Universidade de São Paulo

Escola de Engenharia de São Carlos

Departamento de Engenharia Elétrica

Trabalho de Conclusão de Curso

Análise Estática de Estabilidade de Tensão em Sistemas Elétricos de Potência via Nomogramas e Computação Paralela

Autor
Adriano Lima Abrantes

Orientador
Prof. Dr. Luís Fernando Costa Alberto

São Carlos, 2013

ADRIANO LIMA ABRANTES

ANÁLISE ESTÁTICA DE ESTABILIDADE DE TENSÃO EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA VIA NOMOGRAMAS E COMPUTAÇÃO PARALELA

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Escola de Engenharia de
São Carlos, da Universidade de São Paulo

Curso de Engenharia Elétrica com ênfase
em Sistemas de Energia e Automação

ORIENTADOR: Prof. Dr. Luís Fernando Costa Alberto

São Carlos

2013

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Abrantes, Adriano Lima
A158a Análise Estática de Estabilidade de Tensão em Sistemas Elétricos de Potência via Nomogramas e Computação Paralela / Adriano Lima Abrantes; orientador Luís Fernando Costa Alberto. São Carlos, 2013.

Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica com ênfase em Sistemas de Energia e Automação) -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2013.

1. Sistemas Elétricos de Potência. 2. Fluxo de Carga. 3. Fluxo de Carga Continuado. 4. Estabilidade de Tensão. 5. Avaliação de Segurança. 6. Programação Paralela. I. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: Adriano Lima Abrantes

Título: "Análise de estabilidade de tensão em sistemas elétricos de potência via nomogramas"

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado
em 21 / 11 / 2013 ,

com NOTA 7,0 (SETE, ZERO), **pela Comissão Julgadora:**

Prof. Associado Luís Fernando Costa Alberto - (Orientador - SEL/EESC/USP)

Dr. Edson Aparecido Rozas Theodoro - (Pós-Doutorando - SEL/EESC/USP)

Dr. Moussa Reda Mansour - (SEL/EESC/USP)

Coordenador da CoC-Engenharia Elétrica - EESC/USP:
Prof. Associado Homero Schiabel

Dedico este trabalho aos meus pais,

Armando e Valéria.

Agradecimentos

Agradeço à Universidade de São Paulo pelas oportunidades e conhecimento adquirido.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro concedido no período de Iniciação Científica.

Ao Prof. Luís Fernando Costa Alberto pela sua orientação e disposição durante minha graduação. Ao Edson Geraldi, Edson Theodoro e Moussa Mansour, companheiros do LACO, por toda a ajuda e críticas construtivas.

À Carolina Guimarães, Luan Brito, Marco Garcia, Thiago Degola e Nathália Macedo, pessoas que tive o prazer de trabalhar ao lado na Omega Energia S/A.

À Lígia, minha companheira, que esteve ao meu lado durante os momentos mais difíceis e sempre me motivou a dar o meu melhor.

Aos meus pais por todo o apoio que possibilitou meu desenvolvimento acadêmico.

Aos amigos que, sempre que puderam, estiveram ao meu lado.

Resumo

ABRANTES, A. L. **Análise Estática de Estabilidade de Tensão em Sistemas Elétricos de Potência via Nomogramas e Computação Paralela.** Trabalho de Conclusão de Curso – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

A crescente demanda por energia elétrica e o aumento das dimensões dos sistemas elétricos de potência (SEP) aumentaram a complexidade da operação e do planejamento do sistema. Além disso, os altos investimentos necessários para se expandir a capacidade de SEP contribuem para que o sistema opere próximo de seus limites de transmissão de potência. A importância do fornecimento de energia elétrica e a o aumento da complexidade dos SEP implicam na necessidade de ferramentas capazes de orientar a operação e o planejamento do sistema para assegurar a segurança do mesmo. No contexto de estabilidade estática de tensão, é possível utilizar a margem de estabilidade do sistema devido a bifurcações (Bifurcação sela-nó e bifurcação induzida por limites) para se avaliar a segurança de um determinado ponto de operação, dada uma determinada direção de crescimento de carga e despacho. Este trabalho de conclusão de curso visa desenvolver uma ferramenta computacional capaz de avaliar a distância de um determinado ponto de operação em relação à fronteira da região de operação segura, do ponto de vista de estabilidade estática de tensão. A avaliação é feita através da separação de geradores em grupos cujas injeções de potência ativa variam lentamente, para que se determine a região de operação segura e sua fronteira. O gráfico resultante da análise é denominado nomograma e possibilita uma análise visual rápida e intuitiva das margens de estabilidade do SEP, que pode ser usada para auxiliar o planejamento da expansão do sistema. A princípio, foi implementada uma ferramenta de resolução do fluxo de carga baseada no método de Newton-Raphson, a qual verifica a convergência do método para diversas configurações de despacho. Para aumentar a precisão da determinação da região segura, o método da continuação com parametrização por comprimento de arco foi implementado. Além disso, técnicas de computação paralela baseadas na biblioteca OpenMP complementam a ferramenta, reduzindo o tempo necessário para as análises, fazendo com que o uso da ferramenta seja mais dinâmico.

