



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

MARBYO LOPES DO NASCIMENTO

**ANÁLISE ESTÁTICA DE CONTINGÊNCIAS  
EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA  
UTILIZANDO O ANAREDE**

CAMPINA GRANDE - PB  
FEVEREIRO DE 2017

MARBYO LOPES DO NASCIMENTO

ANÁLISE ESTÁTICA DE CONTINGÊNCIAS  
EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA  
UTILIZANDO O ANAREDE

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à  
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da  
Universidade Federal de Campina Grande  
como parte dos requisitos necessários para a  
obtenção do grau de Bacharel em Ciências no  
Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Sistemas Elétricos de Potência

Célio Anésio da Silva, D.Sc.  
Professor Orientador

Campina Grande, Paraíba  
Fevereiro de 2017

MARBYO LOPES DO NASCIMENTO

ANÁLISE ESTÁTICA DE CONTINGÊNCIAS  
EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA  
UTILIZANDO O ANAREDE

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Sistemas Elétricos de Potência

Aprovado em        /        /

**Professor Washington Luiz Araújo Neves, D.Sc.**  
Universidade Federal de Campina Grande  
Avaliador, UFCG

**Professor Célio Anésio da Silva, D.Sc.**  
Universidade Federal de Campina Grande  
Orientador, UFCG

Dedico este trabalho à minha família, amigos, namorada e a todos que contribuíram de forma direta e indireta para essa conquista.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus que me proporcionou oportunidades e que esteve ao meu lado em todos os momentos, me fazendo sentir seu amor e apoio em tudo o que precisei.

Ao professor Célio Anésio pela disponibilidade e incentivo a realização deste trabalho.

Ao professor Washington Neves pelo interesse e sugestões essenciais a este trabalho.

Aos meus pais Ivonete e Epaminondas pela incansável dedicação e amor a nossa família.

A meus irmãos Priscylla Clara, Epaminondas Junior e Clarice Allayne pela união, paciência e amor dedicado.

A todos os meus amigos pela amizade sincera, pelas alegrias impagáveis e pelo amor incomensurável.

A minha namorada Eujessika que assim como minha família e amigos entendeu minhas ausências e preocupações, tendo sempre a confiança em mim e naquilo que nos une.

Aos professores do curso de Engenharia Elétrica por terem deixado um pouco deles em mim, não só na formação acadêmica, como também na minha formação como ser humano.

Aos funcionários da UFCG, em especial ao Departamento de Engenharia Elétrica pela presteza e carinho dedicados aos alunos.

Finalmente, a todos que direta ou indiretamente participam da minha vida. Vocês estão nas páginas, letras, cores, sombras, luzes, do meu lado, estão em mim.

*Valeu a pena? Tudo vale a pena  
Se a alma não é pequena  
Quem que passar além do Bojador  
Tem que passar além da dor  
Deus ao mar o perigo e o abismo deu  
Mas nele é que espelhou o céu.*

Fernando Pessoa.

## RESUMO

Este trabalho aborda o estudo do fluxo de potência em regime permanente tanto no aspecto teórico-conceitual quanto na simulação de casos bases de sistemas de potência. Aborda também o estudo das contingências e as maneiras de as eliminar do sistema. Apresenta um estudo do *software* Anarede, que torna possível realizar estudos em situação normal e anormal de operação da rede elétrica de potência. Demonstrar a construção de um sistema elétrico de potência simples e a aplicação da análise de contingência automática fornecida pelo *software*, permitindo a partir dos dados fornecidos elaborar um planejamento adequado para aumentar a confiabilidade de qualquer alteração no sistema.

**Palavras-Chave:** Anarede, Fluxo de Potência, Contingências, Sistema Elétrico de Potência.

## ABSTRACT

This work addresses the study of power flow in a permanent regime, such on the conceptual and theoretical aspect well as on the simulation of base cases of power systems. It also addresses the study of contingencies and ways to eliminate them from the system. It presents a study of Anarede software, which make it possible to carry out studies in normal and abnormal situation of operation of the power grid. Demonstrates the construction of a simple power system and the application of the automatic contingency analysis provided by the software, allowing from the data provided elaborating an adequate planning to increase the reliability of any change in the system.

**Keyword:** Anarede, Power Flow, Contingencies, Electric Power Systems.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Ícone da barra de ferramentas.....	27
Figura 2 - Menu de elementos de rede.....	27
Figura 3 - Dados de barra CA.....	27
Figura 6 - Dados de Linha CA.....	29
Figura 7 - Análise de Contingências – Automático.....	31
Figura 8 - Análise de contingências – Automático.....	31
Figura 9 - Sistema composto por três barras.....	34
Figura 10 - Sumário dos índices de severidade de geração.....	37
Figura 11- Geração de reativo - Contingência Linha 1-2 – IEEE 30 Barras.....	37
Figura 12 - Sumário dos índices de severidade de geração – IEEE 30 Barras.....	38
Figura 13 - Sumário dos índices de severidade de geração – IEEE 30 Barras.....	38
Figura 14 - Sumário dos índices de severidade de geração – IEEE 30 Barras.....	39
Figura 15 - Sumário dos índices de severidade de tensão – IEEE 30 Barras.....	39
Figura 16 - Tensão - Contingência Linha 28-27 - IEEE 30 Barras.....	40
Figura 17 - Sumário dos índices de severidade de tensão - IEEE 30 Barras.....	40
Figura 18 - Sumário dos índices de severidade de fluxo - IEEE 30 Barras.....	41
Figura 19 - Fluxo - Contingência Linha 1-2 - IEEE 30 Barras.....	41
Figura 20 - Sumário dos índices de severidade de fluxo - IEEE 30 Barras.....	41
Figura 21 – Representação gráfica do SEP no Anarede.....	47
Figura 22 - Ícone da barra de ferramentas.....	50
Figura 23 - Menu de elementos de rede.....	50
Figura 24 - Dados de barra CA.....	50
Figura 26 - Gerenciador de Dados.....	54
Figura 27 - Dados de Carga Individualizada.....	55
Figura 28 - Dados do Gerador.....	56
Figura 29 - Sistemas com três barras.....	56
Figura 30 - Selecionando a análise de contingências.....	59
Figura 31 - Análise de Contingências – Automático.....	60
Figura 32 - Análise de contingência – Automático.....	61
Figura 33 - Sumário de Relatórios.....	61
Figura 34 - Sumário dos índices de severidade de geração.....	64
Figura 35 - Geração de reativos - contingência linha 1-2.....	64
Figura 36 - Sumário de Severidade de geração.....	65
Figura 37 - Sumário de severidade de geração.....	65
Figura 38 - Sumário de severidade de geração.....	65
Figura 39 - Sumário de índices de severidade de tensão.....	66
Figura 40 - Tensão - Contingência linha 27-28.....	66
Figura 41 - Sumário dos índices de severidade de tensão.....	67
Figura 42 - Sumário dos índices de severidade de fluxo.....	67
Figura 43 - Sumário dos índices de severidade de fluxo.....	67
Figura 44 - Diagrama unifilar do sistema a ser analisado.....	69

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Dados de Barra.....	34
Tabela 2 - Valores dos fluxos de Potência .....	34
Tabela 3 - Limites de Geração .....	36
Tabela 4 - Faixa de variação da tensão nominal para as barras de 69 kV a 230 kV. ....	36
Tabela 5 - Faixa de variação da tensão nominal para as barras de 1 kV a 69 kV. ....	36

# SUMÁRIO

Agradecimentos.....	v
Resumo.....	vii
Abstract.....	viii
Lista de Ilustrações.....	ix
Lista de Tabelas.....	x
Sumário.....	xi
1 Introdução.....	12
1.1 Objetivos.....	13
Objetivo Geral.....	13
Objetivos Específicos.....	13
1.2 Motivação do Trabalho.....	13
1.3 Método Adotado.....	14
1.4 Estrutura do Trabalho.....	14
2 Fundamentação Teórica.....	16
2.1 Fluxo de Potência.....	16
Formulação Básica.....	16
2.2 Método Utilizado pelo Anarede.....	18
2.3 Método de Newton-Raphson.....	19
2.4 Contingências.....	23
Estados de Operação do Sistema.....	24
3 Anarede.....	26
3.1 Dados de barra.....	27
3.2 Dados de linha.....	28
3.3 Contingências – Critério $N_{Linhas}-1$ .....	30
4 Simulações e Estudo do Caso Base.....	33
4.1 Simulação do fluxo de potência.....	33
4.2 Análise de Contingências Sistema 30 Barras IEEE.....	35
5 Conclusão.....	43
REFERÊNCIAS.....	45
APÊNDICE A – GUIA DE LABORATÓRIO: ANÁLISE ESTÁTICA DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA UTILIZANDO O <i>SOFTWARE</i> ANAREDE.....	46
APÊNDICE B – GUIA DE LABORATÓRIO: ANÁLISE DE CONTINGÊNCIAS DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA UTILIZANDO O <i>SOFTWARE</i> ANAREDE.....	58
APÊNDICE C – FLUXO DE POTÊNCIA ATRAVÉS DO MÉTODO DE NEWTON-RAPHSON.....	69

# 1 INTRODUÇÃO

A análise do fluxo de potência é a metodologia mais utilizada nos vários estudos feitos em sistemas elétricos de potência, consistindo basicamente nos cálculos das tensões nodais, em módulo e fase, e dos fluxos de potência em sistemas de transmissão, dado um nível de carga especificado, um despacho de geração ativa estabelecida, bem como a topologia e os parâmetros da rede (PASSOS FILHO, 2000).

Todo sistema elétrico de potência deve atender as necessidades dos seus clientes. Procurando garantir um fornecimento de energia sem interrupções e com qualidade, existem leis e normas estabelecidas pelos órgãos regulamentadores que determinam os valores máximos e mínimos das tensões nos pontos de entrega das concessionárias, assim como determinam limites estabelecidos para frequência a qual o sistema pode operar.

A geração de energia deve operar em equilíbrio com a carga demandada, mas o sistema está em constante oscilação, pelo fato de a demanda de carga alterar no decorrer do tempo. Quando se encontra um desequilíbrio entre a geração e a carga os operadores e elementos do sistema trabalham a fim de alcançar um novo ponto de equilíbrio. Portanto, os estudos de fluxo de potência permitem avaliar como a variação da carga irá afetar o sistema elétrico dentro dos limites de operação, determinar as melhores alternativas de expansão da rede, e ainda, avaliar o impacto causado pela ocorrência de uma contingência. Além disso, esses estudos também colaboram para o planejamento e operação dos sistemas elétricos, visando definir o melhor perfil de tensões, ajustes de tap dos transformadores, condições para o chaveamento de banco de capacitores, etc. (SANTOS, DAHER; NAZARI, 2013).

Grande parte dos programas para o cálculo de fluxo de potência utilizam diferentes variações do método de Newton-Raphson, método desenvolvido em sua formulação clássica no final da década de sessenta. Apesar de requerer algoritmos mais complexos para a sua implementação, o mesmo apresenta desempenho computacional bastante satisfatório. Com destaque para sua grande confiabilidade de convergência que veio permitir o seu uso generalizado, mesmo em sistemas antes considerados de difícil solução (PASSOS FILHOS, 2000).

No tema do fluxo de potência será abordada a modelagem do sistema estático, desconsiderando os efeitos transitórios e utilizando o método de Newton-Raphson para a resolução o fluxo de potência.

Já os estudos de contingências levam em consideração que as redes elétricas de potência podem sofrer anormalidade em sua topologia, tais como: saída de operação de linhas de transmissão e transformadores que podem originar violações nos limites da rede (SANTOS; DAHER; NAZARI, 2013). Portanto, os estudos de fluxo de potência são realizados com intuito de simular o sistema operando em condições normais de operação e na ocorrência de contingências, resultando na validação ou não do cumprimento dos limites de operação.

Neste trabalho será estudado o sistema de potência de 30 barras do IEEE, analisando as contingências com o critério  $N_{Linhas-1}$ , bem como a análise do fluxo de potência de um sistema de potência com três barras, utilizando o *software* Anarede.

## 1.1 OBJETIVOS

### OBJETIVO GERAL

Realizar análise estática do sistema elétrico de potência, em condições normais de operação e análise de contingências critério  $N_{Linhas-1}$  com o auxílio da ferramenta computacional Anarede.

### OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Analisar, por meio de simulação computacional, o fluxo de potência em um sistema elétrico simples composto por três barras, utilizando o Anarede.

Analisar, por meio de simulação computacional, as contingências do sistema elétrico de potência de 30 barras do IEEE e a forma de corrigi-las, utilizando o Anarede.

Elaborar um material didático para utilização do *software* Anarede.

## 1.2 MOTIVAÇÃO DO TRABALHO

O engenheiro de sistema de potência, “deve conhecer os métodos para fazer estudo de carga, deve saber analisar faltas e ter conhecimento de estabilidade, uma vez que todos

esses fatores afetam o projeto e o funcionamento de um sistema, bem como a escolha de sua aparelhagem de controle. ” (STEVENSON, 1986).

Os sistemas elétricos de duas ou três barras não contemplam a complexidade necessária para compreender o funcionamento de um sistema de potência real. Visando uma preparação mais adequada aos acadêmicos do curso de engenharia elétrica é recomendável que seja realizado a introdução do conhecimento e operação de algum *software* utilizado no estudo de sistemas de potência. O *software* utilizado no decorrer das análises elaboradas neste trabalho foi o Anarede, que é o *software* mais utilizado nas concessionárias que operam no Brasil.

### 1.3 MÉTODO ADOTADO

Inicialmente será feito um estudo através das referências bibliográficas sobre o estudo do fluxo de potência no seu aspecto conceitual e matemático, bem com o estudo das contingências e seus efeitos em um sistema de potência e a forma de corrigi-las. A etapa seguinte será o estudo das ferramentas disponíveis no programa Anarede com relação ao fluxo de potência e a simulação das contingências.

Após a revisão e o estudo do *software* Anarede, foi elaborado um material didático para auxiliar os alunos de engenharia elétrica com a familiarização do *software* Anarede, de forma didática, a metodologia proposta apresentará o passo a passo da criação de uma rede elétrica e a simulação das contingências no Anarede.

A consolidação do projeto se dará com a confecção de um documento contendo, além de fundamentação teórica sobre o assunto, todas as etapas necessárias à obtenção das análises propostas.

### 1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho está dividido em cinco capítulos, além de três apêndices, que serão sucintamente descritos a seguir:

Conforme visto, no capítulo I são apresentadas às considerações iniciais, a delimitação do tema, o objetivo, a justificativa e a metodologia da pesquisa.

No capítulo II descreve-se o estudo do fluxo de potência e as contingências, apresentando todas as premissas para análise dos casos simulados.

No capítulo III é apresentado um estudo do Anarede com o objetivo de se ter o conhecimento necessário para as simulações do fluxo de potência, analisar os relatórios e critérios adotados pelo *software*.

No capítulo IV apresenta-se as simulações, análise dos resultados obtidos e as soluções propostas para o caso 30 barras IEEE para o estudo de fluxo de potência e suas contingências com critério  $N_{Linhas-1}$ .

Por fim, no capítulo V listam-se as considerações finais do trabalho. Como material complementar, no apêndice A tem-se o material didático elaborado para iniciar o uso do *software* Anarede. No apêndice B está o material didático elaborado para o estudo de análise de contingências. E finalmente no apêndice C está o desenvolvimento matemático da resolução do fluxo de potência usando o método de Newton-Raphson.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 FLUXO DE POTÊNCIA

O cálculo do fluxo de potência em uma rede de energia elétrica consiste essencialmente na determinação do estado da rede, da distribuição dos fluxos e de algumas outras grandezas de interesse, em geral, realizado utilizando-se de métodos computacionais desenvolvidos especificamente para a resolução do sistema de equações e inequações algébricas que consistem em o modelo estático da rede.

Os componentes de um sistema de energia elétrica podem ser classificados em dois grupos: os que estão ligados entre um nó qualquer e o nó terra, como é o caso de geradores, cargas, reatores e capacitores; e os que estão ligados entre dois nós quaisquer da rede, como é o caso de linha de transmissão, transformadores e defasadores.

As equações básicas do fluxo de potência são obtidas impondo-se a conservação das potências ativas e reativas em cada nó da rede, isto é, a potência líquida injetada deve ser igual à soma das potências que fluem pelos componentes internos que tem este nó como um dos seus terminais. Isso equivale a se impor a primeira lei de Kirchhoff. A segunda lei de Kirchhoff é utilizada para expressar os fluxos de potência nos componentes internos como funções das tensões (estados) de seus nós terminais.

#### FORMULAÇÃO BÁSICA

O problema do fluxo de potência pode ser formulado por um sistema de equações e inequações algébricas não lineares que correspondem às leis de Kirchhoff e a um conjunto de restrições operacionais da rede e de seus componentes. Na formulação mais simples do problema a cada barra da rede são associadas quatro variáveis, sendo que duas delas entram no problema como dados e duas como incógnitas:

$V_k$  – amplitude da tensão nodal (barra k)

$\theta_k$  – ângulo da tensão nodal

$P_k$  – geração líquida (geração menos a carga) de potência ativa

$Q_k$  – injeção líquida de potência reativa

Dependendo de quais variáveis nodais entram como dados e quais são consideradas como incógnitas, definem-se três tipos de barras:

$PQ$  – são dados  $P_k$  e  $Q_k$ , calculados  $V_k$  e  $\theta_k$

$PV$  – são dados  $P_k$  e  $V_k$ , e calculados  $Q_k$  e  $\theta_k$

*Referência ( $V\theta$ )* – são dados  $V_k$  e  $\theta_k$ , e calculados  $P_k$  e  $Q_k$

As barras dos tipos  $PQ$  e  $PV$  são utilizadas para representar, respectivamente, barras de carga e barras de geração. A barra  $V\theta$ , ou barra de referência, tem uma dupla função: como próprio nome indica, fornece a referência angular do sistema, além disso, é utilizada para fechar o balanço de potência do sistema, levando em conta as perdas de transmissão não conhecidas antes de se ter a solução final do problema.

