxo de potência demonstra a relação entre os componentes de um sistema em regime permanente. Essas relações são descritas de acordo com as tensões e ângulos de barra; a partir dessas grandezas, é possível calcular os valores de fluxo de potência, a quantidade e direção de potência ativa e reativa, que passa em cada ramo do sistema.

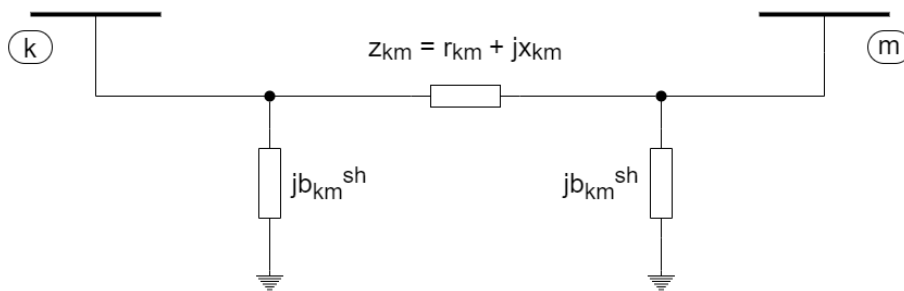
Esta seção elabora a construção e resolução do problema convencional de fluxo de potência em sistemas elétricos.

2.1 MATRIZ DE ADMITÂNCIAS

A matriz de admitâncias Y_{barra} de um sistema elétrico representa as conexões entre as subestações da rede através de seus parâmetros. Essas conexões podem ser realizadas por meio de linhas de transmissão ou transformadores, levando em conta componentes como reatores *shunt* de linha e de barra.

Os parâmetros para linhas de transmissão, utilizados na construção da Y_{barra} , se baseiam em seu modelo , como demonstrado na Figura 1.

Figura 1 Modelo de uma Linha de Transmissão



Fonte: Autoria Própria, com base em Grainger e Stevenson (1994)

Os valores que, comumente, descrevem os parâmetros série desse modelo são de impedância. Para os propósitos de elaboração da Y_{barra} , é necessário transformá-los em admitância, como o próprio nome da matriz indica. O valor da admitância do modelo de linha de transmissão é calculado conforme indicado nas Equações (1) e (2).

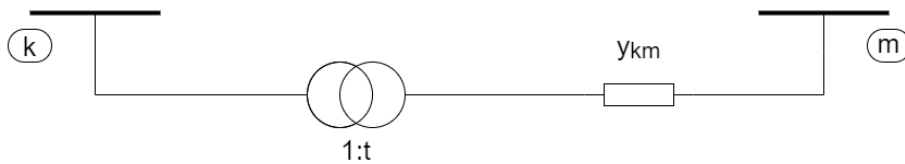
$$y_{km} = g_{km} + jb_{km} = Z_{km}^{-1} = \frac{r_{km}}{r_{km}^2 + X_{km}^2} + j \frac{X_{km}}{r_{km}^2 + X_{km}^2} \quad (1)$$

Onde g indica a condutância e b indica a susceptância, conforme indica abaixo:

$$g_{km} = \frac{r_{km}}{r_{km}^2 + X_{km}^2} \quad b_{km} = \frac{X_{km}}{r_{km}^2 + X_{km}^2} \quad (2)$$

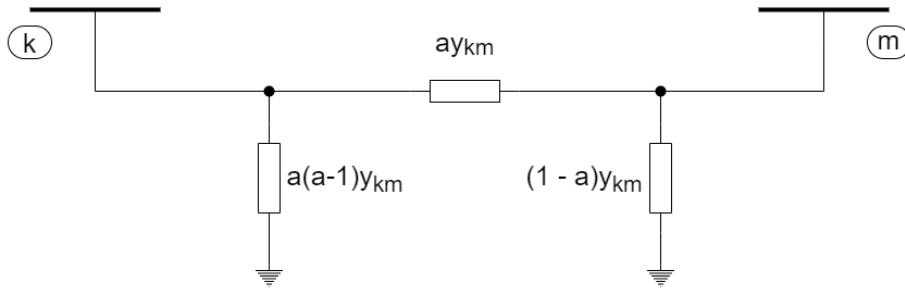
No que diz respeito aos transformadores eles podem ser em fase, defasadores puros ou defasadores (Monticelli, 1983), com modelo de acordo com o indicado na Figura 2.

Figura 2 Modelo de um Transformador em Fase



Fonte: Autoria Própria, com base em Grainger e Stevenson (1994)

Para os transformadores em fase, o valor da constante t , que representa a relação do transformador, é dada por um número real, aqui indicado como $t = a$. Isso indica a possibilidade do transformador de controlar o fluxo de potência reativa através do ramo, resultando no controle de suas tensões terminais (conquanto não sendo rígidas), de acordo com o valor de a ser menor ou maior que 1. No caso de $a = 1$ o transformador é representado por apenas uma admitância (Monticelli, 1983). A Figura 3 indica o modelo de um transformador em fase.

Figura 3 Modelo de um Transformador em Fase

Fonte: Autoria Própria, com base em Grainger e Stevenson (1994)

Já para os transformadores defasadores, o valor de t é um número complexo de forma $t = ae^j$. Um transformador defasador puro ($t = e^j$) pode controlar o fluxo de potência ativa através do ramo, enquanto o defasador ($t = ae^j$) pode controlar o fluxo de potência tanto ativo quanto reativo através do ramo (Monticelli, 1983).

Para os propósitos deste estudo, apenas transformadores em fase serão utilizados, geralmente considerando $a = 1$. Nesse caso, o transformador é representado apenas por uma impedância/admitância série.

Considerando, então, os modelos de linha de transmissão e transformadores apresentados, a construção da Y_{barra} se dá na forma de uma matriz quadrada $N \times N$, onde N é o número de barras do sistema. Os elementos diagonais da matriz são descritos pela Equação (3), enquanto os elementos não-diagonais são descritos pela Equação (4).

$$y_{kk} = \sum_{m \in \kappa} \frac{r_{km}}{r_{km}^2 + x_{km}^2} + j \left(\frac{x_{km}}{r_{km}^2 + x_{km}^2} + \frac{b_{km}^{sh}}{2} + b_k \right) \quad (3)$$

$$y_{km} = \left(\frac{r_{km}}{r_{km}^2 + x_{km}^2} \quad j \frac{x_{km}}{r_{km}^2 + x_{km}^2} \right) \quad (4)$$

Onde:

- b_k é a susceptância *shunt* da barra em questão.
- κ é o conjunto de barras que se conecta à barra k .

2.2 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DE FLUXO DE POTÊNCIA

Para cada barra de um sistema elétrico, quatro variáveis diferentes são atribuídas:

- V sendo a módulo da tensão complexa da barra;
- θ sendo o valor do ângulo da tensão complexa da barra;
- P sendo injeção total de potência ativa na barra;
- Q sendo injeção total de potência reativa na barra.

Para a formulação do problema de Fluxo de Potência, as barras do sistema são divididas em três tipos diferentes que representam quais variáveis do problema serão consideradas como parâmetros iniciais e quais serão incógnitas (Monticelli, 1983). Esses tipos são:

- Barras do tipo PQ representam barras de carga, onde os valores de injeção de potência ativa (P) e reativa (Q) são dados iniciais e os valores de módulo da tensão (V) e ângulo da tensão (θ) são calculados. Usualmente, são as barras mais comuns de um sistema;
- Barras do tipo PV representam barras de geração, onde os valores de injeção de potência ativa (P) e módulo da tensão (V) são dados iniciais e os valores de injeção de potência reativa (Q) e ângulo da tensão (θ) são calculados. Essas barras representam, também, compensadores síncronos, onde o valor inicial de potência ativa será $P = 0$;
- Barras do tipo $V\theta$ tem os valores de módulo (V) e ângulo (θ) da tensão como dados iniciais e os valores de injeção de potência ativa (P) e reativa (Q) são calculados. Esse tipo de barra também é chamada de barra de referência por proporcionar a referência angular de todo o sistema, além de servir para o balanço de potência ativa do sistema, já que é o único tipo de barra em que a potência ativa não é um dado e sim uma incógnita. Por esses motivos, todo sistema elétrico deve ter, pelo menos, uma barra do tipo $V\theta$.

O problema de Fluxo de Potência pode, então, ser descrito pela aplicação da primeira lei de Kirchhoff em cada barra do sistema, de maneira que o somatório das potências entrando na barra seja zero. Portanto, para cada barra, as Equações (5) e (6) descrevem a aplicação dessa lei.

$$P = P_k^{inj} - V_k \sum_{m \neq k} V_m (g_{km} \cos(\theta_k - \theta_m) + b_{km} \sin(\theta_k - \theta_m)) = 0 \quad (5)$$

$$Q = Q_k^{inj} - V_k \sum_{m \neq k} V_m (g_{km} \sin(\theta_k - \theta_m) - b_{km} \cos(\theta_k - \theta_m)) = 0 \quad (6)$$

Onde:

- P_k^{inj} e Q_k^{inj} são as potências ativa e reativa, respectivamente, injetadas na barra k .

Essas equações originam um sistema não-linear onde as equações de estado são P e Q , e as variáveis de estado são V e θ . A resolução desse sistema não-linear indica o estado de cada barra do sistema, por meio do qual é possível calcular o valor de todas as outras variáveis do sistema. As barras do tipo PV , porém, tem seus estados definidos como dados iniciais; por isso, as equações do sistema não-linear incluem apenas as barras de tipo PQ e PV .

As barras PV tem a variável de estado V e o valor de P_k^{inj} já definidos; portanto, atribui-se apenas a equação de estado P para cada barra PV , e tem-se o intuito de descobrir apenas o valor da variável de estado θ . De outra maneira, a barra PQ tem os valores de P_k^{inj} e Q_k^{inj} já definidos; portanto, atribui-se as equações de estado P e Q para cada barra PQ , e tem-se o intuito de descobrir ambas variáveis de estado (θ e V).

Dessa maneira, o sistema não-linear $\mathbf{f}(\mathbf{x}) = \mathbf{0}$ que descreve o problema de fluxo de potência e o vetor de variáveis de estado \mathbf{x} são detalhados por (7).

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} \Delta P_{npq+npv} \\ \Delta Q_{npq} \end{bmatrix} = \mathbf{0} \quad e \quad \mathbf{x} = \begin{bmatrix} \theta_{npq+npv} \\ V_{npq} \end{bmatrix} \quad (7)$$

Onde:

- npq é a quantidade de barras do tipo PQ do sistema;
- npv é a quantidade de barras do tipo PV do sistema.

O sistema não-linear do problema de Fluxo de Potência é de tamanho $2npq + npv$.

A partir do estado do sistema, é possível calcular as potências ativas e reativas em cada circuito do sistema, (8) e (9), assim como as potências reativas geradas em cada

barra dos tipos PV e V e as potências ativas em cada barra do tipo V , (10).

$$P_{km} = V_k^2 g_{km} - V_k V_m (g_{km} \cos(\theta_k - \theta_m) + b_{km} \sin(\theta_k - \theta_m)) \quad (8)$$

$$Q_{km} = -V_k^2 \left(b_{km} + \frac{b_{km}^{sh}}{2} \right) + V_k V_m (b_{km} \cos(\theta_k - \theta_m) - g_{km} \sin(\theta_k - \theta_m)) \quad (9)$$

$$P_k = \sum_{m \neq k} P_{km} \quad Q_k = \sum_{m \neq k} Q_{km} \quad (10)$$

O problema de fluxo de potência, por ser descrito como um sistema não-linear, não possui solução analítica. Por conta disso, métodos de resolução numéricos precisam ser empregados para garantir a resolução do problema.

O método numérico comumente utilizado para problema de fluxo de potência, e de interesse desse estudo, é o método de Newton-Raphson e suas variações. Além desse, é possível utilizar outros métodos, como o de Gauss-Seidel, que, porém, não serão abordados no decorrer deste trabalho (Grainger e Stevenson, 1994).

2.3 MÉTODO DE NEWTON-RAPHSON PARA RESOLUÇÃO DE SISTEMAS NÃO-LINEARES

Os métodos utilizados para resolução de sistemas não-lineares são métodos iterativos. Isso implica na escolha de um valor inicial para cada variável de estado do sistema, onde esse palpite inicial é aplicado ao sistema com o intuito de calcular, de maneira sucessiva, novos valores de estado. Depois de um certo número de iterações, espera-se que o valor dos estados do sistema convirja para um valor tal que $\mathbf{f}(\mathbf{x}) = \mathbf{0}$, quando, então, o valor dos estados do sistema pode ser considerado como a solução do mesmo. O método de Newton-Raphson é um método iterativo.

Será considerada a situação de resolução de uma única equação não-linear $f(x) = 0$, ao invés de um sistema $\mathbf{f}(\mathbf{x}) = \mathbf{0}$, para demonstrar o funcionamento do método de Newton-Raphson (Mariesa, 2009).

Tendo $f(x) = 0$, onde x indica o resultado real, expande-se essa função em sua série de Taylor no entorno do ponto x^i , (11).

$$f(x) = f(x^i) + \left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)_{x^i} (x - x^i) + \frac{1}{2!} \left(\frac{\partial^2 f}{\partial x^2}\right)_{x^i} (x - x^i)^2 + \dots = 0 \quad (11)$$

Para $i \neq 1$ assume-se que o resultado do processo iterativo converge para x , sendo possível substituir x , na Equação (11), por x^{i+1} , como indicado em (12).

$$f(x^{i+1}) = f(x^i) + \left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)_{x^i} (x^{i+1} - x^i) + \frac{1}{2!} \left(\frac{\partial^2 f}{\partial x^2}\right)_{x^i} (x^{i+1} - x^i)^2 + \dots = 0 \quad (12)$$

A partir de um palpite inicial próximo o suficiente de x , os termos de maior ordem de (12) podem ser desprezados, (13).

$$f(x^{i+1}) = f(x^i) + \left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)_{x^i} (x^{i+1} - x^i) = 0 \quad (13)$$

Rearrmando a equação, em função de x^i , é possível que seja resolvida para x^{i+1} , (14).

$$x^{i+1} = x^i - \left[\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)_{x^i} \right]^{-1} f(x^i) \quad (14)$$

O método de Newton-Raphson terá obtido uma solução quando o módulo de $f(x^i)$ for $|f(x^i)| < \epsilon$, onde ϵ indica uma tolerância já determinada.

Generalizando essa definição para sistemas, ao invés de apenas para uma função, tem-se a Equação (15).

$$\mathbf{x}^{i+1} = \mathbf{x}^i - [\mathbf{J}(\mathbf{x}^i)]^{-1} \mathbf{f}(\mathbf{x}^i) \quad (15)$$

Onde:

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} \quad \mathbf{f}(\mathbf{x}^i) = \begin{bmatrix} f_1(\mathbf{x}^i) \\ \vdots \\ f_n(\mathbf{x}^i) \end{bmatrix} \quad (16)$$

E $\mathbf{J}(\mathbf{x}^k)$ indica a matriz Jacobiana do sistema não-linear, sendo sua formação como demonstrada em (17):

$$[\mathbf{J}(\mathbf{x}^i)] = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \frac{\partial f_1}{\partial x_3} & \cdots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \frac{\partial f_2}{\partial x_3} & \cdots & \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_3}{\partial x_1} & \frac{\partial f_3}{\partial x_2} & \frac{\partial f_3}{\partial x_3} & \cdots & \frac{\partial f_3}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \frac{\partial f_n}{\partial x_2} & \frac{\partial f_n}{\partial x_3} & \cdots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{bmatrix} \quad (17)$$

De modo similar, o método de Newton-Raphson terá obtido uma solução para um sistema não-linear quando a norma infinita de $\mathbf{f}(\mathbf{x}^i)$ for $\|\mathbf{f}(\mathbf{x}^i)\| < \epsilon$, onde ϵ indica uma tolerância já determinada.

2.4 MÉTODO DE NEWTON-RAPHSON PARA RESOLUÇÃO DE FLUXO DE POTÊNCIA

A formulação do sistema não-linear a ser resolvido pelo método de Newton-Raphson na Equação (15), pode ser rearranjada na forma $\mathbf{A}\mathbf{x} = \mathbf{b}$, onde $\mathbf{A} = [\mathbf{J}(\mathbf{x}^i)]$, $\mathbf{b} = \mathbf{f}(\mathbf{x}^i)$ e $\mathbf{x} = (\mathbf{x}^{i+1} \quad \mathbf{x}^i)$, como apresentado na Equação (18).

$$[\mathbf{J}(\mathbf{x}^i)](\mathbf{x}^{i+1} \quad \mathbf{x}^i) = \mathbf{f}(\mathbf{x}^i) \quad (18)$$

Essa formulação é utilizada para o problema de Fluxo de Potência, ficando como:

$$[\mathbf{J}(\mathbf{v})] \begin{bmatrix} 1 \\ \vdots \\ P_{npq+npv} \\ V_1 \\ \vdots \\ V_{npq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_1 \\ \vdots \\ P_{npq+npv} \\ Q_1 \\ \vdots \\ Q_{npv} \end{bmatrix} \quad (19)$$

Onde $V_k = V_k^{i+1} - V_k^i$ e P e Q são as equações de *mismatch*, como apresentadas em (5) e (6).

A matriz Jacobiana, então, é da forma:

$$[\mathbf{J}(\mathbf{v})] = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial V} & \frac{\partial P}{\partial V} \\ \frac{\partial Q}{\partial V} & \frac{\partial Q}{\partial V} \end{bmatrix} \quad (20)$$

Como em P e Q os termos P_i^{inj} e Q_i^{inj} são constantes, pode-se considerar a

Jacobiana como:

$$[\mathbf{J}(\cdot; \mathbf{v})] = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial} & \frac{\partial P}{\partial V} \\ \frac{\partial Q}{\partial} & \frac{\partial Q}{\partial V} \end{bmatrix} \quad \text{ou} \quad [\mathbf{J}(\cdot; V)] = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial} & \frac{\partial P}{\partial V} \\ \frac{\partial Q}{\partial} & \frac{\partial Q}{\partial V} \end{bmatrix} \quad (21)$$

Dessa forma, tem-se:

$$[\mathbf{J}(\cdot; \mathbf{v})] \begin{bmatrix} 1 \\ \vdots \\ \text{npq+npv} \\ V_1 \\ \vdots \\ V_{\text{npq}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_1 \\ \vdots \\ P_{\text{npq+npv}} \\ Q_1 \\ \vdots \\ Q_{\text{npq}} \end{bmatrix} \quad (22)$$

A matriz Jacobiana, em si, é dividida em quatro submatrizes da forma:

$$[\mathbf{J}(\cdot; \mathbf{v})] = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_{\text{npq+npv;npq+npv}} & \mathbf{N}_{\text{npq+npv;npq}} \\ \mathbf{M}_{\text{npq;npq+npv}} & \mathbf{L}_{\text{npv;npq}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial} & \frac{\partial P}{\partial V} \\ \frac{\partial Q}{\partial} & \frac{\partial Q}{\partial V} \end{bmatrix} \quad (23)$$

Onde:

$$\mathbf{H} \begin{cases} H_{km} = \frac{\partial P_k}{\partial} = \frac{\partial}{\partial} = V_k V_m (g_{km} \sin(\theta_k - \theta_m) - b_{km} \cos(\theta_k - \theta_m)) \\ H_{kk} = \frac{\partial P_k}{\partial} = \frac{\partial}{\partial} = V_k^2 b_{kk} - V_k \sum_{m \neq k} V_m (g_{km} \sin(\theta_k - \theta_m) - b_{km} \cos(\theta_k - \theta_m)) \end{cases} \quad (24)$$

$$\mathbf{N} \begin{cases} N_{km} = \frac{\partial P_k}{\partial V_m} = V_k (g_{km} \cos(\theta_k - \theta_m) + b_{km} \sin(\theta_k - \theta_m)) \\ N_{kk} = \frac{\partial P_k}{\partial V_k} = V_k g_{kk} + \sum_{m \neq k} V_m (g_{km} \cos(\theta_k - \theta_m) + b_{km} \sin(\theta_k - \theta_m)) \end{cases} \quad (25)$$

$$\mathbf{M} \begin{cases} M_{km} = \frac{\partial Q_k}{\partial} = \frac{\partial}{\partial} = V_k V_m (g_{km} \cos(\theta_k - \theta_m) + b_{km} \sin(\theta_k - \theta_m)) \\ M_{kk} = \frac{\partial Q_k}{\partial} = \frac{\partial}{\partial} = V_k^2 g_{kk} + V_k \sum_{m \neq k} V_m (g_{km} \cos(\theta_k - \theta_m) + b_{km} \sin(\theta_k - \theta_m)) \end{cases} \quad (26)$$

$$L \begin{cases} L_{km} = @Q_k=@V_m = V_k(g_{km} \sin(\theta_k - \theta_m) - b_{km} \cos(\theta_k - \theta_m)) \\ L_{kk} = @Q_k=@V_k = V_k b_{kk} + \sum_{m \neq k} V_m (g_{km} \sin(\theta_k - \theta_m) - b_{km} \cos(\theta_k - \theta_m)) \end{cases} \quad (27)$$

Existem algumas duas variações possíveis para o método Newton-Raphson para resolução de fluxo de potência; o método Desacoplado e o método Desacoplado Rápido. Essas variações se utilizam do fato de que mudanças no ângulo da tensão de uma barra afetam a potência ativa de maneira mais acentuada e pouco mexem na potência reativa, enquanto que mudanças no módulo da tensão de uma barra afetam a potência reativa de maneira mais acentuada e modificam pouco a potência ativa (Grainger e Stevenson, 1994). Isso significa que há um desacoplamento entre as relações P e QV (Monticelli, 1983).

Os métodos desacoplados não mudam a formulação do problema de Fluxo de Potência, nem a solução final, apenas modificando a matriz Jacobiana, mudando o caminho de convergência. O método Desacoplado zera as submatrizes M e N e o Desacoplado Rápido, além de zerar as submatrizes M e N , mantém constantes as submatrizes H e L (Monticelli, 1983).

Dito isso, para os propósitos deste estudo, os métodos Desacoplado e Desacoplado Rápido não serão utilizados.

3 FLUXO DE POTÊNCIA EM NÍVEL DE SUBESTAÇÃO

Para o problema do problema de fluxo de potência, subestações são representadas como apenas uma barra. Porém, como será apresentado, a subestação pode ser modelada com mais detalhes, de acordo com seu arranjo. Essa representação interna da subestação conta com a inserção de ramos chaveáveis, cuja impedância ou é nula ou é infinita, no modelo da rede.

A representação desses valores extremos de impedância incorrerá em problemas numéricos na resolução do sistema não-linear de fluxo de potência. Por conta disso, é necessário que haja uma representação específica para ramos chaveáveis, de maneira que seja possível descrever a subestação em nível interno sem erros numéricos.

Esta seção apresenta diferentes arranjos de subestações, uma descrição sucinta dos ramos chaveáveis, a modelagem desse ramos para o problema de fluxo de potência e as modificações necessárias na formulação básica do problema e no método de resolução.

3.1 ARRANJOS POSSÍVEIS DE SUBESTAÇÕES

A disposição física de uma subestação pode ser sintetizada pelo diagrama unifilar de seu arranjo. O arranjo de uma subestação indica como as linhas, transformadores ou equipamentos se interconectam e quais possibilidades de manobra ou redundância existem, de acordo com o conhecimento da disposição física dos disjuntores e chaves seccionadores que compõe a subestação.

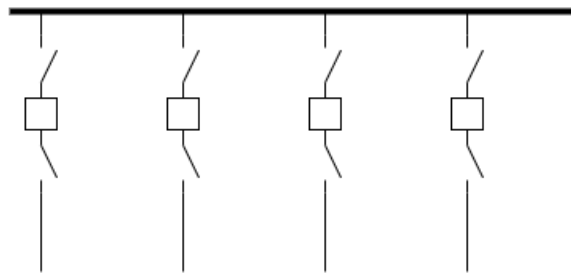
Diferentes subestações são construídas com base em diferentes arranjos, dependendo do nível de tensão, quantidade de *bays*, propósito e outros critérios variados.

Essa subseção apresenta os tipos de arranjo comumente utilizadas em subestações (Mamede Filho, 2013), e que serão aplicadas no decorrer deste estudo.

3.1.1 Barramento Simples

Esse é o arranjo de menor custo e maior limitação, entre os que estão aqui apresentados, não proporcionando opção de manutenção de disjuntor sem a retirada de operação do circuito correspondente, nem a opção de manutenção do barramento sem o desligamento de toda a subestação.

Figura 4 Diagrama Unifilar de uma Subestação de Arranjo Barramento Simples

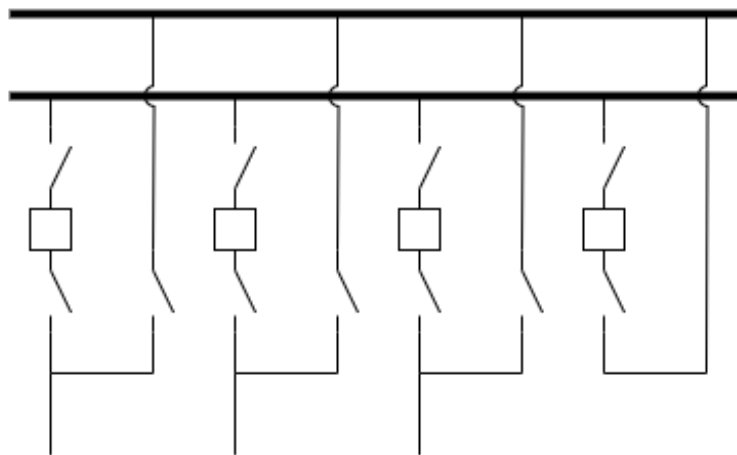


Fonte: Autoria Própria

3.1.2 Barramento Principal e de Transferência

Esse arranjo é formado dois barramentos, o barramento principal e o barramento de transferência ou auxiliar. A operação da subestação se dá pelo barramento principal, mas há a possibilidade de manobra em qualquer disjuntor sem que isso incorra no desligamento do circuito correspondente; nessa situação uma chave seccionadora permite a conexão entre o circuito e o barramento auxiliar, e um disjuntor de acoplamento permite o trânsito de fluxo entre os barramentos.