Palavras-Chave: Sistemas Elétricos de Potência, Fluxo de Carga, Fluxo de Carga Continuado, Estabilidade de Tensão, Avaliação de Segurança, Programação Paralela

Abstract

ABRANTES, A. L. **Static Voltage Stability Analysis in Electrical Power Systems via Nomograms and Parallel Computing**. Trabalho de Conclusão de curso – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

The increasing demand for electrical energy and the growth of electrical power systems (EPS) dimensions have risen the complexity of operation and planning of the grid. Besides that, the high investments necessary to expand the capacity of EPS make the system operate close to its power transmission limits. The importance of supplying electrical energy and the rising complexity of EPS bring the need of tools capable of orienting operation and planning of the system to ensure its safety. In the context of static voltage stability, it is possible to use the stability margin due to bifurcations (Saddle-node and limit induced) to assess the safety of a certain operation point, given a certain direction of dispatch and load increase. This undergraduate project aims to develop a computational tool capable of evaluate the distance between a certain point of operation and the boundaries of the region of safe operation, with respect to static voltage stability. The assessment is performed through the separation of generators in groups that have their injected active power varied slowly in order to determine the region of safe operation and its boundaries. The results are presented in a graph called nomogram and it enables a fast and intuitive visual analysis of the stability margins of an EPS, that can be used to assist planning and operation. At first, a tool was implemented based on the Newton-Raphson method, it checks convergence of the method in different dispatch sets. To provide higher precision of the safe region, the continuation method with arc length parameterization was implemented. Furthermore, techniques of parallel computing based on the OpenMP API were also implemented, reducing the time necessary for the analysis, making the use of the tool more dynamic.

Keywords: Electrical Power Systems, Power Flow, Continuous Power Flow, Voltage Stability, Security Evaluation, Parallel Computing.

Lista de Figuras

Figura 1- Modelo de linha de transmissão 5
Figura 2 - Modelo do transformador em fase 6
Figura 3 - Modelo do transformador defasador 7
Figura 4 - Algoritmo do Fluxo de Carga pelo método de Newton-Raphson considerando limites de injeção de potência reativa 12
Figura 5 - Curva PV Típica 15
Figura 6 - Curvas PV: A esquerda o limite de reativo de um gerador é violado, mas o sistema continua estável. À direita o limite do gerador acaba causando uma BIL....16
Figura 7- Representação gráfica da parametrização física 18
Figura 8 - Representação gráfica da parametrização local 19
Figura 9 - Representação gráfica da parametrização por comprimento de arco.....19
Figura 10 - Método das Secantes 22
Figura 11 - Construção de um Nomograma 25
Figura 12 - Algoritmo do método ponto a ponto 27
Figura 13 - Fluxograma do método continuado aplicado à construção de nomogramas 28
Figura 14 - Fluxograma da execução concorrente do programa desenvolvido.....31
Figura 15 - Curva λV indicando violação de limite reativo da barra de geração 30...32
Figura 16 - Curva λV com indicação de previsão e correção sem considerar limites reativos.....33
Figura 17 - Curva λV com indicação de previsão e correção considerando limites reativos.....33
Figura 18 - Comparação de Nomogramas construídos através do método continuado com ou sem consideração de limites de injeção reativa 35
Figura 19 - Comparação entre resultados obtidos com o método ponto a ponto e o método continuado.....35
Figura 20 - Primeira parte do arquivo PWF.....39
Figura 21 - Segunda parte do arquivo PWF.....40