O conjunto de equações do problema do fluxo de potência é formado por duas equações para cada barra, cada uma delas representando o fato de as potências ativa e reativa injetadas em uma barra serem iguais à soma dos fluxos correspondentes que deixam a barra através de linhas de transmissão, transformadores, etc. Expressando matematicamente obteremos:

$$P_k = \sum_{m \in \Omega_k} P_{km} (V_k, V_m, \theta_k, \theta_m) \quad (1)$$

$$Q_k + Q_k^{sh}(V_k) = \sum_{m \in \Omega_k} Q_{km} (V_k, V_m, \theta_k, \theta_m). \quad (2)$$

Sendo:

$k = 1, \dots, n$ , sendo  $n$  o número de barras da rede

$\Omega_k$  – conjunto das barras vizinhas da barra  $k$

$|V_k|, |V_m|$  – amplitudes das tensões das barras terminais do ramo  $k - m$

$\theta_k, \theta_m$  – ângulos das tensões das barras terminais do ramo  $k - m$

$P_{km}$  – fluxo de potência ativa no ramo  $k - m$

$Q_{km}$  – fluxo de potência reativa no ramo  $k - m$

$Q_{km}^{sh}$  – componente de injeção de potência reativa devida ao elemento *shunt* da barra  $k$ .

As expressões (1) e (2) foram montadas considerando-se a seguinte convenção de sinais: as injeções líquidas de potência são positivas quando entram na barra (geração) e negativos quando saem da barra (carga); os fluxos de potência são positivos quando saem da barra e negativos quando entram; para os elementos *shunt* das barras é adotada a mesma convenção que para as injeções. Essas convenções de sentidos para as potências ativas e reativas são as mesmas utilizadas para as correntes.

O conjunto de inequações, que fazem parte do problema do fluxo de potência, é formado, entre outras, pelas restrições nas magnitudes das tensões nodais das barras PQ e pelos limites nas injeções de potência reativa das barras PV:

$$V_k^{min} \leq V_k \leq V_k^{max},$$

$$Q_k^{min} \leq Q_k \leq Q_k^{max}.$$

## 2.2 MÉTODO UTILIZADO PELO ANAREDE

O Anarede utiliza dois métodos para executar seus cálculos de fluxo de potência: o método de Newton-Raphson e o desacoplado rápido. Para o cálculo do fluxo de potência é necessário que as linhas de transmissão sejam representadas por seu respectivo equivalente  $\pi$ , e os transformadores por seu equivalente de sequência positiva. A partir desses dados pode ser construída a matriz admitância de barra do sistema. Para um sistema de  $n$  barras, os elementos que compõem essa matriz são: Elementos diagonais,  $Y_{kk} \rightarrow$  soma das admitâncias conectadas a uma dada barra  $k$ ; Demais elementos,  $Y_{kn} \rightarrow$  o negativo da soma das admitâncias conectadas entre a uma dada barra  $k$  com uma dada barra  $n$ , onde  $k \neq n$ .

Usando a matriz de admitância nós podemos escrever as equações nodais do sistema de potência:  $I = Y_{bus}V$ , onde  $I$  é o vetor de dimensão  $N$  de corrente injetada em cada barra e  $V$  é o vetor de dimensão  $N$  das tensões das barras. Para uma dada barra  $k$ , temos:

$$I_k = \sum_{n=1}^N Y_{kn} V_n. \quad (3)$$

A potência complexa associada à barra  $k$  será:

$$S_k = P_k + jQ_k = V_k I_k^* \quad (4)$$

A partir das equações (3) e (4), temos a seguinte equação:

$$P_k + jQ_k = V_k [\sum_{n=1}^N Y_{kn} V_n]^*, k = 1, 2, \dots, N \quad (5)$$

Com a seguinte notação,

$$V_n = |V_n| e^{j\delta_n}, \quad (1)$$

$$Y_{kn} = |Y_{kn}| e^{j\theta_{kn}}, k, n = 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

A partir de (5), (6) e (7), têm-se:

$$P_k + jQ_k = V_k \sum_{n=1}^N |Y_{kn}| |V_n| e^{j(\theta_{kn} - \delta_k + \delta_n)} \quad (3)$$

Expressando na forma polar, têm-se:

$$P_k + jQ_k = V_k \angle -\delta_k \sum_{n=1}^N |Y_{kn}| |V_n| \angle \theta_{kn} + \delta_n \quad (4)$$

Separando as partes reais e imaginárias, obtém-se:

$$P_k = \sum_{n=1}^N |V_k| |V_n| |Y_{kn}| \cos(\theta_{ij} - \delta_k + \delta_n), \quad (10)$$

$$Q_k = -\sum_{n=1}^N |V_k| |V_n| |Y_{kn}| \sin(\theta_{ij} - \delta_k + \delta_n). \quad (11)$$

## 2.3 MÉTODO DE NEWTON-RAPHSON

O método mais utilizado para a solução de equações algébricas não lineares simultâneas é o método de Newton-Raphson. O método de Newton é um procedimento de aproximação sucessiva baseado em uma estimativa inicial e o uso da expansão da série de Taylor. Considere a solução da equação unidimensional dada por:

$$f(x) = c. \quad (5)$$

Se  $x^{(0)}$  é uma estimativa inicial da solução, e  $\Delta x^{(0)}$  é um pequeno desvio da solução correta, devemos ter

$$f(x^{(0)} + \Delta x^{(0)}) = c. \quad (6)$$

Expandindo o lado esquerdo da equação acima na série de Taylor sobre  $x^{(0)}$

$$f(x^{(0)}) + \left(\frac{df}{dx}\right)^{(0)} \Delta x^{(0)} + \frac{1}{2!} \left(\frac{d^2f}{dx^2}\right)^{(0)} (\Delta x^{(0)})^2 + \dots = c. \quad (14)$$

Assumindo que o erro  $\Delta x^{(0)}$  é muito pequeno, os termos de ordem superior podem ser negligenciados, o que resulta em

$$\Delta c^{(0)} \cong \left(\frac{df}{dx}\right)^{(0)} \Delta x^{(0)}. \quad (15)$$

Onde

$$\Delta c^{(0)} = c - f(x^{(0)}). \quad (16)$$

Adicionando  $\Delta x^{(0)}$  à estimativa inicial resultará na segunda aproximação

$$x^{(1)} = x^{(0)} + \frac{\Delta c^{(0)}}{\left(\frac{df}{dx}\right)^{(0)}}. \quad (17)$$

O uso sucessivo deste procedimento produz o algoritmo de Newton-Raphson

$$\Delta c^{(k)} = c - f(x^{(k)}), \quad (18)$$

$$\Delta x^{(k)} = \frac{\Delta c^{(k)}}{\left(\frac{df}{dx}\right)^{(k)}}, \quad (19)$$

$$x^{(k+1)} = x^{(k)} + \Delta x^{(k)}. \quad (20)$$

Que pode ser rearranjado como

$$\Delta c^{(k)} = j^{(k)} \Delta x^{(k)}. \quad (21)$$

Sendo

$$j^{(k)} = \left(\frac{df}{dx}\right)^{(k)}. \quad (22)$$

A relação em (21) demonstra que a equação não linear  $f(x) - c = 0$  é aproximada pela linha tangente na curva em  $x^{(k)}$ . Portanto, uma equação linear é obtida em termos das pequenas mudanças na variável.

Considere agora as equações n-dimensionais. Expandindo o lado esquerdo das equações na série de Taylor sobre as estimativas iniciais e negligenciando todos os termos de ordem superior, leva à expressão:

$$(f_1)^{(0)} + \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_1}\right)^{(0)} \Delta x_1^{(0)} + \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_2}\right)^{(0)} \Delta x_2^{(0)} + \dots + \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_n}\right)^{(0)} \Delta x_n^{(0)} = c_1, \quad (23)$$

$$(f_2)^{(0)} + \left(\frac{\partial f_2}{\partial x_1}\right)^{(0)} \Delta x_1^{(0)} + \left(\frac{\partial f_2}{\partial x_2}\right)^{(0)} \Delta x_2^{(0)} + \dots + \left(\frac{\partial f_2}{\partial x_n}\right)^{(0)} \Delta x_n^{(0)} = c_2, \quad (24)$$

⋮

$$(f_n)^{(0)} + \left(\frac{\partial f_n}{\partial x_1}\right)^{(0)} \Delta x_1^{(0)} + \left(\frac{\partial f_n}{\partial x_2}\right)^{(0)} \Delta x_2^{(0)} + \dots + \left(\frac{\partial f_n}{\partial x_n}\right)^{(0)} \Delta x_n^{(0)} = c_n. \quad (25)$$

Ou na forma matricial

$$\begin{bmatrix} c_1 - (f_1)^{(0)} \\ c_2 - (f_2)^{(0)} \\ \vdots \\ c_n - (f_n)^{(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_1}\right)^{(0)} & \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_2}\right)^{(0)} & \dots & \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_n}\right)^{(0)} \\ \left(\frac{\partial f_2}{\partial x_1}\right)^{(0)} & \left(\frac{\partial f_2}{\partial x_2}\right)^{(0)} & \dots & \left(\frac{\partial f_2}{\partial x_n}\right)^{(0)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \dots \\ \left(\frac{\partial f_n}{\partial x_1}\right)^{(0)} & \left(\frac{\partial f_n}{\partial x_2}\right)^{(0)} & \dots & \left(\frac{\partial f_n}{\partial x_n}\right)^{(0)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1^{(0)} \\ \Delta x_2^{(0)} \\ \vdots \\ \Delta x_n^{(0)} \end{bmatrix}. \quad (26)$$

Em forma curta, pode ser escrito como

$$\Delta C^{(k)} = J^{(k)} \Delta X^{(k)}. \quad (27)$$

Ou

$$\Delta X^{(k)} = [J^{(k)}]^{-1} \Delta C^{(k)}. \quad (28)$$

E o algoritmo de Newton-Raphson para o caso n-dimensional torna-se

$$X^{(k+1)} = X^{(k)} + \Delta X^{(k)}. \quad (29)$$

Sendo

$$\Delta X^{(k)} = \begin{bmatrix} \Delta x_1^{(0)} \\ \Delta x_2^{(0)} \\ \vdots \\ \Delta x_n^{(0)} \end{bmatrix} e \Delta C^{(k)} = \begin{bmatrix} c_1 - (f_1)^{(0)} \\ c_2 - (f_2)^{(0)} \\ \vdots \\ c_n - (f_n)^{(0)} \end{bmatrix}.$$

$$J^{(k)} = \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_1}\right)^{(k)} & \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_2}\right)^{(k)} & \dots & \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_n}\right)^{(k)} \\ \left(\frac{\partial f_2}{\partial x_1}\right)^{(k)} & \left(\frac{\partial f_2}{\partial x_2}\right)^{(k)} & \dots & \left(\frac{\partial f_2}{\partial x_n}\right)^{(k)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \left(\frac{\partial f_n}{\partial x_1}\right)^{(k)} & \left(\frac{\partial f_n}{\partial x_2}\right)^{(k)} & \dots & \left(\frac{\partial f_n}{\partial x_n}\right)^{(k)} \end{bmatrix}. \quad (30)$$

$J^{(k)}$  é chamada matriz jacobiana. Os elementos da matriz são as derivadas parciais avaliadas em  $X^{(k)}$ . É assumido que  $J^{(k)}$  tem inversa durante cada iteração. O método de Newton, aplicado ao conjunto de equações não lineares, reduz o problema à resolução de um conjunto de equações lineares para determinar os valores que melhoram a precisão das estimativas.

As equações (10) e (11) constituem um conjunto de equações algébricas não lineares em termos de variáveis independentes, magnitude de tensão em pu e ângulo de fase em radianos. Temos duas equações para cada barramento de carga, dada por (10) e (11), e a equação para cada barramento controlado por tensão, dada por (10). Expandir (10) e (11) na série de Taylor sobre a estimativa inicial e negligenciar todos os termos de ordem mais alta resultam no seguinte conjunto de equações lineares.

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta P_n^{(k)} \\ \Delta Q_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta Q_n^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial P_2}{\partial \delta_2}\right)^{(k)} & \dots & \left(\frac{\partial P_2}{\partial \delta_n}\right)^{(k)} & \left(\frac{\partial P_2}{\partial |V_2|}\right)^{(k)} & \dots & \left(\frac{\partial P_2}{\partial |V_n|}\right)^{(k)} \\ \left(\frac{\partial P_n}{\partial \delta_2}\right)^{(k)} & \dots & \left(\frac{\partial P_n}{\partial \delta_n}\right)^{(k)} & \left(\frac{\partial P_n}{\partial |V_2|}\right)^{(k)} & \dots & \left(\frac{\partial P_n}{\partial |V_n|}\right)^{(k)} \\ \left(\frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2}\right)^{(k)} & \dots & \left(\frac{\partial Q_2}{\partial \delta_n}\right)^{(k)} & \left(\frac{\partial Q_2}{\partial |V_2|}\right)^{(k)} & \dots & \left(\frac{\partial Q_2}{\partial |V_n|}\right)^{(k)} \\ \left(\frac{\partial Q_n}{\partial \delta_2}\right)^{(k)} & \dots & \left(\frac{\partial Q_n}{\partial \delta_n}\right)^{(k)} & \left(\frac{\partial Q_n}{\partial |V_2|}\right)^{(k)} & \dots & \left(\frac{\partial Q_n}{\partial |V_n|}\right)^{(k)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta \delta_n^{(k)} \\ \Delta |V_2^{(k)}| \\ \vdots \\ \Delta |V_n^{(k)}| \end{bmatrix}. \quad (31)$$

Na equação acima, o barramento 1 é assumido como o barramento de referência. A matriz jacobiana dá a relação linearizada entre pequenas mudanças no ângulo de tensão  $\Delta\delta_i^{(k)}$  e magnitude de tensão  $\Delta|V_i^{(k)}|$  com as pequenas mudanças na potência real e reativa  $\Delta P_i^{(k)}$  e  $\Delta Q_i^{(k)}$ . Elementos da matriz jacobiana são as derivadas parciais de (10) e (11), avaliadas em  $\Delta\delta_i^{(k)}$  e  $\Delta|V_i^{(k)}|$ .

Os termos  $\Delta P_i^{(k)}$  e  $\Delta Q_i^{(k)}$  são a diferença entre os valores programados e calculados, conhecidos como os resíduos de potência, dados por:

$$\Delta P_i^{(k)} = P_i - P_i^{(k)}, \quad (32)$$

$$\Delta Q_i^{(k)} = Q_i - Q_i^{(k)}. \quad (33)$$

As novas estimativas para as tensões de barramento são

$$\delta_i^{(k+1)} = \delta_i^{(k)} + \Delta\delta_i^{(k)}, \quad (34)$$

$$|V_i^{(k+1)}| = |V_i^{(k)}| + \Delta|V_i^{(k)}|. \quad (35)$$

O procedimento para a solução de fluxo de potência pelo método de Newton-Raphson é o seguinte:

- Para barramentos de carga, onde  $P_i$  e  $Q_i$  são especificados, as magnitudes de tensão e os ângulos de fase são ajustados para  $|V_i^{(0)}| = 1$  e  $\delta_i^{(0)} = 0$ ;
- Para barramentos de carga,  $P_i^{(k)}$  e  $Q_i^{(k)}$  são calculados a partir de (10) e (11) e  $\Delta P_i^{(k)}$  e  $\Delta Q_i^{(k)}$  são calculados a partir de (32) e (33);
- Para o bus de tensão,  $P_i^{(k)}$  e  $\Delta P_i^{(k)}$  são calculados de (10) e (32), respectivamente.
- Calcular os elementos da matriz Jacobiana;
- As novas magnitudes de tensão e ângulos de fase são calculados a partir de (34) e (35);
- O processo é continuado até que o  $\Delta P_i^{(k)}$  e  $\Delta Q_i^{(k)}$  sejam menores do que a precisão especificada.

$$|\Delta P_i^{(k)}| \leq \epsilon$$

$$|\Delta Q_i^{(k)}| \leq \epsilon$$

## 2.4 CONTINGÊNCIAS

Um sistema de energia elétrica, operando em regime permanente, está sujeito às chamadas restrições de segurança, que consiste em um conjunto preestabelecido de possíveis contingências (MONTICELLE, 1983). Uma contingência em um sistema elétrico de potência consiste no desligamento ou saída repentina de componentes do sistema. A contingência pode ser causada por uma perturbação ou uma falta, com consequente atuação da proteção, uma vez que os equipamentos são protegidos através de relés ou disjuntores. A lista de contingências em um sistema de potência inclui a retirada de uma linha de transmissão, geradores, transformadores, saída de componentes *shunts* e saída de carga.

As contingências podem ser:

- Simples: Em que apenas um componente do sistema é retirado de operação. Também conhecida como critério  $N_{\text{Linhas}} - 1$ ;
- Múltiplas: Neste caso, são admitidas diversas combinações de saídas simultâneas de componentes.

A análise de contingência em um sistema de potência é realizada através de uma simulação computacional em que, dado um ponto de operação do sistema, uma lista de contingência é simulada. Para cada caso, é avaliado o impacto causado no sistema. Os resultados obtidos desta simulação fornecem ao operador uma indicação do que pode ocorrer com o sistema caso um evento não planejado de contingência venha a ocorrer.

A análise de contingência pode ser classificada como estática e dinâmica. A análise estática, amplamente utilizada em tempo real, avalia o estado final da rede a partir das equações do fluxo de potência, após a aplicação da contingência. Possui sua aplicação na operação e planejamento dos sistemas de potência para o monitoramento, avaliação e reforço da segurança do sistema, sendo uma importante ferramenta na análise de segurança estática de um sistema de potência.

A análise dinâmica contempla não apenas o estado final do sistema, quando este entra em regime permanente após a aplicação da contingência, mas também o período que

compreende a transição do sistema de um estado para o outro. Esta análise enquadra-se nos estudos de estabilidade transitória.

O objetivo da operação do sistema é que ele esteja em um estado seguro. Em condições de operação de regime estacionário, ele está sujeito às restrições de carga, que estão relacionadas ao balanço de carga e geração; às restrições de operação que representam os limites impostos às magnitudes das tensões nas barras, aos fluxos de potência aparente nas linhas de transmissão e transformadores e às injeções de potência reativa nas barras de geração; e, por fim, as restrições de segurança que definem a operação segura do sistema sob uma lista de contingências possíveis, como perda de linha, geradores ou capacitores. Os limites de operação mais comuns são: limites de injeção de potência reativa em barras PV; limites de tensão em barras PQ; limites dos TAP de transformadores; e limites de fluxos em circuitos. Dada às restrições, são definidos quatro estados de operação do sistema (MONTICELLE, 1983).

#### ESTADOS DE OPERAÇÃO DO SISTEMA

As definições destes estados de operação são dadas por (MONTICELLE, 1983).