Figura 5 Diagrama Unifilar de uma Subestação de Arranjo Barramento Principal e de Transferência

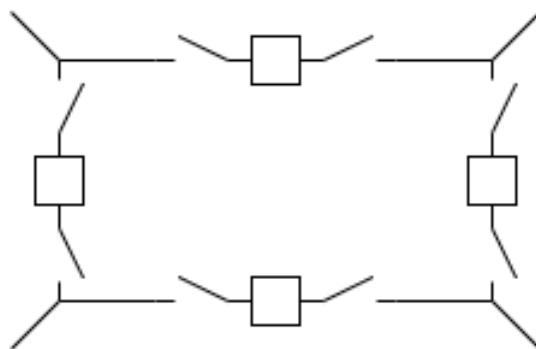


Fonte: Autoria Própria

3.1.3 Anel

Esse arranjo prevê que cada entrada da subestação esteja conectada a duas outras, por meio de um disjuntor, de forma que seja possível a operação mesmo com a abertura, ou manutenção, de qualquer disjuntor dentro da subestação.

Figura 6 Diagrama Unifilar de uma Subestação de Arranjo Anel

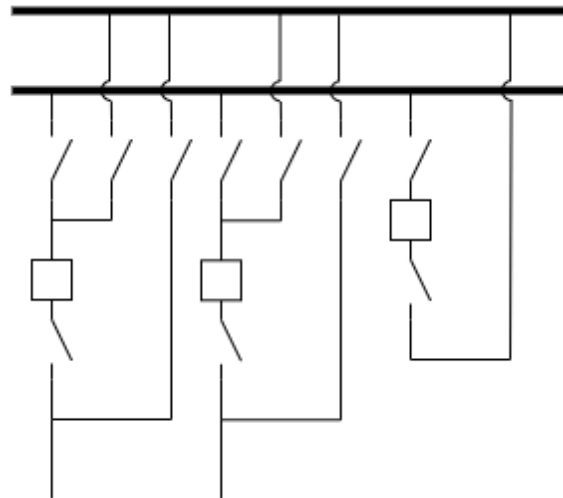


Fonte: Autoria Própria

3.1.4 Barramento Duplo a Quatro Chaves

Esse arranjo é formado por dois barramentos, um disjuntor entre cada entrada e os barramentos, uma chave seccionadora para cada barramento e uma chave seccionadora que funciona como um *bypass*; permitindo uma grande flexibilização de operação dessa subestação. Esse tipo de esquema permite operação dos dois barramentos em conjunto, a manutenção de um barramento sem desligar a subestação e o funcionamento como Barra Principal e de Transferência caso alguma chave esteja funcionando como *bypass*.

Figura 7 Diagrama Unifilar de uma Subestação de Arranjo Barramento Duplo a Quatro Chaves

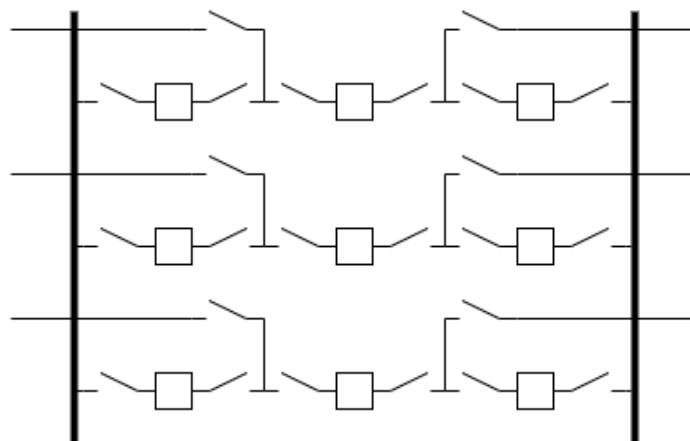


Fonte: Autoria Própria

3.1.5 Disjuntor e Meio

Esse arranjo é formado por dois barramentos e três disjuntores a cada duas entradas da subestação, de forma que cada par de circuito conta com um disjuntor reserva. A operação normal de uma subestação com esse tipo de arranjo prevê os dois barramentos energizados e todos os disjuntores fechados, porém, é possível operar mesmo com a indisponibilidade de um número de disjuntores.

Figura 8 Diagrama Unifilar de uma Subestação de Arranjo Disjuntor e Meio

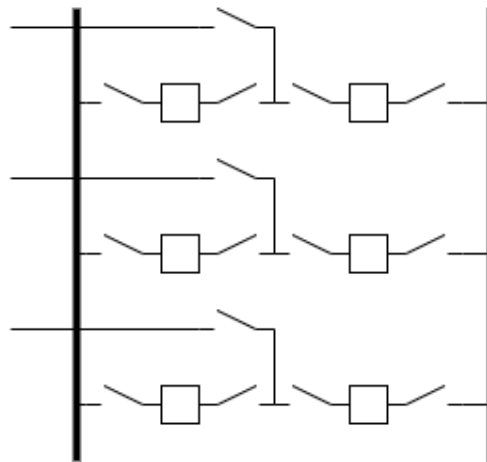


Fonte: Autoria Própria

3.1.6 Barramento Dois Disjuntores

Esse arranjo é formado por dois barramentos e dois disjuntores para cada entradas na subestação. A operação de uma subestação com esse tipo de arranjo permite a conexão de cada circuito a qualquer um dos dois barramentos, ou apenas a um único, e permite a retirada de qualquer disjuntor para manutenção ou por indisponibilidade.

Figura 9 Diagrama Unifilar de uma Subestação de Arranjo Barramento Dois Disjuntores



Fonte: Autoria Própria

3.2 RAMOS CHAVEÁVEIS

Os possíveis arranjos de uma subestação, e seus diagramas unifilares, demonstram a utilização de ramos chaveáveis, sendo esses caracterizados por disjuntores e chaves seccionadoras. Esses equipamentos de manobra são responsáveis por conectar ou isolar equipamentos, áreas da subestação, dentre outros.

Os disjuntores e chaves seccionadores funcionam em dois estados: aberto ou fechado. Enquanto fechados, funcionam como um curto-circuito, e quando abertos, funcionam como um circuito aberto. A descrição matemática adotada para esses equipamentos é apresentada em (28).

$$\begin{cases} Z = 0, & \text{quando fechado} \\ Z = 1, & \text{quando aberto} \end{cases} \quad (28)$$

Para os propósitos desse estudo, disjuntores e chaves seccionadoras serão consideradas de maneira intercambiável, sendo referidos apenas como ramos chaveáveis.

3.3 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DE FLUXO DE POTÊNCIA EM NÍVEL DE SUBESTAÇÃO

O problema de fluxo de potência tem como objetivo primário descobrir o estado do sistema, ou seja, os valores de módulo (V) e ângulo (δ) de tensão para todas as barras do sistema. Na representação interna de uma subestação, cada entrada dela se torna uma barra do sistema, porém, os ramos chaveáveis que as interconectam não podem ser modelados como circuitos comuns com valores de impedância, pois corre-se o risco de ocasionar problemas numéricos. Dessa forma, os valores de fluxo de potência, ativa e reativa, desses ramos chaveáveis serão considerados variáveis de estado do sistema, como sugerido por Lourenço et al. (2010). Então, o problema estendido de fluxo de potência tem como objetivo desvelar os valores de módulo (V) e ângulo (δ) de tensão para todas as barras do sistema assim como os fluxos de potência ativa (t) e reativa (u) para cada ramo chaveável do sistema (Lourenço et al., 2010).

O vetor de variáveis de estado, antes apresentado em (7), para o fluxo de potência estendido, ou em nível de subestação, fica da forma descrita em (29).

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} npq+npv \\ V_{npq} \\ t_{nrc} \\ u_{nrc} \end{bmatrix} \quad (29)$$

Onde:

- nrc é a quantidade de ramos chaveáveis, disjuntores ou chaves seccionadoras, do sistema.

De maneira correspondente, dois novos conjuntos de equações são adicionados ao problema. O primeiro conjunto de equações diz respeito aos ramos chaveáveis que estão fechados, e são representados por $\mathbf{f}^{fc}(\delta; \mathbf{v})$; enquanto o segundo conjunto diz respeito aos ramos chaveáveis que se encontram abertos, sendo representados por $\mathbf{f}^{ab}(t; \mathbf{u})$ (Lourenço et al., 2010).

Considerando um ramo chaveável fechado, a diferença de módulo e ângulo de tensão entre as barras de sua extremidade deve ser zero, já que o ramo representa um curto circuito, isso é descrito pela função $f^{fc}(\cdot; \mathbf{v})$ como apresentado em (30).

$$f_{;km}^{fc} = I_{km} = I_k \quad I_m = 0.0 \quad f_{V;km}^{fc} = V_{km} = V_k \quad V_m = 0.0 \quad (30)$$

Em um ramo chaveável aberto, o fluxo de potência ativa e reativa no ramo deve ser zero, já que representa um circuito aberto, isso é descrito pela função $f^{ab}(\mathbf{t}; \mathbf{u})$ como apresentado em (31).

$$f_{t;km}^{ab} = t_{km} = 0.0 \quad f_{u;km}^{ab} = u_{km} = 0.0 \quad (31)$$

Além disso, as equações responsáveis pelo cálculo de potência ativa e reativa de cada barra devem levar em conta a potência dos ramos chaveáveis que estão ligados a mesma, como demonstrado em (32) e (33).

$$\Delta P_{npq+npv} = P_k^{inj} \left(V_k \sum_{m \in \mathcal{K}_k} V_m (g_{km} \cos(\theta_k - \theta_m) + b_{km} \sin(\theta_k - \theta_m)) + \sum_{m \in \mathcal{K}_k} t_{km} \right) \quad (32)$$

$$\Delta Q_{npq} = Q_k^{inj} \left(V_k \sum_{m \in \mathcal{K}_k} V_m (g_{km} \sin(\theta_k - \theta_m) - b_{km} \cos(\theta_k - \theta_m)) + \sum_{m \in \mathcal{K}_k} u_{km} \right) \quad (33)$$

Onde:

- \mathcal{K}_k indica o conjunto conjunto de barras que está conectada a barra k por ramos chaveáveis.

Dessa maneira, o vetor de equações que modela o problema de fluxo de potência, antes apresentado em (7), considerando o arranjo da subestação é apresentado em (34).

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} P_{npq+npv} \\ Q_{npq} \\ nrcf \\ V_{nrcf} \\ t_{nrca} \\ u_{nrca} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_k^{inj} & (P_k + t_k) \\ Q_k^{inj} & (Q_k + u_k) \\ & k \quad m \\ & V_k \quad V_m \\ & t_{km} \\ & u_{km} \end{bmatrix} \quad (34)$$

Onde:

- P_k e t_k são o somatório dos fluxos de potência ativa que chegam/saem da barra k através de circuitos normais e chaveáveis, respectivamente;
- Q_k e u_k são o somatório dos fluxos de potência reativa que chegam/saem da barra k através de circuitos normais e chaveáveis, respectivamente;
- $nrcf$ é a quantidade de ramos chaveáveis fechados do sistema;
- $nrca$ é a quantidade de ramos chaveáveis abertos do sistema;
- $nrcf + nrca = nrc$.

3.4 MÉTODO DE NEWTON-RAPHSON PARA RESOLUÇÃO DE FLUXO DE POTÊNCIA EM NÍVEL DE SUBESTAÇÃO

Considerando a formulação da resolução do problema de fluxo de potência pelo método de Newton-Raphson apresentada em (22), e as mudanças consideradas na seção 3.3, pode-se considerar o sistema na forma:

$$[J(\cdot; V; t; u)] \begin{bmatrix} 1 \\ \vdots \\ npq+npv \\ V_1 \\ \vdots \\ V_{npq} \\ t_1 \\ \vdots \\ t_{nrc} \\ u_1 \\ \vdots \\ u_{nrc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_1 \\ \vdots \\ P_{npq+npv} \\ Q_1 \\ \vdots \\ Q_{npq} \\ f_1^{fc}(\cdot) \\ \vdots \\ f_{nrc}^{fc}(\cdot) \\ f_1^{fc}(V) \\ \vdots \\ f_{nrc}^{fc}(V) \\ f_1^{ab}(t) \\ \vdots \\ f_{nrc}^{ab}(t) \\ f_1^{ab}(u) \\ \vdots \\ f_{nrc}^{ab}(u) \end{bmatrix} \quad (35)$$

Onde $\Delta t = t^{i+1} - t^i$, $\Delta u = u^{i+1} - u^i$, $f^{fc}(\cdot)$ e $f^{fc}(v)$ são as equações que descrevem os ramos chaveáveis fechados, (30), e $f^{ab}(t)$ e $f^{ab}(u)$ descrevem os ramos abertos, (31).

Nessa situação, a matriz Jacobiana tem o seguinte formato (Lourenço et al., 2010):

$$[J(\cdot; v; t; u)] = \begin{bmatrix} H_{npq+npv;npq+npv} & N_{npq+npv;npq} & T_{npq+npv;nrc} & \mathbf{0}_{npq+npv;nrc} \\ M_{npq;npq+npv} & L_{npq;npq} & \mathbf{0}_{npq;nrc} & U_{npq;nrc} \\ C_{2nrcf;npq+npv} & D_{2nrcf;npq} & \mathbf{0}_{2nrcf;nrc} & \mathbf{0}_{2nrcf;nrc} \\ \mathbf{0}_{2nrca;npq+npv} & \mathbf{0}_{2nrca;npq} & \mathbf{0}_{2nrca;nrc} & P_{2nrca;nrc} \end{bmatrix} \quad (36)$$

$$\begin{bmatrix} H & N & T & 0 \\ M & L & 0 & U \\ C & D & 0 & 0 \\ 0 & 0 & O & P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial} & \frac{\partial P}{\partial V} & \frac{\partial P}{\partial t} & \frac{\partial P}{\partial u} \\ \frac{\partial Q}{\partial} & \frac{\partial Q}{\partial V} & \frac{\partial Q}{\partial t} & \frac{\partial Q}{\partial u} \\ \frac{\partial f^{fc}}{\partial} & \frac{\partial f^{fc}}{\partial V} & \frac{\partial f^{fc}}{\partial t} & \frac{\partial f^{fc}}{\partial u} \\ \frac{\partial f^{ab}}{\partial} & \frac{\partial f^{ab}}{\partial V} & \frac{\partial f^{ab}}{\partial t} & \frac{\partial f^{ab}}{\partial u} \end{bmatrix} \quad (37)$$

Onde H , N , M e L são definidos em (24), (25), (26) e (27).

Considerando que um ramo chaveável conecta duas barras k e m , e o cálculo de potência, ativa e reativa, de cada barra de potência de uma barra é da forma (38) e (39):

$$P_k = V_k \sum_{m \neq k} V_m (g_{km} \cos(\theta_k - \theta_m) + b_{km} \sin(\theta_k - \theta_m)) + \sum_{m \neq k} t_{km} \quad (38)$$

$$Q_k = V_k \sum_{m \neq k} V_m (g_{km} \sin(\theta_k - \theta_m) - b_{km} \cos(\theta_k - \theta_m)) + \sum_{m \neq k} u_{km} \quad (39)$$

Os valores de $T = [\partial P = \partial t]$ e $U = [\partial Q = \partial u]$ serão 0 quando a barra não está conectada a nenhum ramo chaveável, 1 quando se trata da barra k em relação a um fluxo t_{km} ou u_{km} , ou -1 quando se trata da barra m em relação a um fluxo t_{km} ou u_{km} .

Como as funções que descrevem os ramos fechados e abertos, f^{fc} e f^{ab} , são divididas em duas, como demonstrado de (30) a (31), pode-se dividir os termos C , D , O e P na forma:

$$C_1 = \left[\frac{\partial f^{fc}}{\partial t; km} = \partial \right] \quad C_2 = \left[\frac{\partial f^{fc}}{\partial V; km} = \partial \right] \quad (40)$$

$$D_1 = \left[\frac{\partial f^{fc}}{\partial V; km} = \partial V \right] \quad D_2 = \left[\frac{\partial f^{fc}}{\partial t; km} = \partial V \right] \quad (41)$$

$$O_1 = \left[\frac{\partial f^{ab}}{\partial t; km} = \partial t \right] \quad O_2 = \left[\frac{\partial f^{ab}}{\partial u; km} = \partial t \right] \quad (42)$$

$$P_1 = \left[\frac{\partial f^{ab}}{\partial t; km} = \partial U \right] \quad P_2 = \left[\frac{\partial f^{ab}}{\partial u; km} = \partial U \right] \quad (43)$$

C_2 , D_1 , O_2 e P_1 serão sempre zero; C_2 pois não há nenhum termo em função de V em $f^{fc}_{;km}$, D_1 pois não há nenhum termo em função de t em $f^{fc}_{;km}$, O_2 pois não há nenhum termo em função de t em $f^{ab}_{u;km}$ e P_1 pois não há nenhum termo em função de u

em $f_{t;km}^{ab}$

Cada função $f_{;km}^{fc} = \theta_{km} = \theta_k - \theta_m$ representa a diferença angular entre duas barras conectadas por ramos chaveáveis. Em \mathbf{C}_1 , cada uma dessas funções será derivada em relação ao ângulo de cada barra, θ_k . Os valores de \mathbf{C}_1 , então, serão 0 quando θ_n corresponde a uma barra n que não é a barra k ou m da função $f_{;km}^{fc}$ atual, 1 quando θ_k corresponde a barra k da função $f_{;km}^{fc}$ ou -1 quando θ_m corresponde a barra m da função $f_{;km}^{fc}$.

Por outro lado, cada função $f_{V;km}^{fc} = V_{km} = V_k - V_m$ representa a diferença de módulo de tensão entre duas barras conectadas por ramos chaveáveis. Em \mathbf{D}_2 , cada uma dessas funções será derivada em relação ao módulo de tensão de cada barra, V_k . Os valores de \mathbf{D}_2 , então, serão 0 quando V_n corresponde a uma barra n que não é a barra k ou m da função $f_{V;km}^{fc}$ atual, 1 quando V_k corresponde a barra k da função $f_{V;km}^{fc}$ ou -1 quando V_m corresponde a barra m da função $f_{V;km}^{fc}$.

As funções $f_{t;km}^{ab}$ e $f_{u;km}^{ab}$ representam o fluxo de potência através de um ramo chaveável, no sentido de k para m . Em \mathbf{O}_1 , cada uma das funções $f_{t;km}^{ab}$ será derivada em relação ao fluxo de potência ativa, t_{km} ; enquanto em \mathbf{P}_2 , cada uma das funções $f_{u;km}^{ab}$ será derivada em relação ao fluxo de potência reativa, u_{km} . Dessa forma, os valores de \mathbf{O}_1 e \mathbf{P}_2 serão 0 quando o t_{km} ou u_{km} , pelo qual se está derivando, for diferente do que aparece nas funções em questão, e serão 1 se for igual.

Ressalta-se que, como pode ser percebido, os valores de \mathbf{T} , \mathbf{U} , \mathbf{C} , \mathbf{D} , \mathbf{O} e \mathbf{P} serão sempre 0, 1 ou -1 .

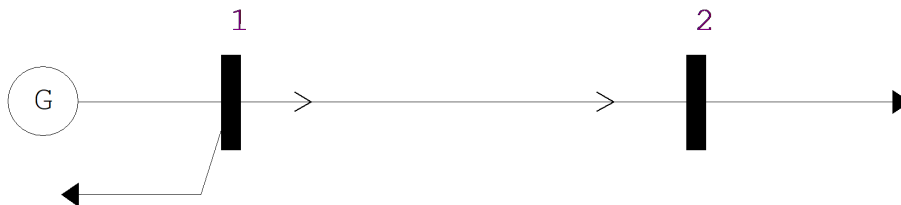
3.5 EXEMPLO DE PROBLEMA DE FLUXO DE POTÊNCIA EM NÍVEL DE SUBESTAÇÃO

Para demonstrar a utilização do método de resolução de fluxo de potência estendido, um sistema de duas barras será apresentado e uma de suas subestações representada de acordo com um arranjo. Essa subseção apresentará, então, o passo a passo da resolução desse sistema.

A Figura 10 apresenta o diagrama do sistema base utilizado como exemplo, enquanto as Tabelas 1 e 2 apresentam os parâmetros dessa rede, sendo que os ramos chaveáveis estão indicados nessas tabelas por reatâncias de valor 0.00001, quando fechados, e 99.9900, quando abertos; esses valores são apenas representativos dos ramos chaveáveis,

já que suas impedâncias não são levadas em consideração na formulação do problema.

Figura 10 Sistema de Exemplo



Fonte: Autoria Própria, desenho do ANAREDE

Tabela 1
Parâmetros de Barra - Sistema de Exemplo

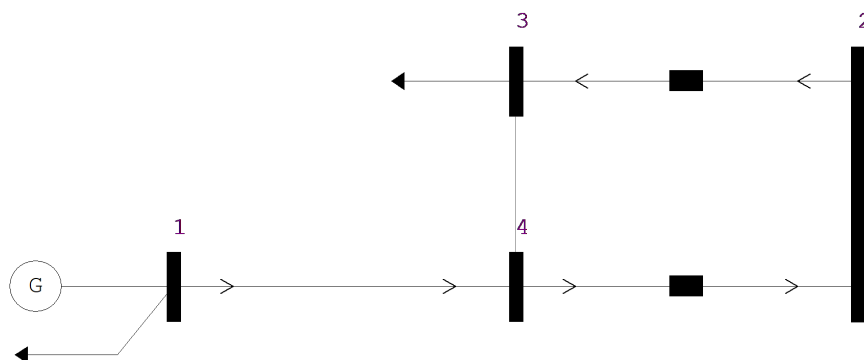
Num.	Tipo	V [pu]	θ [°]	P_g [MW]	P_c [MW]	Q_c [Mvar]	B [pu]
1	$V\theta$	1.000	0.00		50.00	30.99	
2	PQ				170.00	105.30	

Tabela 2
Parâmetros de Circuito - Sistema de Exemplo

Num. Barra De	Num. Barra Para	R [pu]	X [pu]	B [pu]
1	2	0.01008	0.05040	0.10250

A Figura 11 apresenta o diagrama do sistema utilizado considerando a subestação 2 expandida, enquanto as Tabelas 3 e 4 apresentam os parâmetros dessa rede.

Figura 11 Sistema de Exemplo Expandido



Fonte: Autoria Própria, desenho do ANAREDE

Tabela 3
Parâmetros de Barra - Sistema de Exemplo Expandido

Num.	Tipo	V [pu]	θ [°]	P_g [MW]	P_c [MW]	Q_c [Mvar]	B [pu]
1	$V\theta$	1.000	0.00		50.00	30.99	
2	PQ						
3	PQ				170.00	105.30	
4	PQ						

Tabela 4
Parâmetros de Circuito - Sistema de Exemplo Expandido

Num. Barra De	Num. Barra Para	R [pu]	X [pu]	B [pu]
1	4	0.010 08	0.050 40	0.102 50
2	3		0.000 01	
2	4		0.000 01	
3	4		99.990 00	

Para a resolução desse sistema expandido, primeiro calcula-se a matriz Y_{barra} , como indicado em (44):

$$Y_{barra} = \begin{bmatrix} & 1 & & 4 \\ 3.81562882 & 19.02689408j & 3.81562882 + 19.07814408j & \\ 3.81562882 + 19.07814408j & 3.81562882 & 19.02689408j & \\ & & & \end{bmatrix} \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \end{matrix} \quad (44)$$

A partir disso, são feitas as iterações do método de Newton-Raphson, considerando uma tolerância de $\epsilon = 10^{-6}$.