Sumário

1. INTRODUÇÃO 1

1.1. Proposta do Trabalho 2

1.2. Estrutura da Monografia 3

2. MODELAGEM DO PROBLEMA DO FLUXO DE CARGA 4

2.1. Formulação Básica 4

2.2. Modelagem de Elementos Internos de Rede 4

2.2.1. Linhas de Transmissão 5

2.2.2. Transformador em fase 6

2.2.3. Transformador defasador 7

2.2.4. Expressões Gerais de Correntes 7

2.2.5. Expressões Gerais dos Fluxos de Potência 8

2.3. Formulação Matricial 8

2.4. Formulação do Problema do Fluxo de Carga 9

2.4.1. Método de Newton-Raphson 10

2.4.2. Controles e Limites Reativos 11

3. FLUXO DE CARGA CONTINUADO 13

3.1. Introdução 13

3.2. Conceitos Básicos 13

3.2.1. Bifurcação Sela-Nó 14

3.2.2. Bifurcação Induzida por Limites 15

3.3. Método da Continuação Aplicado ao Problema do Fluxo de Carga 16

3.4. Modelagem 16

3.5. Parametrização 17

3.5.1. Parametrização Física 17

3.5.2. Parametrização Local 18

3.5.3. Parametrização por Comprimento de Arco 19

3.6. Preditores 20

3.6.1. Método da Tangente 20
3.6.2. Método da Secante 22
3.7. Corretor 22
3.8. Controle de Tamanho de Passo 23
3.9. Algoritmo 24
4. NOMOGRAMAS 25
4.1. Redespacho de Geração 25
4.2. Nomogramas ponto a ponto 26
4.3. Nomogramas com Método da Continuação 28
5. PARALELIZAÇÃO 29
5.1. Arquiteturas 29
5.2. Escolha do *Software* 30
5.3. Implementação 31
6. RESULTADOS 32
6.1. Curvas λV 32
6.2. Nomogramas 34
7. CONCLUSÕES 37
7.1. Trabalhos Futuros 37
BIBLIOGRAFIA 38
APÊNDICE 39

1. INTRODUÇÃO

A crescente demanda por energia elétrica e o aumento das dimensões dos sistemas elétricos de potência (SEP) aumentaram a complexidade da operação e do planejamento do sistema. Além disso, os altos investimentos necessários para se expandir a capacidade de SEP contribuem para que o sistema opere próximo de seus limites de transmissão de potência. A importância do fornecimento de energia elétrica e a o aumento da complexidade dos SEP implicam na necessidade de ferramentas capazes de orientar a operação e planejamento do sistema para assegurar a segurança do mesmo.

Uma das ferramentas utilizadas pelo Operador Nacional do Sistema (ONS), o Organon [1], é capaz de gerar um relatório gráfico indicando a configuração atual de despacho e sua posição em relação à fronteira de segurança do SEP. A esse gráfico, dá-se o nome de nomograma. O nomograma é construído através da segregação das barras de geração (excluindo a barra de referência) de um SEP em três grupos, fazendo com que a somatória de injeção de potência ativa dos três grupos permaneça constante. Optou-se por separar em três grupos para que se obtenha um resultado em duas dimensões, fazendo com que o terceiro grupo seja o complemento.

Essa relação é representada pelas equações (1.1) e (1.2), em que P_k é a injeção de potência ativa do grupo k.

$$P_1 + P_2 + P_3 = C \tag{1.1}$$

$$P_3 = C - (P_1 + P_2) \tag{1.2}$$

A princípio, determina-se o estado do SEP no despacho base e então varia-se a injeção de potência ativa de cada um dos grupos a fim de verificar a possibilidade de operação em diferentes configurações de despacho, determinando assim a região de operação segura do sistema. Finalmente, a injeção de potência ativa de um dos grupos é apresentada no eixo horizontal enquanto a de um segundo grupo é apresentada no eixo vertical, indicando a região de operação segura. Neste trabalho, essa região é verificada através da resolução do problema de fluxo de carga, ou seja, se o despacho apresentar uma solução estável do ponto de vista de análise estática de tensão, então esse ponto pertence à região de operação segura. Essa análise possibilita que se visualize as restrições no despacho de geração para um determinado sistema de transmissão e que se compare as

regiões de operação segura para diferentes cenários de carga e configurações, auxiliando o planejamento.