- Seguro: Estado em que são obedecidas as restrições de carga, de operação e de segurança. O sistema está sobre operação normal atendendo toda a demanda e sem violação dos limites de operação. Para este estado, caso alguma das contingências listadas ocorra, o sistema continuará atendendo as cargas normalmente. Contudo, há a possibilidade de o sistema entrar em estado de emergência caso ocorra uma contingência que não estava na lista.
- Alerta: Neste estado, o sistema opera normalmente. Contudo, alguma contingência incluída na lista poderá levar o sistema ao estado de emergência, caso ela venha a ocorrer de fato.
- Emergência: Neste caso, há a violação de um ou mais restrições operativas. A emergência pode ser provocada por uma contingência com conseqüente desligamento de um ou mais equipamentos do sistema.
- Restaurado: Este estado é atingido quando uma emergência é eliminada através de um desligamento manual ou automático de partes do sistema, comprometendo sua integridade através do corte de cargas para que as restrições de operação sejam atendidas.

Estas informações, obtidas através da análise de contingência, são necessárias para que o operador possa tomar ações de controle adequadas, antes ou após o evento, de maneira a manter o sistema sob uma operação segura mesmo após a contingência. As ações podem ser preventivas e/ou corretivas. Nesta situação, deve-se prever se os fluxos de potência e tensões se reajustarão, permanecendo dentro de limites aceitáveis de operação, ou se ocorrerá uma sobrecarga severa e tensões muito baixas poderão levar o sistema a um colapso, não resistindo ao evento (BALU, 1992).

A sobrecarga causada devido a uma contingência pode levar a atuação de alguns elementos de proteção, retirando outros equipamentos do sistema, que por sua vez, podem provocar maior sobrecarga nos restantes, causando a atuação de proteção de alguns destes remanescentes dando sequência a um processo em cascata que pode levar ao desligamento de grande parte do sistema. Por isso, quando previamente conhecido o estado do sistema após uma contingência, as ações de controle podem garantir o menor impacto possível, sobre um menor número de consumidores.

Devido à grande quantidade de possíveis contingências é necessário classificá-las de acordo com o índice de desempenho, que indica a severidade das violações, assim as contingências menos severas serão desconsideradas. A análise de contingência é realizada através da resolução do fluxo de potência após a retirada de um ou mais equipamentos, verificando-se as possíveis violações dos limites operacionais.

### 3 ANAREDE

O programa de Análise de Redes ou Anarede é um programa computacional desenvolvido pelo CEPEL (Centro de Pesquisas de Energia Elétrica) o qual possibilita a realização de estudos em operações e planejamento de sistemas elétricos de potência. A versão utilizada nesse estudo é numerada como V9.6.0.

Neste trabalho daremos destaque a dois programas: Fluxo de Potência e Análise de Contingências. O Anarede recorre a algoritmos com métodos iterativos para resolução de sistemas com equações algébricas não lineares de forma a obter a solução da rede operando em regime permanente.

O estudo do fluxo de potência é imprescindível à obtenção do estado operativo da rede elétrica para condições definidas de carga, geração, topologia, e determinadas restrições operacionais. A partir do estudo do fluxo de potência podemos prever como um sistema pode se comportar diante de algum tipo de problema. Com o uso de Anarede podemos simular, por exemplo, certas contingências e gerar relatórios completos sobre o sistema. Tais relatórios descrevem tudo o que acontece no sistema, como intercâmbio entre barras, suas tensões, ângulos, perdas, entre outros fatores.

Dois métodos estão disponíveis para a solução do fluxo de potência: Método de Newton e o Método Desacoplado Rápido.

A solução das equações no Anarede é normalmente efetuada pelo método de Newton. Porém, os dois métodos podem ser utilizados conjuntamente na execução do fluxo de potência, executando-se parte da solução com um método e depois com outro.

O Anarede pode ser inicializado por um *prompt* de comando o qual necessita de um arquivo .pwf ou .txt para ser executado, esse arquivo ou algoritmo pode ser criado através de um simples bloco de notas desde que siga o modelo de leitura do programa. Ele também possui uma interface gráfica intuitiva e que torna a sua utilização simplificada.

As seções seguintes serão destinadas a demonstração de inserção de dados e operações básicas no Anarede.

### 3.1 DADOS DE BARRA

Para inserção dos componentes do sistema elétrico de potência deve-se clicar no ícone com forma de lápis na barra de ferramentas, conforme a Figura 2



Figura 1 - Ícone da barra de ferramentas.

Este comando irá disponibilizar a barra de desenho dos elementos da rede, conforme Figura 2.



Figura 2 - Menu de elementos de rede.

O primeiro elemento é a barra CA, para inserir a barra no sistema deve-se clicar em Barra CA e dar dois cliques na área de trabalho do Anarede, no local onde se deseja inserir a barra. Após o posicionamento da barra ocorrerá à abertura de uma janela de configuração dos dados da barra, conforme Figura 3.

Dados de Barra CA (DBAR)

Número: [dropdown] Nome: [dropdown] Tensão: [input] p.u. Ângulo: [input] graus

Tipo: [dropdown] VDef: [input] p.u. Grupo Limite de Tensão: [dropdown] Grupo Base de Tensão: [dropdown] [input] kV

Área: [input] Barra Controlada: [dropdown]  Controle Local Modo de Visualização: [dropdown]  Ligado

Carga Ativa: [input] MW Reativa: [input] Mvar Geração Ativa: [input] MW Reativa: [input] Mvar Geração Reativa Mínima: [input] Mvar Máxima: [input] Mvar Shunt Equivalente: [input] Mvar Individualizado (DBSH): [input] Mvar  Limites Abertos

Agregadores: [listbox]

Primeira Vizinhança Número: [dropdown] Nome: [dropdown] [Mostrar] [Trocar]

[Inserir] [Alterar] [Remover] [Limpar] [Cancelar]

Figura 3 - Dados de barra CA.

Sendo:

- Número: Número da barra;
- Nome: Identificação alfanumérica da barra;

- Tensão: Valor inicial da tensão em pu, os valores devem ser sempre digitados com caractere ponto para separar a parte decimal, mesmo quando o valor for um número inteiro. Para barras controladas, este campo deve ser preenchido com o valor da magnitude de tensão a ser mantido constante;
- Ângulo: Valor do ângulo de fase da tensão da barra em graus;
- Tipo: Campo destinado à determinação do tipo de barra:
  - PQ: barra de carga;
  - PV: barra de geração;
  - Referência ( $V\theta$ ): barra de referência, swing ou slack.
- Carga Ativa: Valor da carga ativa da barra em MW;
- Carga Reativa: Valor da carga reativa da barra em Mvar;
- Geração Ativa: Valor da geração de potência ativa na barra em MW;
- Geração Reativa: Valor da geração de potência reativa na barra em Mvar;
- Geração Reativa Mínima: Valor do limite mínimo de geração reativa na barra em Mvar;
- *Shunt* Equivalente: Quando for necessário a inserção de um banco *shunt*, recomenda-se que este seja realizado posteriormente a inserção da barra. Assim como todos os elementos do sistema elétrico o banco *shunt* fica localizado no menu indicado na Figura 2, este comando irá disponibilizar a barra dos elementos da rede conforme a Figura 3. Para inseri-lo deve-se clicar na opção *shunt* de Barra, clicar duas vezes no local da área de trabalho e clicar duas vezes na barra a qual deverá ser conectado, automaticamente irão abrir os dados de barra para o preenchimento do *shunt* Equivalente. O *software* adota a convenção de que valores positivos são referentes a banco capacitivos e negativos referentes a indutivos.

Os valores de geração e carga também podem ser inseridos através da representação gráfica, sendo que estes elementos estão contidos no menu ilustrado na Figura 2 e 3. Sempre que estes valores forem inseridos na área de trabalho e ligado às respectivas barras, irá abrir o menu para ajustes dos dados de barra, conforme indicado na Figura 4.

### 3.2 DADOS DE LINHA

Assim como a barra CA o elemento linha CA, fica disponível na barra de elementos da rede, indicado na Figura 3. Para inserir deve-se clicar na barra de onde se inicia a linha até

a linha de destino, automaticamente irá abrir a janela de Dados de Circuito, conforme indicado na Figura 6.

Figura 4 - Dados de Linha CA.

Sendo:

- Barra De: Este campo é preenchido automaticamente pelo *software* de acordo com a seleção de barras realizadas na inserção da linha;
- Barra Para: Este campo é preenchido automaticamente pelo *software* de acordo com a seleção de barras realizadas na inserção da linha;
- Número: Em alguns casos existem mais de uma linha interligando as mesmas barras, este campo é destinado a identificação de qual circuito está sendo inserido, nos casos em que existir somente uma linha deve-se manter o valor *default* 1;
- Resistência: Neste item deve-se inserir em % o valor das resistências conectadas ao circuito.
- Reatância: Neste item deve-se inserir em % o valor das reatâncias conectadas ao circuito;
- Susceptância: Nesta lacuna insere-se o valor total da susceptância *shunt* ligado ao circuito, o valor é dado em potência reativa, Mvar, para tensão nominal da linha.

### 3.3 CONTINGÊNCIAS – CRITÉRIO $N_{\text{LINHAS}}-1$

O programa de Análise de contingências processa sequencialmente um conjunto de casos de contingências com a finalidade de detectar dificuldades operativas severas. Para cada caso de contingência é executada uma solução de fluxo de potência e efetuada a monitoração do estado operativo simulado da rede elétrica. A monitoração da rede é traduzida em termos de índices de severidade que, ao final do processamento, são ordenados decrescentemente para indicar os casos mais severos<sup>1</sup>.

O programa de análise de contingências tem a capacidade de processar qualquer combinação, simples ou múltiplas, de perda de circuito, abertura de circuito em uma das extremidades, perdas de elementos *shunt*, perda de geração e perda de carga, contudo as análises desenvolvidas neste trabalho serão limitadas contingências simples com critério  $N_{\text{Linhas}}-1$ , conforme predeterminado na introdução.

As grandezas monitoradas pela análise de contingências são os níveis de tensão nos barramentos, fluxo de potência nos circuitos e potência reativa nas barras de geração e de referência, sendo as contingências classificadas de acordo com o índice de severidade.

Para realizar as simulações de contingências no Anarede deve-se primeiramente rodar o fluxo de potência, em seguida selecionar o menu Análise/Análise de Contingências, onde estará disponíveis duas maneiras de simulação, a análise programada e a análise automática. A análise programada consiste na execução de uma lista de contingências predefinida pelo operador. Já a análise de contingência automática permite selecionar uma fração da rede elétrica em estudo e simular o critério  $N_{\text{Linhas}} - 1$  sobre os circuitos pertencentes à fração selecionada. Tendo em vista o objetivo deste trabalho é a análise de contingência do tipo  $N_{\text{Linhas}}-1$ , será dado enfoque no recurso de análise automática.

Na análise de contingência automática é possível selecionar a fração do circuito que se deseja estudar, conforme Figura 7.

---

<sup>1</sup> Cf. Manual do Programa de Análise de Redes V9.6.0

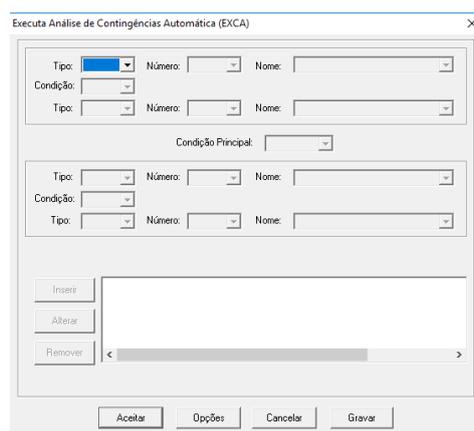


Figura 5 - Análise de Contingências – Automático.

Sendo que:

- Tipo: Tipo de elemento que se deseja limitar a simulação;
- Número: Identificação do número da barra, área ou grupo de tensão que se deseja realizar a simulação;
- Nome: Identificação alfanumérica;
- Condição: Este campo é destinado à restrição do grupo de barras, áreas ou bases de tensão que se deseja realizar a análise de contingência. Caso selecione “Intervalo”, o *software* realiza a simulação em todas as linhas ligadas entre as barras selecionadas no campo número. Caso selecione “União”, o *software* realiza a simulação somente nas barras selecionadas no campo número.
- Condição Principal: A condição principal relaciona os conjuntos destacados na Figura 9.
  - Diferença: É subtraído o segundo conjunto do primeiro;
  - União: Os conjuntos são somados;
  - Interseção: Realiza a interseção entre os conjuntos;

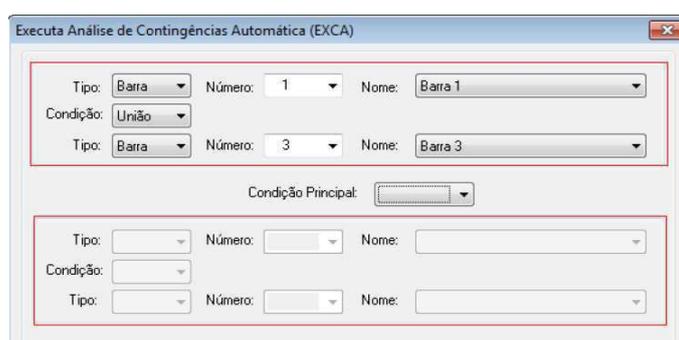


Figura 6 - Análise de contingências – Automático.

Para confirmar a análise é necessário clicar no botão “Inserir” e em seguida clicar no botão “Aceitar”, mostrados na Figura 8, conseqüentemente o software irá gerar um relatório de execução de contingências automático. Este relatório contém a identificação de todos os circuitos dos quais foram realizadas a contingência  $N_{Linhas} - 1$ , indicando informações detalhadas quanto a violação dos limites de tensão, fluxo e geração.

Tendo em vista que na maioria das aplicações deseja-se monitorar um grande número de circuitos, torna-se improdutivo analisar uma contingência por vez, para tanto no final do relatório existe um sumário em que constam todas as violações classificadas de acordo com os respectivos índices de severidade. Podendo assim restringir os estudos aos circuitos em que de fato ocorreram extrapolações.

O Anarede possui três filtros na sua parte gráfica que facilita o reconhecimento de violações. No caso em que a tensão da barra ficar abaixo de seu limite mínimo estipulado no grupo limite de tensão, a barra será hachurada por linhas de cor azul indicando sub tensão. Ao contrário, se a violação ocorrer no limite máximo, essa barra será hachurada de cor vermelha indicando sobre tensão. Da mesma forma acontece para o gerador e para as linhas do sistema em análise.

## 4 SIMULAÇÕES E ESTUDO DO CASO BASE

As simulações e o estudo do caso base serão desenvolvidos utilizando o *software* Anarede para a resolução do fluxo de potência e simulações das contingências  $N_{\text{Linhas}-1}$  do sistema elétrico do IEEE 30 barras e para o exemplo descrito na seção 2.4 deste trabalho. O Anarede já possui em sua biblioteca o modelo básico do IEEE e este não possui limite de geração, tensão e fluxo, portanto as capacidades máximas e mínimas de geração e carregamento das linhas serão estimadas, baseando-se na resolução do fluxo de potência e nas simulações já os valores referentes aos limites de tensão serão baseados na Resolução N°505/2001 da ANEEL.

Primeiramente será apresentada a simulação do fluxo de potência do sistema elétrico resolvido pelo método de Newton-Raphson na seção 2.4 deste trabalho. Em seguida será feito o estudo do sistema de 30 barras com relação ao fluxo de potência a análise de contingência.

### 4.1 SIMULAÇÃO DO FLUXO DE POTÊNCIA

Para exemplificar o fluxo de potência no *software* Anarede, será simulado o mesmo sistema de potência resolvido na seção 2.4, visando confirmar a aplicação do método Newton-Raphson e a comparação entre a resolução computacional e a analítica.

Para fazer a simulação do sistema de potência, é necessário seguir alguns passos que visam favorecer uma maior organização e clareza na simulação.

Primeiramente devem-se inserir as barras do sistema utilizando o procedimento descrito na seção 3.1, ou consultando o apêndice A e utilizar os valores da Tabela 1.

Em um segundo momento devem-se inserir as linhas do sistema utilizando o procedimento descrito na seção 3.2, ou consultando o apêndice A e utilizar os valores da Tabela 2.

Por fim, rodar o fluxo de potência e consultar o gerenciador de dados para verificar o resultado dos parâmetros do sistema. Após seguir os passos e rodar o fluxo de potência o sistema deverá apresentar-se conforme a Figura 10.

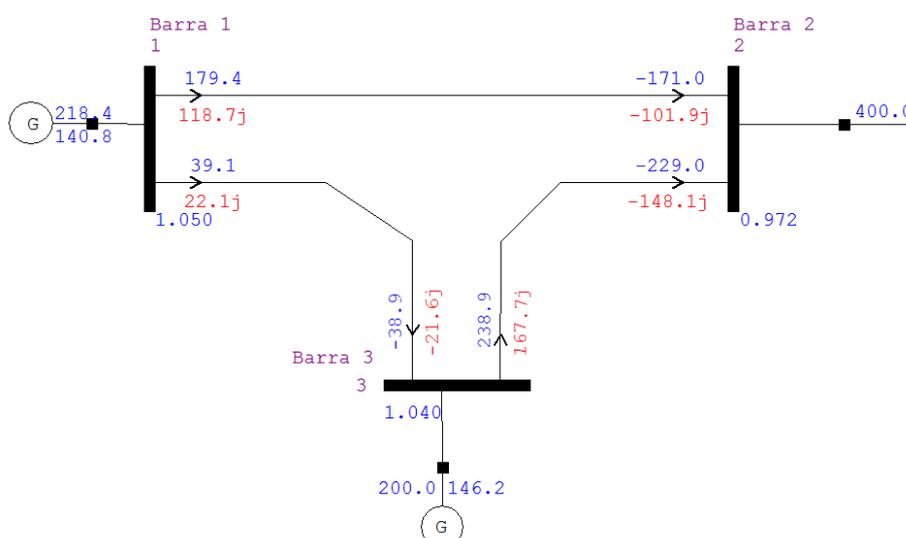


Figura 7 - Sistema composto por três barras.

Consultando o gerenciador de dados para os dados das barras temos os valores referentes à simulação:

Tabela 1- Dados de Barra.