- 1ª Iteração:

$$\mathbf{x}^{(0)} = \begin{bmatrix} 2 \\ 3 \\ 4 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ t_{23} \\ t_{24} \\ t_{34} \\ u_{23} \\ u_{24} \\ u_{34} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{f}^{(0)} = \begin{bmatrix} P_2 \\ P_3 \\ P_4 \\ Q_2 \\ Q_3 \\ Q_4 \\ 23 \\ 24 \\ V_{23} \\ V_{24} \\ t_{34} \\ u_{34} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2.00E+00 \\ 7.00E-01 \\ 1.00E+00 \\ 2.00E+00 \\ 5.30E-02 \\ 1.05E+00 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (45)$$

$$\epsilon = 2.0 \quad (46)$$

$$\mathbf{J}^{(0)} = \begin{array}{cccccccccccc|c}
 & 2 & 3 & 4 & V_2 & V_3 & V_4 & t_{23} & t_{24} & t_{34} & u_{23} & u_{24} & u_{34} & \\
 \left[\begin{array}{cccccccccccc}
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 19.078144 & 0 & 0 & 3.815629 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\
 0 & 0 & 3.815629 & 0 & 0 & 18.975644 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\
 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1
 \end{array} \right] & \begin{array}{l} P_2 \\ P_3 \\ P_4 \\ Q_2 \\ Q_3 \\ Q_4 \\ 23 \\ 24 \\ V_{23} \\ V_{24} \\ t_{34} \\ u_{34} \end{array}
 \end{array} \quad (47)$$

$$\Delta \mathbf{x}^{(0)} = \begin{array}{c} \left[\begin{array}{c} 2 \\ 3 \\ 4 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ t_{23} \\ t_{24} \\ t_{34} \\ u_{23} \\ u_{24} \\ u_{34} \end{array} \right] = \begin{array}{c} \left[\begin{array}{cc} 7.55E & 02 \\ 7.55E & 02 \\ 7.55E & 02 \\ 6.80E & 02 \\ 6.80E & 02 \\ 6.80E & 02 \\ 7.00E & 01 \\ 2.70E & + 00 \\ 0 \\ 5.30E & 02 \\ 2.05E & + 00 \\ 0 \end{array} \right] \end{array} \quad (48)$$

• 2ª Iteração:

$$\mathbf{x}^{(1)} = \mathbf{x}^{(0)} + \Delta \mathbf{x}^{(0)} = \begin{bmatrix} 0.075512 \\ 0.075512 \\ 0.075512 \\ 0.932025 \\ 0.932025 \\ 0.932025 \\ 1.700000 \\ 1.700000 \\ 0 \\ 1.053000 \\ 1.053000 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{f}^{(1)} = \begin{bmatrix} 0 \\ 2.22E-16 \\ 1.27E-01 \\ 0 \\ 0 \\ 1.19E-01 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (49)$$

$$\mu = 0.12696800929794572 \quad (50)$$

$$\mathbf{J}^{(1)} = \begin{array}{cccccccccccc} & 2 & 3 & 4 & V_2 & V_3 & V_4 & t_{23} & t_{24} & t_{34} & u_{23} & u_{24} & u_{34} & & \\ \left[\begin{array}{cccccccccccc} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_3 \\ 0 & 0 & 17.462344 & 0 & 0 & 1.868502 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & Q_2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & Q_3 \\ 0 & 0 & 4.887554 & 0 & 0 & 16.731143 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & Q_4 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 23 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 24 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & V_{23} \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & V_{24} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & t_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & u_{34} \end{array} \right] & & \end{array} \quad (51)$$

$$\Delta \mathbf{x}^{(1)} = \begin{bmatrix} 2 \\ 3 \\ 4 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ t_{23} \\ t_{24} \\ t_{34} \\ u_{23} \\ u_{24} \\ u_{34} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 6:31E & 03 \\ 6:31E & 03 \\ 6:31E & 03 \\ 8:94E & 03 \\ 8:94E & 03 \\ 8:94E & 03 \\ 2:22E & 16 \\ 2:22E & 16 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (52)$$

• 3ª Iteração:

$$\mathbf{x}^{(2)} = \mathbf{x}^{(1)} + \Delta \mathbf{x}^{(1)} = \begin{bmatrix} 0.081826 \\ 0.081826 \\ 0.081826 \\ 0.923083 \\ 0.923083 \\ 0.923083 \\ 1.700000 \\ 1.700000 \\ 0 \\ 1.053000 \\ 1.053000 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{f}^{(1)} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1:46E & 03 \\ 0 \\ 0 \\ 1:57E & 03 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (53)$$

$$" = 0.0015698148413409996 \quad (54)$$

$$\mathbf{J}^{(2)} = \begin{array}{cccccccccccc|c}
 & 2 & 3 & 4 & V_2 & V_3 & V_4 & t_{23} & t_{24} & t_{34} & u_{23} & u_{24} & u_{34} & \\
 \left[\begin{array}{cccccccccccc}
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 17:263900 & 0 & 0 & 1:682068 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\
 0 & 0 & 4:949768 & 0 & 0 & 16:424356 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\
 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1
 \end{array} \right] & \begin{array}{l} P_2 \\ P_3 \\ P_4 \\ Q_2 \\ Q_3 \\ Q_4 \\ 23 \\ 24 \\ V_{23} \\ V_{24} \\ t_{34} \\ u_{34} \end{array}
 \end{array} \quad (55)$$

$$\Delta \mathbf{x}^{(2)} = \begin{array}{c} \left[\begin{array}{c} 2 \\ 3 \\ 4 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ t_{23} \\ t_{24} \\ t_{34} \\ u_{23} \\ u_{24} \\ u_{34} \end{array} \right] = \begin{array}{c} \left[\begin{array}{cc} 7:31E & 05 \\ 7:31E & 05 \\ 7:31E & 05 \\ 1:18E & 04 \\ 1:18E & 04 \\ 1:18E & 04 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{array} \right] \end{array} \quad (56)$$

• 4ª Iteração:

$$\mathbf{x}^{(23)} = \mathbf{x}^{(2)} + \Delta \mathbf{x}^{(2)} = \begin{bmatrix} 0.081899 \\ 0.081899 \\ 0.081899 \\ 0.922965 \\ 0.922965 \\ 0.922965 \\ 1.700000 \\ 1.700000 \\ 0 \\ 1.053000 \\ 1.053000 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{f}^{(3)} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 2.27E-07 \\ 0 \\ 0 \\ 2.63E-07 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (57)$$

$$" = 2.632295315052602E-07 \quad (58)$$

3.6 APLICAÇÃO DESENVOLVIDA EM PYTHON

Para a implementação da metodologia apresentada de representação de ramos chaveáveis para fluxo de potência, uma aplicação em Python foi desenvolvida. Essa aplicação lê um arquivo de entrada de dados, do tipo PWF, identifica as barras, circuitos e ramos chaveáveis do sistema e resolve o problema de fluxo de potência pelo método de Newton-Raphson. Caso o sistema apresentado para a aplicação não tenha ramos chaveáveis, ela simplesmente realizará o cálculo de fluxo de potência convencional.

O arquivo PWF de entrada é do formato utilizado no programa ANAREDE, de forma que um sistema no ANAREDE pode ser prontamente aplicado no programa desenvolvido. As informações contidas nesse tipo de arquivo que são lidas pelo programa são:

- Número e tipo (PQ , PV ou V) de cada barra;
- Módulo de tensão, em pu, das barras PV e V ;
- Ângulo de tensão, em graus, das barras V ;

- Geração ativa das barras PV ;
- Carga ativa e reativa das barras;
- Susceptância shunt das barras, em MVA;
- Resistência, reatância, ambas em %, e susceptância, em MVA, dos circuitos que conectam cada barra.

Todos os valores lidos são transformados e manipulados em pu ou radianos, no caso do ângulo de tensão, pelo programa.

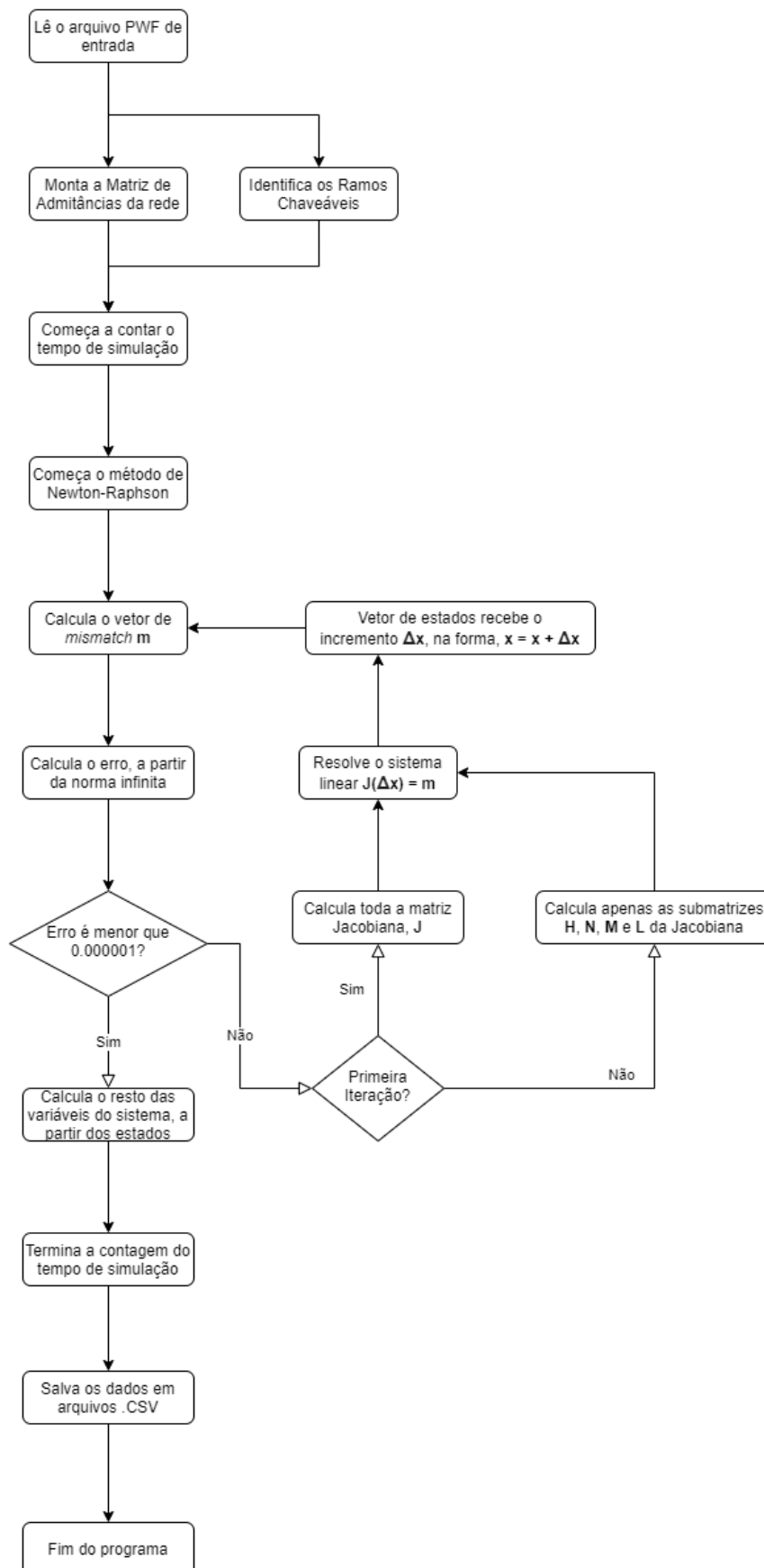
A identificação de um ramo chaveável pelo programa se dá pelo valor da reatância do circuito; caso essa seja 9999% o circuito será considerado um ramo chaveável aberto, e caso seja 0.001% será considerado um ramo chaveável fechado. Dessa maneira, o arquivo de entrada é preparado de forma que apenas ramos chaveáveis apresentem reatâncias com esses valores.

O programa se utiliza das seguintes bibliotecas:

- sys: parâmetros e funções específicas do sistema;
- os.path: manipulação comum de nomes de caminhos;
- time: funções relacionadas a tempo;
- tkinter: interfaces gráficas;
- pandas: ferramenta de análise e manipulação de dados;
- numpy: pacote de computação científica.

A Figura 12 demonstra, de maneira simplificada, o funcionamento da aplicação em Python por meio de um fluxograma.

Figura 12 Fluxograma da Aplicação Desenvolvida em Python



4 TESTES E RESULTADOS

Com o intuito de verificar a metodologia apresentada para resolução de fluxo de potência em nível de subestação, diferentes testes serão realizados e, seus resultados, apresentados neste capítulo. Os sistemas elétricos base da IEEE de 14, 30 e 57 barras serão utilizados para o modelo da rede original, e subestações arbitrárias serão escolhidas em cada caso para serem representadas de maneira detalhada, com diferentes arranjos.

O algoritmo de resolução de fluxo de potência, comum e em nível de subestação, foi criado e implementado em Python para esse estudo, de forma que todos os testes serão realizados a partir dele. Para validar os resultados, todos os testes feitos em Python serão, também, realizados no ANAREDE (programa de Análise de Redes do CEPEL, responsável por soluções de Fluxo de Potência).

O ANAREDE não permite a representação de ramos chaveáveis como impedâncias nulas ou infinitas. Dessa forma, tais ramos serão representados de maneira alternativa; os ramos chaveáveis abertos serão representados como circuitos desligados, enquanto os ramos chaveáveis fechados serão representados como uma reatância de 0.001% ou 0.00001 ρu , a menor possível no ANAREDE.

Para cada teste realizado, os erros relativos e absolutos, entre o programa em Python e o ANAREDE, serão apresentados. O cálculo desses erros é da forma:

$$E_{absoluto} = |X_{anarede} - X_{python}| \quad (59)$$

$$E_{relativo} = \left| \frac{X_{anarede} - X_{python}}{X_{anarede}} \right| 100 \quad (60)$$

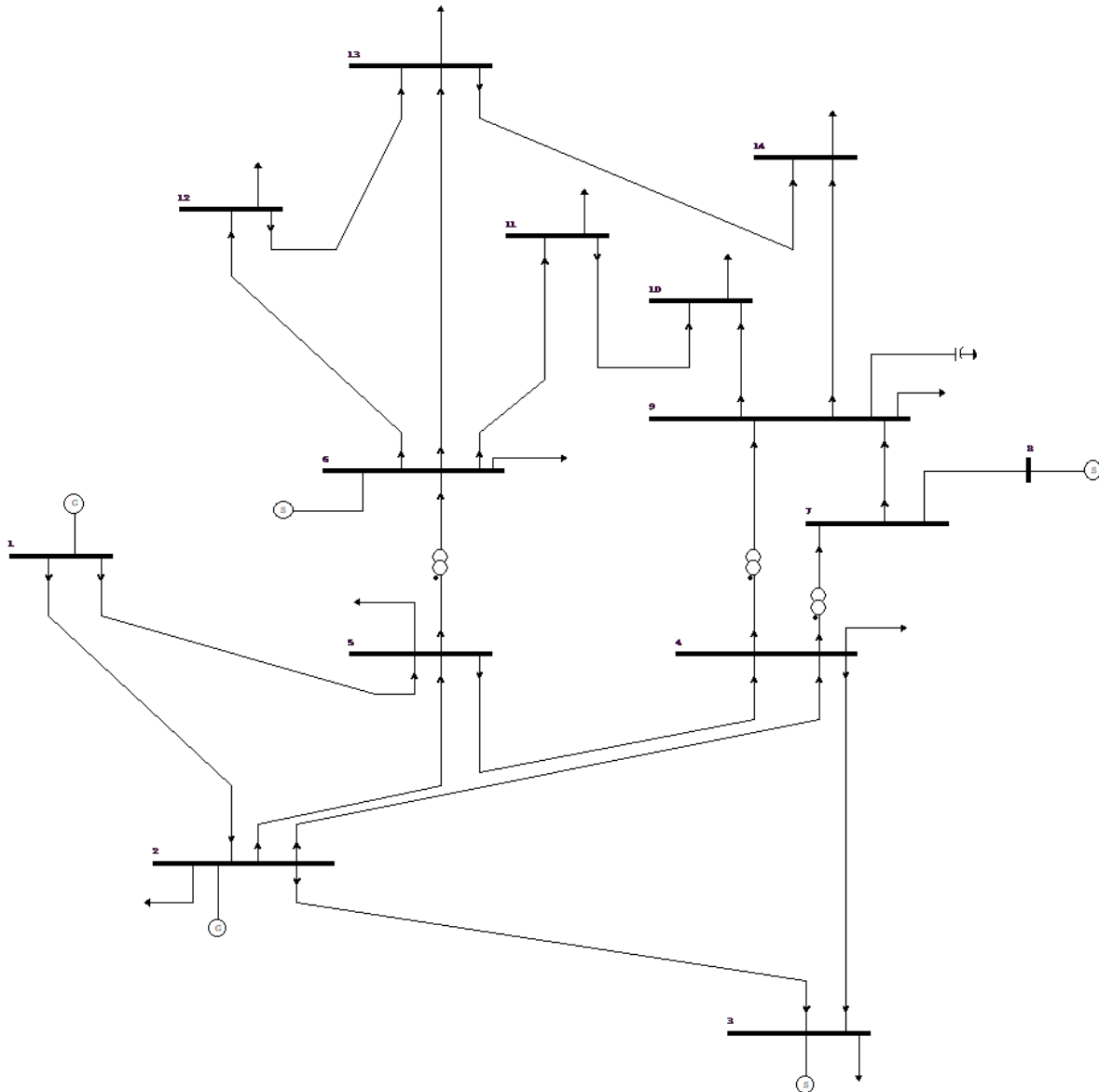
Cada subseção desse capítulo apresentará, então, os testes para um dos sistemas base da IEEE, apresentando os resultados, em Python e no ANAREDE, de sua formulação normal (considerando cada subestação como uma barra) e de sua formulação com algumas subestações detalhadas.

4.1 PRIMEIRO TESTE - IEEE 14 BARRAS

4.1.1 Sistema Elétrico Base

O sistema elétrico base, sem nenhuma subestação detalhada, IEEE 14 barras tem seus parâmetros descritos no Anexo A.1, e seu desenho é apresentado na Figura 13.

Figura 13 Diagrama Unifilar do Sistema IEEE 14 Barras



Fonte: Autoria Própria, desenho do ANAREDE

Comparando os resultados do Python e do ANAREDE, os maiores erros relativos e absolutos, de cada grandeza calculada, são apresentados abaixo.

Tabela 5
Erros Relativos Máximos - IEEE 14 Barras

Erros Relativos					
V [%]	θ [%]	P_g [%]	Q_g [%]	P_{km} [%]	Q_{km} [%]
4.23E-03	4.05E-04	1.04E-05	1.79E-04	1.50E-03	3.47E-03

Tabela 6
Erros Absolutos Máximos - IEEE 14 Barras

Erros Absolutos					
V [pu]	θ []	P_g [MW]	Q_g [Mvar]	P_{km} [MW]	Q_{km} [Mvar]
4.36E-05	5.09E-05	2.41E-05	4.62E-05	9.46E-05	5.16E-05

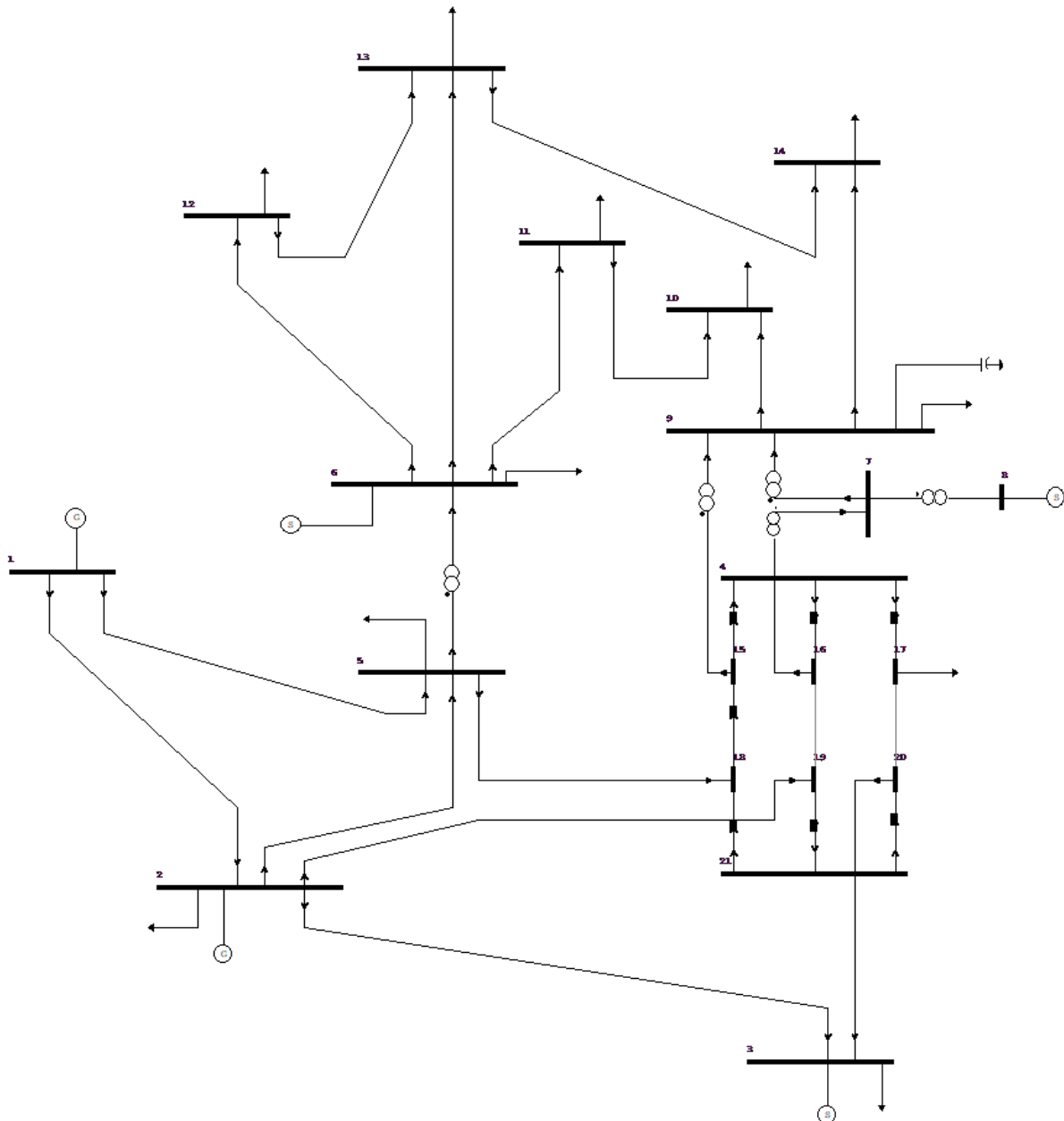
Todos os erros absolutos apresentados são da ordem de E-05, isso ocorre porque o ANAREDE só exibe resultados até a quarta casa decimal. Considerando, também, que o maior erro relativo é de 0.00423%, é possível assumir que não há discrepância considerável entre os resultados de fluxo de potência rodados no programa em Python e no ANAREDE.

Os resultados completos para esse sistema são apresentados no Anexo C.1, onde as Tabelas 31 e 32 apresentam os resultados quando rodados em Python, e as Tabelas 33 e 34 apresentam os resultados quando rodados no ANAREDE.

4.1.2 Sistema com Subestação Detalhada

Para esse teste a subestação 4, do caso base, é detalhada com o arranjo de disjuntor e meio. Dessa forma, o desenho do sistema fica como apresentado na Figura 14 e o detalhamento da subestação 4 fica como na Figura 20, no Anexo B.1. Os detalhes dos parâmetros desse sistema estão descritos no Anexo A.2.

Figura 14 Diagrama Unifilar do Sistema IEEE 14 Barras - Subestação Detalhada



Fonte: Autoria Própria, desenho do ANAREDE

Comparando os resultados do Python e do ANAREDE, os maiores erros relativos e absolutos, de cada grandeza calculada, são apresentados abaixo.

Tabela 7
Erros Relativos Máximos - IEEE 14 Barras - Subestação Detalhada

Erros Relativos					
V [%]	θ [%]	P_g [%]	Q_g [%]	P_{km} [%]	Q_{km} [%]
4.10E-03	1.22E-02	1.68E-04	4.73E-03	3.44E-02	3.52E-02

Tabela 8
Erros Absolutos Máximos - IEEE 14 Barras - Subestação Detalhada

Erros Absolutos					
V [pu]	θ []	P_g [MW]	Q_g [Mvar]	P_{km} [MW]	Q_{km} [Mvar]
4.33E-05	1.27E-03	3.90E-04	1.29E-03	3.04E-03	3.02E-03

O maior erro absoluto apresentado é de 3.04E-03 (circuito entre as barras 2 e 19, sendo esta uma seção de entrada da subestação 4), condizente a um erro relativo de apenas 0.0054%. Considerando, também, que o maior erro relativo é de 0.0352%, é possível assumir que não há discrepância considerável entre os resultados de fluxo de potência rodados no programa em Python e no ANAREDE.

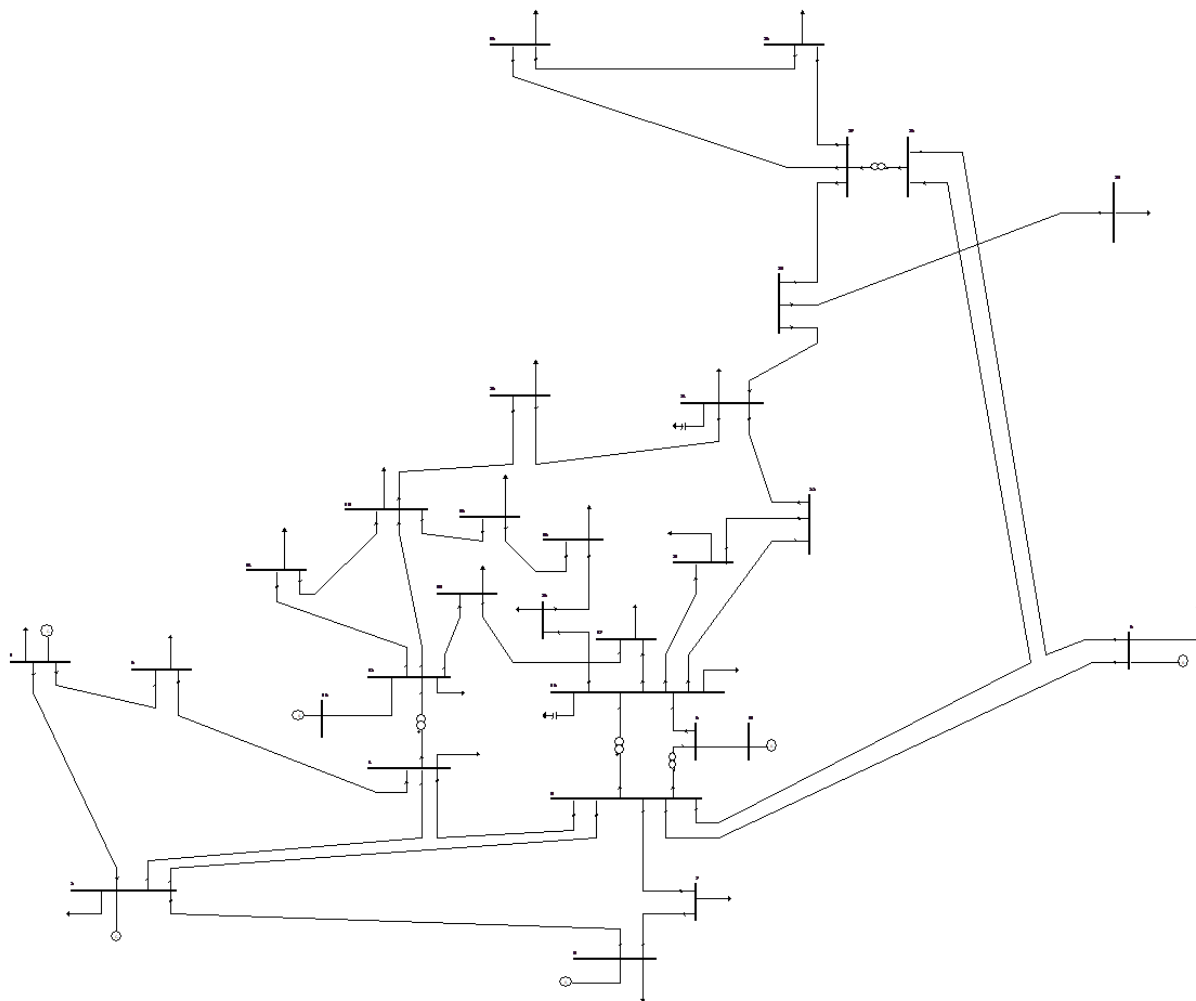
Os resultados completos para esse sistema são apresentados no Anexo C.2, onde as Tabelas 35 e 36 apresentam os resultados quando rodados no Python, e as Tabelas 37 e 38 apresentam os resultados quando rodados no ANAREDE.