O alto esforço computacional necessário para se verificar a operação em um grande número de configurações de despacho dificulta a utilização de tal método na operação em tempo real. Para solucionar este problema, técnicas de programação paralela associadas a outros métodos de resolução, podem reduzir significativamente o tempo necessário para a execução desses cálculos.

Neste trabalho, buscou-se desenvolver uma ferramenta que possibilite uma análise visual de um determinado ponto de operação do sistema e suas distâncias da região de operação insegura no contexto de estabilidade estática de tensão. Essas distâncias representam o quanto se pode variar o despacho em uma determinada direção sem que o sistema apresente um colapso de tensão.

1.1. Proposta do Trabalho

O principal objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de uma ferramenta computacional capaz de gerar nomogramas que auxiliem o planejamento da expansão de um SEP. Duas ferramentas distintas foram desenvolvidas. A primeira consiste em resolver diversos fluxos de carga para diferentes despachos de geração, denominada “método ponto a ponto”. A segunda ferramenta, denominada “método continuado”, é baseada no método da continuação com parametrização por comprimento de arco, para que se obtenha maior robustez e precisão na vizinhança do ponto de máximo carregamento.

Assim como a ferramenta desenvolvida em [2], o trabalho propõe a utilização de dois preditores diferentes no método continuado, inicialmente utiliza-se o preditor tangente visto que apenas o ponto de operação do caso base (ou flat-start) é conhecido e, posteriormente, utiliza-se o preditor secante, que requer conhecimento de uma solução anterior do sistema. Como corretor, o método de Newton-Raphson é utilizado. Utiliza-se o programa baseado no método continuado para traçar nomogramas mais precisamente, através do método da continuação e técnicas de programação paralela.

1.2. Estrutura da Monografia

O texto está organizado de maneira a fornecer os conceitos necessários à compreensão das análises desenvolvidas. Abaixo estão descritos os demais capítulos do texto:

- **Capítulo 2:** É apresentado o problema do fluxo de carga em SEP e a metodologia adotada para o cálculo do estado do sistema.
- **Capítulo 3:** O método da continuação com parametrização por comprimento de arco aplicado para o cálculo da Margem de Estabilidade de Tensão é descrito.
- **Capítulo 4:** São apresentadas as técnicas desenvolvidas para a geração de nomogramas, tanto através do cálculo do fluxo de carga ponto a ponto quanto através do método da continuação e sua implementação com processamento paralelo.
- **Capítulo 5:** Apresentam-se conceitos de programação paralela e a abordagem utilizada para a implementação da ferramenta proposta.
- **Capítulo 6:** São apresentados os resultados obtidos para o sistema teste. Este capítulo também fornece informações sobre o desempenho computacional obtido.
- **Capítulo 7:** Os resultados apresentados no capítulo anterior são discutidos e propostas para o futuro do projeto são apresentadas.

2. MODELAGEM DO PROBLEMA DO FLUXO DE CARGA

Neste capítulo serão apresentadas as equações dos fluxos de potência que regem o comportamento de um SEP. Além disso, será apresentada a formulação matricial utilizada na resolução do problema através do Método de Newton-Raphson e do Método da Continuação.

2.1. Formulação Básica

Na formulação básica do problema, cada barra do SEP é associada a quatro variáveis:

- $\boldsymbol{V_k}$ – Magnitude da tensão na barra k
- $\boldsymbol{\theta_k}$ – Ângulo da tensão na barra k (defasagem em relação ao ângulo da barra de referência)
- $\boldsymbol{P_k}$ – Injeção líquida de potência ativa na barra k
- $\boldsymbol{Q_k}$ – Injeção líquida de potência reativa na barra k

As barras são então classificadas em um dos três tipos definidos abaixo:

- PQ – $\boldsymbol{P_k}$ e $\boldsymbol{Q_k}$ são fornecidos, enquanto calcula-se $\boldsymbol{V_k}$ e $\boldsymbol{\theta_k}$
- PV – $\boldsymbol{P_k}$ e $\boldsymbol{V_k}$ são fornecidos, enquano calcula-se $\boldsymbol{Q_k}$ e $\boldsymbol{\theta_k}$
- *Slack* (Referência) – são fornecidos $\boldsymbol{V_k}$ e $\boldsymbol{\theta_k}$, enquanto calcula-se $\boldsymbol{P_k}$ e $\boldsymbol{Q_k}$