Nº	Tipo	Tensão Base(kV)	Nome da Bara	Tensão (pu)	Tensão (kV)	Ângulo (°)	Geração Ativa (MW)	Geração Reativa (Mvar)
1	V0	1,00	Barra 1	1,05	1,10	0,00	218,40	140,80
2	PQ	1,00	Barra 2	0,97	1,00	-2,70		
3	PV	1,00	Barra 3	1,04	1,00	-0,50	200,00	146,20

Se compararmos os valores obtidos na Tabela 4 com os valores obtidos na Tabela 3, observaremos que os valores calculados são muito próximos dos valores simulados, mostrando que os cálculos pelo método de Newton-Raphson nos garantem boa precisão e valida os resultados calculados.

Comparando os valores dos fluxos de potência nas linhas, temos que os valores calculados se aproximam dos valores simulados, conforme Tabela 5.

Tabela 2 - Valores dos fluxos de Potência

Linha	Valores da simulação		Valores calculados	
	Potência Ativa (MW)	Potência Reativa (Mvar)	Potência Ativa (MW)	Potência Reativa (Mvar)
1-2	179,40	118,70	179,70	120,10
2-1	-171,00	-101,90	-171,20	-103,10
1-3	39,10	22,10	38,80	22,05
3-1	-38,90	-21,60	-38,60	-21,50
2-3	-229,00	148,10	-229,70	149,60
3-2	238,90	167,70	239,60	169,50

## 4.2 ANÁLISE DE CONTINGÊNCIAS SISTEMA 30 BARRAS IEEE

No diretório “Exemplos” do *software* Anarede encontram-se os modelos de sistemas de potência do IEEE. Para este trabalho será utilizado o sistema de 30 barras, sendo necessário o carregamento deste arquivo na área de trabalho do Anarede.

Primeiramente é necessário executar o fluxo de potência do sistema para que seja possível qualquer análise no sistema. Em seguida analisam-se através do gerenciador de dados às barras, linhas, transformadores e geradores do sistema.

Analisando os dados de barra verifica-se que o centro de geração ativa é composto pelas barras 1 e 2, além destes geradores nota-se a presença de quatro geradores síncronos, localizados nas barras 5, 8, 11 e 13.

É possível constatar que as barras ligadas ou interligadas diretamente aos geradores ou condensadores síncronos possuem um valor de tensão consideravelmente altos em relação as suas bases, isso é justificável devido à injeção de reativos nestas barras. Analogamente verifica-se que a tensão nominal da barra 30 é a mais baixa do sistema, isso devido a sua distância em relação ao centro de geração e em relação aos condensadores.

Analisando os dados das linhas verifica-se que o valor mais expressivo é a linha que interliga as barras 27 e 30, isto é um dos motivos que implica na tensão nominal baixa na barra 30. De forma análoga aos dados de linha e barra obtém-se os dados dos transformadores, e verifica-se que todos os transformadores em questão possuem TAP fixo.

Com relação à capacidade de geração do exemplo, observa-se que possui limites abertos.

Para simular as contingências é necessário determinar os limites de geração, tensão e fluxo dos elementos que constituem o sistema. Para as simulações do sistema de 30 barras desenvolvidas nesse guia serão considerados os limites de geração de acordo com a Tabela 4.

Tabela 3 - Limites de Geração

Barra	Nome da Barra	Geração Ativa (MW)	Geração Reativa (Mvar)	Geração Ativa Mínima (MW)	Geração Ativa Máxima (MW)	Geração Reativa Mínima (Mvar)	Geração Reativa Máxima (Mvar)
1	Glen-Lyn	232,30	-16,60	200,00	300,00	-80,00	40,00
2	Claytor	40,00	49,56	20,00	60,00	-40,00	50,00
5	Fieldale	0,00	36,94	0,00	0,00	-40,00	40,00
8	Reusens	0,00	37,33	0,00	0,00	-10,00	40,00
11	Roanoke	0,00	16,18	0,00	0,00	-6,00	24,00
13	Hancock	0,00	10,63	0,00	0,00	-6,00	24,00

Para determinar os limites de tensão foram verificados os valores normalizados pela resolução da Aneel Nº 505/01, sendo estes:

Tabela 4 - Faixa de variação da tensão nominal para as barras de 69 kV a 230 kV.

Classificação da Tensão de atendimento (TA)	Faixa de variação da Tensão de Leitura (TL) em relação à Tensão Contratada (TC)
Adequada	$0,95 TC \leq TL \leq 1,05TC$
Precária	$0,90 TC \leq TL \leq 0,95TC$ ou $1,05 TC \leq TL \leq 1,07TC$
Crítica	$TL \leq 0,90 TC$ ou $TL \geq 1,07TC$

Tabela 5 - Faixa de variação da tensão nominal para as barras de 1 kV a 69 kV.

Classificação da Tensão de atendimento (TA)	Faixa de variação da Tensão de Leitura (TL) em relação à Tensão Contratada (TC)
Adequada	$0,93 TC \leq TL \leq 1,05TC$
Precária	$0,90 TC \leq TL \leq 0,93TC$
Crítica	$TL \leq 0,90 TC$ ou $TL \geq 1,05TC$

Com base nas Tabelas 5 e 6 é possível estipular dois grupos limites de tensão. O primeiro é para as barras de 69 kV a 230 kV, em que no regime normal de operação a tensão nominal deve estar entre os valores de 0,95 pu e 1,05 pu. Em condições de emergência a tensão deve ser maior que 0,90 pu e menor que 1,07 pu. Para as barras de 1 kV até 69 kV, foi determinado que em regime normal de operação a tensão deve estar entre 0,93 pu e 1,05 pu, já em condições de emergência a tensão deve estar entre 0,90 pu e 1,05 pu.

Assim como para os limites de geração, no exemplo disponibilizado pelo Anarede, os limites de carregamento das linhas de transmissão são todos abertos. Portanto, as capacidades deverão ser estimadas para execução e análise das contingências e neste caso serão limitados os estudos as linhas ligadas às barras de geração, tendo em vista que esta tem importância mais expressiva em relação a todo o sistema. Além disso, o carregamento dessas linhas é sempre maior do que as demais linhas do sistema.

Para análise de contingência e verificação das possíveis contingências, os índices de severidade de geração, tensão e fluxo serão tratados isoladamente e nesta sequência. O índice de severidade corresponde ao desvio quadrático médio em relação aos limites estabelecidos para a grandeza que está sendo monitorada<sup>2</sup>.

Após a análise e solução do índice referente ao fluxo de potência será verificado se os índices de geração e tensão voltaram a apresentar violações, caso sim, o sistema será reavaliado como um todo, até que os três índices estejam em parâmetros aceitáveis.

Após todos os ajustes dos limites podemos usar o recurso de contingência automática do Anarede, obtém-se assim o relatório de contingência com os seguintes índices de severidades para a geração.

X----- GERACAO -----X-----X-----X						
NUMERO	INDICE	(%)INDICE	IDENTIFICACAO DA CONTINGENCIA			
VIOLACOES	SEVERIDADE	SEVERIDADE	DE	NOME DE	PARA	NOME PARA CIRC.
X-----X-----X-----X-----X-----X-----X						
4	40.2	40.2	1	Glen-Lyn-132	2	Claytor--132 1
2	19.1	19.1	2	Claytor--132	5	Fieldale-132 1
2	16.0	16.0	1	Glen-Lyn-132	3	Kumis----132 1
2	14.7	14.7	3	Kumis----132	4	Hancock -132 1
2	3.0	3.0	2	Claytor--132	6	Roanoke--132 1
2	1.9	1.9	6	Roanoke--132	7	Blaine---132 1
2	1.4	1.4	4	Hancock -132	6	Roanoke--132 1
1	1.2	1.2	4	Hancock -132	12	Hancock---33 1
1	1.1	1.1	2	Claytor--132	4	Hancock -132 1
2	0.6	0.6	9	Roanoke--1.0	11	Roanoke---11 1
2	0.2	0.2	5	Fieldale-132	7	Blaine---132 1
2	0.1	0.1	12	Hancock---33	13	Hancock---11 1
2	0.0	0.0	6	Roanoke--132	9	Roanoke--1.0 1

Figura 8 - Sumário dos índices de severidade de geração.

A partir do sumário apresentado na Figura 10 é possível constatar que o maior índice de severidade é no desligamento da linha que interliga as barras 1 e 2. Com essa informação buscamos o relatório detalhado dessa contingência e observa-se que, em grande parte, o índice de severidade é determinado por extrapolações de geração de reativos nas barras 2 e 8, conforme Figura 11.

MONITORACAO DE GERACAO REATIVA							
X-----X-----X-----X-----X-----X-----X							
BARRA	GERACAO		VIOLACAO		LIM		
NUM.	NOME	TP	ARE	MINIMA	Mvar	MAXIMA	Mvar
X-----X-----X-----X-----X-----X-----X							
2	Claytor--132	1	1	-40.0	92.7	50.0	42.7 SUP
8	Reusens--132	1	1	-10.0	71.2	40.0	31.2 SUP
5	Fieldale-132	1	1	-40.0	45.4	40.0	5.4 SUP
1	Glen-Lyn-132	2	1	-80.0	43.0	40.0	3.0 SUP
				---- IND SEVER.	40.2	----	

Figura 9- Geração de reativo - Contingência Linha 1-2 – IEEE 30 Barras.

<sup>2</sup> Cf. Manual do Programa de Análise de Redes V9.6.0



Após a inserção desse banco de capacitor, rodamos novamente o fluxo de potência e verificamos a contingência, que se apresentará conforme Figura 14.

X----- GERACAO -----X-----							
NUMERO	INDICE	(%)INDICE	IDENTIFICACAO DA CONTINGENCIA				
VIOLACOES	SEVERIDADE	SEVERIDADE	DE	NOME DE	PARA	NOME PARA	CIRC.
X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----							
2	0.1	0.1	1	Glen-Lyn-132	2	Claytor--132	1
0	0.0	0.0	29	Barra29---33	30	Barra30---33	1
0	0.0	0.0	28	Cloverdle132	27	Cloverdle-33	1
0	0.0	0.0	27	Cloverdle-33	30	Barra30---33	1

Figura 12 - Sumário dos índices de severidade de geração – IEEE 30 Barras.

Observa-se que existem duas violações no desligamento das linhas 1-2, mas essas apresentam baixo índice de severidade e podem ser desconsideradas.

Uma vez solucionadas todas as contingências com relação à geração, passa-se a análise das violações de tensão do sistema. Sabemos que as tensões terminais das barras de geração são determinadas pelo usuário e que a tensão nominal das barras 1, 11 e 13 do exemplo estão fora dos limites estipulados, altera-se a magnitude da tensão das barras em questão, para valores entre a faixa definida no grupo base. Portanto, a tensão nominal das barras 1, 11 e 13 devem ser alteradas para 1,04 p.u.

Após a alteração, roda-se o fluxo de potência e a análise de contingência novamente e obteremos os seguintes índices de severidade, conforme a Figura 15.

X----- TENSÃO -----X-----							
NUMERO	INDICE	(%)INDICE	IDENTIFICACAO DA CONTINGENCIA				
VIOLACOES	SEVERIDADE	SEVERIDADE	DE	NOME DE	PARA	NOME PARA	CIRC.
X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----							
5	228.4	228.4	28	Cloverdle132	27	Cloverdle-33	1
1	0.0	0.0	27	Cloverdle-33	30	Barra30---33	1
0	0.0	0.0	10	Roanoke---33	21	Barra21---33	1
0	0.0	0.0	10	Roanoke---33	20	Barra20---33	1

Figura 13 - Sumário dos índices de severidade de tensão – IEEE 30 Barras.

Com base no sumário apresentado na Figura 15 verifica-se um índice de severidade extremamente alto na retirada da linha que interliga as barras 28 e 27. Por isso verifica-se o relatório detalhado dessa contingência percebe-se a ocorrência de uma queda de tensão expressiva nas barras 25, 26, 27, 29 e 30, conforme Figura 16.

IEEE 30 Bus Test Case - Winter 1961  
MONITORACAO DE TENSÃO

NUM.	BARRA NOME	ARE	MIN	TENSAO MOD.	MAX	VIOLACAO (PU)	SHUNTBAR (Mvar)	SHUNTLIN (Mvar)	SEVERIDADE
25	Barra25---33	1	0.930	0.898	1.050	-0.032			****
26	Barra26---33	1	0.930	0.878	1.050	-0.052			*****
27	Cloverdle-33	1	0.930	0.872	1.050	-0.058			*****
29	Barra29---33	1	0.930	0.848	1.050	-0.082			*****
30	Barra30---33	1	0.930	0.835	1.050	-0.095			*****

----- IND SEVER.          228.4 -----

Figura 14 - Tensão - Contingência Linha 28-27 - IEEE 30 Barras.

Analisando cuidadosamente o circuito e a contingência em questão verifica-se que grande parte da potência reativa consumida pelas barras indicadas na Figura 16, está sendo gerada pelo condensador síncrono ligado a barra 8. Portanto, a ocorrência de uma contingência na linha que interliga a barra 28 e 27 ocasiona na interrupção desta alimentação reativo.

É natural que a primeira ideia seja a instalação de capacitores nestas barras para a compensação de reativos, e de fato isso resolveria o problema, porém uma perda da linha poderia ocorrer acúmulo de reativos nas barras em questão e conseqüentemente haveria sobre tensão nas demais barras. Portanto, ao invés da instalação de um banco de capacitor a melhor solução é a instalação de uma nova linha que interligue as barras 23 e 30, com valores de resistência e reatância estimados em 0,30 pu. e 0,55 pu. Respectivamente.

Com a inserção dessa nova linha, roda-se o fluxo de potência, a análise de contingência e observa-se que o sistema não sofrerá com pontos de extrapolação de tensão na ocorrência de contingências, conforme Figura 17.

X----- TENSÃO -----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X									
NUMERO	INDICE	(%)	INDICE	IDENTIFICACAO DA CONTINGENCIA					
VIOLACOES	SEVERIDADE	SEVERIDADE	DE	NOME DE	PARA	NOME PARA	PARA	CIRC.	
0	0.0	0.0	1	Glen-Lyn-132	2	Claytor--132		1	
0	0.0	0.0	29	Barra29---33	30	Barra30---33		1	
0	0.0	0.0	28	Cloverdle132	27	Cloverdle-33		1	
0	0.0	0.0	27	Cloverdle-33	30	Barra30---33		1	

Figura 15 - Sumário dos índices de severidade de tensão - IEEE 30 Barras.

Após analisar os índices de tensão, passa-se agora a analisar o problema de carregamento das linhas de transmissão na ocorrência de uma contingência. Observamos agora o sumário dos índices de severidade de fluxo, conforme Figura 18.



Resumindo as modificações feitas no sistema foram:

- Alteração da tensão nominal das barras 1, 11 e 13 para 1,04pu;
- Inserção de banco *shunt* de 60 Mvar na barra 2;
- Inserção de banco *shunt* de 40 Mvar na barra 5;
- Inserção de banco *shunt* de 30 Mvar na barra 8;
- Inserção de banco *shunt* de 5 Mvar na barra 13;
- Inserção de uma linha interligando as barras 1 e 4;
- Inserção de uma linha interligando as barras 23 e 30.

Uma vez satisfeitos todos os índices de severidade o problema de contingência está solucionado, cabendo apenas ressaltar que as soluções sugeridas não são as únicas que sanariam as contingências.

## 5 CONCLUSÃO

Neste trabalho de conclusão de curso foi feita uma revisão da literatura sobre *fluxo de potência e contingências*. Observou-se a importância do tema e a necessidade do estudo de uma ferramenta que permita obter resultados práticos quanto aos temas propostos.

O estudo do Fluxo de potência mostra valiosas informações sobre o comportamento do sistema, permitindo o estudo do comportamento do sistema diante, por exemplo, de uma contingência.

O estudo das Contingências nos permite observar o comportamento do sistema diante de um evento inesperado ou não, favorecendo o planejamento e a prevenção de possíveis problemas no sistema elétrico.

O *software* Anarede favorece meios para os estudos propostos. Com uma interface gráfica convidativa e amigável é possível construir diagramas unifilares dos sistemas de potência que se deseja estudar, obtendo assim facilmente acesso aos dados pelo gerenciador de dados. Os relatórios de saída nos oferecem todos os parâmetros do sistema em estudo, como: níveis de tensão, perdas, intercâmbio de potência entre áreas, fluxo de potência ativa e reativa entre as barras, diagnóstico de redes no caso de equivalentes de rede, entre outros.

Os casos estudados são relativamente pequenos, foram escolhidos para permitir um primeiro contato com o *software* já que nosso objetivo era mostrar como utilizar o Anarede (ver os Apêndices A e B) e tentar elucidar possíveis dúvidas.

O Anarede com todas as suas ferramentas e possibilidades permite que o operador possa analisar gerenciar, administrar e aplicar todo o seu conhecimento no planejamento do sistema, resolução do fluxo de potência e suas contingências. Por esse motivo, a simulação do caso base do IEEE de 30 barras foi feita dando enfoque na resolução das violações causadas pelas contingências  $N_{Linhas-1}$ , favorecendo o estudo das possíveis soluções, tais como a inserção de novas linhas de transmissão e/ou distribuição, a inserção de banco de capacitores nas barras, conforme apresentado na seção 4.2.1. As soluções propostas para a eliminação das contingências não são únicas, para que a análise possa ser mais eficaz, se faz necessário um estudo dos custos das instalações propostas e do impacto ambiental, as soluções propostas neste trabalho foram elaboradas sem levar em considerações esses custos e impactos ambientais.

Como sugestão para trabalhos futuros relacionados com o tema de sistema de potência, podemos citar um estudo mais detalhado do *software* Anarede dos itens não abordados neste trabalho, como por exemplo, a análise de sensibilidade de tensão, o cálculo de equivalentes de redes e o fluxo de potência continuado e os demais recursos do Anarede.

O Anarede é uma importante ferramenta computacional largamente utilizada nas empresas concessionárias que operam redes de transmissão, no Operado Nacional do Sistema Elétrico (ONS), no Ministério de Minas e Energia (MME), na Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), entre outros.

Devido à importância do Anarede no cenário atual, o objetivo deste trabalho é passar os primeiros passos de como inserir os elementos do sistema utilizando a interface gráfica, mostrando através de imagens e fazendo com que o usuário se familiarize com os diversos ambientes, menus, e especificidades do Anarede, e assim, possa explorar os vários recursos dessa poderosa ferramenta de análise de fluxo de potência, tornando-se útil para novos usuários.

## REFERÊNCIAS

ANEEL – **Resolução nº 505/2001**. De 26 de Novembro de 2001.