4.2 SEGUNDO TESTE - IEEE 30 BARRAS

4.2.1 Sistema Elétrico Base

O sistema elétrico base, sem nenhuma subestação detalhada, IEEE 30 barras tem seus parâmetros descritos no Anexo A.3, e seu desenho é apresentado na Figura 15.

Figura 15 Diagrama Unifilar do Sistema IEEE 30 Barras



Fonte: Autoria Própria, desenho do ANAREDE

Comparando os resultados do Python e do ANAREDE, os maiores erros relativos e absolutos, de cada grandeza calculada, são apresentados abaixo.

Tabela 9
Erros Relativos Máximos - IEEE 30 Barras

Erros Relativos					
V [%]	θ [%]	P_g [%]	Q_g [%]	P_{km} [%]	Q_{km} [%]
4.99E-03	3.99E-04	2.81E-05	1.66E-03	1.10E-02	5.93E-02

Tabela 10
Erros Absolutos Máximos - IEEE 30 Barras

Erros Absolutos					
V [pu]	θ [°]	P_g [MW]	Q_g [Mvar]	P_{km} [MW]	Q_{km} [Mvar]
5.05E-05	6.74E-05	7.33E-05	4.49E-04	4.60E-04	3.07E-04

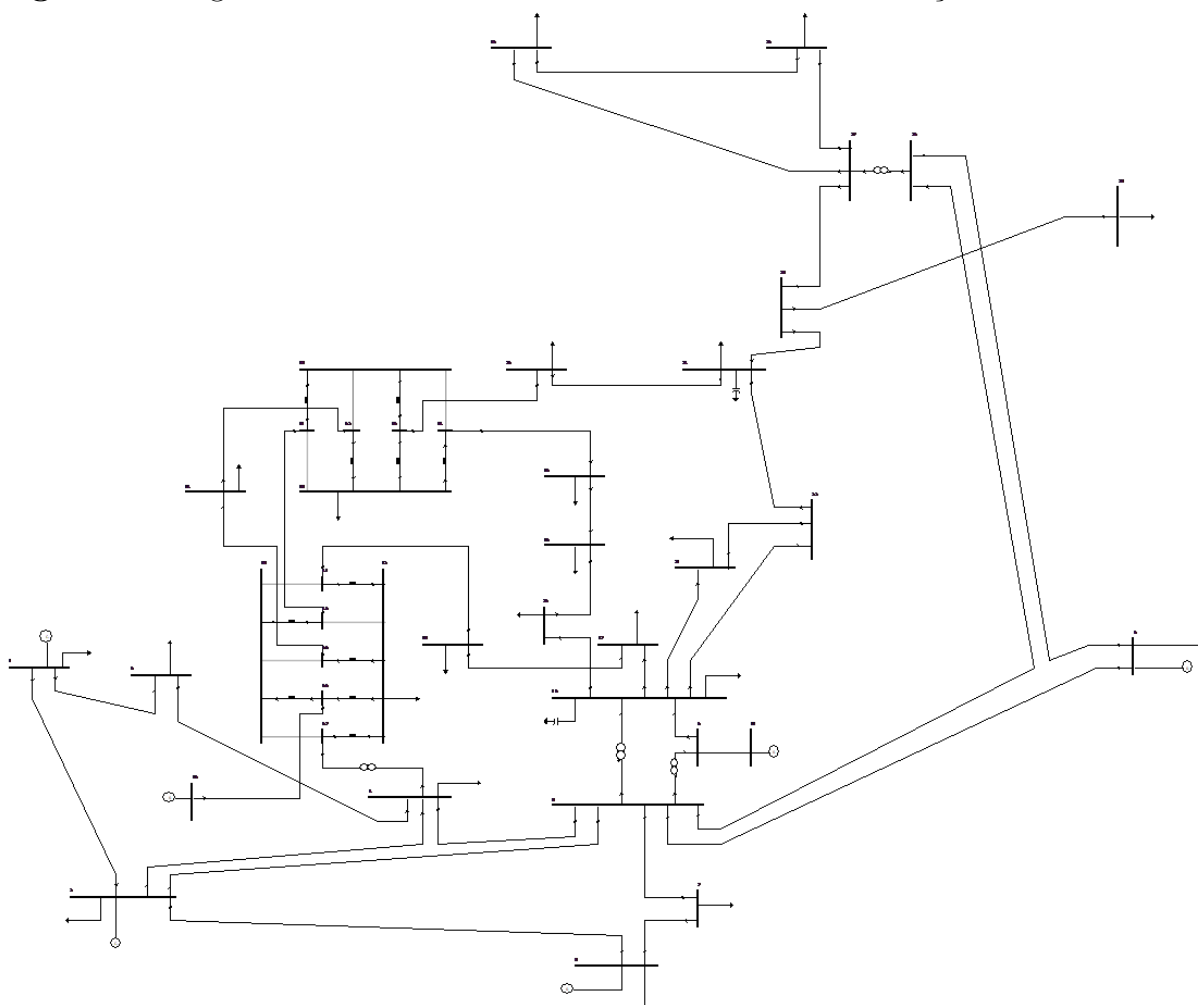
Os maiores erros absolutos apresentados são da ordem de E-04, o que indica uma diferença apenas na última casa decimal em relação aos valores do ANAREDE. Considerando, também, que o maior erro relativo é de 0.0593%, é possível assumir que não há discrepância considerável entre os resultados de fluxo de potência rodados no programa em Python e no ANAREDE.

Os resultados completos para esse sistema são apresentados no Anexo C.3, onde as Tabelas 39 e 40 apresentam os resultados quando rodados no Python, e as Tabelas 41 e 42 apresentam os resultados quando rodados no ANAREDE.

4.2.2 Sistema com Subestações Detalhadas

Para esse teste as subestações 12 e 15, do caso base, são detalhadas ambas com o arranjos de barramento dois disjuntores. Dessa forma, o desenho do sistema fica como apresentado na Figura 16, o detalhamento da subestação 12 fica como na Figura 21 e o detalhamento da subestação 15 fica como na Figura 22, no Anexo B.2. Os detalhes dos parâmetros desse sistema estão descritos no Anexo A.4.

Figura 16 Diagrama Unifilar do Sistema IEEE 30 Barras - Subestações Detalhadas



Fonte: Autoria Própria, desenho do ANAREDE

Comparando os resultados do Python e do ANAREDE, os maiores erros relativos e absolutos, de cada grandeza calculada, são apresentados abaixo.

Tabela 11
Erros Relativos Máximos - IEEE 30 Barras - Subestação Detalhada

Erros Relativos					
V [%]	θ [%]	P_g [%]	Q_g [%]	P_{km} [%]	Q_{km} [%]
4.89E-03	2.71E-03	1.02E-05	2.16E-03	5.78E-02	9.85E-02

Tabela 12
Erros Absolutos Máximos - IEEE 30 Barras - Subestação Detalhada

Erros Absolutos					
V [pu]	θ []	P_g [MW]	Q_g [Mvar]	P_{km} [MW]	Q_{km} [Mvar]
4.95E-05	4.43E-04	2.67E-05	6.10E-04	2.19E-03	1.55E-03

O maior erro absoluto apresentado é de 2.19E-03 (ocorrendo em ramos chaveáveis de ambas subestações expandidas e no circuito que as conecta), condizente a um erro relativo de apenas 0.0126%. Considerando, também, que o maior erro relativo é de 0.0985%, é possível assumir que não há discrepância considerável entre os resultados de fluxo de potência rodados no programa em Python e no ANAREDE.

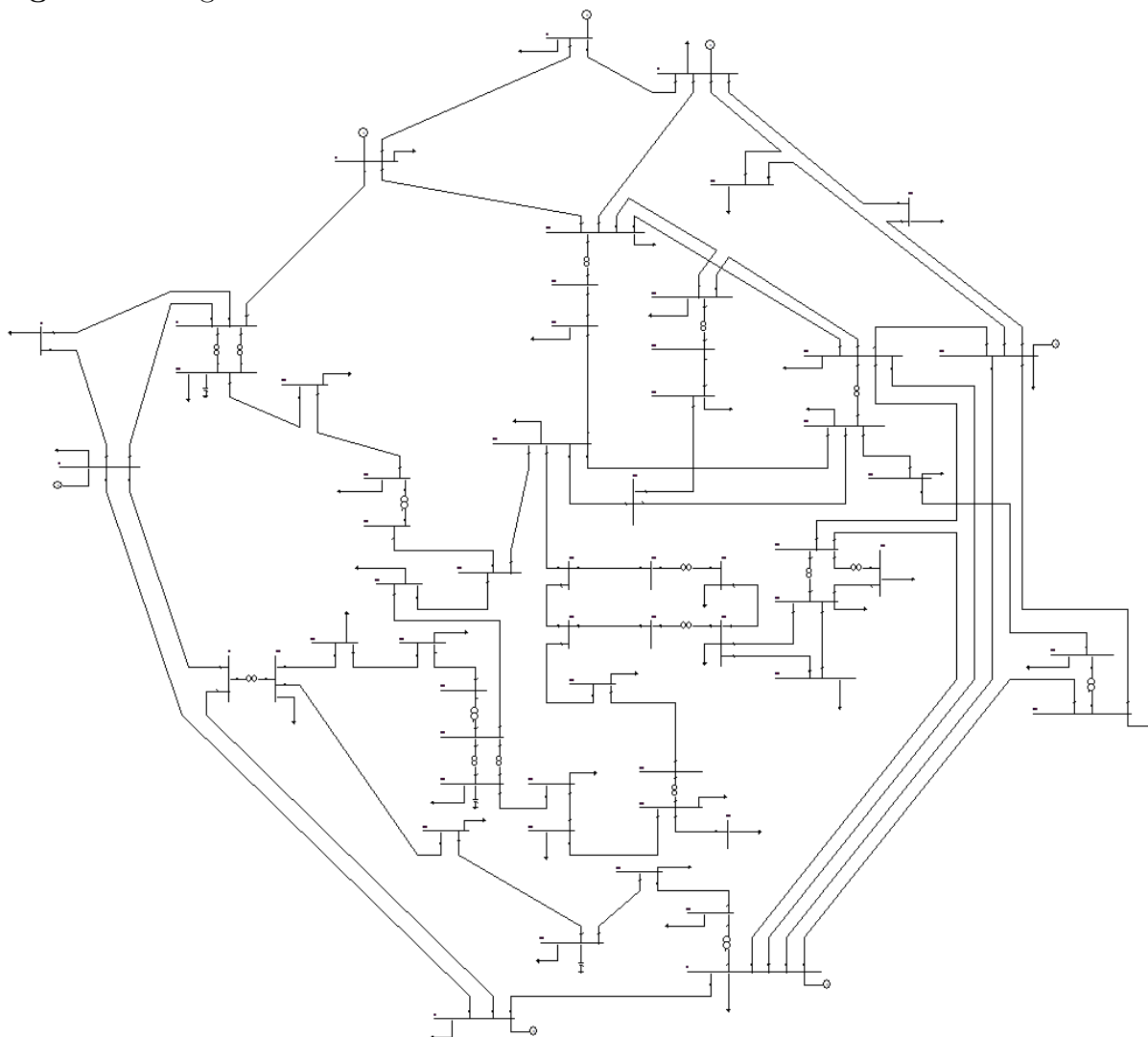
Os resultados completos para esse sistema são apresentados no Anexo C.4, onde as Tabelas 43 e 44 apresentam os resultados quando rodados no Python, e as Tabelas 45 e 46 apresentam os resultados quando rodados no ANAREDE.

4.3 TERCEIRO TESTE - IEEE 57 BARRAS

4.3.1 Sistema Elétrico Base

O sistema elétrico base, sem nenhuma subestação detalhada, IEEE 57 barras tem seus parâmetros descritos no Anexo A.5, e seu desenho é apresentado na Figura 17.

Figura 17 Diagrama Unifilar do Sistema IEEE 57 Barras



Fonte: Autoria Própria, desenho do ANAREDE

Comparando os resultados do Python e do ANAREDE, os maiores erros relativos e absolutos, de cada grandeza calculada, são apresentados abaixo.

Tabela 13
Erros Relativos Máximos - IEEE 57 Barras

Erros Relativos					
V [%]	θ [%]	P_g [%]	Q_g [%]	P_{km} [%]	Q_{km} [%]
5.60E-03	2.32E-03	1.13E-06	1.25E-02	1.30E-02	4.14E-02

Tabela 14
Erros Absolutos Máximos - IEEE 57 Barras

Erros Absolutos					
V [pu]	θ []	P_g [MW]	Q_g [Mvar]	P_{km} [MW]	Q_{km} [Mvar]
4.97E-05	3.06E-04	5.40E-06	5.02E-04	7.02E-04	6.18E-04

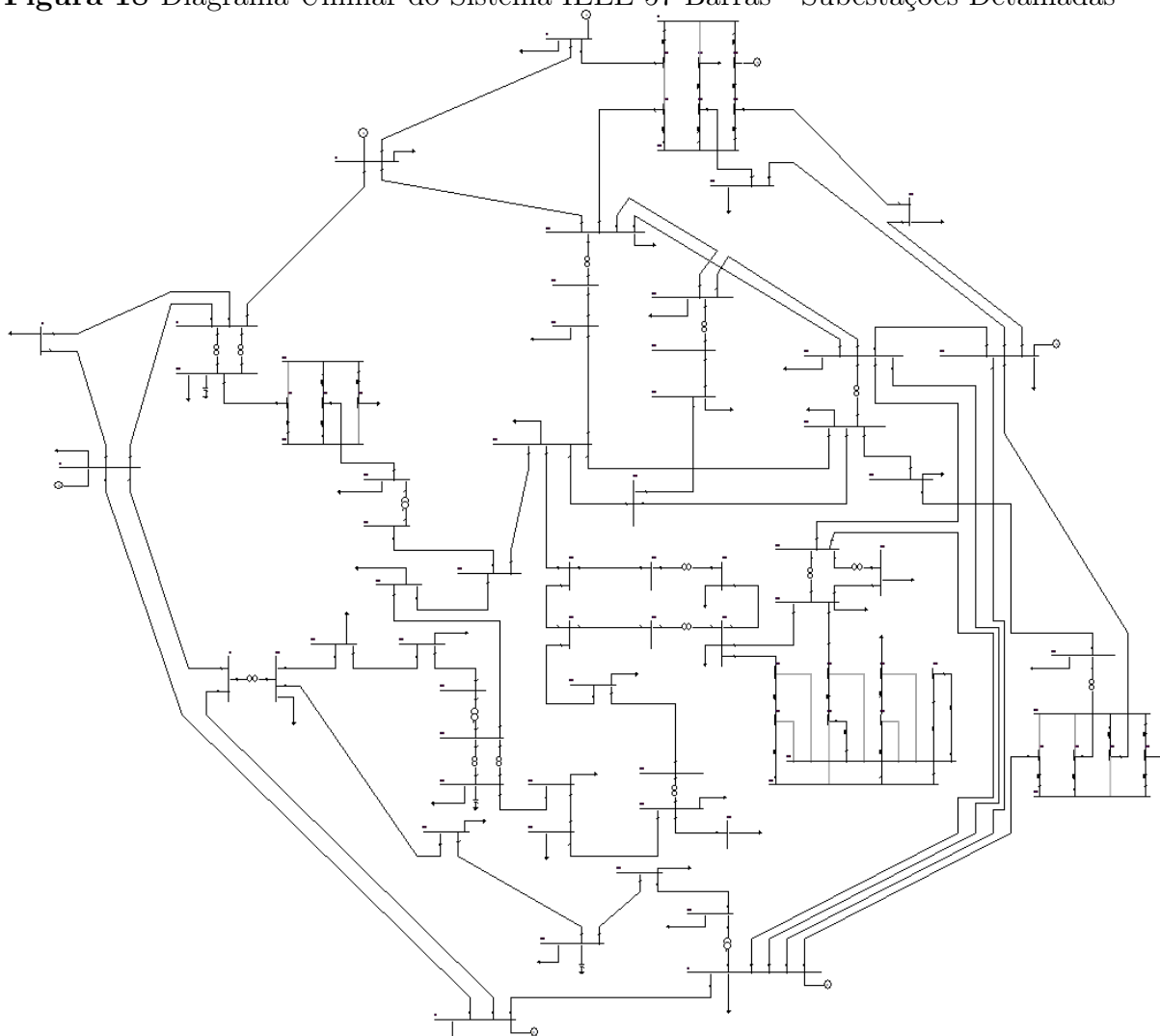
Os maiores erros absolutos apresentados são da ordem de E-04, o que indica uma diferença apenas na última casa decimal em relação aos valores do ANAREDE. Considerando, também, que o maior erro relativo é de 0.0414%, é possível assumir que não há discrepância considerável entre os resultados de fluxo de potência rodados no programa em Python e no ANAREDE.

Os resultados completos para esse sistema são apresentados no Anexo C.5, onde as Tabelas 47 e 48 apresentam os resultados quando rodados no Python, e as Tabelas 49 e 50 apresentam os resultados quando rodados no ANAREDE.

4.3.2 Sistema com Subestações Detalhadas

Para esse teste são detalhadas as subestações 1 (disjuntor e meio), 10 (barramento dois disjuntores), 19 (barramento dois disjuntores) e 42 (barramento duplo a quatro chaves), do caso base. Dessa forma, o desenho do sistema fica como apresentado na Figura 18, o detalhamento da subestação 1 fica como na Figura 23, o detalhamento da subestação 10 fica como na Figura 24, o detalhamento da subestação 19 fica como na Figura 25 e o detalhamento da subestação 42 fica como na Figura 26, todas elas no Anexo B.3. Os detalhes dos parâmetros desse sistema estão descritos no Anexo A.6.

Figura 18 Diagrama Unifilar do Sistema IEEE 57 Barras - Subestações Detalhadas



Fonte: Autoria Própria, desenho do ANAREDE

Comparando os resultados do Python e do ANAREDE, os maiores erros relativos e absolutos, de cada grandeza calculada, são apresentados abaixo.

Tabela 15
Erros Relativos Máximos - IEEE 57 Barras - Subestação Detalhada

Erros Relativos					
V [%]	θ [%]	P_g [%]	Q_g [%]	P_{km} [%]	Q_{km} [%]
6.80E-03	3.52E-03	5.50E-05	6.36E-02	4.71E-01	2.80E-01

Tabela 16
Erros Absolutos Máximos - IEEE 57 Barras - Subestação Detalhada

Erros Absolutos					
V [pu]	θ []	P_g [MW]	Q_g [Mvar]	P_{km} [MW]	Q_{km} [Mvar]
6.77E-05	9.31E-04	2.72E-04	2.52E-02	7.33E-03	2.42E-02

Os maiores erros absolutos apresentados são de 2.52E-02 (ocorrendo na geração reativa da barra PV 2) e 2.42E-02 (ocorrendo em um ramo chaveável da subestação 1), condizentes a um erro relativo de apenas 0.0159% e 0.0361%, respectivamente. Considerando, também, que o maior erro relativo é de 0.471%, é possível assumir que não há discrepância considerável entre os resultados de fluxo de potência rodados no programa em Python e no ANAREDE.

Os resultados completos para esse sistema são apresentados no Anexo C.6, onde as Tabelas 51 e 52 apresentam os resultados quando rodados no Python, e as Tabelas 53 e 54 apresentam os resultados quando rodados no ANAREDE.

4.4 ANÁLISE COMPUTACIONAL

Como foi possível observar, a expansão das subestações, em casos em que só havia a representação de subestações por barras, aumenta a dimensão do problema de fluxo de potência, já que cada seção de barramento é representada como uma barra própria. Além disso, na metodologia apresentada para resolução de fluxo de potência em nível de subestação, aumenta ainda mais a dimensão do problema ao introduzir novas variáveis de estado e equações. A Tabela 17 descreve esse aumento.

Tabela 17
Tamanho da Jacobiana - Casos Testes

Casos	Original	Nível de Subestação	
	$2NPQ + NPV$	$2NPQ + NPV$	$2NPQ + NPV + 2NRC$
IEEE 14 Barras	22	36	54
IEEE 30 Barras	53	75	111
IEEE 57 Barras	106	154	228

Por conta disso, um esforço computacional maior é exigido para a resolução de problemas com esse tipo de metodologia. Porém, as novas equações do problema, (30) e (31), são equações lineares; dessa maneira, não há um aumento no número de iterações na resolução do sistema não-linear geral por conta da modelagem de ramos chaveáveis. Os tempos de simulação de cada teste realizado nesta seção, e a quantidade de suas iterações, são apresentados na Tabela 18.

Tabela 18
Dados das Simulações

Caso	Tempo de Simulação [s]	Iterações
IEEE 14 Barras	0.406737328	3
IEEE 14 Barras - Subestação Detalhada	1.437064171	3
IEEE 30 Barras	1.746863365	3
IEEE 30 Barras - Subestação Detalhada	4.631031990	3
IEEE 57 Barras	7.835971355	4
IEEE 57 Barras - Subestação Detalhada	47.869232893	4

Esses tempos foram calculados apenas para o programa em Python, a descrição desta medição está no fluxograma da Figura 12, e são as médias de um total de 15 amostragens. O programa, para esse teste de tempo, foi rodado em um computador utilizando o sistema operacional Windows 10 de 64 bits, com um processador Intel Core i7-2600 CPU @ 3.40 Hz.

5 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho expõe a formulação do problema de fluxo de potência considerando a possibilidade do detalhamento de subestações de acordo com seu arranjo. Esse detalhamento faz com que o problema convencional passe a incluir ramos chaveáveis, como disjuntores e chaves seccionadoras, que não podem ser considerados da mesma forma que ramos normais. A representação desses ramos se demonstra importante, por exemplo, em estudos de fluxo de barramento de projeto básico do ONS ou estudos de chaveamento corretivo.

A modelagem de ramos chaveáveis fez com que duas novas variáveis de estado, t_{ij} e U_{ij} , fossem incluídas na formulação usual de fluxo de potência, além de V e θ . Novas equações, f^{fc} e f^{ab} , que descrevem o funcionamento desses ramos quando fechados, situação em que a diferença de módulo e ângulo de tensão entre as barras das extremidades é zero, e quando abertos, situação em que o fluxo de potência ativa e reativa pelo ramo é zero, também são consideradas.

Dessa maneira, um programa foi desenvolvido em Python para fazer o cálculo de fluxo de potência considerando essa modelagem em nível de subestação, e sistemas testes, de variados tamanhos, foram colocados a prova para validá-lo. Esses resultados se mostraram coerentes, e isso foi demonstrado ao compará-los com os valores calculados, dos mesmos sistemas, no ANAREDE.

Os resultados de fluxo de potência a partir da aplicação em Python e do ANAREDE não diferem de maneira significativa, atestando a validade do método elaborado.

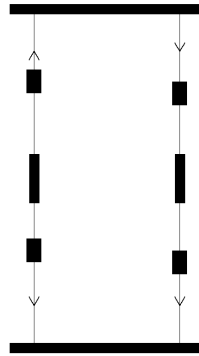
5.1 TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para trabalhos futuros, a partir deste, pode-se considerar, primeiramente, um algoritmo mais geral que resolve esse problema de Fluxo de Potência em nível de subestação.

O algoritmo apresentado neste trabalho não contempla a possibilidade de formação de caminhos fechados de ramos chaveáveis, como exemplificado na Figura 19. Nessa situação, por se tratar de ramos de impedância desprezível (considerados como impedância zero), esses caminhos fechados fazem com que surjam um sistema de equações indeterminado, de forma que o fluxo por um ramo pode ser qualquer valor $t_a + t$ conquanto o outro

seja $t_b = t$. Para contornar esse problema, é necessário um procedimento que identifique os caminhos fechados que existem na rede, procedimento esse baseado em análise de grafos, e outro procedimento que estabeleça um conjunto de equações não redundante para a subestação que contenha o caminho (Lourenço et al., 2010).

Figura 19 Exemplo de um caminho fechado formado por ramos chaveáveis



Fonte: Autoria Própria, desenho do ANAREDE

Outra possibilidade futura é a otimização desse algoritmo, podendo-se aplicar o método de Newton-Raphson Desacoplado para resolvê-lo, (Lourenço, Simões Costa, e Silva, 2009), ou métodos alternativos como o que resolve o problema em duas etapas (Lourenço, Foletto, e Tortelli, 2018). Além disso, a implementação de métodos de otimização numéricos para melhorar o desempenho computacional da resolução do problema.

A inclusão de um método de análise de contingências, considerando essa modelagem de subestação, também é possível como um trabalho futuro. Dessa forma seria possível monitorar o fluxo em ramos chaveáveis para caso de contingências externas, como perdas de linhas de transmissão ou transformadores, e internas a subestação, como abertura ou perda de algum ramo chaveável. Essa análise pode ser utilizada no dimensionamento dos disjuntores, chaves seccionadoras, cabos condutores e barramentos de uma nova subestação ou de uma expansão de uma subestação existente.