As barras PQ modelam cargas cujas potências ativa e reativa são conhecidas. As barras PV modelam barras de geração, onde há controle da magnitude da tensão e conhecimento da potência ativa injetada. Finalmente, a barra *slack*, que é única no sistema, tem a função de fornecer uma referência angular ao sistema além de ser utilizada para fechar o balanço de potência no sistema, pois é a única barra sem injeção de potência ativa previamente definida [3]. Enquanto outras formulações incluem barras do tipo PQV e cargas que variam de acordo com a magnitude da tensão, este trabalho não as contempla.

2.2. Modelagem de Elementos Internos de Rede

São considerados elementos internos de rede as linhas de transmissão, transformadores e defasadores. Na sequência apresentam-se os modelos dos respectivos elementos internos de rede.

2.2.1. Linhas de Transmissão

O modelo π da linha de transmissão é definido pela sua resistência em série r_{km}, reatância série x_{km}, e susceptância shunt de linha b_{km}^{sh} conforme a Figura 1.

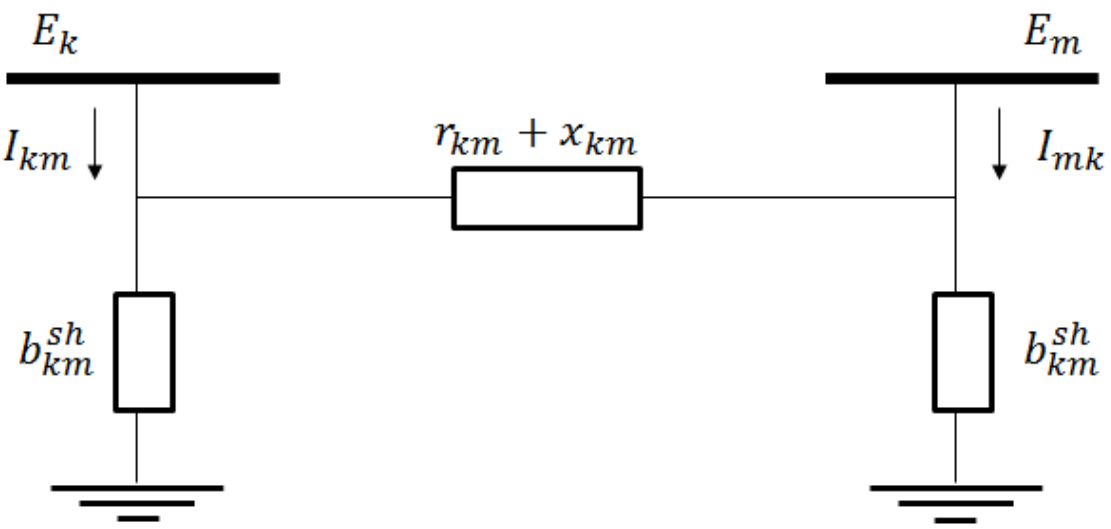

Figura 1- Modelo de linha de transmissão

Em que E_k é o fasor da tensão na barra k, de magnitude V_k e ângulo θ_k, e I_{km} é o fasor da corrente que deixa a barra k pelo respectivo ramo da rede. Definimos então a condutância série g_{km} e a susceptância série b_{km}:

$$g_{km} = \frac{r_{km}}{r_{km}^2 + x_{km}^2} \tag{2.1}$$

$$b_{km} = \frac{-x_{km}}{r_{km}^2 + x_{km}^2} \tag{2.2}$$

Sendo a admitância série:

$$y_{km} = g_{km} + jb_{km} \tag{2.3}$$

As correntes são então definidas por:

$$I_{km} = \left(y_{km} + jb_{km}^{sh}\right)E_k - y_{km}E_m \tag{2.4}$$

$$I_{mk} = -y_{km}E_k + \left(y_{km} + jb_{km}^{sh}\right)E_m \tag{2.5}$$

2.2.2. Transformador em fase

O modelo do transformador é constituído pela sua razão de transformação a_{km} e admitância série y_{km} conforme a Figura 2.