CEPEL – Centro de Pesquisa em Energia Elétrica, *Programa de Análise de Redes – Manual do Usuário V9.6.0*.

GLOVER, J. Duncan; SARMA, Mulukutla S.; OVERBYE, Thomas J.. **Power System: Analysis and Design**. 5. ed. Stamford: Cengage Learning, 2008.

MACÊDO, Ana Vitória de Almeida. **Solução de fluxo de potência, cálculo de estabilidade de tensão e equivalente de redes com aplicações utilizando o ANAREDE**. 2009. 65 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2009.

MONTECELLI, Alcir José. **Fluxo de cargas em redes de energia elétrica**. São Paulo: Edgar Blucher, 1983.

OLIVEIRA, Carlos César Barioni de et al. **Introdução a sistemas elétricos de potência: componentes simétricas**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2000.

PASSOS FILHO, João Alberto. **Modelagem e Incorporação de dispositivos de controle no problema de fluxo de potência**. 2000. 159 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Industrial Elétrica, Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2000.

SAADAT, Hadi. **Power System Analysis**. 3. ed. New York: Mcgraw-hill, 1999.

DAHER, Renato; NAZARI, Vagner; SANTOS, Diogo Leandro Nunes. **Análise estática de sistema elétrico de potência utilizando o software anarede**. 2013. 99 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Industrial Elétrica, Eletrotécnica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

STEVENSON JUNIOR, William D. **Elementos de Análise de Sistemas de Potência**. 2. ed. São Paulo: Mcgraw-hill, 1986.

# APÊNDICE A – GUIA DE LABORATÓRIO: ANÁLISE ESTÁTICA DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA UTILIZANDO O *SOFTWARE* ANAREDE

## 1 OBJETIVOS

### 1.1 OBJETIVO GERAL

Realizar estudo e análise estática sobre o fluxo de potência do SEP em condições normais de operação com o auxílio da ferramenta computacional Anarede.

### 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Do objetivo geral, surgem as seguintes metas a serem atingidas:

- i. Calcular usando o método Newton-Raphson os valores de tensão, ângulo de fase, potência ativa e potência reativa das barras de um SEP;
- ii. Simular o fluxo de potência de um SEP utilizando o *software* Anarede;
- iii. Analisar os resultados obtidos com a simulação e comparar com os resultados obtidos no cálculo pelo método Newton-Raphson;

## 2 INTRODUÇÃO

As equações que modelam o problema de fluxo de potência são duas para cada barra do sistema, sendo que uma equação relacionada à potência ativa e a outra equação a reativa. Essas equações baseiam-se na primeira lei de Kirchhoff, na qual o somatório de potências ativa e potências reativas injetadas em uma barra são iguais ao somatório da potência ativa e da potência reativa que saem da barra (MONTICELLI, 1983). As equações podem ser expressas por:

$$P_k = V_k \sum_{n=1}^N Y_{kn} V_n \cos(\delta_k - \delta_n - \theta_{kn})$$

$$Q_k = V_k \sum_{n=1}^N Y_{kn} V_n \sin(\delta_k - \delta_n - \theta_{kn})$$

Onde  $k = 1, 2, \dots, N$

O principal método utilizado pelo *software* Anarede para cálculo de fluxo de potência é o Newton-Raphson. Esse método iterativo é baseado na expansão da série de Taylor e é o mais eficiente na resolução de sistemas de equações algébricas não lineares. O método de Newton-Raphson tem por objetivo principal determinar as variáveis de estado de um SEP (tensão, ângulo de fase, potência ativa e potência reativa).

### 3 PREPARAÇÃO

A figura 1 mostra o diagrama unifilar de um sistema elétrico de potência com três barras. As tabelas 1 e 2 fornecem os dados conhecidos de cada barra e das linhas de transmissão. Os valores bases para o sistema são 100 MVA e 138 kV nas linhas de alta tensão, obtenha o fluxo de potência para o sistema utilizando o método de Newton-Raphson com precisão  $\epsilon = 0,001$ .

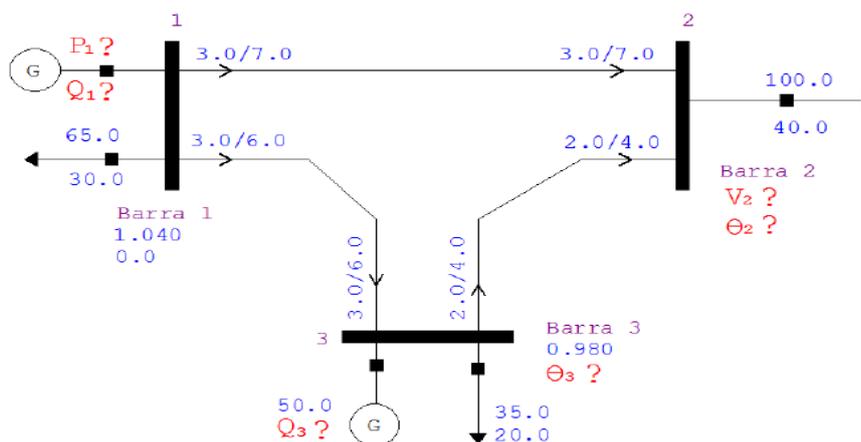


Figura 19 – Representação gráfica do SEP no Anarede.

Tabela 6 - Dados das Barras.

Dados Barra	Geração		Carga		Tensão - pu		Tipo
	P(MW)	Q(Mvar)	P(MW)	Q(Mvar)	Módulo	Ângulo-rad	
1	?	?	65,00	30,00	1,04	0,00	V $\theta$
2	-	-	100,00	40,00	?	?	PQ
3	50,00	?	35,00	20,00	0,98	?	PV

Tabela 7 – Dados das Linhas de Transmissão.

Linhas barra a barra	Impedância Série		Admitância Série		Mvar carregamento (Capacitivo)
	R (pu)	X(pu)	G(pu)	B(pu)	
1-2	0,03	0,07	5,17	-12,07	8,20
1-3	0,03	0,06	6,66	-13,33	4,20
2-3	0,02	0,04	10,00	-20,00	3,10

Os dados que compõem as tabelas 1 e 2 para estudo em uma situação real podem ser provenientes de previsões ou valores conhecidos pelas empresas de energia elétrica. Considere o símbolo “?” como incógnita do problema.

**Dica:** A última coluna da tabela 2 fornece o valor da susceptância *shunt* total de cada linha. Se não levar esse valor em consideração nos cálculos, ocorrerá divergência entre os valores calculados e simulados.

Para obter o valor da susceptância a partir dos dados da tabela 2, deve-se transformar esse dado em pu e considerar a magnitude da tensão no valor de 1 pu. Aplicando esse método na linha do exemplo entre a linha 1 e 2, tem-se:

$$Q(pu) = b^{sh}(pu) \times V^2(pu)$$

$$\frac{8,2Mvar}{100M} = b^{sh}(pu) \times 1^2(pu)$$

$$b^{sh}(pu) = 0,082 \text{ (total da linha entre as barras 1 e 2)}$$

Análogo às outras linhas, tem-se:

$$b^{sh}(pu) = 0,042 \text{ (total da linha entre as barras 1 e 3)}$$

$$b^{sh}(pu) = 0,031 \text{ (total da linha entre as barras 2 e 3)}$$

Esses valores são divididos pela metade e distribuídos nos dois extremos conforme o modelo  $\pi$  da linha, e por ser capacitivo somado a susceptância própria de cada linha.

Após o cálculo utilizando o método de Newton-Raphson, preencha a tabela com os resultados obtidos.

$\Theta_1$	$\Theta_2$ (rad)	$\Theta_3$ (rad)	$V_1$ (pu)	$V_2$ (pu)	$V_3$ (pu)
$\Theta_1$	$\Theta_2$ (graus)	$\Theta_3$ (graus)	$V_1$ (kV)	$V_2$ (kV)	$V_3$ (kV)

Com todos os valores das variáveis do SEP, calcule o fluxo entre as três barras e preencha a tabela abaixo.

Linha	P(pu)	P(MW)	Q(pu)	Q(Mvar)
1 – 2				
1 – 3				
2 – 1				
2 – 3				
3 – 1				
3 - 2				

Por último calcule as perdas nas linhas e preencha a tabela.

Linha	P(pu)	P(MW)	Q(pu)	Q(Mvar)
1 – 2				
1 – 3				
2 – 3				

## 4 SIMULAÇÃO

O Anarede é um software destinado ao estudo de sistemas elétricos de potência, desenvolvido pelo CEPEL e tornou-se uma das principais ferramentas das concessionárias de transmissão, sendo o programa mais utilizado pelo setor elétrico brasileiro.

No ambiente do Anarede construa o diagrama do SEP apresentado na figura 1 de forma a obter os valores de todas as grandezas obtidas no item 3.

Os itens a seguir serão destinados a demonstrar a inserção de dados e operações no Anarede.

### 4.1 MONTAGEM DA SIMULAÇÃO

- Inserção das barras.

**1º passo:** Para inserção dos componentes do sistema elétrico de potência deve-se clicar no ícone com forma de lápis na barra de ferramentas, conforme a figura 2.



Figura 20 - Ícone da barra de ferramentas.

Este comando irá disponibilizar a barra de desenho dos elementos da rede, conforme figura 3.



Figura 21 - Menu de elementos de rede.

O primeiro elemento é a barra CA, clique uma vez nesse ícone e em seguida dê um clique na área de trabalho do Anarede, posicione a barra onde você desejar (é possível girar a barra clicando com o botão direito do mouse).

**2º passo:** Após ter posicionado a barra dê dois cliques para fixá-la na área de trabalho. Imediatamente ocorrerá a abertura de uma janela de configuração dos dados da barra, conforme figura 4.

Figura 22 - Dados de barra CA.

Os campos presentes na janela de configuração da barra estão descritos abaixo e devem ser preenchidos com os valores fornecidos na tabela 1.

- Número: Número da barra;
- Nome: Identificação alfanumérica da barra;

- Tensão: Valor inicial da tensão em p.u., os valores devem ser sempre digitados com caractere ponto para separar a parte decimal, mesmo quando o valor for um número inteiro. Para barras controladas, este campo deve ser preenchido com o valor da magnitude de tensão a ser mantido constante.
- Ângulo: Valor do ângulo de fase da tensão da barra em graus;
- Tipo: Campo destinado à determinação do tipo de barra:
  - PQ – barra de carga;
  - PV – barra de geração;
  - Referência ( $V\Theta$ ) – barra de referência, swing ou slack.
- Os demais campos não precisam ser preenchidos para essa simulação. Eles utilizarão os valores *default* do Anarede.

**3º passo:** Após a configuração da barra 1, basta repetir o procedimento para configuração das barras 2 e 3.

Para facilitar o posicionamento dos elementos na área de trabalho existe o ícone grid  na barra de menus, que divide a tela com linhas pontilhadas favorecendo uma melhor possibilidade de organização dos elementos na área de trabalho.

- Inserção das linhas

Após a inserção de todas as barras é a vez de inserir as linhas no sistema.

**1º passo:** Para inserir uma linha basta selecionar o ícone linha CA (vizinho ao ícone da barra usado anteriormente). Em seguida basta clicar na barra de origem do fluxo e posteriormente na barra de destino, automaticamente irá abrir a janela de dados de circuito, conforme indicado na figura 5.

Figura 25 - Dados de linha CA.

Os campos presentes na **janela de configuração da linha** estão descritos abaixo e devem ser preenchidos com os valores fornecidos na tabela 2.

- Barra De: Este campo é preenchido automaticamente pelo *software* de acordo com a seleção de barras realizada na inserção da linha;
- Barra Para: Este campo é preenchido automaticamente pelo *software* de acordo com a seleção de barras realizada na inserção da linha;
- Número: Em alguns casos existem mais de uma linha interligando as mesmas barras, este campo é destinado a identificação de qual circuito está sendo inserido, nos casos em que existir somente uma linha deve-se manter o valor *default* 1;
- Resistência: Neste item deve-se inserir em % o valor das resistências conectadas ao circuito.
- Reatância: Neste item deve-se em % o valor das reatâncias conectadas ao circuito.
- Susceptância: Nesta lacuna insere-se o valor total da susceptância *shunt* ligada ao circuito, o valor é dado em potência reativa, Mvar, para tensão nominal da linha.
- Os demais campos não precisam ser preenchidos para essa simulação. Eles utilizarão os valores *default* próprio do Anarede.

Uma observação importante a ser feita com relação à linha é que o Anarede modela a linha utilizando o modelo  $\pi$  equivalente.

Existe a possibilidade de inserir os elementos *shunts* de linha através de uma representação gráfica. Para isso basta clicar no ícone Shunt de Linha na barra de desenho. Porém essa prática não é recomendável se o sistema a ser analisado for muito grande (maioria dos casos), pois, a inserção destes elementos deixa a área de trabalho com muitos elementos gráficos o que acaba se tornando um ambiente poluído de imagens e vai requerer um computador mais potente para administrar todas as informações.

Após a configuração da linha entre as barras 1-2, faça o mesmo para as linhas entre as barras 2-3 e 1-3.

**2º passo:** Com os passos seguidos até esse momento já é possível fazer as simulações. Para rodar o fluxo de potência basta clicar no ícone , na barra de ferramentas do Anarede.

**3º passo:** Para verificar se os dados inseridos tanto nas barras ou nas linhas estão corretos, é só utilizar o ícone  na barra de ferramentas depois clicar no item do sistema que deseja verificar os dados. Caso contenha algum valor indesejado é possível fazer a alteração para o valor correto e clicar em alterar.

**4º passo:** Para ter acesso a todos os dados da simulação selecione na barra de menus “Dados” e em seguida “Gerenciador de Dados...”. Aparecerá a seguinte janela, conforme a figura 6.

No lado esquerdo da figura 6 teremos os elementos inseridos no sistema, ao clicar em cada um deles aparecerão todos os dados referentes à simulação.

Uma informação muito importante é quanto a excluir os elementos da área de trabalho do Anarede. Existem dois ícones para essa finalidade, cada um com uma função. O ícone com desenho de uma borracha apaga somente a parte gráfica deixando os dados numéricos na memória. O outro ícone é o com desenho de uma caveira que apaga o elemento gráfico e o dado numérico.

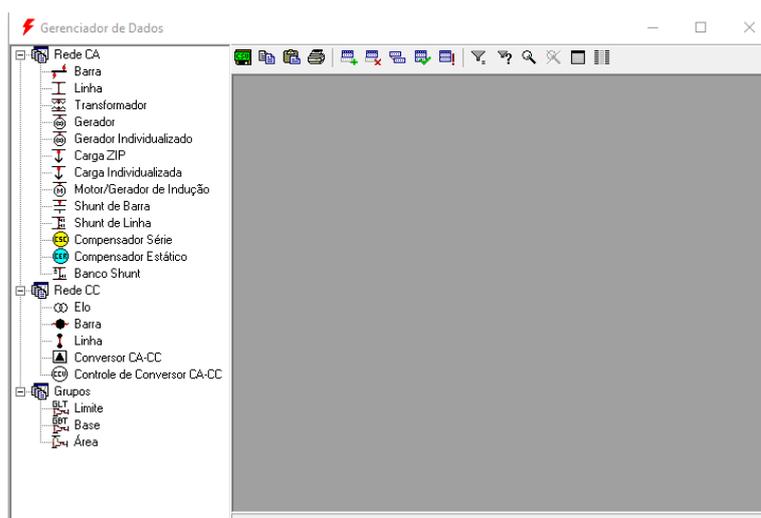


Figura 23 - Gerenciador de Dados.

- Ferramentas de Design

É possível usar alguns ícones que nos possibilitarão um aperfeiçoamento no desenho do SEP.

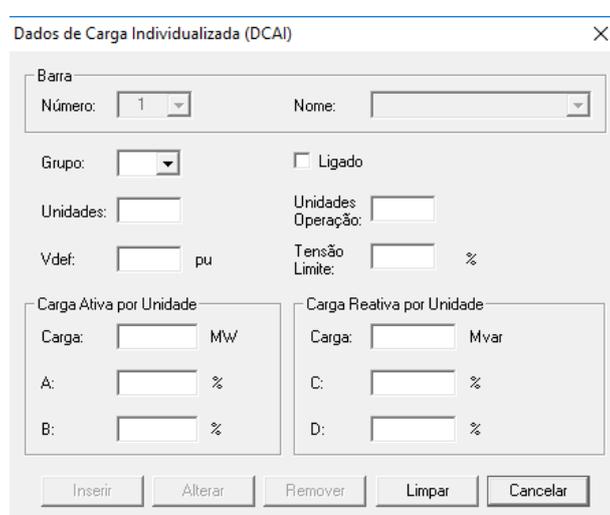
- O ícone  torna possível aumentar ou diminuir o tamanho das barras, bem como modificar o ponto em que a linha se encontra com a barra;
- O ícone  permite girar os elementos;
- O ícone  permite arrastar os elementos para uma nova posição. Para arrastar os elementos do sistema, basta clicar com o botão direito do mouse e mover para a posição desejada.
- Inserção de Geradores e Cargas

Para que o seu sistema fique idêntico ao sistema da figura 1 além de utilizar os ícones citados no item anterior, é necessário inserir mais alguns elementos de sistema, que são os geradores e as cargas. Deve-se deixar claro que a inserção desses elementos não alterará em nada o sistema, pois, todos os valores já foram utilizados.

- Inserção das Barras de Cargas

**1º passo:** Vamos inserir nas barras as cargas.

O ícone a ser utilizado é a “carga individualizada” que é representada por  na barra de desenho. Utilizando esse ícone se faz necessário apagar os dados referentes à carga nas configurações da barra, utilize o ícone  na barra e coloque o valor 0. (zero ponto) nos valores referentes a carga. Para inserir a carga, primeiro clicamos no ícone em seguida damos dois cliques na posição desejada na área de trabalho (lembrando que é possível rotacionar os elementos com o botão direito do mouse). Depois clicamos na barra que a carga está ligada. Ao fazer esse procedimento aparecerá uma janela, conforme a figura 7.



A janela de diálogo "Dados de Carga Individualizada (DCAI)" contém os seguintes campos e controles:

- Barra:** Número: 1 (dropdown), Nome: (dropdown)
- Grupo:** (dropdown)
- Ligado:**
- Unidades:** (input)
- Unidades Operação:** (input)
- Vdef:** (input) pu
- Tensão Limite:** (input) %
- Carga Ativa por Unidade:**
  - Carga: (input) MW
  - A: (input) %
  - B: (input) %
- Carga Reativa por Unidade:**
  - Carga: (input) Mvar
  - C: (input) %
  - D: (input) %
- Botões:** Inserir, Alterar, Remover, Limpar, Cancelar

Figura 24 - Dados de Carga Individualizada.