A representação de ramos chaveáveis no modelo de rede para fluxo de potência também pode ser utilizado para problemas de fluxo em áreas de distribuição que contem com grande número de disjuntores e chaves seccionadoras. Os testes apresentados neste trabalho, porém, foram para sistemas de transmissão; para testes com sistemas de distribuição, são necessárias considerações próprias a esse contexto.

ANEXOS

A PARÂMETROS DA REDE

A.1 IEEE 14 BARRAS - PARÂMETROS

Tabela 19
Parâmetros de Barra - IEEE 14 Barras

Num.	Tipo	V [pu]	θ [°]	P_g [MW]	P_c [MW]	Q_c [Mvar]	B [pu]
1	$V\theta$	1.060	0.00				
2	PV	1.045		40.00	21.70	12.70	
3	PV	1.010		0.00	94.20	19.00	
4	PQ				47.80	3.90	
5	PQ				7.60	1.60	
6	PV	1.070		0.00	11.20	7.50	
7	PQ						
8	PV	1.090		0.00			
9	PQ				29.50	16.60	0.19
10	PQ				9.00	5.80	
11	PQ				3.50	1.80	
12	PQ				6.10	1.60	
13	PQ				13.50	5.80	
14	PQ				14.90	5.00	

Tabela 20
Parâmetros de Circuito - IEEE 14 Barras

Num. Barra De	Num. Barra Para	R [pu]	X [pu]	B [pu]
1	2	0.019 38	0.059 17	0.052 80
1	5	0.054 03	0.223 04	0.049 20
2	3	0.046 99	0.197 97	0.043 80
2	4	0.058 11	0.176 32	0.034 00
2	5	0.056 95	0.173 88	0.034 60
3	4	0.067 01	0.171 03	0.012 80
4	5	0.013 35	0.042 11	
4	7	0.000 00	0.209 12	
4	9	0.000 00	0.556 18	

Continua na próxima página

Continuação da tabela				
Num. Barra De	Num. Barra Para	R [pu]	X [pu]	B [pu]
5	6	0.000 00	0.252 02	
6	11	0.094 98	0.198 90	
6	12	0.122 91	0.255 81	
6	13	0.066 15	0.130 27	
7	8	0.000 00	0.176 15	
7	9	0.000 00	0.110 01	
9	10	0.031 81	0.084 50	
9	14	0.127 11	0.270 38	
10	11	0.082 05	0.192 07	
12	13	0.220 92	0.199 88	
13	14	0.170 93	0.348 02	

A.2 IEEE 14 BARRAS - NÍVEL DE SUBESTAÇÃO - PARÂMETROS

Os ramos chaveáveis estão representados por reatâncias de valor 0.00001, quando fechados, e 99.9900, quando abertos.

Tabela 21
Parâmetros de Barra - IEEE 14 Barras - Nível de Subestação

Num.	Tipo	V [pu]	θ []	P_g [MW]	P_c [MW]	Q_c [Mvar]	B [pu]
1	$V\theta$	1.060	0.00				
2	PV	1.045		40.00	21.70	12.70	
3	PV	1.010		0.00	94.20	19.00	
4	PQ						
5	PQ				7.60	1.60	
6	PV	1.070		0.00	11.20	7.50	
7	PQ						
8	PV	1.090		0.00			
9	PQ				29.50	16.60	0.19
10	PQ				9.00	5.80	
11	PQ				3.50	1.80	
12	PQ				6.10	1.60	
13	PQ				13.50	5.80	
14	PQ				14.90	5.00	
15	PQ						
16	PQ						

Continua na próxima página

Continuação da tabela							
Num.	Tipo	V [pu]	θ []	P_g [MW]	P_c [MW]	Q_c [Mvar]	B [pu]
17	PQ				47.80	3.90	
18	PQ						
19	PQ						
20	PQ						
21	PQ						

Tabela 22
Parâmetros de Circuito - IEEE 14 Barras - Nível de Subestação

Num. Barra De	Num. Barra Para	R [pu]	X [pu]	B [pu]
1	2	0.019 38	0.059 17	0.052 80
1	5	0.054 03	0.223 04	0.049 20
2	3	0.046 99	0.197 97	0.043 80
2	5	0.056 95	0.173 88	0.034 60
2	19	0.058 11	0.173 62	0.034 00
3	20	0.067 01	0.171 03	0.012 80
4	15		0.000 01	
4	16		0.000 01	
4	17		0.000 01	
5	6		0.252 02	
5	18	0.013 35	0.042 11	
6	11	0.094 98	0.198 90	
6	12	0.122 91	0.255 81	
6	13	0.066 15	0.130 27	
7	8		0.176 15	
7	9		0.110 01	
7	16		0.209 12	
9	10	0.031 81	0.084 50	
9	14	0.127 11	0.270 38	
10	11	0.082 05	0.192 07	
12	13	0.220 92	0.199 88	
13	14	0.170 93	0.348 02	
15	9		0.556 18	
15	18		0.000 01	
16	19		99.990 00	

Continua na próxima página

Continuação da tabela				
Num. Barra De	Num. Barra Para	R [pu]	X [pu]	B [pu]
17	20		99.990 00	
18	21		0.000 01	
19	21		0.000 01	
20	21		0.000 01	

A.3 IEEE 30 BARRAS - PARÂMETROS

Tabela 23
Parâmetros de Barra - IEEE 30 Barras

Num.	Tipo	V [pu]	θ []	P_g [MW]	P_c [MW]	Q_c [Mvar]	B [pu]
1	$V\theta$	1.060	0.00		0.00	6.00	0.00
2	PV	1.043		40.00	21.70	12.70	0.00
3	PQ				2.40	1.20	0.00
4	PQ				7.60	1.60	0.00
5	PV	1.010		0.00	94.20	19.00	0.00
6	PQ				0.00	0.00	0.00
7	PQ				22.80	10.90	0.00
8	PV	1.010		0.00	30.00	30.00	0.00
9	PQ				0.00	0.00	0.00
10	PQ				5.80	2.00	0.19
11	PV	1.082		0.00	0.00	0.00	0.00
12	PQ				11.20	7.50	0.00
13	PV	1.071		0.00	0.00	0.00	0.00
14	PQ				6.20	1.60	0.00
15	PQ				8.20	2.50	0.00
16	PQ				3.50	1.80	0.00
17	PQ				9.00	5.80	0.00
18	PQ				3.20	0.90	0.00
19	PQ				9.50	3.40	0.00
20	PQ				2.20	0.70	0.00
21	PQ				17.50	11.20	0.00
22	PQ				0.00	0.00	0.00
23	PQ				3.20	1.60	0.00
24	PQ				8.70	6.70	0.04
25	PQ				0.00	0.00	0.00

26	<i>PQ</i>				3.50	2.30	0.00
27	<i>PQ</i>				0.00	0.00	0.00
28	<i>PQ</i>				0.00	0.00	0.00
29	<i>PQ</i>				2.40	0.90	0.00
30	<i>PQ</i>				10.60	1.90	0.00

Tabela 24
Parâmetros de Circuito - IEEE 30 Barras

Num. Barra De	Num. Barra Para	R [pu]	X [pu]	B [pu]
1	2	0.019 20	0.057 50	0.052 80
1	3	0.045 20	0.165 20	0.040 80
2	4	0.057 00	0.173 70	0.036 80
2	5	0.047 20	0.198 30	0.041 80
2	6	0.058 10	0.176 30	0.037 40
3	4	0.013 20	0.037 90	0.008 40
4	6	0.011 90	0.041 40	0.009 00
4	12	0.000 00	0.256 00	
5	7	0.046 00	0.116 00	0.020 40
6	7	0.026 70	0.082 00	0.017 00
6	8	0.012 00	0.042 00	0.009 00
6	9	0.000 00	0.208 00	
6	10	0.000 00	0.556 00	
6	28	0.016 90	0.059 90	0.013 00
8	28	0.063 60	0.200 00	0.042 80
9	10	0.000 00	0.110 00	
9	11	0.000 00	0.208 00	
10	17	0.032 40	0.084 50	
10	20	0.093 60	0.209 00	
10	21	0.034 80	0.074 90	
10	22	0.072 70	0.149 90	
12	13	0.000 00	0.140 00	
12	14	0.123 10	0.255 90	
12	15	0.066 20	0.130 40	
12	16	0.094 50	0.198 70	
14	15	0.221 00	0.199 70	
15	18	0.107 30	0.218 50	
Continua na próxima página				

Continuação da tabela				
Num. Barra De	Num. Barra Para	R [pu]	X [pu]	B [pu]
15	23	0.100 00	0.202 00	
16	17	0.052 40	0.192 30	
18	19	0.063 90	0.129 20	
19	20	0.034 00	0.068 00	
21	22	0.011 60	0.023 60	
22	24	0.115 00	0.179 00	
23	24	0.132 00	0.270 00	
24	25	0.188 50	0.329 20	
25	26	0.254 40	0.380 00	
25	27	0.109 30	0.208 70	
27	29	0.219 80	0.415 30	
27	30	0.320 20	0.602 70	
28	27	0.000 00	0.396 00	
29	30	0.239 90	0.453 30	

A.4 IEEE 30 BARRAS - NÍVEL DE SUBESTAÇÃO - PARÂMETROS

Os ramos chaveáveis estão representados por reatâncias de valor 0.00001, quando fechados, e 99.9900, quando abertos.

Tabela 25
Parâmetros de Barra - IEEE 30 Barras - Nível de Subestação

Num.	Tipo	V [pu]	θ [°]	P_g [MW]	P_c [MW]	Q_c [Mvar]	B [pu]
1	$V\theta$	1.060	0.00		0.00	6.00	
2	PV	1.043		40.00	21.70	12.70	
3	PQ				2.40	1.20	
4	PQ				7.60	1.60	
5	PV	1.010		0.00	94.20	19.00	
6	PQ						
7	PQ				22.80	10.90	
8	PV	1.010		0.00	30.00	30.00	
9	PQ						
10	PQ				5.80	2.00	0.19
11	PV	1.082		0.00			
12	PQ				11.20	7.50	
13	PV	1.071		0.00			
14	PQ				6.20	1.60	

15	PQ				8.20	2.50	
16	PQ				3.50	1.80	
17	PQ				9.00	5.80	
18	PQ				3.20	0.90	
19	PQ				9.50	3.40	
20	PQ				2.20	0.70	
21	PQ				17.50	11.20	
22	PQ						
23	PQ				3.20	1.60	
24	PQ				8.70	6.70	0.04
25	PQ						
26	PQ				3.50	2.30	
27	PQ						
28	PQ						
29	PQ				2.40	0.90	
30	PQ				10.60	1.90	
31	PQ						
32	PQ						
33	PQ						
34	PQ						
35	PQ						
36	PQ						
37	PQ						
38	PQ						
39	PQ						
40	PQ						
41	PQ						

Tabela 26
Parâmetros de Circuito - IEEE 30 Barras - Nível de Subestação

Num. Barra De	Num. Barra Para	R [pu]	X [pu]	B [pu]
1	2	0.019 20	0.057 50	0.052 80
1	3	0.045 20	0.165 20	0.040 80
2	4	0.057 00	0.173 70	0.036 80
2	5	0.047 20	0.198 30	0.041 80
2	6	0.058 10	0.176 30	0.037 40

Continua na próxima página

Continuação da tabela				
Num. Barra De	Num. Barra Para	R [pu]	X [pu]	B [pu]
3	4	0.013 20	0.037 90	0.008 40
4	6	0.011 90	0.041 40	0.009 00
4	37		0.256 00	
5	7	0.046 00	0.116 00	0.020 40
6	7	0.026 70	0.082 00	0.017 00
6	8	0.012 00	0.042 00	0.009 00
6	9		0.208 00	
6	10		0.556 00	
6	28	0.016 90	0.059 90	0.013 00
8	28	0.063 60	0.200 00	0.042 80
9	10		0.110 00	
9	11		0.208 00	
10	17	0.032 40	0.084 50	
10	20	0.093 60	0.209 00	
10	21	0.034 80	0.074 90	
10	22	0.072 70	0.149 90	
12	37		0.000 01	
12	38		0.000 01	
12	39		0.000 01	
12	40		99.990 00	
12	41		0.000 01	
14	32	0.221 00	0.199 70	
15	31		99.990 00	
15	32		0.000 01	
15	33		0.000 01	
15	34		0.000 01	
16	17	0.052 40	0.192 30	
18	19	0.063 90	0.129 20	
19	20	0.034 00	0.068 00	
21	22	0.011 60	0.023 60	
22	24	0.115 00	0.179 00	
23	24	0.132 00	0.270 00	
24	25	0.188 50	0.329 20	
25	26	0.254 40	0.380 00	
Continua na próxima página				

Continuação da tabela				
Num. Barra De	Num. Barra Para	R [pu]	X [pu]	B [pu]
25	27	0.109 30	0.208 70	
27	29	0.219 80	0.415 30	
27	30	0.320 20	0.602 70	
28	27		0.396 00	
29	30	0.239 90	0.453 30	
31	35		0.000 01	
32	35		99.990 00	
33	23	0.100 00	0.202 00	
33	35		0.000 01	
34	18	0.107 30	0.218 50	
34	35		99.990 00	
36	37		99.990 00	
36	38		0.000 01	
36	39		99.990 00	
36	40		0.000 01	
36	41		99.990 00	
38	13		0.140 00	
39	14	0.123 10	0.255 90	
40	31	0.066 20	0.130 40	
41	16	0.094 50	0.198 70	

A.5 IEEE 57 BARRAS - PARÂMETROS

Tabela 27
Parâmetros de Barra - IEEE 57 Barras

Num.	Tipo	V [pu]	θ [°]	P_g [MW]	P_c [MW]	Q_c [Mvar]	B [pu]
1	$V\theta$	1.040	0.00		55.00	17.00	
2	PV	1.010		0.00	3.00	88.00	
3	PV	0.985		40.00	41.00	21.00	
4	PQ						
5	PQ				13.00	4.00	
6	PV	0.980		0.00	75.00	2.00	
7	PQ						
8	PV	1.005		450.00	150.00	22.00	
9	PV	0.980		0.00	121.00	26.00	

10	<i>PQ</i>				5.00	2.00	
11	<i>PQ</i>						
12	<i>PV</i>	1.015		310.00	377.00	24.00	
13	<i>PQ</i>				18.00	2.30	
14	<i>PQ</i>				10.50	5.30	
15	<i>PQ</i>				22.00	5.00	
16	<i>PQ</i>				43.00	3.00	
17	<i>PQ</i>				42.00	8.00	
18	<i>PQ</i>				27.20	9.80	0.10
19	<i>PQ</i>				3.30	0.60	
20	<i>PQ</i>				2.30	1.00	
21	<i>PQ</i>						
22	<i>PQ</i>						
23	<i>PQ</i>				6.30	2.10	
24	<i>PQ</i>						
25	<i>PQ</i>				6.30	3.20	0.06
26	<i>PQ</i>						
27	<i>PQ</i>				9.30	0.50	
28	<i>PQ</i>				4.60	2.30	
29	<i>PQ</i>				17.00	2.60	
30	<i>PQ</i>				3.60	1.80	
31	<i>PQ</i>				5.80	2.90	
32	<i>PQ</i>				1.60	0.80	
33	<i>PQ</i>				3.80	1.90	
34	<i>PQ</i>						
35	<i>PQ</i>				6.00	3.00	
36	<i>PQ</i>						
37	<i>PQ</i>						
38	<i>PQ</i>				14.00	7.00	
39	<i>PQ</i>						
40	<i>PQ</i>						
41	<i>PQ</i>				6.30	3.00	
42	<i>PQ</i>				7.10	4.40	
43	<i>PQ</i>				2.00	1.00	
44	<i>PQ</i>				12.00	1.80	
45	<i>PQ</i>						
46	<i>PQ</i>						

47	<i>PQ</i>				29.70	11.60	
48	<i>PQ</i>						
49	<i>PQ</i>				18.00	8.50	
50	<i>PQ</i>				21.00	10.50	
51	<i>PQ</i>				18.00	5.30	
52	<i>PQ</i>				4.90	2.20	
53	<i>PQ</i>				20.00	10.00	0.06
54	<i>PQ</i>				4.10	1.40	
55	<i>PQ</i>				6.80	3.40	
56	<i>PQ</i>				7.60	2.20	
57	<i>PQ</i>				6.70	2.00	

Tabela 28
Parâmetros de Circuito - IEEE 57 Barras

Num. Barra De	Num. Barra Para	R [pu]	X [pu]	B [pu]
1	2	0.008 30	0.028 00	0.129 00
2	3	0.029 80	0.085 00	0.081 80
3	4	0.011 20	0.036 60	0.038 00
4	5	0.062 50	0.132 00	0.025 80
4	6	0.043 00	0.148 00	0.034 80
6	7	0.020 00	0.102 00	0.027 60
6	8	0.033 90	0.173 00	0.047 00
8	9	0.009 90	0.050 50	0.054 80
9	10	0.036 90	0.167 90	0.044 00
9	11	0.025 80	0.084 80	0.021 80
9	12	0.064 80	0.295 00	0.077 20
9	13	0.048 10	0.158 00	0.040 60
13	14	0.013 20	0.043 40	0.011 00
13	15	0.026 90	0.086 90	0.023 00
1	15	0.017 80	0.091 00	0.098 80
1	16	0.045 40	0.206 00	0.054 60
1	17	0.023 80	0.108 00	0.028 60
3	15	0.016 20	0.053 00	0.054 40
4	18	0.000 00	0.555 00	
5	6	0.030 20	0.064 10	0.012 40
7	8	0.013 90	0.071 20	0.019 40

Continua na próxima página

Continuação da tabela				
Num. Barra De	Num. Barra Para	R [pu]	X [pu]	B [pu]
10	12	0.027 70	0.126 20	0.032 80
11	13	0.022 30	0.073 20	0.018 80
12	13	0.017 80	0.058 00	0.060 40
12	16	0.018 00	0.081 30	0.021 60
12	17	0.039 70	0.179 00	0.047 60
14	15	0.017 10	0.054 70	0.014 80
18	19	0.461 00	0.685 00	
19	20	0.283 00	0.434 00	
21	20	0.000 00	0.776 70	
21	22	0.073 60	0.117 00	
22	23	0.009 90	0.015 20	
23	24	0.166 00	0.256 00	0.008 40
24	25	0.000 00	1.182 00	
24	26	0.000 00	0.047 30	
26	27	0.165 00	0.254 00	
27	28	0.061 80	0.095 40	
28	29	0.041 80	0.058 70	
7	29	0.000 00	0.064 80	
25	30	0.135 00	0.202 00	
30	31	0.326 00	0.497 00	
31	32	0.507 00	0.755 00	
32	33	0.039 20	0.036 00	
34	32	0.000 00	0.953 00	
34	35	0.052 00	0.078 00	0.003 20
35	36	0.043 00	0.053 70	0.001 60
36	37	0.029 00	0.036 60	
37	38	0.065 10	0.100 90	0.002 00
37	39	0.023 90	0.037 90	
36	40	0.030 00	0.046 60	
22	38	0.019 20	0.029 50	
11	41	0.000 00	0.749 00	
41	42	0.207 00	0.352 00	
41	43	0.000 00	0.412 00	
38	44	0.028 90	0.058 50	0.002 00
Continua na próxima página				

Continuação da tabela				
Num. Barra De	Num. Barra Para	R [pu]	X [pu]	B [pu]
15	45	0.000 00	0.104 20	
14	46	0.000 00	0.073 50	
46	47	0.023 00	0.068 00	0.003 20
47	48	0.018 20	0.023 30	
48	49	0.083 40	0.129 00	0.004 80
49	50	0.080 10	0.128 00	
50	51	0.138 60	0.220 00	
10	51	0.000 00	0.071 20	
13	49	0.000 00	0.191 00	
29	52	0.144 20	0.187 00	
52	53	0.076 20	0.098 40	
53	54	0.187 80	0.232 00	
54	55	0.173 20	0.226 50	
11	43	0.000 00	0.153 00	
44	45	0.062 40	0.124 20	0.004 00
40	56	0.000 00	1.195 00	
56	41	0.553 00	0.549 00	
56	42	0.212 50	0.354 00	
39	57	0.000 00	1.355 00	
57	56	0.174 00	0.260 00	
38	49	0.115 00	0.177 00	0.003 00
38	48	0.031 20	0.048 20	
9	55	0.000 00	0.120 50	

A.6 IEEE 57 BARRAS - NÍVEL DE SUBESTAÇÃO - PARÂMETROS

Os ramos chaveáveis estão representados por reatâncias de valor 0.00001, quando fechados, e 99.9900, quando abertos.

Tabela 29
Parâmetros de Barra - IEEE 57 Barras - Nível de Subestação

Num.	Tipo	V [pu]	θ [°]	P_g [MW]	P_c [MW]	Q_c [Mvar]	B [pu]
1	PQ						
2	PV	1.010		0.00	3.00	88.00	
3	PV	0.985		40.00	41.00	21.00	
4	PQ						
5	PQ				13.00	4.00	

6	<i>PV</i>	0.980		0.00	75.00	2.00	
7	<i>PQ</i>						
8	<i>PV</i>	1.005		450.00	150.00	22.00	
9	<i>PV</i>	0.980		0.00	121.00	26.00	
10	<i>PQ</i>						
11	<i>PQ</i>						
12	<i>PV</i>	1.015		310.00	377.00	24.00	
13	<i>PQ</i>				18.00	2.30	
14	<i>PQ</i>				10.50	5.30	
15	<i>PQ</i>				22.00	5.00	
16	<i>Vθ</i>	1.040	0.00		43.00	3.00	
17	<i>PQ</i>				42.00	8.00	
18	<i>PQ</i>				27.20	9.80	0.10
19	<i>PQ</i>						
20	<i>PQ</i>				2.30	1.00	
21	<i>PQ</i>						
22	<i>PQ</i>						
23	<i>PQ</i>				6.30	2.10	
24	<i>PQ</i>						
25	<i>PQ</i>				6.30	3.20	0.06
26	<i>PQ</i>						
27	<i>PQ</i>				9.30	0.50	
28	<i>PQ</i>				4.60	2.30	
29	<i>PQ</i>				17.00	2.60	
30	<i>PQ</i>				3.60	1.80	
31	<i>PQ</i>				5.80	2.90	
32	<i>PQ</i>				1.60	0.80	
33	<i>PQ</i>				3.80	1.90	
34	<i>PQ</i>						
35	<i>PQ</i>				6.00	3.00	
36	<i>PQ</i>						
37	<i>PQ</i>						
38	<i>PQ</i>				14.00	7.00	
39	<i>PQ</i>						
40	<i>PQ</i>						
41	<i>PQ</i>				6.30	3.00	
42	<i>PQ</i>						

43	<i>PQ</i>				2.00	1.00	
44	<i>PQ</i>				12.00	1.80	
45	<i>PQ</i>						
46	<i>PQ</i>						
47	<i>PQ</i>				29.70	11.60	
48	<i>PQ</i>						
49	<i>PQ</i>				18.00	8.50	
50	<i>PQ</i>				21.00	10.50	
51	<i>PQ</i>				18.00	5.30	
52	<i>PQ</i>				4.90	2.20	
53	<i>PQ</i>				20.00	10.00	0.06
54	<i>PQ</i>				4.10	1.40	
55	<i>PQ</i>				6.80	3.40	
56	<i>PQ</i>				7.60	2.20	
57	<i>PQ</i>				6.70	2.00	
58	<i>PQ</i>						
59	<i>PQ</i>						
60	<i>PQ</i>				55.00	17.00	
61	<i>PQ</i>						
62	<i>PQ</i>						
63	<i>PQ</i>						
64	<i>PQ</i>						
65	<i>PQ</i>						
66	<i>PQ</i>						
67	<i>PQ</i>						
68	<i>PQ</i>				5.00	2.00	
69	<i>PQ</i>						
70	<i>PQ</i>						
71	<i>PQ</i>						
72	<i>PQ</i>				3.30	0.60	
73	<i>PQ</i>						
74	<i>PQ</i>						
75	<i>PQ</i>						
76	<i>PQ</i>						
77	<i>PQ</i>						
78	<i>PQ</i>				7.10	4.40	
79	<i>PQ</i>						

80	<i>PQ</i>						
81	<i>PQ</i>						

Tabela 30
Parâmetros de Circuito - IEEE 57 Barras - Nível de Subestação

Num. Barra De	Num. Barra Para	R [pu]	X [pu]	B [pu]
1	58		0.000 01	
1	60		99.990 00	
1	62		0.000 01	
2	3	0.029 80	0.085 00	0.081 80
2	58	0.008 30	0.028 00	0.129 00
3	4	0.011 20	0.036 60	0.038 00
3	15	0.016 20	0.053 00	0.054 40
4	5	0.062 50	0.132 00	0.025 80
4	6	0.043 00	0.148 00	0.034 80
4	18		0.555 00	
5	6	0.030 20	0.064 10	0.012 40
6	7	0.020 00	0.102 00	0.027 60
6	8	0.033 90	0.173 00	0.047 00
7	8	0.013 90	0.071 20	0.019 40
7	29		0.064 80	
8	9	0.009 90	0.050 50	0.054 80
9	11	0.025 80	0.084 80	0.021 80
9	12	0.064 80	0.295 00	0.077 20
9	13	0.048 10	0.158 00	0.040 60
9	55		0.120 50	
9	65	0.036 90	0.167 90	0.044 00
10	65		99.990 00	
10	66		99.990 00	
10	67		0.000 01	
10	68		0.000 01	
11	13	0.022 30	0.073 20	0.018 80
11	41		0.749 00	
11	43		0.153 00	
12	13	0.017 80	0.058 00	0.060 40
12	16	0.018 00	0.081 30	0.021 60