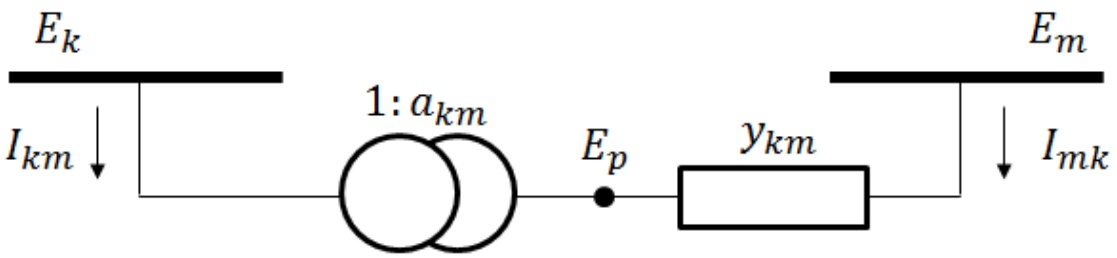

Figura 2 - Modelo do transformador em fase

No transformador ideal, a potência se conserva:

$$E_k I_{km}^* + E_p I_{mk}^* = 0 = E_k I_{km}^* + (a E_k I_{mk}^*) \quad (2.6)$$

Logo a relação entre as correntes é:

$$\frac{I_{km}}{I_{mk}} = -a \quad (2.7)$$

Utilizando a relação:

$$\frac{E_k}{E_p} = a^{-1} = -\frac{I_{mk}}{I_{km}} = \frac{I_{pm}}{I_{km}} \quad (2.8)$$

Podemos então escrever:

$$I_{km} = a I_{pm} = -a I_{mk} \quad (2.9)$$

$$I_{mk} = y_{km}(E_m - a E_k) \quad (2.10)$$

$$I_{km} = (a^2 y_{km}) E_k + (-a y_{km}) E_m \quad (2.11)$$

$$I_{mk} = (-a y_{km}) E_k + (y_{km}) E_m \quad (2.12)$$

2.2.3. Transformador defasador

O modelo do transformador defasador é constituído pela sua razão de transformação complexa $1: ae^{j\varphi}$ conforme a Figura 3:

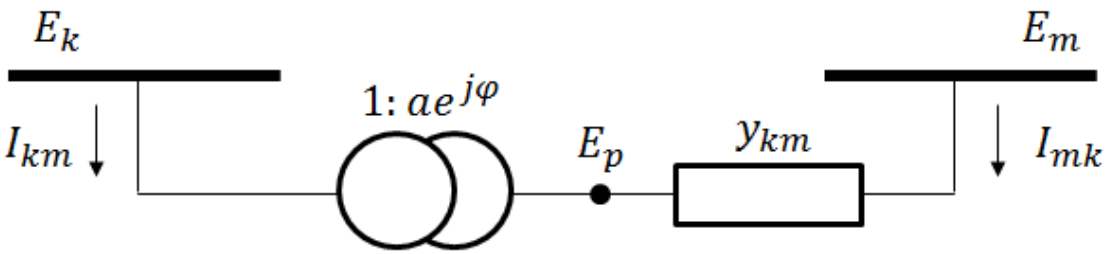

Figura 3 - Modelo do transformador defasador

Executando o mesmo procedimento do transformador em fase, mas utilizando a razão de transformação complexa $1: ae^{j\varphi}$ obtemos:

$$I_{km} = (a^2 y_{km})E_k + (-ae^{-j\varphi} y_{km})E_m \quad (2.13)$$

$$I_{mk} = (-ae^{j\varphi} y_{km})E_k + (y_{km})E_m \quad (2.14)$$

Nota-se que, ao contrário da linha de transmissão e do transformador em fase, o transformador defasador apresenta coeficientes diferentes para as tensões da barra para onde flui a corrente. Isso faz com que a matriz admitância que representa essas relações de corrente e tensão seja numericamente assimétrica.

2.2.4. Expressões Gerais de Correntes

As semelhanças entre as expressões de correntes em elementos internos nos permitem a seguinte generalização:

$$I_{km} = (a^2 y_{km})E_k + (-ae^{-j\varphi} y_{km})E_m \quad (2.15)$$

$$I_{mk} = (-ae^{j\varphi} y_{km})E_k + (y_{km})E_m \quad (2.16)$$

Essa expressão geral representa uma linha de transmissão quando a = 1 e φ = 0 ou um transformador em fase quando $a \neq 1$ e $\varphi = 0$. Caso $\varphi \neq 0$, trata-se de um transformador defasador.