Preencha o campo “Grupo” com valor 1, marque a opção “Ligado” e em seguida preencha os campos referente as potência ativa (MW) e reativa (Mvar) para carga com os valores da tabela 1, sem esquecer de apagar esses valores na configuração da barra.

- 4.4.1.2. Inserção dos Geradores

**1º passo:** Para inserir os gerados procederemos de maneira semelhante.

Clique no ícone “gerador individualizado” que é representado por , utilizando esse ícone se faz necessário apagar os dados referentes à geração nas configurações das barras (utilize o ícone  na barra e coloque o valor 0(zero) nos valores referentes a carga).

**2º passo:** Para inserir o gerador primeiro clicamos no ícone em seguida damos dois cliques na posição desejada na área de trabalho e depois um clique na barra que o gerador está ligado. Após esse procedimento aparecerá a seguinte tela, conforme figura 8.

Figura 25 - Dados do Gerador.

**3º passo:** Preencha o campo “Grupo” com valor 1, marque a opção “Ligado” e no campo “Xtrafo” coloque o valor 0.1. E NÃO marque a opção “calcular unidades”.

Após seguir todos os passos citados anteriormente, clicar no ícone  novamente e o sistema aparecerá na área de trabalho do Anarede, conforme a figura 9.

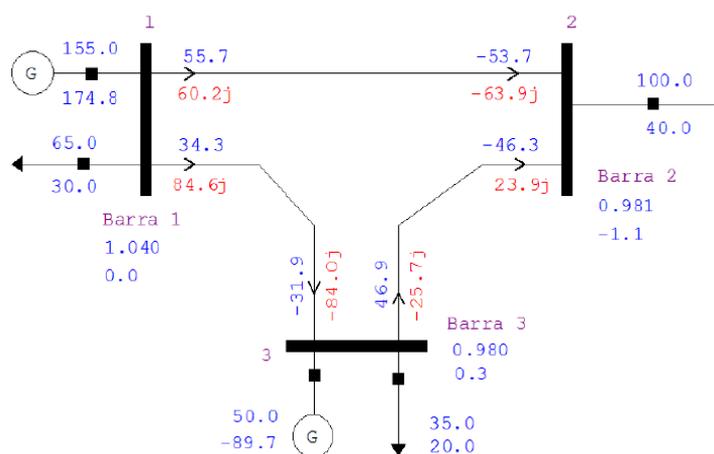


Figura 26 - Sistemas com três barras.

## 5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Compare os resultados da obtidos na preparação com os resultados obtidos na simulação. Para obter todos os dados da simulação utilize o gerenciador de dados.

## 6 BIBLIOGRAFIA

DAHER, Renato; NAZARI, Vagner; SANTOS, Diogo Leando Nunes. **Análise Estática de Sistema Elétrico de Potência Utilizando o *Software Anarede***. Trabalho de Conclusão de Curso pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. 1º sem. 2013.

CEPEL – **Programa de Análise de Redes**. Manual do usuário V09.07.02.

SAADAT, Hadi. **Power System Analysis**. 3. ed. New York: Wcb/mcgraw-hill, 1999.

# APÊNDICE B – GUIA DE LABORATÓRIO: ANÁLISE DE CONTINGÊNCIAS DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA UTILIZANDO O *SOFTWARE* ANAREDE

## 1 OBJETIVOS

### 1.1 OBJETIVO GERAL

Realizar estudo e análise de contingências do sistema 30 barras do IEEE e apresentar possíveis formas de corrigi-las.

### 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Do objetivo geral, surgem as seguintes metas a serem atingidas:

- i. Estudar o que é uma contingência;
- ii. Rodar o fluxo de potência e as contingências utilizando o *software* Anarede;
- iii. Analisar as contingências e apresentar possíveis formas de corrigi-las.

## 2 INTRODUÇÃO

Um sistema de energia elétrica operando em regime permanente está sujeito às chamadas restrições de segurança, que consiste em um conjunto preestabelecido de possíveis contingências (MONTICELLI, 1983).

A lista de contingências em um SEP inclui a retirada de linha de transmissão, geradores e transformadores, podendo existir ocorrência simples com apenas uma contingência ou podendo existir várias contingências, também chamada de múltiplas.

Os sistemas elétricos de potência atuais são projetados para suportarem as contingências simples também chamadas de contingências  $N_{\text{Linhas}} - 1$ . Isto significa que na retirada de um único equipamento o sistema opera de modo seguro, o qual a carga é atendida e todas as variáveis do sistema estão dentro da faixa normal de operação sem que nenhum equipamento seja sobrecarregado.

Devido à grande quantidade de possíveis contingências é necessário classificá-las de acordo com o índice de desempenho, que indica a severidade das violações, assim as contingências menos severas serão desconsideradas. A análise de contingência é realizada

através da resolução do fluxo de potência após a retirada de um ou mais equipamentos, verificando-se as possíveis violações dos limites operacionais.

### 3 SIMULAÇÃO

A função de Análise de contingências do *software* Anarede é de identificar condições de operação severas em uma eventualidade. O Anarede tem a capacidade de processar qualquer combinação, simples ou múltipla, de perda de geração, de elemento *shunt*, de carga e perda de circuito (linha de transmissão), contudo as simulações e análises desenvolvidas nessa atividade serão limitadas a contingências simples com critério  $N_{Linhas} - 1$ .

As grandezas monitoradas pelo *software* na análise de contingência são os níveis de tensão nos barramentos, fluxo de potência nos circuitos e potência reativa nas barras de geração e referência, sendo as contingências classificadas de acordo com o índice de severidade.

Para realizar as simulações de contingências no Anarede deve-se primeiramente rodar o fluxo de potência clicando no botão , em seguida selecionar o menu Análise/Análise de Contingências, onde estará disponíveis duas maneiras de simulação, a análise programada e a análise automática. A análise programada consiste na execução de uma lista de contingências predefinida pelo operador. Já a análise de contingência automática permite selecionar uma fração da rede elétrica em estudo e simular o critério  $N_{Linhas} - 1$  sobre os circuitos pertencentes à fração selecionada. Tendo em vista o objetivo deste guia, será dado enfoque no recurso de análise automática. O procedimento a ser feito está exemplificado na Figura 1.

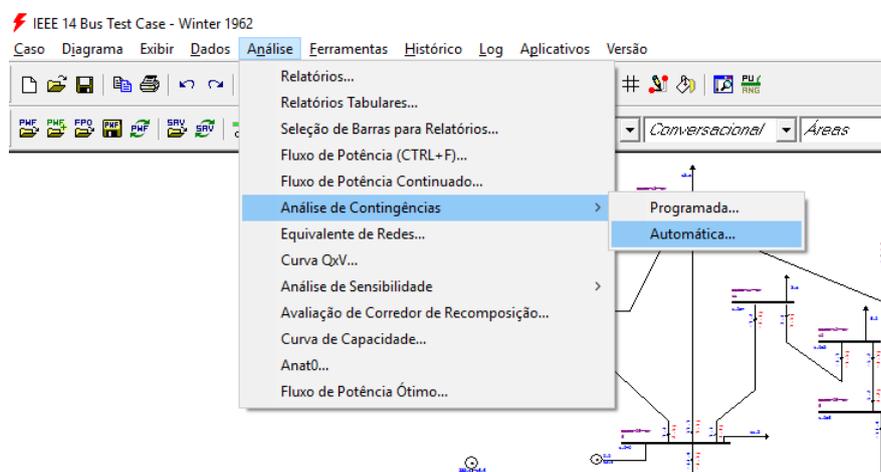


Figura 27 - Selecionando a análise de contingências

Após selecionar a análise de contingência automática, imediatamente ocorrerá a abertura de uma janela de execução da análise de contingência automática, conforme Figura 2. Nesse tipo de análise é possível selecionar a fração do circuito que se deseja estudar.

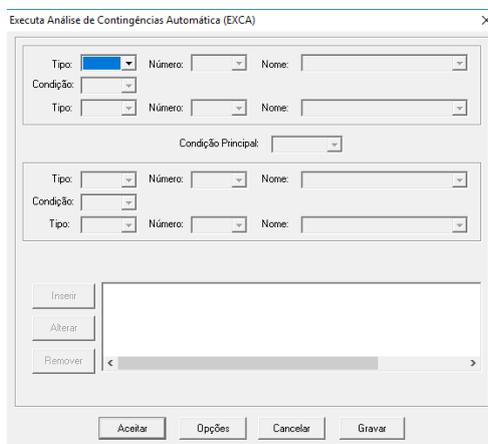


Figura 28 - Análise de Contingências – Automático.

Os campos presentes na janela de configuração da barra estão descritos abaixo:

- Tipo: Tipo de elemento que se deseja limitar a simulação;
- Número: Identificação do número da barra, área ou grupo de tensão que se deseja realizar a simulação;
- Nome: Identificação alfanumérica (preenchimento automático após seleção o número);
- Condição: Este campo é destinado à restrição do grupo de barras, áreas ou bases de tensão que se deseja realizar a análise de contingência. Caso selecione “Intervalo”, o *software* realiza a simulação em todas as linhas ligadas entre as barras selecionadas no campo número. Caso selecione “União”, o *software* realiza a simulação somente nas barras selecionadas no campo número.
- Condição Principal: A condição principal relaciona os conjuntos destacados na Figura 3.
  - Diferença: É subtraído o segundo conjunto do primeiro;
  - União: Os conjuntos são somados;
  - Interseção: Realiza a interseção entre os conjuntos;

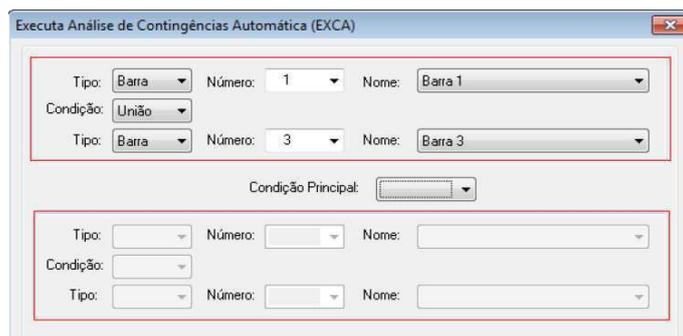


Figura 29 - Análise de contingência – Automático.

Para confirmar a análise é necessário clicar no botão “Inserir” e em seguida clicar no botão “Aceitar”, mostrados na Figura 2, conseqüentemente o software irá gerar um relatório de execução de contingências automático. Este relatório contém a identificação de todos os circuitos dos quais foram realizados a contingência  $N_{Linhas} - 1$ , indicando informações detalhadas quanto a violação dos limites de tensão, fluxo e geração.

Tendo em vista que na maioria das aplicações deseja-se monitorar um grande número de circuitos, torna-se improdutivo analisar uma contingência por vez, para tanto no final do relatório existe um sumário em que constam todas as violações classificadas de acordo com os respectivos índices de severidade, como pode ser visto na Figura 4.

SUMARIO DE MONITORACAO ( CASOS MAIS SEVEROS - CASOS CONVERGIDOS )

TENSÃO						
NUMERO VIOLACOES	INDICE SEVERIDADE	(%) INDICE SEVERIDADE	DE	IDENTIFICACAO DA CONTINGENCIA		CIRC.
				NOME DE PARA	NOME PARA	
0	0.0	0.0	1	Barra 1	2 Barra 2	1
0	0.0	0.0	2	Barra 2	3 Barra 3	1
0	0.0	0.0	1	Barra 1	3 Barra 3	1

FLUXO						
NUMERO VIOLACOES	INDICE SEVERIDADE	(%) INDICE SEVERIDADE	DE	IDENTIFICACAO DA CONTINGENCIA		CIRC.
				NOME DE PARA	NOME PARA	
2	2.7	2.7	1	Barra 1	2 Barra 2	1
2	2.4	2.4	2	Barra 2	3 Barra 3	1
0	0.0	0.0	1	Barra 1	3 Barra 3	1

FLUXO/V						
NUMERO VIOLACOES	INDICE SEVERIDADE	(%) INDICE SEVERIDADE	DE	IDENTIFICACAO DA CONTINGENCIA		CIRC.
				NOME DE PARA	NOME PARA	
2	2.7	2.7	1	Barra 1	2 Barra 2	1
2	2.4	2.4	2	Barra 2	3 Barra 3	1
0	0.0	0.0	1	Barra 1	3 Barra 3	1

GERACAO						
NUMERO VIOLACOES	INDICE SEVERIDADE	(%) INDICE SEVERIDADE	DE	IDENTIFICACAO DA CONTINGENCIA		CIRC.
				NOME DE PARA	NOME PARA	
0	0.0	0.0	1	Barra 1	2 Barra 2	1
0	0.0	0.0	2	Barra 2	3 Barra 3	1
0	0.0	0.0	1	Barra 1	3 Barra 3	1

Figura 30 - Sumário de Relatórios.

Analisando o relatório da Figura 4 é possível verificar que ocorreram somente violações de fluxo nos desligamentos das linhas 1-2 e 2-3, sendo que em ambos ocorrem duas violações. A partir desta análise podem-se restringir os estudos aos circuitos em que de fato ocorreram extrapolações.

O Anarede possui três filtros na sua parte gráfica que facilita o reconhecimento de violações. No caso em que a tensão da barra ficar abaixo de seu limite mínimo estipulado no grupo limite de tensão, a barra será hachurada por linhas de cor azul indicando subtensão. Ao contrário, se a violação ocorrer no limite máximo, essa barra será hachurada de cor vermelha indicando sobretensão. Da mesma forma acontece para o gerador e para as linhas do sistema em análise.

- Montagem da simulação

### **Estudo de caso base.**

O Anarede já apresenta em sua biblioteca os modelos básicos do IEEE e estes não possuem limites de geração, tensão e fluxo. Portanto as capacidades mínimas e máximas de geração e carregamento das linhas serão estimadas, baseando-se na resolução do fluxo de potência e nas simulações. Já os valores referentes ao limite de tensão serão baseados na Resolução N°505/2001 da Aneel.

1º passo: Para inserção do sistema de potência de 30 barras IEEE, basta acessar o menu “Caso”/ “Carregar...”, em seguida ir no diretório exemplo do próprio Anarede e selecionar o arquivo *IEEE30.pwf*. Após o carregamento o sistema estará disponível na área de trabalho.

2º passo: Executar o fluxo de potência e acessar o gerenciador de dados no campo Dados/Gerenciador de Dados, este recurso disponibiliza o relatório de características dos equipamentos presente no sistema.

A partir do gerenciador de dados, selecione o item “Barra” no lado esquerdo da tela e identifique quais são as barras de geração, os geradores síncronos e qual barra tem a demanda mais expressiva. Ainda no gerenciador de dados, selecione “Linha” e identifique qual linha possui os valores mais expressivos de resistência e reatância. Para finalizar a etapa de familiarização dos elementos do sistema, veja os dados referente aos “Transformadores” e “Geradores”, após visualização de todos os dados do sistema pode dar início ao estudo das contingências.

### **Simulação das contingências**

Para simular as contingências é necessário determinar os limites de geração, tensão e fluxo dos elementos que constituem o sistema.

Para as simulações do sistema de 30 barras desenvolvidas nesse guia serão considerados os limites de geração de acordo com a tabela 1 e tabela 2.

Tabela 8 - Limites para os geradores.

Barra	Nome da Barra	Geração Ativa (MW)	Geração Reativa(Mvar)	Geração Ativa Mínima (MW)	Geração Ativa Máxima (MW)	Geração Reativa Mínima (Mvar)	Geração Reativa Máxima (Mvar)
1	Glen-Lyn-132	232,30	-16,60	200,00	300,00	-80,00	40,00
2	Claytor--132	40,00	49,56	20,00	60,00	-40,00	50,00
5	Fieldale-132	0,00	36,94	0,00	0,00	-40,00	40,00
8	Reusens---132	0,00	37,33	0,00	0,00	-10,00	40,00
11	Roanoke---11	0,00	16,18	0,00	0,00	-6,00	24,00
13	Hancock---11	0,00	10,63	0,00	0,00	-6,00	24,00

**Observação:** Para alterar os valores limites devemos ir ao gerenciador de dados dos geradores e das barras.

Tabela 9 - Limites de Tensão.

Base Tensão	Tensão Mínima (p.u.)	Tensão Máxima (p.u.)	Tensão mínima em emergência (p.u.)	Tensão Máxima em emergência (p.u.)
1 Kv a 69 Kv	0,93	1,05	0,90	1,05

**Observação:** Para alterar os valores limites devemos ir ao gerenciador de dados e clicar em limite no lado esquerdo da tela.

Para determinar os valores da tabela 2 referentes aos limites de tensão foram verificados os valores normatizados pela resolução da Aneel N° 505/01.

Para o exemplo em estudo, as linhas que terão seus valores limitados são as linhas ligadas às barras de geração, tendo em vista que esta tem importância mais expressiva em relação a todo o sistema. Os limites para as linhas estão na tabela 3.

Tabela 10 - Capacidade de carregamento das linhas.

Barra DE	Nome DE	Barra PARA	Nome PARA	Proprietário	Resistência (%)	Reatância (%)	Susceptância (Mvar)	Capac. Normal (MVA)	Capac. Emergência (MVA)	Capac. Equipamento (MVA)
1	Glen-Lyn-132	2	Claytor--132	1	1.92	5.75	5.28	240	270	270
1	Glen-Lyn-132	3	Kumis---132	1	4.52	16.52	4.08	100	120	120
2	Claytor--132	4	Hancock-132	2	5.7	17.37	3.68	60	70	70
2	Claytor--132	5	Fieldale-132	2	4.72	19.83	4.18	100	120	120
2	Claytor--132	6	Roanoke--132	2	5.81	17.63	3.74	80	100	100
3	Kumis---132	4	Hancock-132	3	1.32	3.79	.84	100	120	120

Para análise de contingência e verificação das possíveis contingências, os índices de severidade de geração, tensão e fluxo serão tratados isoladamente e nesta sequência. Após a análise e solução do índice referente ao fluxo de potência será verificado se os índices de geração e tensão voltaram a apresentar violações, caso sim, o sistema será reavaliado como um todo, até que os três índices estejam em parâmetros aceitáveis.

Após todos os ajustes dos limites podemos usar o recurso de contingências do Anarede. Para isso basta seguir as orientações dadas na parte três deste guia e analisar todas as barras do sistema.