Continua na próxima página

Continuação da tabela				
Num. Barra De	Num. Barra Para	R [pu]	X [pu]	B [pu]
12	17	0.039 70	0.179 00	0.047 60
12	67	0.027 70	0.126 20	0.032 80
13	14	0.013 20	0.043 40	0.011 00
13	15	0.026 90	0.086 90	0.023 00
13	49		0.191 00	
14	15	0.017 10	0.054 70	0.014 80
14	46		0.073 50	
15	45		0.104 20	
15	59	0.017 80	0.091 00	0.098 80
16	63	0.045 40	0.206 00	0.054 60
17	61	0.023 80	0.108 00	0.028 60
18	70	0.461 00	0.685 00	
19	70		99.990 00	
19	71		0.000 01	
19	72		0.000 01	
20	71	0.283 00	0.434 00	
21	20		0.776 70	
21	22	0.073 60	0.117 00	
22	23	0.009 90	0.015 20	
22	38	0.019 20	0.029 50	
23	24	0.166 00	0.256 00	0.008 40
24	25		1.182 00	
24	26		0.047 30	
25	30	0.135 00	0.202 00	
26	27	0.165 00	0.254 00	
27	28	0.061 80	0.095 40	
28	29	0.041 80	0.058 70	
29	52	0.144 20	0.187 00	
30	31	0.326 00	0.497 00	
31	32	0.507 00	0.755 00	
32	33	0.039 20	0.036 00	
34	32		0.953 00	
34	35	0.052 00	0.078 00	0.003 20
35	36	0.043 00	0.053 70	0.001 60
Continua na próxima página				

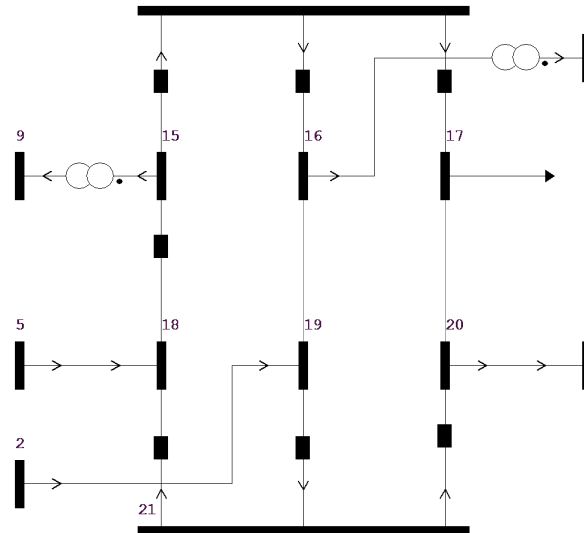
Continuação da tabela				
Num. Barra De	Num. Barra Para	R [pu]	X [pu]	B [pu]
36	37	0.029 00	0.036 60	
36	40	0.030 00	0.046 60	
37	38	0.065 10	0.100 90	0.002 00
37	39	0.023 90	0.037 90	
38	44	0.028 90	0.058 50	0.002 00
38	48	0.031 20	0.048 20	
38	49	0.115 00	0.177 00	0.003 00
39	57		1.355 00	
40	56		1.195 00	
41	43		0.412 00	
41	76	0.207 00	0.352 00	
42	74		99.990 00	
42	75		99.990 00	
42	76		99.990 00	
42	77		0.000 01	
42	78		99.990 00	
42	79		99.990 00	
42	80		0.000 01	
44	45	0.062 40	0.124 20	0.004 00
46	47	0.023 00	0.068 00	0.003 20
47	48	0.018 20	0.023 30	
48	49	0.083 40	0.129 00	0.004 80
49	50	0.080 10	0.128 00	
50	51	0.138 60	0.220 00	
51	66		0.071 20	
52	53	0.076 20	0.098 40	
53	54	0.187 80	0.232 00	
54	55	0.173 20	0.226 50	
56	41	0.553 00	0.549 00	
56	74	0.212 50	0.354 00	
57	56	0.174 00	0.260 00	
58	59		99.990 00	
59	64		0.000 01	
60	61		0.000 01	
Continua na próxima página				

Continuação da tabela				
Num. Barra De	Num. Barra Para	R [pu]	X [pu]	B [pu]
61	64		0.000 01	
62	63		0.000 01	
63	64		0.000 01	
65	69		0.000 01	
66	69		0.000 01	
67	69		99.990 00	
68	69		0.000 01	
70	73		0.000 01	
71	73		0.000 01	
72	73		99.990 00	
74	75		0.000 01	
75	81		0.000 01	
76	77		0.000 01	
77	81		99.990 00	
78	79		0.000 01	
79	81		0.000 01	
80	81		0.000 01	

B DIAGRAMAS DAS SUBESTAÇÕES EXPANDIDAS

B.1 IEEE 14 BARRAS - NÍVEL DE SUBESTAÇÃO

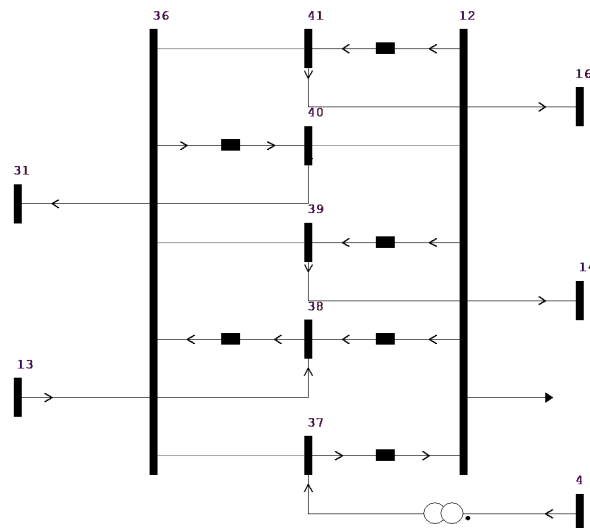
Figura 20 Diagrama Unifilar da Subestação 4



Fonte: Autoria Própria, desenho do ANAREDE

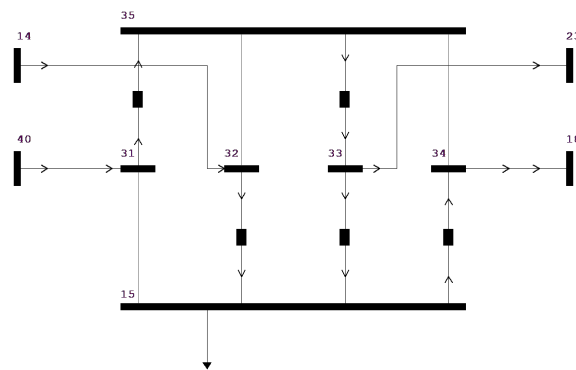
B.2 IEEE 30 BARRAS - NÍVEL DE SUBESTAÇÃO

Figura 21 Diagrama Unifilar da Subestação 12



Fonte: Autoria Própria, desenho do ANAREDE

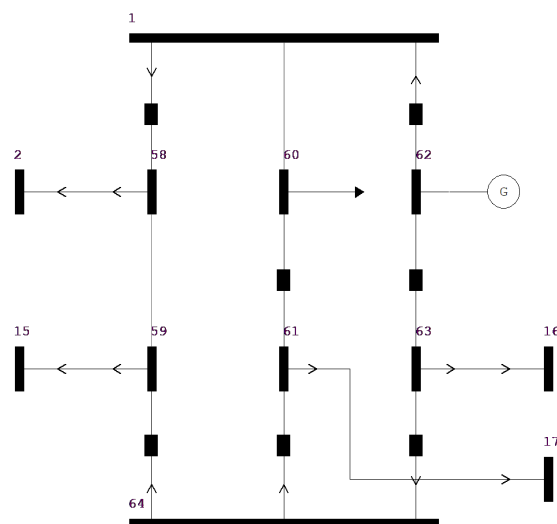
Figura 22 Diagrama Unifilar da Subestação 15



Fonte: Autoria Própria, desenho do ANAREDE

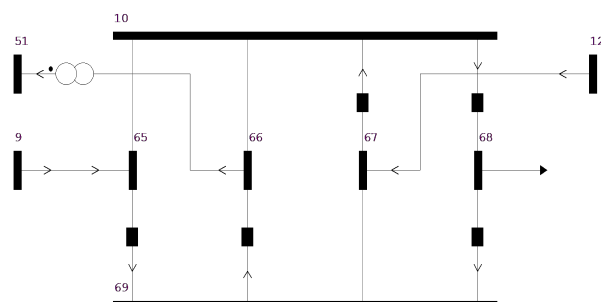
B.3 IEEE 57 BARRAS - NÍVEL DE SUBESTAÇÃO

Figura 23 Diagrama Unifilar da Subestação 1



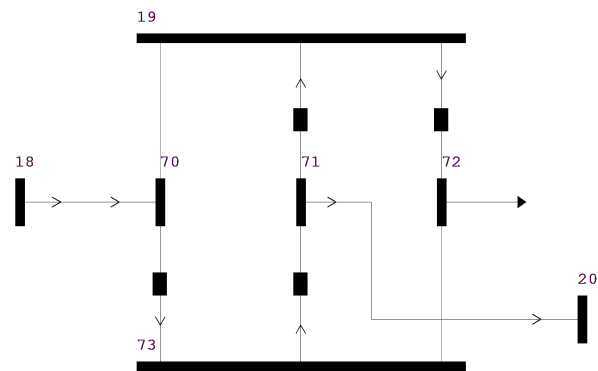
Fonte: Autoria Própria, desenho do ANAREDE

Figura 24 Diagrama Unifilar da Subestação 10



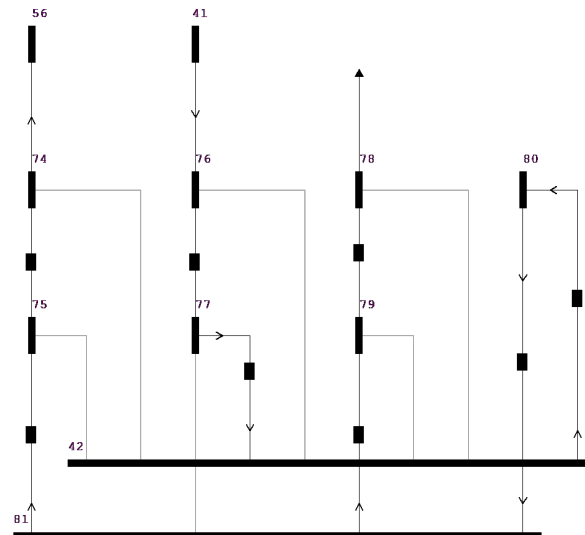
Fonte: Autoria Própria, desenho do ANAREDE

Figura 25 Diagrama Unifilar da Subestação 19



Fonte: Autoria Própria, desenho do ANAREDE

Figura 26 Diagrama Unifilar da Subestação 42



Fonte: Autoria Própria, desenho do ANAREDE

C RESULTADOS COMPLETOS DOS TESTES

C.1 IEEE 14 BARRAS - RESULTADOS

Tabela 31
Resultados de Barra - IEEE 14 Barras

Num.	Tipo	V [pu]	θ [°]	P_g [MW]	Q_g [Mvar]
1	$V\theta$	1.0600	0.0000	232.3753	23.5306
2	PV	1.0450	4.9518	40.0000	27.4133
3	PV	1.0100	12.6158	0.0000	18.0144
4	PQ	1.0295	10.4202	0.0000	0.0000
5	PQ	1.0349	8.9558	0.0000	0.0000
6	PV	1.0700	14.6719	0.0000	40.3640
7	PQ	1.0559	13.5534	0.0000	0.0000
8	PV	1.0900	13.5534	0.0000	21.1157
9	PQ	1.0497	15.1694	0.0000	0.0000
10	PQ	1.0458	15.3658	0.0000	0.0000
11	PQ	1.0543	15.1456	0.0000	0.0000
12	PQ	1.0547	15.5161	0.0000	0.0000
13	PQ	1.0495	15.5754	0.0000	0.0000
14	PQ	1.0315	16.3531	0.0000	0.0000

Tabela 32
Resultados de Circuito - IEEE 14 Barras

Num. Barra De	Num. Barra Para	P [MW]	Q [Mvar]
1	2	155.9516	20.1864
1	5	76.4238	3.3442
2	3	72.5299	3.6302
2	4	56.0066	8.3450
2	5	41.4690	7.8729
3	4	23.9493	2.3323
4	5	62.3109	7.3948
4	7	28.4114	12.2129
4	9	16.0865	3.0688
5	6	43.7618	12.2356
6	11	7.1109	5.0723

Continua na próxima página

Continuação da tabela			
Num. Barra De	Num. Barra Para	P [MW]	Q [Mvar]
6	12	7.7986	2.7037
6	13	17.6523	7.9936
7	8	0.0000	20.4547
7	9	28.4114	6.3547
9	10	5.4798	2.7278
9	14	9.5182	2.6488
10	11	3.5311	3.1010
12	13	1.6254	0.9514
13	14	5.5537	2.7114

Tabela 33
Resultados de Barra - IEEE 14 Barras - ANAREDE

Num.	Tipo	V [pu]	θ [°]	P_g [MW]	Q_g [Mvar]
1	$V\theta$	1.0600	0.0000	232.3753	23.5306
2	PV	1.0450	4.9518	40.0000	27.4133
3	PV	1.0100	12.6157	0.0000	18.0144
4	PQ	1.0295	10.4202	0.0000	0.0000
5	PQ	1.0349	8.9558	0.0000	0.0000
6	PV	1.0700	14.6719	0.0000	40.3640
7	PQ	1.0559	13.5534	0.0000	0.0000
8	PV	1.0900	13.5534	0.0000	21.1157
9	PQ	1.0497	15.1694	0.0000	0.0000
10	PQ	1.0458	15.3658	0.0000	0.0000
11	PQ	1.0543	15.1456	0.0000	0.0000
12	PQ	1.0547	15.5160	0.0000	0.0000
13	PQ	1.0495	15.5754	0.0000	0.0000
14	PQ	1.0315	16.3531	0.0000	0.0000

Tabela 34
Resultados de Circuito - IEEE 14 Barras - ANAREDE

Num. Barra De	Num. Barra Para	P [MW]	Q [Mvar]
1	2	155.9515	20.1864
1	5	76.4238	3.3442
2	3	72.5299	3.6302
Continua na próxima página			

Continuação da tabela			
Num. Barra De	Num. Barra Para	P [MW]	Q [Mvar]
2	4	56.0066	8.3450
2	5	41.4690	7.8729
3	4	23.9493	2.3323
4	5	62.3109	7.3948
4	7	28.4114	12.2130
4	9	16.0865	3.0688
5	6	43.7618	12.2356
6	11	7.1109	5.0723
6	12	7.7986	2.7037
6	13	17.6523	7.9936
7	8	0.0000	20.4547
7	9	28.4113	6.3547
9	10	5.4798	2.7278
9	14	9.5182	2.6488
10	11	3.5311	3.1010
12	13	1.6254	0.9514
13	14	5.5537	2.7114

C.2 IEEE 14 BARRAS - NÍVEL DE SUBESTAÇÃO - RESULTADOS

Tabela 35
Resultados de Barra - IEEE 14 Barras - Nível de Subestação

Num.	Tipo	V [pu]	θ [°]	P_g [MW]	Q_g [Mvar]
1	$V\theta$	1.0600	0.0000	232.3847	23.5443
2	PV	1.0450	4.9565	40.0000	27.2887
3	PV	1.0100	12.6062	0.0000	18.0505
4	PQ	1.0294	10.3960	0.0000	0.0000
5	PQ	1.0349	8.9396	0.0000	0.0000
6	PV	1.0700	14.6535	0.0000	40.3834
7	PQ	1.0559	13.5307	0.0000	0.0000
8	PV	1.0900	13.5307	0.0000	21.1276
9	PQ	1.0497	15.1474	0.0000	0.0000
10	PQ	1.0458	15.3444	0.0000	0.0000
11	PQ	1.0543	15.1256	0.0000	0.0000
12	PQ	1.0547	15.4974	0.0000	0.0000

Continua na próxima página

Continuação da tabela					
Num.	Tipo	V [pu]	θ []	P_g [MW]	Q_g [Mvar]
13	<i>PQ</i>	1.0495	15.5565	0.0000	0.0000
14	<i>PQ</i>	1.0315	16.3325	0.0000	0.0000
15	<i>PQ</i>	1.0294	10.3960	0.0000	0.0000
16	<i>PQ</i>	1.0294	10.3960	0.0000	0.0000
17	<i>PQ</i>	1.0294	10.3960	0.0000	0.0000
18	<i>PQ</i>	1.0294	10.3960	0.0000	0.0000
19	<i>PQ</i>	1.0294	10.3960	0.0000	0.0000
20	<i>PQ</i>	1.0294	10.3960	0.0000	0.0000
21	<i>PQ</i>	1.0294	10.3960	0.0000	0.0000

Tabela 36
Resultados de Circuito - IEEE 14 Barras - Nível de Subestação

Num. Barra De	Num. Barra Para	P [MW]	Q [Mvar]
1	2	156.0948	20.2199
1	5	76.2899	3.3243
2	3	72.4010	3.6431
2	5	41.2624	7.8095
2	19	56.4774	8.6035
3	20	24.0702	2.2498
4	15	76.2228	16.1266
4	16	28.4228	12.2266
4	17	47.8000	3.9000
5	6	43.7439	12.2450
5	18	62.5033	5.6690
6	11	7.0999	5.0801
6	12	7.7973	2.7049
6	13	17.6467	7.9975
7	8	0.0000	20.4658
7	9	28.4228	6.3500
7	16	28.4228	14.1157
9	10	5.4908	2.7199
9	14	9.5249	2.6436
10	11	3.5201	3.1089
12	13	1.6242	0.9527

Continua na próxima página

Continuação da tabela			
Num. Barra De	Num. Barra Para	P [MW]	Q [Mvar]
13	14	5.5470	2.7167
15	9	16.0929	3.0746
15	18	92.3157	19.2013
16	19	0.0000	0.0000
17	20	0.0000	0.0000
18	21	30.3034	11.9835
19	21	54.7559	10.0892
20	21	24.4525	1.8944

Tabela 37

Resultados de Barra - IEEE 14 Barras - Nível de Subestação - ANAREDE

Num.	Tipo	V [pu]	θ [°]	P_g [MW]	Q_g [Mvar]
1	$V\theta$	1.0600	0.0000	232.3843	23.5440
2	PV	1.0450	4.9565	40.0000	27.2900
3	PV	1.0100	12.6062	0.0000	18.0513
4	PQ	1.0294	10.3970	0.0000	0.0000
5	PQ	1.0349	8.9397	0.0000	0.0000
6	PV	1.0700	14.6538	0.0000	40.3826
7	PQ	1.0559	13.5316	0.0000	0.0000
8	PV	1.0900	13.5316	0.0000	21.1266
9	PQ	1.0497	15.1481	0.0000	0.0000
10	PQ	1.0458	15.3451	0.0000	0.0000
11	PQ	1.0543	15.1262	0.0000	0.0000
12	PQ	1.0547	15.4978	0.0000	0.0000
13	PQ	1.0495	15.5569	0.0000	0.0000
14	PQ	1.0315	16.3331	0.0000	0.0000
15	PQ	1.0294	10.3966	0.0000	0.0000
16	PQ	1.0294	10.3972	0.0000	0.0000
17	PQ	1.0294	10.3973	0.0000	0.0000
18	PQ	1.0294	10.3961	0.0000	0.0000
19	PQ	1.0294	10.3957	0.0000	0.0000
20	PQ	1.0294	10.3961	0.0000	0.0000
21	PQ	1.0294	10.3960	0.0000	0.0000

Tabela 38
Resultados de Circuito - IEEE 14 Barras - Nível de Subestação - ANAREDE

Num. Barra De	Num. Barra Para	P [MW]	Q [Mvar]
1	2	156.0936	20.2197
1	5	76.2906	3.3243
2	3	72.4017	3.6430
2	5	41.2637	7.8097
2	19	56.4744	8.6016
3	20	24.0697	2.2493
4	15	76.2204	16.1253
4	16	28.4204	12.2253
4	17	47.8000	3.8998
5	6	43.7459	12.2449
5	18	62.5032	5.6696
6	11	7.1011	5.0794
6	12	7.7975	2.7048
6	13	17.6474	7.9972
7	8	0.0000	20.4649
7	9	28.4203	6.3508
7	16	28.4203	14.1141
9	10	5.4895	2.7205
9	14	9.5242	2.6441
10	11	3.5213	3.1082
12	13	1.6244	0.9526
13	14	5.5478	2.7163
15	9	16.0934	3.0744
15	18	92.3136	19.1994
16	19	0.0000	0.0000
17	20	0.0000	0.0000
18	21	30.3012	11.9805
19	21	54.7530	10.0866
20	21	24.4519	1.8937

C.3 IEEE 30 BARRAS - RESULTADOS

Tabela 39
Resultados de Barra - IEEE 30 Barras

Num.	Tipo	V [pu]	θ [°]	P_g [MW]	Q_g [Mvar]
1	<i>Vθ</i>	1.0600	0.0000	260.9196	14.3553
2	<i>PV</i>	1.0430	5.3392	40.0000	42.8983
3	<i>PQ</i>	1.0269	7.6070	0.0000	0.0000
4	<i>PQ</i>	1.0194	9.3699	0.0000	0.0000
5	<i>PV</i>	1.0100	14.1348	0.0000	35.0535
6	<i>PQ</i>	1.0138	11.1003	0.0000	0.0000
7	<i>PQ</i>	1.0045	12.8719	0.0000	0.0000
8	<i>PV</i>	1.0100	11.7869	0.0000	26.9587
9	<i>PQ</i>	1.0364	14.3619	0.0000	0.0000
10	<i>PQ</i>	1.0256	16.0663	0.0000	0.0000
11	<i>PV</i>	1.0820	14.3619	0.0000	23.6998
12	<i>PQ</i>	1.0340	15.3629	0.0000	0.0000
13	<i>PV</i>	1.0710	15.3629	0.0000	28.2720
14	<i>PQ</i>	1.0191	16.2790	0.0000	0.0000
15	<i>PQ</i>	1.0148	16.3648	0.0000	0.0000
16	<i>PQ</i>	1.0228	15.9424	0.0000	0.0000
17	<i>PQ</i>	1.0196	16.2496	0.0000	0.0000
18	<i>PQ</i>	1.0062	16.9845	0.0000	0.0000
19	<i>PQ</i>	1.0043	17.1527	0.0000	0.0000
20	<i>PQ</i>	1.0089	16.9410	0.0000	0.0000
21	<i>PQ</i>	1.0124	16.5257	0.0000	0.0000
22	<i>PQ</i>	1.0128	16.5105	0.0000	0.0000
23	<i>PQ</i>	1.0042	16.7371	0.0000	0.0000
24	<i>PQ</i>	0.9987	16.8726	0.0000	0.0000
25	<i>PQ</i>	0.9914	16.3576	0.0000	0.0000
26	<i>PQ</i>	0.9732	16.8000	0.0000	0.0000
27	<i>PQ</i>	0.9956	15.7675	0.0000	0.0000
28	<i>PQ</i>	1.0099	11.7111	0.0000	0.0000
29	<i>PQ</i>	0.9752	17.0682	0.0000	0.0000
30	<i>PQ</i>	0.9633	18.0035	0.0000	0.0000

Tabela 40
Resultados de Circuito - IEEE 30 Barras

Num. Barra De	Num. Barra Para	P [MW]	Q [Mvar]
1	2	172.8880	21.0145
1	3	88.0316	0.6592
2	4	43.4922	0.5781
2	5	82.1925	1.7670
2	6	60.3401	1.6298
3	4	82.5106	7.5042
4	6	73.5625	6.7901
4	12	42.9897	3.5876
5	7	14.9458	9.8818
6	7	38.2810	1.2240
6	8	29.4977	0.5172
6	9	28.7425	10.2048
6	10	16.1891	1.4503
6	28	18.6234	0.7557
8	28	0.6040	1.9584
9	10	28.7425	10.6145
9	11	0.0000	22.7019
10	17	5.8915	5.0419
10	20	9.3875	4.0859
10	21	16.0555	10.6314
10	22	7.7970	5.0009
12	13	0.0000	27.2964
12	14	7.7205	2.3618
12	15	17.3910	6.5401
12	16	6.6782	2.7223
14	15	1.4455	0.6058
15	18	5.6648	1.2417
15	23	4.7527	2.9784
16	17	3.1322	0.8257
18	19	2.4297	0.2703
19	20	7.0740	3.1373
21	22	1.5672	0.8326
22	24	6.1702	4.0453
23	24	1.5222	1.3167
Continua na próxima página			

Continuação da tabela			
Num. Barra De	Num. Barra Para	P [MW]	Q [Mvar]
24	25	1.0739	2.8449
25	26	3.5471	2.3704
25	27	4.6385	0.4440
27	29	6.1975	1.6833
27	30	7.1016	1.6805
28	27	17.9617	4.2900
29	30	3.7060	0.6105

Tabela 41
Resultados de Barra - IEEE 30 Barras - ANAREDE

Num.	Tipo	V [pu]	θ [°]	P_g [MW]	Q_g [Mvar]
1	$V\theta$	1.0600	0.0000	260.9197	14.3554
2	PV	1.0430	5.3392	40.0000	42.8981
3	PQ	1.0269	7.6070	0.0000	0.0000
4	PQ	1.0194	9.3699	0.0000	0.0000
5	PV	1.0100	14.1348	0.0000	35.0534
6	PQ	1.0138	11.1003	0.0000	0.0000
7	PQ	1.0045	12.8719	0.0000	0.0000
8	PV	1.0100	11.7869	0.0000	26.9583
9	PQ	1.0364	14.3619	0.0000	0.0000
10	PQ	1.0256	16.0663	0.0000	0.0000
11	PV	1.0820	14.3619	0.0000	23.6996
12	PQ	1.0340	15.3629	0.0000	0.0000
13	PV	1.0710	15.3629	0.0000	28.2717
14	PQ	1.0191	16.2790	0.0000	0.0000
15	PQ	1.0148	16.3647	0.0000	0.0000
16	PQ	1.0228	15.9424	0.0000	0.0000
17	PQ	1.0196	16.2496	0.0000	0.0000
18	PQ	1.0062	16.9845	0.0000	0.0000
19	PQ	1.0043	17.1527	0.0000	0.0000
20	PQ	1.0089	16.9410	0.0000	0.0000
21	PQ	1.0125	16.5257	0.0000	0.0000
22	PQ	1.0128	16.5104	0.0000	0.0000
23	PQ	1.0042	16.7370	0.0000	0.0000