2.2.5. Expressões Gerais dos Fluxos de Potência

Os fluxos de potência através de um elemento interno de rede podem ser deduzidos da seguinte maneira:

$$S_{km}^{*} = E_k^{*} I_{km} \tag{2.17}$$

$$S_{mk}^{*} = E_m^{*} I_{mk} \tag{2.18}$$

Substituindo (2.15) e (2.16) em (2.17) e (2.18) respectivamente e separando a parte real e a imaginária, temos:

$$P_{km} = (a_{km}V_k)^2 g_{km} - (a_{km}V_k)V_m(g_{km}\cos(\theta_{km}+\varphi_{km}) + b_{km}\sin(\theta_{km}+\varphi_{km})) \tag{2.19}$$

$$Q_{km} = -(a_{km}V_k)^2\left(b_{km}+b_{km}^{sh}\right) - (a_{km}V_k)V_m(g_{km}\sin(\theta_{km}+\varphi_{km}) - b_{km}\cos(\theta_{km}+\varphi_{km})) \tag{2.20}$$

$$P_{mk} = {V_m}^2 g_{km} - (a_{km}V_k)V_m(g_{km}\cos(\theta_{km}+\varphi_{km}) - b_{km}\sin(\theta_{km}+\varphi_{km})) \tag{2.21}$$

$$Q_{mk} = -V_m^2\left(b_{km}+b_{km}^{sh}\right) - (a_{km}V_k)V_m(g_{km}\sin(\theta_{km}+\varphi_{km}) + b_{km}\cos(\theta_{km}+\varphi_{km})) \tag{2.22}$$

Sendo**:**

$$\theta_{km} = \theta_k - \theta_m \tag{2.23}$$

2.3. Formulação Matricial

Através das expressões das correntes (2.15) e (2.16), pode se deduzir a expressão para a matriz admitância Y:

$$I = YE \tag{2.24}$$

$$Y_{km} = -a_{km}e^{-j\varphi_{km}}y_{km} \tag{2.25}$$

$$Y_{mk} = -a_{km}e^{j\varphi_{km}}y_{km} \tag{2.26}$$

$$Y_{kk} = jb_k^{sh} + \sum_{m\in\Omega_k}\left(jb_{km}^{sh} + a_{km}^2 y_{km}\right) \tag{2.27}$$

Onde Ω_k é o conjunto de barras conectadas à barra k e jb_k^{sh}é a susceptância associada a um elemento shunt conectado à barra k. Em geral a matriz admitância é esparsa, pois sempre que não há conexão entre os nós k e m, Y_{km} será nulo.

Podemos escrever a injeção de corrente na barra k da seguinte maneira

$$I_k = Y_{kk}E_k + \sum_{m\in\Omega_k} Y_{km}E_m = \sum_{m\in K} Y_{km}E_m \tag{2.28}$$

Sendo:

$$K = \Omega_k \cup \{k\} \tag{2.29}$$

Deduzimos a injeção de potência aparente através de (2.28):

$$S_k^* = E_k^* \left(\sum_{m \in K} Y_{km} E_m \right) = V_k \sum_{m \in K} V_m \, (G_{km} + jB_{km})(\cos\theta_{km} - j\sin\theta_{km}) \tag{2.30}$$

Onde:

$$Y = G + jB \tag{2.31}$$

Separando a parte real e a imaginária, temos as injeções de potência ativa e reativa associadas à barra k.

$$P_k = V_k \sum_{m \in K} V_m (G_{km} \cos\theta_{km} + B_{km} \sin\theta_{km}) \tag{2.32}$$

$$Q_k = V_k \sum_{m \in K} V_m (G_{km} \sin\theta_{km} - B_{km} \cos\theta_{km}) \tag{2.33}$$

2.4. Formulação do Problema do Fluxo de Carga

Através de (2.32) e (2.33) pode-se escrever as funções cujas raízes queremos encontrar através do método de Newton-Raphson:

$$\Delta P_k = P_k^{esp} - P_k(\theta, V) \tag{2.34}$$

$$\Delta Q_k = Q_k^{esp} - P_k(\theta, V) \tag{2.35}$$

Dessa forma, temos nPV + nPQ equações de potência ativa e nPQ equações de potência reativa, sendo nPV o número de barras PV e nPQ o número de barras PQ do SEP. Temos também, nPQ + nPV incógnitas associadas aos ângulos das tensões e nPQ incógnitas associadas às magnitudes das tensões.