O Anarede vai gerar o sumário de severidade de todo o sistema, conforme Figura 5.

X----- GERACAO -----X-----X-----X-----X-----X							
NUMERO	INDICE	(%)	INDICE	IDENTIFICACAO DA CONTINGENCIA			
VIOLACOES	SEVERIDADE	SEVERIDADE	DE	NOME DE	PARA	NOME PARA	CIRC.
X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X							
4	40.2	40.2	1	Glen-Lyn-132	2	Claytor--132	1
2	19.1	19.1	2	Claytor--132	5	Fieldale-132	1
2	16.0	16.0	1	Glen-Lyn-132	3	Kumis----132	1
2	14.7	14.7	3	Kumis----132	4	Hancock -132	1
2	3.0	3.0	2	Claytor--132	6	Roanoke--132	1
2	1.9	1.9	6	Roanoke--132	7	Blaine---132	1
2	1.4	1.4	4	Hancock -132	6	Roanoke--132	1
1	1.2	1.2	4	Hancock -132	12	Hancock---33	1
1	1.1	1.1	2	Claytor--132	4	Hancock -132	1
2	0.6	0.6	9	Roanoke--1.0	11	Roanoke---11	1
2	0.2	0.2	5	Fieldale-132	7	Blaine---132	1
2	0.1	0.1	12	Hancock---33	13	Hancock---11	1
2	0.0	0.0	6	Roanoke--132	9	Roanoke--1.0	1

Figura 31 - Sumário dos índices de severidade de geração.

A partir do sumário apresentado na Figura 5 é possível constatar que o maior índice de severidade é no desligamento da linha que interliga as barras 1 e 2. Com essa informação buscamos o relatório detalhado dessa contingência e observa-se que, em grande parte, o índice de severidade é determinado por extrapolações de geração de reativos nas barras 2 e 8, conforme Figura 6.

MONITORACAO DE GERACAO REATIVA							
X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X							
BARRA	GERACAO		VIOLACAO		LIM		
NUM.	NOME	TP	ARE	MINIMA	Mvar	MAXIMA	Mvar
X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X							
2	Claytor--132	1	1	-40.0	92.7	50.0	42.7 SUP
8	Reusens--132	1	1	-10.0	71.2	40.0	31.2 SUP
5	Fieldale-132	1	1	-40.0	45.4	40.0	5.4 SUP
1	Glen-Lyn-132	2	1	-80.0	43.0	40.0	3.0 SUP

---- IND SEVER.            40.2 ----

Figura 32 - Geração de reativos - contingência linha 1-2.

Para solucionar essa contingência basta instalar bancos de capacitores ligados as barras 2 e 8. Para fazer essa inserção, basta clicar em dados de elementos  e clicar na barra que deseja fazer a alteração. No campo *Shunt* deve ser inserido o valor de 60Mvar para a barra 2 e 30Mvar para a barra 8. Para fazer essas alterações é útil usar o comando zoom  e o move desenho  para navegar na área de trabalho.

Essas alterações visam eliminar as contingências referentes à geração, por isso, após essas alterações é necessário rodar novamente o fluxo de potência e as contingências



Observa-se que existem duas violações no desligamento das linhas 1-2, mas essas apresentam baixo índice de severidade e podem ser desconsideradas.

Uma vez solucionadas todas as contingências com relação à geração, passa-se a análise das violações de tensão do sistema. Sabemos que as tensões terminais das barras de geração são determinadas pelo usuário e que a tensão nominal das barras 1, 11 e 13 do exemplo estão fora dos limites estipulados, altera-se a magnitude da tensão das barras em questão, para valores entre a faixa definida no grupo base. Portanto, a tensão nominal das barras 1, 11 e 13 devem ser alteradas para 1.04p.u.

Após a alteração, roda-se o fluxo de potência e a análise de contingência novamente e obteremos os seguintes índices de severidade, conforme a Figura 10.

X----- TENSÃO -----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X							
NUMERO	INDICE	(%)	INDICE	IDENTIFICACAO DA CONTINGENCIA			
VIOLACOES	SEVERIDADE	SEVERIDADE	DE	NOME DE	PARA	NOME PARA	CIRC.
X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X							
5	228.4	228.4	28	Cloverdle132	27	Cloverdle-33	1
1	0.0	0.0	27	Cloverdle-33	30	Barra30---33	1
0	0.0	0.0	10	Roanoke---33	21	Barra21---33	1
0	0.0	0.0	10	Roanoke---33	20	Barra20---33	1

Figura 36 - Sumário de índices de severidade de tensão.

Com base no sumário apresentado na Figura 10 verifica-se um índice de severidade extremamente alto na retirada da linha que interliga as barras 28 e 27. Por isso verifica-se o relatório detalhado dessa contingência percebe-se a ocorrência de uma queda de tensão expressiva nas barras 25, 26, 27, 29 e 30, conforme Figura 11.

IEEE 30 Bus Test Case - Winter 1961  
MONITORACAO DE TENSÃO

X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X									
NUM.	BARRA NOME	ARE	TENSÃO			VIOLACAO (PU)	SHUNTBAR (Mvar)	SHUNTLIN (Mvar)	SEVERIDADE
			MIN	MOD.	MAX				
X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X									
25	Barra25---33	1	0.930	0.898	1.050	-0.032			****
26	Barra26---33	1	0.930	0.878	1.050	-0.052			*****
27	Cloverdle-33	1	0.930	0.872	1.050	-0.058			*****
29	Barra29---33	1	0.930	0.848	1.050	-0.082			*****
30	Barra30---33	1	0.930	0.835	1.050	-0.095			*****
----- IND SEVER.			228.4	-----					

Figura 37 - Tensão - Contingência linha 27-28.

É natural que a primeira ideia seja a instalação de capacitores nestas barras para a compensação de reativos, e de fato isso resolveria o problema, porém uma perda da linha poderia ocorrer acúmulo de reativos nas barras em questão e conseqüentemente haveria sobretensão nas demais barras. Portanto, ao invés da instalação de um banco de capacitor a

melhor solução é a instalação de uma nova linha que interligue as barras 23 e 30, com valores de resistência e reatância estimados em 0,3p.u. e 0,55p.u. respectivamente.

Com a inserção dessa nova linha, roda-se o fluxo de potência, a análise de contingência e observa-se que o sistema não sofrerá com pontos de extrapolação de tensão na ocorrência de contingências, conforme Figura 12.

X----- TENSÃO -----X-----							
NUMERO	INDICE	(%)INDICE	IDENTIFICACAO DA CONTINGENCIA				
VIOLACOES	SEVERIDADE	SEVERIDADE	DE	NOME DE	PARA	NOME PARA	CIRC.
X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----							
0	0.0	0.0	1	Glen-Lyn-132	2	Claytor--132	1
0	0.0	0.0	29	Barra29---33	30	Barra30---33	1
0	0.0	0.0	28	Cloverdle132	27	Cloverdle-33	1
0	0.0	0.0	27	Cloverdle-33	30	Barra30---33	1

Figura 38 - Sumário dos índices de severidade de tensão.

Após analisar os índices de tensão, passa-se agora a analisar o problema de carregamento das linhas de transmissão na ocorrência de uma contingência. Observamos agora o sumário dos índices de severidade de fluxo, conforme Figura 13.

X----- FLUXO -----X-----							
NUMERO	INDICE	(%)INDICE	IDENTIFICACAO DA CONTINGENCIA				
VIOLACOES	SEVERIDADE	SEVERIDADE	DE	NOME DE	PARA	NOME PARA	CIRC.
X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----							
3	19.3	19.3	1	Glen-Lyn-132	2	Claytor--132	1
4	5.6	5.6	2	Claytor--132	5	Fieldale-132	1
3	4.8	4.8	1	Glen-Lyn-132	3	Kumis----132	1
3	4.7	4.7	3	Kumis----132	4	Hancock -132	1
4	4.6	4.6	2	Claytor--132	6	Roanoke--132	1
2	2.1	2.1	2	Claytor--132	4	Hancock -132	1
1	1.5	1.5	6	Roanoke--132	7	Blaine---132	1
1	1.5	1.5	4	Hancock -132	6	Roanoke--132	1
0	0.0	0.0	30	Barra30---33	23	Barra23---33	1
0	0.0	0.0	23	Barra23---33	24	Barra24---33	1

Figura 39 - Sumário dos índices de severidade de fluxo.

Analisando a Figura 13 verifica-se o maior índice de severidade é no desligamento da linha 1-2, isso é compreensível tendo em vista que esta é a linha de maior fluxo do sistema. Uma possível solução é a inserção de uma linha ligando as barras 1 e 4, com resistência e reatância de 0,05 pu e 0,10 pu. respectivamente.

Após a inserção dessa linha roda-se o fluxo de potência e a análise de contingência e observa-se que houve uma diminuição dos índices de severidade, conforme Figura 14.

X----- FLUXO -----X-----							
NUMERO	INDICE	(%)INDICE	IDENTIFICACAO DA CONTINGENCIA				
VIOLACOES	SEVERIDADE	SEVERIDADE	DE	NOME DE	PARA	NOME PARA	CIRC.
X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----							
1	1.5	1.5	6	Roanoke--132	7	Blaine---132	1
1	1.4	1.4	4	Hancock -132	6	Roanoke--132	1
0	0.0	0.0	28	Cloverdle132	27	Cloverdle-33	1
0	0.0	0.0	27	Cloverdle-33	30	Barra30---33	1

Figura 40 - Sumário dos índices de severidade de fluxo.

Apesar de ainda apresentar violações, os índices são consideráveis baixos para justificarem o custo de duplicação ou a inserção de um novo circuito. No entanto estes casos devem ser cuidadosamente avaliados pelo operador.

Após o término da análise do fluxo das linhas, os parâmetros tensão e geração devem ser reavaliados, visando identificar a alteração de algum índice devido à inserção de um banco de capacitor ou de um novo circuito.

Uma vez satisfeitas todos os índices de severidade o problema de contingência está solucionado, cabendo apenas ressaltar que as soluções sugeridas não são as únicas que sanariam as contingências.

#### 4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Faça um resumo das modificações feitas no sistema em relação ao modelo original para a solução das contingências do sistema.

#### 5 BIBLIOGRAFIA

DAHER, Renato; NAZARI, Vagner; SANTOS, Diogo Leando Nunes. **Análise Estática de Sistema Elétrico de Potência Utilizando o Software Anarede**. Trabalho de Conclusão de Curso pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. 1º sem. 2013.

CEPEL – **Programa de Análise de Redes**. Manual do usuário V9.6.0.

ANAREDE – **Análise de Redes Elétricas**. Disponível em: <http://www.anarede.cepel.br/>. Acesso em: 23 de dezembro de 2016.

## APÊNDICE C – FLUXO DE POTÊNCIA ATRAVÉS DO MÉTODO DE NEWTON-RAPHSON

O problema a ser analisado apresenta diagrama unifilar segundo a Figura 1 e consiste em um sistema de três barras com gerador nas barras um e três, e carga na barra dois. O sistema está na base de 100MVA, as susceptância das linhas podem ser desprezadas e a tolerância é de  $\varepsilon = 0,005$ . Os dados do sistema estão apresentados nas Tabelas 1 e 2.

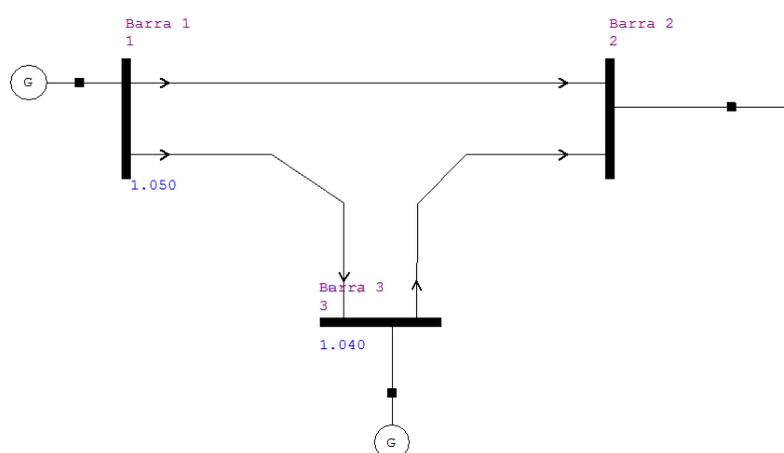


Figura 41 - Diagrama unifilar do sistema a ser analisado.

Tabela 11 - Dados de Barra.

Dados Barra	Geração		Carga		Tensão - pu		Tipo
	P(MW)	Q(Mvar)	P(MW)	Q(Mvar)	Módulo	Ângulo-rad	
1	?	?	-	-	1,05	0,00	V $\theta$
2	-	-	400,00	250,00	?	?	PQ
3	200,00	?	-	-	1,04	?	PV

Tabela 12 – Dados de Linha.

Linhas barra a barra	Impedância Série		Admitância Série		Mvar carregamento (Capacitivo)
	R (pu)	X(pu)	G(pu)	B(pu)	
1-2	0,02	0,04	10,00	-20,00	-
1-3	0,01	0,03	10,00	-30,00	-
2-3	0,0125	0,025	16,00	-32,00	-

Com os dados da tabela 2 montamos a matriz admitância do sistema:

$$Y = \begin{pmatrix} 20 - j50 & -10 + j50 & -10 + j30 \\ -10 + j20 & 26 - j52 & -16 + j32 \\ -10 + j30 & -16 + j32 & 26 - j62 \end{pmatrix}$$

Convertendo a matriz admitância para a forma polar e com ângulo em radianos, temos:

$$Y = \begin{pmatrix} 53,85165\angle -1,9029 & 22,36068\angle 2,0344 & 31,62278\angle 1,8925 \\ 22,36068\angle 2,0344 & 58,13777\angle -1,1071 & 35,77709\angle 2,0344 \\ 31,62278\angle 1,8925 & 35,77709\angle 2,0344 & 67,23095\angle -1,1737 \end{pmatrix}$$

Das equações do fluxo de potência, temos:

$$P_2 = |V_2||V_1||Y_{21}| \cos(\theta_{21} - \delta_2 + \delta_1) + |V_2|^2|Y_{22}| \cos \theta_{22} + |V_2||V_3||Y_{23}| \cos(\theta_{23} - \delta_2 + \delta_3)$$

$$P_3 = |V_3||V_1||Y_{31}| \cos(\theta_{31} - \delta_3 + \delta_1) + |V_3||V_2||Y_{32}| \cos(\theta_{32} - \delta_3 + \delta_2) + |V_3|^2|Y_{33}| \cos \theta_{33}$$

$$Q_2 = -|V_2||V_1||Y_{21}| \sin(\theta_{21} - \delta_2 + \delta_1) - |V_2|^2|Y_{22}| \sin \theta_{22} - |V_2||V_3||Y_{23}| \sin(\theta_{23} - \delta_2 + \delta_3)$$

Os elementos da matriz jacobiana são obtidos calculando a derivada parcial das equações acima com relação a  $\delta_2$ ,  $\delta_3$  e  $|V_2|$ . Com isso teremos:

$$\frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} = |V_2||V_1||Y_{21}| \sin(\theta_{21} - \delta_2 + \delta_1) + |V_2||V_3||Y_{23}| \sin(\theta_{23} - \delta_2 + \delta_3)$$

$$\frac{\partial P_2}{\partial \delta_3} = -|V_2||V_3||Y_{23}| \sin(\theta_{23} - \delta_2 + \delta_3)$$

$$\frac{\partial P_2}{\partial |V_2|} = |V_1||Y_{21}| \cos(\theta_{21} - \delta_2 + \delta_1) + 2|V_2||Y_{22}| \cos \theta_{22} + |V_3||Y_{23}| \cos(\theta_{23} - \delta_2 + \delta_3)$$

$$\frac{\partial P_3}{\partial \delta_2} = -|V_3||V_2||Y_{32}| \sin(\theta_{32} - \delta_3 + \delta_2)$$

$$\frac{\partial P_3}{\partial \delta_3} = |V_3||V_1||Y_{31}| \sin(\theta_{31} - \delta_3 + \delta_1) + |V_3||V_2||Y_{32}| \sin(\theta_{32} - \delta_3 + \delta_2)$$

$$\frac{\partial P_3}{\partial |V_2|} = |V_3||Y_{32}| \cos(\theta_{32} - \delta_3 + \delta_2)$$

$$\frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2} = |V_2||V_1||Y_{21}| \cos(\theta_{21} - \delta_2 + \delta_1) + |V_2||V_3||Y_{23}| \cos(\theta_{23} - \delta_2 + \delta_3)$$

$$\frac{\partial Q_2}{\partial \delta_3} = -|V_2||V_3||Y_{23}| \cos(\theta_{23} - \delta_2 + \delta_3)$$

$$\frac{\partial Q_2}{\partial |V_2|} = -|V_1||Y_{21}| \sin(\theta_{21} - \delta_2 + \delta_1) - 2|V_2||Y_{22}| \sin \theta_{22} - |V_3||Y_{23}| \sin(\theta_{23} - \delta_2 + \delta_3)$$

A carga e a geração expressas em pu são:

$$S_2 = -\frac{400 + j250}{100} = -4,0 - j2,5 \text{ pu}$$

$$P_3 = \frac{200}{100} = 2,0 \text{ pu}$$

Aplicando a sequência do método de Newton Raphson:

1º passo:

Começar o processo de iteração com estimativa inicial de  $|V_2^{(0)}| = 1,0$ ,  $\delta_2^{(0)} = 0,0$  e  $\delta_3^{(0)} = 0,0$ .

$$P_2^{(0)} = |1||1,05||22,36068| \cos(2,0344) \\ + |1||58,13777| \cos(-1,1071) + |1||1,04||35,77709| \cos(2,0344)$$

$$P_2^{(0)} = -10,4991 + 26,0025 - 16,6385 = -1,14 \text{ pu}$$

$$P_3^{(0)} = |1,04||1,05||31,62278| \cos(1,8925) + |1,04||1||35,77709| \cos(2,0344) \\ + |1,04^2||67,23095| \cos(-1,1737)$$

$$P_3^{(0)} = -10,9185 - 16,6385 + 28,1227 = 0,5616 \text{ pu}$$

$$Q_2^{(0)} = -|1||1,05||22,36068| \sin(2,0344) \\ - |1^2||58,13777| \sin(-1,1071) - |1||1,04||35,77709| \sin(2,0344)$$

$$Q_2^{(0)} = -21,00005 + 51,9987 - 33,3807 = -2,28 \text{ pu}$$

Os valores líquidos de P e Q nas barras dois e três na base de 100 MVA são:

$$\Delta P_2^{(0)} = P_2 - P_2^{(0)} = -4 - (-1,14) = -2,86 \text{ pu}$$

$$\Delta P_3^{(0)} = P_3 - P_3^{(0)} = 2 - (0,5616) = 1,438 \text{ pu}$$

$$\Delta Q_2^{(0)} = Q_2 - Q_2^{(0)} = -2,5 - (-2,28) = -0,2200 \text{ pu}$$

Como os valores residuais são maiores de que 0,005 que é a tolerância estabelecida. Com isso é necessário linearizar o sistema montando a matriz Jacobiana com as derivadas parciais calculadas anteriormente. O processo iterativo só terminará quando a tolerância for satisfeita.