Continua na próxima página

Continuação da tabela					
Num.	Tipo	V [pu]	θ []	P_g [MW]	Q_g [Mvar]
24	PQ	0.9987	16.8725	0.0000	0.0000
25	PQ	0.9914	16.3576	0.0000	0.0000
26	PQ	0.9732	16.8000	0.0000	0.0000
27	PQ	0.9956	15.7675	0.0000	0.0000
28	PQ	1.0099	11.7111	0.0000	0.0000
29	PQ	0.9752	17.0682	0.0000	0.0000
30	PQ	0.9633	18.0035	0.0000	0.0000

Tabela 42
Resultados de Circuito - IEEE 30 Barras - ANAREDE

Num. Barra De	Num. Barra Para	P [MW]	Q [Mvar]
1	2	172.8880	21.0145
1	3	88.0316	0.6591
2	4	43.4922	0.5782
2	5	82.1924	1.7670
2	6	60.3401	1.6299
3	4	82.5106	7.5042
4	6	73.5625	6.7900
4	12	42.9896	3.5877
5	7	14.9458	9.8817
6	7	38.2810	1.2239
6	8	29.4976	0.5175
6	9	28.7425	10.2049
6	10	16.1890	1.4504
6	28	18.6234	0.7556
8	28	0.6040	1.9585
9	10	28.7421	10.6143
9	11	0.0000	22.7017
10	17	5.8918	5.0418
10	20	9.3874	4.0859
10	21	16.0557	10.6313
10	22	7.7971	5.0008
12	13	0.0000	27.2962
12	14	7.7205	2.3618

Continua na próxima página

Continuação da tabela			
Num. Barra De	Num. Barra Para	P [MW]	Q [Mvar]
12	15	17.3909	6.5400
12	16	6.6781	2.7223
14	15	1.4455	0.6058
15	18	5.6646	1.2417
15	23	4.7527	2.9784
16	17	3.1323	0.8256
18	19	2.4300	0.2702
19	20	7.0745	3.1370
21	22	1.5671	0.8327
22	24	6.1701	4.0453
23	24	1.5222	1.3167
24	25	1.0739	2.8448
25	26	3.5471	2.3704
25	27	4.6386	0.4440
27	29	6.1975	1.6833
27	30	7.1016	1.6805
28	27	17.9616	4.2899
29	30	3.7059	0.6106

C.4 IEEE 30 BARRAS - NÍVEL DE SUBESTAÇÃO - RESULTADOS

Tabela 43
Resultados de Barra - IEEE 30 Barras - Nível de Subestação

Num.	Tipo	V [pu]	θ [°]	P_g [MW]	Q_g [Mvar]
1	$V\theta$	1.0600	0.0000	260.9196	14.3553
2	PV	1.0430	5.3392	40.0000	42.8983
3	PQ	1.0269	7.6070	0.0000	0.0000
4	PQ	1.0194	9.3699	0.0000	0.0000
5	PV	1.0100	14.1348	0.0000	35.0535
6	PQ	1.0138	11.1003	0.0000	0.0000
7	PQ	1.0045	12.8719	0.0000	0.0000
8	PV	1.0100	11.7869	0.0000	26.9587
9	PQ	1.0364	14.3619	0.0000	0.0000
10	PQ	1.0256	16.0663	0.0000	0.0000
11	PV	1.0820	14.3619	0.0000	23.6998

Continua na próxima página

Continuação da tabela					
Num.	Tipo	V [pu]	θ []	P_g [MW]	Q_g [Mvar]
12	PQ	1.0340	15.3629	0.0000	0.0000
13	PV	1.0710	15.3629	0.0000	28.2720
14	PQ	1.0191	16.2790	0.0000	0.0000
15	PQ	1.0148	16.3648	0.0000	0.0000
16	PQ	1.0228	15.9424	0.0000	0.0000
17	PQ	1.0196	16.2496	0.0000	0.0000
18	PQ	1.0062	16.9845	0.0000	0.0000
19	PQ	1.0043	17.1527	0.0000	0.0000
20	PQ	1.0089	16.9410	0.0000	0.0000
21	PQ	1.0124	16.5257	0.0000	0.0000
22	PQ	1.0128	16.5105	0.0000	0.0000
23	PQ	1.0042	16.7371	0.0000	0.0000
24	PQ	0.9987	16.8726	0.0000	0.0000
25	PQ	0.9914	16.3576	0.0000	0.0000
26	PQ	0.9732	16.8000	0.0000	0.0000
27	PQ	0.9956	15.7675	0.0000	0.0000
28	PQ	1.0099	11.7111	0.0000	0.0000
29	PQ	0.9752	17.0682	0.0000	0.0000
30	PQ	0.9633	18.0035	0.0000	0.0000
31	PQ	1.0148	16.3648	0.0000	0.0000
32	PQ	1.0148	16.3648	0.0000	0.0000
33	PQ	1.0148	16.3648	0.0000	0.0000
34	PQ	1.0148	16.3648	0.0000	0.0000
35	PQ	1.0148	16.3648	0.0000	0.0000
36	PQ	1.0340	15.3629	0.0000	0.0000
37	PQ	1.0340	15.3629	0.0000	0.0000
38	PQ	1.0340	15.3629	0.0000	0.0000
39	PQ	1.0340	15.3629	0.0000	0.0000
40	PQ	1.0340	15.3629	0.0000	0.0000
41	PQ	1.0340	15.3629	0.0000	0.0000

Tabela 44
Resultados de Circuito - IEEE 30 Barras - Nível de Subestação

Num. Barra De	Num. Barra Para	P [MW]	Q [Mvar]
1	2	172.8880	21.0145
1	3	88.0316	0.6592
2	4	43.4922	0.5781
2	5	82.1925	1.7670
2	6	60.3401	1.6298
3	4	82.5106	7.5042
4	6	73.5625	6.7901
4	37	42.9897	3.5876
5	7	14.9458	9.8818
6	7	38.2810	1.2240
6	8	29.4977	0.5172
6	9	28.7425	10.2048
6	10	16.1891	1.4503
6	28	18.6234	0.7557
8	28	0.6040	1.9584
9	10	28.7425	10.6145
9	11	0.0000	22.7019
10	17	5.8915	5.0419
10	20	9.3875	4.0859
10	21	16.0555	10.6314
10	22	7.7970	5.0009
12	37	42.9897	8.1722
12	38	17.3910	20.7563
12	39	7.7205	2.3618
12	40	0.0000	0.0000
12	41	6.6782	2.7223
14	32	1.4455	0.6058
15	31	0.0000	0.0000
15	32	1.4403	0.6011
15	33	12.4245	3.1406
15	34	5.6648	1.2417
16	17	3.1322	0.8257
18	19	2.4297	0.2703
19	20	7.0740	3.1373
Continua na próxima página			

Continuação da tabela			
Num. Barra De	Num. Barra Para	P [MW]	Q [Mvar]
21	22	1.5672	0.8326
22	24	6.1702	4.0453
23	24	1.5222	1.3167
24	25	1.0739	2.8449
25	26	3.5471	2.3704
25	27	4.6385	0.4440
27	29	6.1975	1.6833
27	30	7.1016	1.6805
28	27	17.9617	4.2900
29	30	3.7060	0.6105
31	35	17.1773	6.1191
32	35	0.0000	0.0000
33	23	4.7527	2.9784
33	35	17.1773	6.1191
34	18	5.6648	1.2417
34	35	0.0000	0.0000
36	37	0.0000	0.0000
36	38	17.3910	6.5401
36	39	0.0000	0.0000
36	40	17.3910	6.5401
36	41	0.0000	0.0000
38	13	0.0000	27.2964
39	14	7.7205	2.3618
40	31	17.3910	6.5401
41	16	6.6782	2.7223

Tabela 45

Resultados de Barra - IEEE 30 Barras - Nível de Subestação - ANAREDE

Num.	Tipo	V [pu]	θ [°]	P_g [MW]	Q_g [Mvar]
1	$V\theta$	1.0600	0.0000	260.9196	14.3553
2	PV	1.0430	5.3392	40.0000	42.8985
3	PQ	1.0269	7.6070	0.0000	0.0000
4	PQ	1.0194	9.3699	0.0000	0.0000
5	PV	1.0100	14.1348	0.0000	35.0536

Continua na próxima página

Continuação da tabela					
Num.	Tipo	V [pu]	θ [°]	P_g [MW]	Q_g [Mvar]
6	PQ	1.0138	11.1003	0.0000	0.0000
7	PQ	1.0045	12.8719	0.0000	0.0000
8	PV	1.0100	11.7870	0.0000	26.9592
9	PQ	1.0364	14.3620	0.0000	0.0000
10	PQ	1.0256	16.0665	0.0000	0.0000
11	PV	1.0820	14.3620	0.0000	23.6999
12	PQ	1.0340	15.3629	0.0000	0.0000
13	PV	1.0710	15.3630	0.0000	28.2714
14	PQ	1.0191	16.2792	0.0000	0.0000
15	PQ	1.0148	16.3652	0.0000	0.0000
16	PQ	1.0228	15.9425	0.0000	0.0000
17	PQ	1.0196	16.2497	0.0000	0.0000
18	PQ	1.0062	16.9849	0.0000	0.0000
19	PQ	1.0043	17.1530	0.0000	0.0000
20	PQ	1.0089	16.9412	0.0000	0.0000
21	PQ	1.0124	16.5259	0.0000	0.0000
22	PQ	1.0128	16.5106	0.0000	0.0000
23	PQ	1.0042	16.7373	0.0000	0.0000
24	PQ	0.9987	16.8727	0.0000	0.0000
25	PQ	0.9914	16.3578	0.0000	0.0000
26	PQ	0.9732	16.8001	0.0000	0.0000
27	PQ	0.9956	15.7676	0.0000	0.0000
28	PQ	1.0099	11.7111	0.0000	0.0000
29	PQ	0.9752	17.0683	0.0000	0.0000
30	PQ	0.9633	18.0036	0.0000	0.0000
31	PQ	1.0148	16.3649	0.0000	0.0000
32	PQ	1.0148	16.3652	0.0000	0.0000
33	PQ	1.0148	16.3651	0.0000	0.0000
34	PQ	1.0148	16.3652	0.0000	0.0000
35	PQ	1.0148	16.3650	0.0000	0.0000
36	PQ	1.0340	15.3631	0.0000	0.0000
37	PQ	1.0340	15.3627	0.0000	0.0000
38	PQ	1.0340	15.3630	0.0000	0.0000
39	PQ	1.0340	15.3630	0.0000	0.0000

Continua na próxima página

Continuação da tabela					
Num.	Tipo	V [pu]	θ []	P_g [MW]	Q_g [Mvar]
40	PQ	1.0340	15.3632	0.0000	0.0000
41	PQ	1.0340	15.3630	0.0000	0.0000

Tabela 46
Resultados de Circuito - IEEE 30 Barras - Nível de Subestação - ANAREDE

Num. Barra De	Num. Barra Para	P [MW]	Q [Mvar]
1	2	172.8881	21.0145
1	3	88.0315	0.6593
2	4	43.4921	0.5780
2	5	82.1925	1.7670
2	6	60.3402	1.6297
3	4	82.5105	7.5041
4	6	73.5636	6.7904
4	37	42.9884	3.5870
5	7	14.9457	9.8818
6	7	38.2809	1.2240
6	8	29.4977	0.5168
6	9	28.7431	10.2047
6	10	16.1895	1.4502
6	28	18.6236	0.7557
8	28	0.6040	1.9584
9	10	28.7431	10.6147
9	11	0.0000	22.7020
10	17	5.8915	5.0422
10	20	9.3883	4.0858
10	21	16.0557	10.6313
10	22	7.7972	5.0009
12	37	42.9884	8.1715
12	38	17.3888	20.7548
12	39	7.7213	2.3613
12	40	0.0000	0.0000
12	41	6.6783	2.7220
14	32	1.4463	0.6052
15	31	0.0000	0.0000

Continua na próxima página

Continuação da tabela			
Num. Barra De	Num. Barra Para	P [MW]	Q [Mvar]
15	32	1.4411	0.6005
15	33	12.4229	3.1413
15	34	5.6640	1.2418
16	17	3.1323	0.8254
18	19	2.4289	0.2705
19	20	7.0748	3.1371
21	22	1.5670	0.8327
22	24	6.1705	4.0452
23	24	1.5217	1.3169
24	25	1.0742	2.8449
25	26	3.5471	2.3704
25	27	4.6388	0.4440
27	29	6.1975	1.6833
27	30	7.1016	1.6805
28	27	17.9620	4.2900
29	30	3.7060	0.6105
31	35	17.1751	6.1200
32	35	0.0000	0.0000
33	23	4.7522	2.9785
33	35	17.1751	6.1199
34	18	5.6640	1.2418
34	35	0.0000	0.0000
36	37	0.0000	0.0000
36	38	17.3888	6.5409
36	39	0.0000	0.0000
36	40	17.3888	6.5409
36	41	0.0000	0.0000
38	13	0.0000	27.2959
39	14	7.7213	2.3613
40	31	17.3888	6.5409
41	16	6.6783	2.7220

C.5 IEEE 57 BARRAS - RESULTADOS

Tabela 47
Resultados de Barra - IEEE 57 Barras

Num.	Tipo	V [pu]	θ [°]	P_g [MW]	Q_g [Mvar]
1	<i>Vθ</i>	1.0400	0.0000	479.8375	130.2693
2	<i>PV</i>	1.0100	1.1864	0.0000	0.7614
3	<i>PV</i>	0.9850	5.9806	40.0000	4.0043
4	<i>PQ</i>	0.9798	7.2744	0.0000	0.0000
5	<i>PQ</i>	0.9762	8.5547	0.0000	0.0000
6	<i>PV</i>	0.9800	8.7162	0.0000	4.4362
7	<i>PQ</i>	0.9819	7.6841	0.0000	0.0000
8	<i>PV</i>	1.0050	4.5554	450.0000	65.2973
9	<i>PV</i>	0.9800	9.6556	0.0000	2.3708
10	<i>PQ</i>	0.9832	11.5818	0.0000	0.0000
11	<i>PQ</i>	0.9724	10.2699	0.0000	0.0000
12	<i>PV</i>	1.0150	10.5274	310.0000	127.6845
13	<i>PQ</i>	0.9809	9.8647	0.0000	0.0000
14	<i>PQ</i>	0.9730	9.3880	0.0000	0.0000
15	<i>PQ</i>	0.9868	7.2152	0.0000	0.0000
16	<i>PQ</i>	1.0133	8.8991	0.0000	0.0000
17	<i>PQ</i>	1.0174	5.4168	0.0000	0.0000
18	<i>PQ</i>	0.9466	17.1697	0.0000	0.0000
19	<i>PQ</i>	0.9223	17.1467	0.0000	0.0000
20	<i>PQ</i>	0.9202	16.2933	0.0000	0.0000
21	<i>PQ</i>	0.9154	14.1052	0.0000	0.0000
22	<i>PQ</i>	0.9181	13.7507	0.0000	0.0000
23	<i>PQ</i>	0.9165	13.7993	0.0000	0.0000
24	<i>PQ</i>	0.9064	13.7190	0.0000	0.0000
25	<i>PQ</i>	0.8382	24.5725	0.0000	0.0000
26	<i>PQ</i>	0.9081	13.3639	0.0000	0.0000
27	<i>PQ</i>	0.9375	11.8951	0.0000	0.0000
28	<i>PQ</i>	0.9554	10.8225	0.0000	0.0000
29	<i>PQ</i>	0.9709	10.0889	0.0000	0.0000
30	<i>PQ</i>	0.8177	25.0295	0.0000	0.0000
31	<i>PQ</i>	0.7931	25.1799	0.0000	0.0000
32	<i>PQ</i>	0.8208	22.8198	0.0000	0.0000
33	<i>PQ</i>	0.8181	22.8730	0.0000	0.0000
34	<i>PQ</i>	0.8646	15.6570	0.0000	0.0000

Continua na próxima página

Continuação da tabela					
Num.	Tipo	V [pu]	θ [°]	P_g [MW]	Q_g [Mvar]
35	PQ	0.8742	15.2829	0.0000	0.0000
36	PQ	0.8863	14.9071	0.0000	0.0000
37	PQ	0.8954	14.6021	0.0000	0.0000
38	PQ	0.9219	13.5678	0.0000	0.0000
39	PQ	0.8939	14.6563	0.0000	0.0000
40	PQ	0.8852	14.9764	0.0000	0.0000
41	PQ	0.9313	15.0712	0.0000	0.0000
42	PQ	0.8882	16.5973	0.0000	0.0000
43	PQ	0.9595	11.6677	0.0000	0.0000
44	PQ	0.9349	12.6031	0.0000	0.0000
45	PQ	0.9743	9.7915	0.0000	0.0000
46	PQ	0.9588	11.4179	0.0000	0.0000
47	PQ	0.9357	13.1082	0.0000	0.0000
48	PQ	0.9317	13.2771	0.0000	0.0000
49	PQ	0.9383	13.4854	0.0000	0.0000
50	PQ	0.9300	14.0378	0.0000	0.0000
51	PQ	0.9719	12.9473	0.0000	0.0000
52	PQ	0.9329	11.8858	0.0000	0.0000
53	PQ	0.9195	12.6729	0.0000	0.0000
54	PQ	0.9397	12.0099	0.0000	0.0000
55	PQ	0.9698	10.9467	0.0000	0.0000
56	PQ	0.8792	17.0479	0.0000	0.0000
57	PQ	0.8701	17.6892	0.0000	0.0000

Tabela 48
Resultados de Circuito - IEEE 57 Barras

Num. Barra De	Num. Barra Para	P [MW]	Q [Mvar]
1	2	101.9800	75.0267
1	15	149.5655	35.1819
1	16	79.5981	0.8729
1	17	93.6940	3.9336
2	3	97.6659	4.6119
3	4	58.5342	5.1356
3	15	35.3451	16.2798

Continua na próxima página

Continuação da tabela			
Num. Barra De	Num. Barra Para	P [MW]	Q [Mvar]
4	5	14.3414	5.1422
4	6	15.0764	5.9662
4	18	28.7197	8.3438
5	6	1.1976	6.9783
6	7	16.6811	0.2675
6	8	42.1684	6.6552
7	8	78.4684	15.3993
7	29	61.7289	18.0244
8	9	177.8108	19.8488
9	10	18.0764	7.6326
9	11	13.4782	3.6545
9	12	2.4658	15.8369
9	13	1.8699	3.0999
9	55	17.7714	8.4698
10	12	19.0422	22.0420
10	51	31.9813	16.0245
11	13	11.5733	8.6277
11	41	10.1206	5.7639
11	43	14.8761	8.4159
12	13	1.3977	57.0317
12	16	33.7204	8.9478
12	17	48.7854	9.2945
13	14	11.7054	21.1444
13	15	48.5031	8.5371
13	49	30.4340	22.8409
14	15	67.2450	2.9504
14	46	44.9563	19.5711
15	45	41.4697	12.7659
18	19	1.5197	2.3343
19	20	1.8202	1.6750
21	20	4.1406	0.4827
21	22	4.1406	0.4827
22	23	7.6456	4.5234
22	38	11.8014	4.0650

Continua na próxima página

Continuação da tabela			
Num. Barra De	Num. Barra Para	P [MW]	Q [Mvar]
23	24	1.3363	2.4092
24	25	12.1029	6.3816
24	26	10.7853	3.3032
25	30	5.8029	4.6333
26	27	10.7853	3.3764
27	28	20.3408	4.2698
28	29	25.2445	7.0387
29	52	19.1698	5.1647
30	31	2.0970	2.6747
31	32	3.7593	0.3111
32	33	3.8106	1.9097
34	32	9.2846	4.5552
34	35	9.2846	4.5552
35	36	15.3583	7.4238
36	37	17.8778	7.9979
36	40	2.3563	0.4942
37	38	21.0602	9.8322
37	39	3.0408	1.6556
38	44	27.9802	6.5139
38	48	14.9461	9.1201
38	49	4.4081	5.8305
39	57	3.0372	1.6499
40	56	2.3541	0.4907
41	42	9.6764	5.8126
41	43	12.8761	5.9855
44	45	40.2604	8.7088
46	47	44.9563	17.7045
47	48	14.6709	4.6609
48	49	0.4370	4.6961
49	50	7.4991	1.4811
50	51	13.5541	9.1039
52	53	13.6668	2.1828
53	54	6.5009	2.7070
54	55	10.7110	4.2431
Continua na próxima página			

Continuação da tabela			
Num. Barra De	Num. Barra Para	P [MW]	Q [Mvar]
56	41	6.6840	1.5285
56	42	2.2562	0.8687
57	56	3.6628	0.5526

Tabela 49
Resultados de Barra - IEEE 57 Barras - ANAREDE

Num.	Tipo	V [pu]	θ [°]	P_g [MW]	Q_g [Mvar]
1	$V\theta$	1.0400	0.0000	479.8375	130.2692
2	PV	1.0100	1.1864	0.0000	0.7614
3	PV	0.9850	5.9806	40.0000	4.0038
4	PQ	0.9798	7.2744	0.0000	0.0000
5	PQ	0.9762	8.5547	0.0000	0.0000
6	PV	0.9800	8.7162	0.0000	4.4360
7	PQ	0.9819	7.6841	0.0000	0.0000
8	PV	1.0050	4.5554	450.0000	65.2973
9	PV	0.9800	9.6556	0.0000	2.3708
10	PQ	0.9832	11.5818	0.0000	0.0000
11	PQ	0.9724	10.2699	0.0000	0.0000
12	PV	1.0150	10.5274	310.0000	127.6845
13	PQ	0.9809	9.8647	0.0000	0.0000
14	PQ	0.9730	9.3880	0.0000	0.0000
15	PQ	0.9868	7.2152	0.0000	0.0000
16	PQ	1.0133	8.8991	0.0000	0.0000
17	PQ	1.0174	5.4168	0.0000	0.0000
18	PQ	0.9466	17.1694	0.0000	0.0000
19	PQ	0.9223	17.1465	0.0000	0.0000
20	PQ	0.9202	16.2932	0.0000	0.0000
21	PQ	0.9154	14.1052	0.0000	0.0000
22	PQ	0.9181	13.7507	0.0000	0.0000
23	PQ	0.9165	13.7993	0.0000	0.0000
24	PQ	0.9064	13.7190	0.0000	0.0000
25	PQ	0.8382	24.5725	0.0000	0.0000
26	PQ	0.9081	13.3639	0.0000	0.0000
27	PQ	0.9375	11.8951	0.0000	0.0000

Continua na próxima página

Continuação da tabela					
Num.	Tipo	V [pu]	θ [°]	P_g [MW]	Q_g [Mvar]
28	PQ	0.9554	10.8225	0.0000	0.0000
29	PQ	0.9709	10.0889	0.0000	0.0000
30	PQ	0.8177	25.0295	0.0000	0.0000
31	PQ	0.7931	25.1799	0.0000	0.0000
32	PQ	0.8208	22.8198	0.0000	0.0000
33	PQ	0.8181	22.8730	0.0000	0.0000
34	PQ	0.8646	15.6570	0.0000	0.0000
35	PQ	0.8742	15.2829	0.0000	0.0000
36	PQ	0.8863	14.9071	0.0000	0.0000
37	PQ	0.8954	14.6021	0.0000	0.0000
38	PQ	0.9219	13.5678	0.0000	0.0000
39	PQ	0.8939	14.6563	0.0000	0.0000
40	PQ	0.8852	14.9764	0.0000	0.0000
41	PQ	0.9313	15.0712	0.0000	0.0000
42	PQ	0.8882	16.5973	0.0000	0.0000
43	PQ	0.9595	11.6677	0.0000	0.0000
44	PQ	0.9349	12.6031	0.0000	0.0000
45	PQ	0.9743	9.7915	0.0000	0.0000
46	PQ	0.9588	11.4179	0.0000	0.0000
47	PQ	0.9357	13.1082	0.0000	0.0000
48	PQ	0.9317	13.2771	0.0000	0.0000
49	PQ	0.9383	13.4854	0.0000	0.0000
50	PQ	0.9300	14.0378	0.0000	0.0000
51	PQ	0.9719	12.9473	0.0000	0.0000
52	PQ	0.9329	11.8858	0.0000	0.0000
53	PQ	0.9195	12.6729	0.0000	0.0000
54	PQ	0.9397	12.0099	0.0000	0.0000
55	PQ	0.9698	10.9467	0.0000	0.0000
56	PQ	0.8792	17.0479	0.0000	0.0000
57	PQ	0.8701	17.6892	0.0000	0.0000