É necessário calcular os parâmetros da matriz Jacobiana, utilizando as expressões das derivadas parciais e as estimativas iniciais.

$$\frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} = |1||1,05||22,36068| \sin(2,0344) + |1||1,04||35,77709| \sin(2,0344) \\ = 21,0005 + 33,2807 = 54,28$$

$$\frac{\partial P_2}{\partial \delta_3} = -|1||1,04||35,77709| \sin(2,0344) = -33,28$$

$$\frac{\partial P_2}{\partial |V_2|} = |1,05||22,36068| \cos(2,0344) \\ + 2|1||58,13777| \cos(-1,1071) + |1,04||35,77709| \cos(2,0344) \\ = -10,4991 + 52,0051 - 16,6385 = 24,8674$$

$$\frac{\partial P_3}{\partial \delta_2} = -|1,04||1||35,77709| \sin(2,0344) = -33,2807$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial P_3}{\partial \delta_3} &= |1,04||1,05||31,62278| \sin(1,8925) + |1,04||1||35,77709| \sin(2,0344) \\ &= 32,7605 + 33,2807 = 66,0412\end{aligned}$$

$$\frac{\partial P_3}{\partial |V_2|} = |1,04||35,77709| \cos(2,0344) = -16,6385$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2} &= |1||1,05||22,36068| \cos(2,0344) + |1||1,04||35,77709| \cos(2,0344) \\ &= -10,4991 - 16,6385 = -27,1376\end{aligned}$$

$$\frac{\partial Q_2}{\partial \delta_3} = -|1||1,04||35,77709| \cos(2,0344) = 16,6385$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial Q_2}{\partial |V_2|} &= -|1,05||22,36068| \sin(2,0344) \\ &\quad - 2|1||58,13777| \sin(-1,1071) - |1,04||35,77709| \sin(2,0344) \\ &= -21,0005 + 103,997 - 33,2750 = -49,722\end{aligned}$$

Com os valores das derivadas substituídas na matriz Jacobiana, temos:

$$J = \begin{pmatrix} 54,28 & -33,28 & 24,86 \\ -33,28 & 66,04 & -16,64 \\ -27,14 & 16,64 & -49,72 \end{pmatrix}$$

Resolver o problema linearizado encontrado o valor de  $\Delta x_n$ . Da expressão  $\Delta k_n = J_n \cdot \Delta x_n$ , tem-se que:  $\Delta x_n = J_n^{-1} \cdot \Delta k_n$ . Sendo  $\Delta P_2 = -2,86$  pu,  $\Delta P_3 = 1,44$  pu e  $\Delta Q_2 = -0,22$  pu e  $\Delta K_n = (\Delta P_2 \quad \Delta P_3 \quad \Delta Q_2)^t$ .

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta_2^{(0)} \\ \Delta \delta_3^{(0)} \\ \Delta |V_2^{(0)}| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,02313 & 0,01344 & 0,00706 \\ 0,01368 & 0,02191 & 492,9 \times 10^{-6} \\ 0,00804 & -35,26 \times 10^{-18} & 0,01609 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -2,86 \\ 1,44 \\ -0,22 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta_2^{(0)} \\ \Delta \delta_3^{(0)} \\ \Delta |V_2^{(0)}| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,045263 \\ -0,007718 \\ -0,026548 \end{bmatrix}$$

A nova estimativa agora calculada a partir dos parâmetros encontrados.

$$\delta_2^{(1)} = 0,0 + (-0,045263) = -0,045263 \text{ rad}$$

$$\delta_3^{(1)} = 0,0 + (-0,007718) = -0,007718 \text{ rad}$$

$$|V_2^{(0)}| = 1,0 + (-0,026548) = 0,97345 \text{ pu}$$

Começando o processo de iteração com a nova estimativa de  $|V_2^{(0)}| = 0,97345$ ,

$$\delta_2^{(0)} = -0,045263 \text{ e } \delta_3^{(0)} = -0,007718.$$

$$\begin{aligned}
P_2^{(1)} &= |0,97345||1,05||22,36068| \cos(2,0344 + 0,045263) \\
&\quad + |0,97345^2||58,13777| \cos(-1,1071) \\
&\quad + |0,97345||1,04||35,77709| \cos(2,0344 + 0,045263 - 0,007718) \\
&= -11,1349 + 24,6401 - 17,4014 = -3,89624
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
P_3^{(1)} &= |1,04||1,05||31,62278| \cos(1,8925 + 0,007718) \\
&\quad + |1,04||0,97345||35,77709| \cos(2,0344 + 0,007718 - 0,045263) \\
&\quad + |1,04^2||67,23095| \cos(-1,1737) = -11,171 - 14,9693 + 28,1227 \\
&= 1,98239
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
Q_2^{(1)} &= -|0,97345||1,05||22,36068| \sin(2,0344 + 0,045263) \\
&\quad - |0,97345^2||58,13777| \sin(-1,1071) \\
&\quad - |0,97345||1,04||35,77709| \sin(2,0344 + 0,045263 - 0,007718) \\
&= -19,9595 + 49,2743 - 31,7663 = -2,4515
\end{aligned}$$

Os valores líquidos de P e Q nas barras dois e três na base de 100MVA são:

$$\Delta P_2^{(1)} = P_2 - P_2^{(1)} = -4 - (-3,8962) = -0,1038$$

$$\Delta P_3^{(1)} = P_3 - P_3^{(1)} = 2 - (1,98239) = 0,01761$$

$$\Delta Q_2^{(1)} = Q_2 - Q_2^{(1)} = -2,5 - (-2,4515) = -0,0485$$

O processo iterativo só termina quando todos os parâmetros forem verdadeiros. Nesse ponto fica evidente que a cada iteração as potências com valores estimados vão se aproximando das potências especificadas, até que o erro seja irrelevante e satisfaça a tolerância que nesse caso é de 0,005.

É necessário calcular os parâmetros da matriz Jacobiana, utilizando as expressões das derivadas parciais com as novas estimativas calculadas.

$$\begin{aligned}
\frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} &= |0,97345||1,05||22,36068| \sin(2,0344 + 0,045263) \\
&\quad + |0,97345||1,04||35,77709| \sin(2,0344 + 0,045263 - 0,007718) \\
&= 19,9595 + 31,7663 = 51,7259
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial P_2}{\partial \delta_3} &= -|0,97345||1,04||35,77709| \sin(2,0344 + 0,045263 - 0,007718) \\
&= -31,7656
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial P_2}{\partial |V_2|} &= |1,05||22,36068| \cos(2,0344 + 0,045263) \\ &\quad + 2|0,97345||58,13777| \cos(-1,1071) \\ &\quad + |1,04||35,77709| \cos(2,0344 + 0,045263 - 0,007718) \\ &= -11,4385 + 50,6243 - 17,876 = 21,302\end{aligned}$$

$$\frac{\partial P_3}{\partial \delta_2} = -|1,04||0,97345||35,77709| \sin(2,0344 + 0,007718 - 0,045263) = -32,98$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial P_3}{\partial \delta_3} &= |1,04||1,05||31,62278| \sin(1,8925 + 0,007718) \\ &\quad + |1,04||0,97345||35,77709| \sin(2,0344 + 0,007718 - 0,045263) \\ &= 32,6753 + 32,9823 = 65,65\end{aligned}$$

$$\frac{\partial P_3}{\partial |V_2|} = |1,04||35,77709| \cos(2,0344 + 0,007718 - 0,045263) = -15,37$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2} &= |0,97345||1,05||22,36068| \cos(2,0344 + 0,045263) \\ &\quad + |0,97345||1,04||35,77709| \cos(2,0344 + 0,045263 - 0,007718) \\ &= -11,1349 - 17,4014 = -28,5385\end{aligned}$$

$$\frac{\partial Q_2}{\partial \delta_3} = -|0,97345||1,04||35,77709| \cos(2,0344 + 0,045263 - 0,007718) = 17,40$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial Q_2}{\partial |V_2|} &= -|1,05||22,36068| \sin(2,0344 + 0,045263) \\ &\quad - 2|0,97345||58,13777| \sin(-1,1071) \\ &\quad - |1,04||35,77709| \sin(2,0344 + 0,045263 - 0,007718) \\ &= -20,5039 + 101,236 - 32,6327 = 48,1035\end{aligned}$$

Com os valores das derivadas substituídas na jacobiana, temos:

$$J = \begin{pmatrix} 51,7246 & -31,7656 & 21,3025 \\ -32,9816 & 65,6563 & -15,3790 \\ -28,5385 & 17,4028 & 48,1035 \end{pmatrix}$$

Resolver o problema linearizado encontrado o valor de  $\Delta x_n$ . Da expressão  $\Delta k_n = J_n \cdot \Delta x_n$ , tem-se que:  $\Delta x_n = J_n^{-1} \cdot \Delta k_n$ . Sendo  $\Delta P_2 = -0,1038$  pu,  $\Delta P_3 = 0,01761$  pu e  $\Delta Q_2 = -0,0485$  pu retirados do 3º passo e  $\Delta K_n = (\Delta P_2 \quad \Delta P_3 \quad \Delta Q_2)^t$ .

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta_2^{(1)} \\ \Delta \delta_3^{(1)} \\ \Delta |V_2^{(1)}| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,02437 & 0,0135 & -0,00647 \\ 0,01441 & 0,02202 & 660,82 \times 10^{-6} \\ 0,00924 & 45,46 \times 10^{-6} & 0,01671 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -0,1038 \\ 0,01761 \\ -0,0485 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \Delta\delta_2^{(1)} \\ \Delta\delta_3^{(1)} \\ \Delta|V_2^{(1)}| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,001795 \\ -0,000985 \\ -0,001767 \end{bmatrix}$$

A nova estimativa agora calculada a partir dos parâmetros encontrados.

$$\delta_2^{(2)} = -0,045263 + (-0,001795) = -0,04706 \text{ rad}$$

$$\delta_3^{(2)} = -0,007718 + (-0,000985) = -0,0087 \text{ rad}$$

$$|V_2^{(2)}| = 0,97345 + (-0,001767) = 0,97168 \text{ pu}$$

Começando o processo de iteração com a nova estimativa de  $|V_2^{(2)}| = 0,97168$ ,

$$\delta_2^{(2)} = -0,04706 \text{ e } \delta_3^{(0)} = -0,00870.$$

$P_2$

$$\begin{aligned} &= |0,97168||1,05||22,36068| \cos(2,0344 + 0,04706) \\ &+ |0,97168^2||58,13777| \cos(-1,1071) + |0,97168||1,04||35,77709| \cos(2,0344 \\ &+ 0,04706 - 0,0087) = -11,1504 + 24,5506 - 17,3956 = -3,9954 \end{aligned}$$

$$P_3 = |1,04||1,05||31,62278| \cos(1,8925 + 0,0087)$$

$$\begin{aligned} &+ |1,04||0,97168||35,77709| \cos(2,0344 + 0,0087 - 0,04706) \\ &+ |1,04^2||67,23095| \cos(-1,1737) = -11,2031 - 14,9153 + 28,1227 \\ &= 2,0044 \end{aligned}$$

$Q_2$

$$\begin{aligned} &= -|0,97168||1,05||22,36068| \sin(2,0344 + 0,04706) \\ &- |0,97168^2||58,13777| \sin(-1,1071) - |0,97168||1,04||35,77709| \sin(2,0344 \\ &+ 0,04706 - 0,0087) = -19,9032 + 49,0952 - 31,6944 = -2,5024 \end{aligned}$$

Os valores líquidos de P e Q nas barras dois e três na base de 100MVA são:

$$\Delta P_2^{(1)} = P_2 - P_2^{(1)} = -4 - (-3,9954) = -0,004$$

$$\Delta P_3^{(1)} = P_3 - P_3^{(1)} = 2 - (2,004) = 0,004$$

$$\Delta Q_2^{(1)} = Q_2 - Q_2^{(1)} = -2,5 - (-2,5024) = -0,002$$

Após essa última iteração observa-se que os valores encontrados para  $\delta_2$ ,  $\delta_3$  e  $|V_2|$  são satisfatórios, então temos todos os valores de tensões e de ângulos de tensões das barras do problema em análise.

Tabela 13 - Tensões e ângulos de tensões.

Barra	Tensão (pu)	Fase (rad)	Fase (°)
1	1,05	0	0
2	0,7	-0,047rad	-2,69
3	1,04	-0,0087rad	-0,498

Com esses valores podemos agora determinar o valor das potências ativa e reativa da barra um e da potência reativa da barra três.

$$Q_3 = -|V_3||V_1||Y_{31}| \sin(\theta_{31} - \delta_3 + \delta_1) - |V_3||V_2||Y_{32}| \sin(\theta_{32} - \delta_3 + \delta_2) - |V_3|^2||Y_{33}| \sin \theta_{33}$$

$$\begin{aligned} Q_3 &= -|1,04||1,05||31,62278| \sin(1,8925 + 0,0087) \\ &\quad - |1,04||0,97168||35,77709| \sin(2,0344 + 0,0087 - 0,04706) \\ &\quad - |1,04|^2||67,23095| \sin(-1,1737) = -32,6643 - 32,9345 + 67,0587 \\ &= 1,46 \text{ pu} \end{aligned}$$

$$P_1 = |V_1|^2||Y_{11}| \cos \theta_{11} + |V_1||V_2||Y_{12}| \cos(\theta_{12} - \delta_1 + \delta_2) + |V_1||V_3||Y_{13}| \cos(\theta_{13} - \delta_1 + \delta_3)$$

$$\begin{aligned} P_1 &= |1,05|^2||53,85| \cos(-1,9) + |1,05||0,97168||22,36| \cos(2,03 - 0,04706) \\ &\quad + |1,05||1,04||31,62| \cos(1,89 - 0,0087) = 2,18 \text{ pu} \end{aligned}$$

$$Q_1 = -|V_1|^2||Y_{11}| \sin \theta_{11} - |V_1||V_2||Y_{12}| \sin(\theta_{12} - \delta_1 + \delta_2) - |V_1||V_3||Y_{13}| \sin(\theta_{13} - \delta_1 + \delta_3)$$

$$\begin{aligned} Q_1 &= -|1,05|^2||53,85| \sin(-1,9) - |1,05||0,97168||22,36| \sin(2,03 - 0,04706) \\ &\quad - |1,05||1,04||31,62| \sin(1,89 - 0,0087) = 1,40 \text{ pu} \end{aligned}$$

Para calcular os fluxos nas linhas precisamos primeiramente calcular as correntes.

$$I_{12} = y_{12}(V_1 - V_2) = (10 - j20) \cdot (1,05 - (0,97 - j0,0456)) = 1,712 - j1,144 \text{ pu}$$

$$I_{21} = -I_{12} = -1,712 + j1,144 \text{ pu}$$

$$I_{13} = y_{13}(V_1 - V_3) = (10 - j30) \cdot (1,05 - (1,04 - j0,009)) = 0,37 - j0,21 \text{ pu}$$

$$I_{31} = -I_{13} = -0,37 + j0,21 \text{ pu}$$

$$\begin{aligned} I_{23} &= y_{23}(V_2 - V_3) = (16 - j32) \cdot ((0,97 - j0,0456) - (1,04 - j0,009)) \\ &= -2,29 + j1,65 \text{ pu} \end{aligned}$$

$$I_{32} = -I_{23} = 2,29 - j1,65 \text{ pu}$$

Os fluxos nas linhas são:

$$\begin{aligned} S_{12} &= V_1 I_{12}^* = 1,05(1,712 + j1,144) \\ &= 1,797 + j1,2012 \text{ pu ou } 179,7 \text{ MW e } 120,12 \text{ Mvar} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_{21} &= V_2 I_{21}^* = (0,97 - j0,0456)(-1,712 - j1,144) \\ &= -1,7128 - j1,031 \text{ pu ou } -171,2 \text{ MW e } -103,1 \text{ Mvar} \end{aligned}$$

$$S_{13} = V_1 I_{13}^* = 1,05 \cdot (0,37 + j0,21) = 0,388 + j0,22 \text{ pu ou } 38,8 \text{ MW e } 22,05 \text{ Mvar}$$

$$\begin{aligned} S_{31} &= V_3 I_{31}^* = (1,04 - j0,009)(-0,37 - j0,21) \\ &= -0,386 - j0,215 \text{ pu ou } -38,6 \text{ MW e } -21,5 \text{ Mvar} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_{23} &= V_2 I_{23}^* = (0,97 - j0,0456)(-2,29 - j1,65) \\ &= -2,297 - j1,496 \text{ pu ou } -229,7 \text{ MW e } 149,6 \text{ Mvar} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_{32} &= V_3 I_{32}^* = (1,04 - j0,009)(2,29 + j1,65) \\ &= 2,396 + j1,69 \text{ pu ou } 239,6 \text{ MW e } -169,5 \text{ Mvar} \end{aligned}$$

As perdas nas linhas:

$$\begin{aligned} S_{L12} &= S_{12} + S_{21} = (1,797 + j1,2012) + (-1,7128 - j1,03) \\ &= 0,084 + j0,171 \text{ pu ou } 8,4 \text{ Mw e } 17,1 \text{ Mvar} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_{L13} &= S_{13} + S_{31} = (0,388 + j0,22) + (-0,386 + j0,215) \\ &= 0,002 + j0,05 \text{ pu ou } 2 \text{ Mw e } 5 \text{ Mvar} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_{L23} &= S_{23} + S_{32} = (-2,71 - j1,45) + (2,99 + j1,394) \\ &= 0,28 - j0,056 \text{ pu ou } 28 \text{ Mw e } 5,6 \text{ Mvar} \end{aligned}$$