Tabela 50
Resultados de Circuito - IEEE 57 Barras - ANAREDE

Num. Barra De	Num. Barra Para	P [MW]	Q [Mvar]
1	2	101.9800	75.0266
1	15	149.5655	35.1819
1	16	79.5981	0.8729
1	17	93.6940	3.9336
2	3	97.6659	4.6119
3	4	58.5345	5.1361
3	15	35.3450	16.2798
4	5	14.3413	5.1422
4	6	15.0763	5.9661
4	18	28.7190	8.3432
5	6	1.1975	6.9782
6	7	16.6811	0.2675
6	8	42.1684	6.6552
7	8	78.4684	15.3993
7	29	61.7289	18.0244
8	9	177.8108	19.8488
9	10	18.0764	7.6326
9	11	13.4782	3.6545
9	12	2.4658	15.8369
9	13	1.8699	3.0999
9	55	17.7714	8.4698
10	12	19.0422	22.0420
10	51	31.9813	16.0245
11	13	11.5733	8.6277
11	41	10.1206	5.7639
11	43	14.8761	8.4159
12	13	1.3977	57.0317
12	16	33.7204	8.9478
12	17	48.7854	9.2945
13	14	11.7054	21.1444
13	15	48.5031	8.5371
13	49	30.4340	22.8408
14	15	67.2449	2.9504
14	46	44.9563	19.5710
Continua na próxima página			

Continuação da tabela			
Num. Barra De	Num. Barra Para	P [MW]	Q [Mvar]
15	45	41.4697	12.7658
18	19	1.5199	2.3343
19	20	1.8201	1.6751
21	20	4.1403	0.4828
21	22	4.1406	0.4829
22	23	7.6455	4.5235
22	38	11.8014	4.0648
23	24	1.3363	2.4092
24	25	12.1029	6.3816
24	26	10.7853	3.3031
25	30	5.8029	4.6333
26	27	10.7853	3.3764
27	28	20.3408	4.2697
28	29	25.2445	7.0386
29	52	19.1698	5.1647
30	31	2.0970	2.6747
31	32	3.7593	0.3111
32	33	3.8106	1.9097
34	32	9.2846	4.5552
34	35	9.2846	4.5552
35	36	15.3583	7.4238
36	37	17.8778	7.9979
36	40	2.3563	0.4942
37	38	21.0602	9.8322
37	39	3.0408	1.6556
38	44	27.9802	6.5138
38	48	14.9461	9.1200
38	49	4.4081	5.8304
39	57	3.0373	1.6500
40	56	2.3541	0.4907
41	42	9.6764	5.8126
41	43	12.8761	5.9855
44	45	40.2604	8.7088
46	47	44.9563	17.7044
Continua na próxima página			

Continuação da tabela			
Num. Barra De	Num. Barra Para	P [MW]	Q [Mvar]
47	48	14.6709	4.6608
48	49	0.4370	4.6961
49	50	7.4991	1.4811
50	51	13.5540	9.1039
52	53	13.6668	2.1828
53	54	6.5009	2.7070
54	55	10.7110	4.2431
56	41	6.6840	1.5285
56	42	2.2562	0.8687
57	56	3.6627	0.5526

C.6 IEEE 57 BARRAS - NÍVEL DE SUBESTAÇÃO - RESULTADOS

Tabela 51
Resultados de Barra - IEEE 57 Barras - Nível de Subestação

Num.	Tipo	V [pu]	θ [°]	P_g [MW]	Q_g [Mvar]
1	PQ	0.9956	26.0957	0.0000	0.0000
2	PV	1.0100	26.9158	0.0000	158.8768
3	PV	0.9850	28.0494	40.0000	18.5574
4	PQ	0.9796	28.5439	0.0000	0.0000
5	PQ	0.9762	28.5936	0.0000	0.0000
6	PV	0.9800	28.1583	0.0000	2.1581
7	PQ	0.9808	26.0902	0.0000	0.0000
8	PV	1.0050	22.3191	450.0000	66.6872
9	PV	0.9800	26.4674	0.0000	6.9655
10	PQ	0.9832	26.4448	0.0000	0.0000
11	PQ	0.9690	27.2858	0.0000	0.0000
12	PV	1.0150	23.2744	310.0000	184.2187
13	PQ	0.9753	26.9844	0.0000	0.0000
14	PQ	0.9650	28.0977	0.0000	0.0000
15	PQ	0.9751	27.9985	0.0000	0.0000
16	$V\theta$	1.0130	8.9000	494.5594	33.1834
17	PQ	0.9930	26.6131	0.0000	0.0000
18	PQ	0.9424	38.0452	0.0000	0.0000
19	PQ	0.9186	37.2104	0.0000	0.0000

Continua na próxima página

Continuação da tabela					
Num.	Tipo	V [pu]	θ [°]	P_g [MW]	Q_g [Mvar]
20	PQ	0.9168	35.8266	0.0000	0.0000
21	PQ	0.9065	32.9085	0.0000	0.0000
22	PQ	0.9096	32.4110	0.0000	0.0000
23	PQ	0.9081	32.4543	0.0000	0.0000
24	PQ	0.8998	32.2666	0.0000	0.0000
25	PQ	0.8293	43.3135	0.0000	0.0000
26	PQ	0.9017	31.8826	0.0000	0.0000
27	PQ	0.9336	30.3152	0.0000	0.0000
28	PQ	0.9526	29.2058	0.0000	0.0000
29	PQ	0.9687	28.4521	0.0000	0.0000
30	PQ	0.8086	43.7797	0.0000	0.0000
31	PQ	0.7838	43.9310	0.0000	0.0000
32	PQ	0.8119	41.5130	0.0000	0.0000
33	PQ	0.8093	41.5673	0.0000	0.0000
34	PQ	0.8565	34.1927	0.0000	0.0000
35	PQ	0.8663	33.8127	0.0000	0.0000
36	PQ	0.8785	33.4313	0.0000	0.0000
37	PQ	0.8875	33.1449	0.0000	0.0000
38	PQ	0.9133	32.2024	0.0000	0.0000
39	PQ	0.8861	33.1814	0.0000	0.0000
40	PQ	0.8777	33.4722	0.0000	0.0000
41	PQ	0.9272	32.4591	0.0000	0.0000
42	PQ	0.8818	34.1821	0.0000	0.0000
43	PQ	0.9558	28.7812	0.0000	0.0000
44	PQ	0.9249	31.7306	0.0000	0.0000
45	PQ	0.9606	29.8857	0.0000	0.0000
46	PQ	0.9504	30.0293	0.0000	0.0000
47	PQ	0.9274	31.6136	0.0000	0.0000
48	PQ	0.9237	31.7326	0.0000	0.0000
49	PQ	0.9333	31.2065	0.0000	0.0000
50	PQ	0.9272	30.8284	0.0000	0.0000
51	PQ	0.9740	28.1938	0.0000	0.0000
52	PQ	0.9316	29.9084	0.0000	0.0000
53	PQ	0.9186	30.5046	0.0000	0.0000

Continua na próxima página

Continuação da tabela					
Num.	Tipo	V [pu]	θ [°]	P_g [MW]	Q_g [Mvar]
54	PQ	0.9398	29.3851	0.0000	0.0000
55	PQ	0.9711	27.9096	0.0000	0.0000
56	PQ	0.8708	34.8319	0.0000	0.0000
57	PQ	0.8607	35.6279	0.0000	0.0000
58	PQ	0.9956	26.0957	0.0000	0.0000
59	PQ	0.9956	26.0957	0.0000	0.0000
60	PQ	0.9956	26.0957	0.0000	0.0000
61	PQ	0.9956	26.0957	0.0000	0.0000
62	PQ	0.9956	26.0957	0.0000	0.0000
63	PQ	0.9956	26.0957	0.0000	0.0000
64	PQ	0.9956	26.0957	0.0000	0.0000
65	PQ	0.9832	26.4448	0.0000	0.0000
66	PQ	0.9832	26.4448	0.0000	0.0000
67	PQ	0.9832	26.4448	0.0000	0.0000
68	PQ	0.9832	26.4448	0.0000	0.0000
69	PQ	0.9832	26.4448	0.0000	0.0000
70	PQ	0.9186	37.2104	0.0000	0.0000
71	PQ	0.9186	37.2104	0.0000	0.0000
72	PQ	0.9186	37.2104	0.0000	0.0000
73	PQ	0.9186	37.2104	0.0000	0.0000
74	PQ	0.8818	34.1821	0.0000	0.0000
75	PQ	0.8818	34.1821	0.0000	0.0000
76	PQ	0.8818	34.1821	0.0000	0.0000
77	PQ	0.8818	34.1821	0.0000	0.0000
78	PQ	0.8818	34.1821	0.0000	0.0000
79	PQ	0.8818	34.1821	0.0000	0.0000
80	PQ	0.8818	34.1821	0.0000	0.0000
81	PQ	0.8818	34.1821	0.0000	0.0000

Tabela 52
Resultados de Circuito - IEEE 57 Barras - Nível de Subestação

Num. Barra De	Num. Barra Para	P [MW]	Q [Mvar]
1	58	33.3693	67.2322
1	60	0.0000	0.0000

Continua na próxima página

Continuação da tabela			
Num. Barra De	Num. Barra Para	P [MW]	Q [Mvar]
1	62	33.3693	67.2322
2	3	29.9661	15.2570
2	58	32.9661	55.6199
3	4	24.9236	5.2594
3	15	3.6699	14.6326
4	5	1.4893	0.5786
4	6	4.0986	0.7532
4	18	27.4553	8.8472
5	6	11.5143	0.9620
6	7	32.7697	4.9739
6	8	57.8931	2.1204
7	8	93.4229	13.0733
7	29	60.4213	19.5173
8	9	146.2184	23.4300
9	11	18.2059	6.2226
9	12	20.2433	10.3641
9	13	5.8218	0.7565
9	55	19.8774	7.4997
9	65	0.6063	3.8400
10	65	0.0000	0.0000
10	66	0.0000	0.0000
10	67	46.6590	14.9180
10	68	46.6590	14.9180
11	13	8.5118	6.5362
11	41	10.8166	5.8960
11	43	15.7979	8.5938
12	13	121.4391	32.7437
12	16	290.4149	105.2752
12	17	34.0924	3.4073
12	67	47.3338	14.7174
13	14	45.0795	9.1718
13	15	17.7718	6.2496
13	49	35.0851	22.7038
14	15	7.7744	16.0368

Continua na próxima página

Continuação da tabela			
Num. Barra De	Num. Barra Para	P [MW]	Q [Mvar]
14	46	42.0588	19.9738
15	45	29.6018	14.0717
15	59	38.1377	18.5772
16	63	144.4309	4.1766
17	61	8.3688	1.8730
18	70	0.2553	3.1150
19	70	0.0000	0.0000
19	71	3.3000	0.6000
19	72	3.3000	0.6000
20	71	3.1475	2.3598
21	20	5.4475	1.0685
21	22	5.4475	1.0685
22	23	6.9227	4.3262
22	38	12.3978	3.3016
23	24	0.6147	2.2139
24	25	12.0963	6.5338
24	26	11.4955	3.6550
25	30	5.7963	4.6319
26	27	11.4955	3.7400
27	28	21.0920	4.6965
28	29	26.0231	7.5075
29	52	17.0603	6.2192
30	31	2.0882	2.6702
31	32	3.7691	0.3171
32	33	3.8108	1.9099
34	32	9.2980	4.6009
34	35	9.2980	4.6009
35	36	15.3735	7.4768
36	37	17.0592	8.0894
36	40	1.5188	0.5259
37	38	19.5986	9.9760
37	39	2.4055	1.7175
38	44	16.7625	9.9440
38	48	19.0908	7.3226
Continua na próxima página			

Continuação da tabela			
Num. Barra De	Num. Barra Para	P [MW]	Q [Mvar]
38	49	10.5798	3.5249
39	57	2.4028	1.7133
40	56	1.5178	0.5244
41	43	13.7979	5.9829
41	76	10.4664	5.9220
42	74	0.0000	0.0000
42	75	0.0000	0.0000
42	76	0.0000	0.0000
42	77	10.1182	5.3299
42	78	0.0000	0.0000
42	79	0.0000	0.0000
42	80	10.1182	5.3299
44	45	28.8935	11.8404
46	47	42.0588	18.2628
47	48	11.8221	5.3580
48	49	7.4607	2.2519
49	50	1.1841	5.2369
50	51	22.2106	5.3054
51	66	41.0514	11.9399
52	53	11.6536	3.3621
53	54	8.4756	1.4890
54	55	12.7404	3.0926
56	41	7.4323	1.3335
56	74	2.9909	0.8845
57	56	4.2972	0.4369
58	59	0.0000	0.0000
59	64	38.4460	10.5602
60	61	55.0000	17.0000
61	64	63.3857	16.1225
62	63	33.3693	67.2322
63	64	101.8317	26.6828
65	69	0.6076	0.3937
66	69	41.0514	13.3117
67	69	0.0000	0.0000
Continua na próxima página			

Continuação da tabela			
Num. Barra De	Num. Barra Para	P [MW]	Q [Mvar]
68	69	41.6590	12.9180
70	73	0.2046	3.0397
71	73	0.2046	3.0397
72	73	0.0000	0.0000
74	75	3.0182	0.9299
75	81	3.0182	0.9299
76	77	10.1182	5.3299
77	81	0.0000	0.0000
78	79	7.1000	4.4000
79	81	7.1000	4.4000
80	81	10.1182	5.3299

Tabela 53

Resultados de Barra - IEEE 57 Barras - Nível de Subestação - ANAREDE

Num.	Tipo	V [pu]	θ [°]	P_g [MW]	Q_g [Mvar]
1	PQ	0.9956	26.0956	0.0000	0.0000
2	PV	1.0100	26.9159	0.0000	158.8516
3	PV	0.9850	28.0497	40.0000	18.5657
4	PQ	0.9796	28.5442	0.0000	0.0000
5	PQ	0.9762	28.5940	0.0000	0.0000
6	PV	0.9800	28.1586	0.0000	2.1581
7	PQ	0.9808	26.0906	0.0000	0.0000
8	PV	1.0050	22.3194	450.0000	66.6873
9	PV	0.9800	26.4678	0.0000	6.9699
10	PQ	0.9832	26.4449	0.0000	0.0000
11	PQ	0.9690	27.2861	0.0000	0.0000
12	PV	1.0150	23.2746	310.0000	184.2283
13	PQ	0.9753	26.9847	0.0000	0.0000
14	PQ	0.9650	28.0980	0.0000	0.0000
15	PQ	0.9751	27.9988	0.0000	0.0000
16	$V\theta$	1.0130	8.9000	494.5591	33.1773
17	PQ	0.9930	26.6135	0.0000	0.0000
18	PQ	0.9424	38.0453	0.0000	0.0000
19	PQ	0.9186	37.2106	0.0000	0.0000

Continua na próxima página

Continuação da tabela					
Num.	Tipo	V [pu]	θ [°]	P_g [MW]	Q_g [Mvar]
20	PQ	0.9168	35.8268	0.0000	0.0000
21	PQ	0.9065	32.9089	0.0000	0.0000
22	PQ	0.9096	32.4114	0.0000	0.0000
23	PQ	0.9081	32.4546	0.0000	0.0000
24	PQ	0.8998	32.2670	0.0000	0.0000
25	PQ	0.8293	43.3140	0.0000	0.0000
26	PQ	0.9017	31.8830	0.0000	0.0000
27	PQ	0.9336	30.3156	0.0000	0.0000
28	PQ	0.9526	29.2061	0.0000	0.0000
29	PQ	0.9687	28.4525	0.0000	0.0000
30	PQ	0.8086	43.7801	0.0000	0.0000
31	PQ	0.7838	43.9314	0.0000	0.0000
32	PQ	0.8119	41.5134	0.0000	0.0000
33	PQ	0.8093	41.5678	0.0000	0.0000
34	PQ	0.8565	34.1932	0.0000	0.0000
35	PQ	0.8663	33.8131	0.0000	0.0000
36	PQ	0.8785	33.4317	0.0000	0.0000
37	PQ	0.8875	33.1453	0.0000	0.0000
38	PQ	0.9133	32.2028	0.0000	0.0000
39	PQ	0.8861	33.1818	0.0000	0.0000
40	PQ	0.8777	33.4726	0.0000	0.0000
41	PQ	0.9272	32.4594	0.0000	0.0000
42	PQ	0.8818	34.1825	0.0000	0.0000
43	PQ	0.9558	28.7816	0.0000	0.0000
44	PQ	0.9249	31.7310	0.0000	0.0000
45	PQ	0.9606	29.8860	0.0000	0.0000
46	PQ	0.9503	30.0297	0.0000	0.0000
47	PQ	0.9274	31.6140	0.0000	0.0000
48	PQ	0.9237	31.7330	0.0000	0.0000
49	PQ	0.9333	31.2069	0.0000	0.0000
50	PQ	0.9272	30.8290	0.0000	0.0000
51	PQ	0.9740	28.1947	0.0000	0.0000
52	PQ	0.9316	29.9088	0.0000	0.0000
53	PQ	0.9186	30.5050	0.0000	0.0000

Continua na próxima página

Continuação da tabela					
Num.	Tipo	V [pu]	θ [°]	P_g [MW]	Q_g [Mvar]
54	PQ	0.9398	29.3855	0.0000	0.0000
55	PQ	0.9711	27.9100	0.0000	0.0000
56	PQ	0.8708	34.8324	0.0000	0.0000
57	PQ	0.8607	35.6283	0.0000	0.0000
58	PQ	0.9956	26.0958	0.0000	0.0000
59	PQ	0.9956	26.0961	0.0000	0.0000
60	PQ	0.9955	26.0965	0.0000	0.0000
61	PQ	0.9956	26.0962	0.0000	0.0000
62	PQ	0.9956	26.0954	0.0000	0.0000
63	PQ	0.9956	26.0952	0.0000	0.0000
64	PQ	0.9956	26.0958	0.0000	0.0000
65	PQ	0.9832	26.4454	0.0000	0.0000
66	PQ	0.9832	26.4457	0.0000	0.0000
67	PQ	0.9832	26.4446	0.0000	0.0000
68	PQ	0.9832	26.4452	0.0000	0.0000
69	PQ	0.9832	26.4454	0.0000	0.0000
70	PQ	0.9186	37.2106	0.0000	0.0000
71	PQ	0.9186	37.2106	0.0000	0.0000
72	PQ	0.9186	37.2107	0.0000	0.0000
73	PQ	0.9186	37.2106	0.0000	0.0000
74	PQ	0.8818	34.1827	0.0000	0.0000
75	PQ	0.8818	34.1826	0.0000	0.0000
76	PQ	0.8818	34.1823	0.0000	0.0000
77	PQ	0.8818	34.1824	0.0000	0.0000
78	PQ	0.8818	34.1827	0.0000	0.0000
79	PQ	0.8818	34.1827	0.0000	0.0000
80	PQ	0.8818	34.1826	0.0000	0.0000
81	PQ	0.8818	34.1826	0.0000	0.0000

Tabela 54

Resultados de Circuito - IEEE 57 Barras - Nível de Subestação - ANAREDE

Num. Barra De	Num. Barra Para	P [MW]	Q [Mvar]
1	58	33.3730	67.2086
1	60	0.0000	0.0000

Continua na próxima página

Continuação da tabela			
Num. Barra De	Num. Barra Para	P [MW]	Q [Mvar]
1	62	33.3730	67.2086
2	3	29.9700	15.2557
2	58	32.9700	55.5959
3	4	24.9246	5.2588
3	15	3.6729	14.6401
4	5	1.4896	0.5785
4	6	4.0982	0.7532
4	18	27.4548	8.8467
5	6	11.5140	0.9620
6	7	32.7693	4.9739
6	8	57.8928	2.1205
7	8	93.4227	13.0735
7	29	60.4215	19.5175
8	9	146.2190	23.4299
9	11	18.2054	6.2241
9	12	20.2445	10.3638
9	13	5.8213	0.7550
9	55	19.8774	7.4997
9	65	0.6035	3.8390
10	65	0.0000	0.0000
10	66	0.0000	0.0000
10	67	46.6545	14.9179
10	68	46.6545	14.9179
11	13	8.5123	6.5348
11	41	10.8165	5.8960
11	43	15.7979	8.5938
12	13	121.4431	32.7463
12	16	290.4185	105.2770
12	17	34.0954	3.4131
12	67	47.3291	14.7170
13	14	45.0805	9.1739
13	15	17.7726	6.2471
13	49	35.0861	22.7041
14	15	7.7738	16.0345
Continua na próxima página			

Continuação da tabela			
Num. Barra De	Num. Barra Para	P [MW]	Q [Mvar]
14	46	42.0592	19.9735
15	45	29.6018	14.0711
15	59	38.1334	18.5645
16	63	144.4267	4.1706
17	61	8.3658	1.8678
18	70	0.2556	3.1151
19	70	0.0000	0.0000
19	71	3.2998	0.6000
19	72	3.2998	0.6000
20	71	3.1473	2.3599
21	20	5.4472	1.0687
21	22	5.4475	1.0687
22	23	6.9226	4.3260
22	38	12.3976	3.3012
23	24	0.6146	2.2138
24	25	12.0963	6.5339
24	26	11.4956	3.6552
25	30	5.7963	4.6319
26	27	11.4956	3.7402
27	28	21.0922	4.6968
28	29	26.0233	7.5078
29	52	17.0603	6.2192
30	31	2.0882	2.6702
31	32	3.7691	0.3171
32	33	3.8108	1.9099
34	32	9.2979	4.6009
34	35	9.2979	4.6009
35	36	15.3735	7.4768
36	37	17.0592	8.0894
36	40	1.5188	0.5259
37	38	19.5987	9.9760
37	39	2.4055	1.7175
38	44	16.7625	9.9434
38	48	19.0908	7.3226
Continua na próxima página			

Continuação da tabela			
Num. Barra De	Num. Barra Para	P [MW]	Q [Mvar]
38	49	10.5795	3.5252
39	57	2.4028	1.7133
40	56	1.5178	0.5244
41	43	13.7979	5.9829
41	76	10.4660	5.9221
42	74	0.0000	0.0000
42	75	0.0000	0.0000
42	76	0.0000	0.0000
42	77	10.1178	5.3300
42	78	0.0000	0.0000
42	79	0.0000	0.0000
42	80	10.1178	5.3300
44	45	28.8936	11.8397
46	47	42.0592	18.2625
47	48	11.8225	5.3576
48	49	7.4604	2.2523
49	50	1.1826	5.2364
50	51	22.2091	5.3059
51	66	41.0497	11.9403
52	53	11.6536	3.3621
53	54	8.4755	1.4890
54	55	12.7404	3.0926
56	41	7.4326	1.3335
56	74	2.9905	0.8846
57	56	4.2972	0.4369
58	59	0.0000	0.0000
59	64	38.4416	10.5471
60	61	55.0000	17.0000
61	64	63.3827	16.1176
62	63	33.3730	67.2080
63	64	101.8244	26.6664
65	69	0.6048	0.3947
66	69	41.0497	13.3120
67	69	0.0000	0.0000

Continua na próxima página

Continuação da tabela			
Num. Barra De	Num. Barra Para	P [MW]	Q [Mvar]
68	69	41.6545	12.9177
70	73	0.2050	3.0398
71	73	0.2050	3.0398
72	73	0.0000	0.0000
74	75	3.0178	0.9300
75	81	3.0178	0.9300
76	77	10.1178	5.3301
77	81	0.0000	0.0000
78	79	7.1000	4.4000
79	81	7.1000	4.4000
80	81	10.1178	5.3300

REFERÊNCIAS

- Alsac, O., Vempati, N., Stott, B., e Monticelli, A. (1998). Generalized state estimation. *IEEE Transactions on Power Systems*, 13(3), 1069-1075. doi: 10.1109/59.709101
- Clements, K., e Costa, A. (1998). Topology error identification using normalized lagrange multipliers. *IEEE Transactions on Power Systems*, 13(2), 347-353. doi: 10.1109/59.667350
- Exposito, A., e de la Villa Jaen, A. (2001). Reduced substation models for generalized state estimation. *IEEE Transactions on Power Systems*, 16(4), 839-846. doi: 10.1109/59.962435
- Grainger, J., e Stevenson, W. (1994). *Power system analysis*. McGraw-Hill.
- Korres, G., e Katsikas, P. (2002). Identification of circuit breaker statuses in wls state estimator. *IEEE Transactions on Power Systems*, 17(3), 818-825. doi: 10.1109/TPWRS.2002.800943
- Lourenço, E., Foletto, T., e Tortelli, O. (2018, 05). Power flow in networks modeled at substation level in two stages. *2018 Simposio Brasileiro de Sistemas Eletricos (SBSE)*, 1-6. doi: 10.1109/SBSE.2018.8395692
- Lourenço, E., Simões Costa, A., e Ribeiro, R. (2010, 02). Steady-state solution for power networks modeled at bus section level. *IEEE Transactions on Power Systems*, 25(1), 10-20. doi: 10.1109/TPWRS.2009.2036466
- Lourenço, E., Simões Costa, A., e Silva, N. (2009, 06). Fast decoupled steady-state solution for power networks modeled at the bus section level. *2009 IEEE Bucharest PowerTech*, 1-7. doi: 10.1109/PTC.2009.5282150
- Mamede Filho, D., J.; Mamede. (2013). *Proteção de sistemas elétricos de potência*. LTC.
- Mariesa, L. (2009). *Computational methods for electric power systems*. CRC Press.
- Mazi, A. A., Wollenberg, B. F., e Hesse, M. H. (1986). Corrective control of power system flows by line and bus-bar switching. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1(3), 258-264. doi: 10.1109/TPWRS.1986.4334990
- Monticelli, A. (1983). *Fluxo de carga em redes de energia elétrica*. Edgard Blücher Ltda.
- Monticelli, A. (1993). The impact of modeling short circuit branches in state estimation. *IEEE Transactions on Power Systems*, 8(1), 364-370. doi: 10.1109/59.221219
- Monticelli, A., e Garcia, A. (1991). Modeling zero impedance branches in power system state estimation. *IEEE Transactions on Power Systems*, 6(4), 1561-1570. doi:

10.1109/59.117003

ONS. (2013). *Diretrizes para a elaboração de projetos básicos para empreendimentos de transmissão*. Rio de Janeiro.

Vempati, N., Silva, C., Alsac, O., e Stott, B. (2005). Topology estimation. In *IEEE power engineering society general meeting, 2005* (p. 806-810 Vol. 1). doi: 10.1109/PES.2005.1489505