Com um total de nPV + (2 x nPQ) equações e o mesmo número de incógnitas, podemos aplicar o método de Newton-Raphson para determinar os valores dos ângulos e magnitudes das tensões nodais desconhecidas. A parte do problema de se determinar V_k nas barras PQ e θ_k nas barras PV e PQ é aqui denominada subsistema 1.

Uma vez conhecidos os ângulos e tensões nodais, ou seja, o estado do sistema, torna-se trivial o cálculo das injeções de potência reativa das barras PV e da injeção de potência ativa da barra *Slack* através das equações (2.32) e (2.33). A essa parte do problema, dá-se o nome de subsistema 2.

2.4.1. Método de Newton-Raphson

O Método de Newton-Raphson é utilizado na resolução do subsistema 1. O algoritmo para resolução de um sistema n-dimensional composto por uma função vetorial $g(x) = 0$ é:

i) Escolha um vetor x inicial
ii) Calcule $g(x)$ e verifique se$|g_i(x)|$ é menor que o erro tolerável, para i=1,2,...,n. Se sim, o processo convergiu. Caso contrário, passe para (iii).
iii) Calcule $\Delta x = -J(x)^{-1}g(x)$, faça $x = x + \Delta x$ e volte ao passo (ii)

Onde J é a matriz jacobiana definida por:

$$J(x) = \begin{bmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial x_1} & \frac{\partial g_1}{\partial x_2} & \cdots & \frac{\partial g_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial g_2}{\partial x_1} & \frac{\partial g_2}{\partial x_2} & \cdots & \frac{\partial g_2}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial g_n}{\partial x_1} & \frac{\partial g_n}{\partial x_2} & \cdots & \frac{\partial g_n}{\partial x_n} \end{bmatrix}$$

Para implementar o método de Newton-Raphson, optou-se por formular o problema da seguinte maneira:

$$x = \begin{bmatrix} \theta_{PV} \\ \theta_{PQ} \\ V_{PQ} \end{bmatrix}, g = \begin{bmatrix} \Delta P_{PV} \\ \Delta P_{PQ} \\ \Delta Q_{PQ} \end{bmatrix}$$

Sendo θ_{PV} o vetor com os ângulos das barras PV, θ_{PQ}o vetor com os ângulos das barras PQ, V_{PQ} as magnitudes das tensões nas barras PV, ΔP_{PV} o vetor com os resíduos das injeções de potência ativa das barras PV, ΔP_{PQ} o vetor com os resíduos das injeções de potência ativa das barras PQ e ΔQ_{PQ} o vetor com os resíduos das injeções de potência ativa das barras PQ.

Reescrevemos a jacobiana:

$$J(x) = -\begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix} = -\begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \theta} & \frac{\partial P}{\partial V} \\ \frac{\partial Q}{\partial \theta} & \frac{\partial Q}{\partial V} \end{bmatrix}$$

Onde:

$$H_{km} = \frac{\partial P_k}{\partial \theta_m} = V_k V_m (G_{km} \sin\theta_{km} - B_{km} \cos\theta_{km}) \quad (2.36)$$

$$H_{kk} = \frac{\partial P_k}{\partial \theta_k} = -Q_k - V_k^2 B_{kk} \tag{2.37}$$

$$N_{km} = \frac{\partial P_k}{\partial V_m} = V_k(G_{km}\cos\theta_{km} + B_{km}\sin\theta_{km}) \tag{2.38}$$

$$N_{kk} = \frac{\partial P_k}{\partial V_k} = \frac{(P_k + V_k^2 G_{kk})}{V_k} \tag{2.39}$$

$$M_{km} = \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_m} = -V_k V_m(G_{km}\cos\theta_{km} + B_{km}\sin\theta_{km}) \tag{2.40}$$

$$M_{kk} = \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_k} = P_k - V_k^2 G_{kk} \tag{2.41}$$

$$L_{km} = \frac{\partial Q_k}{\partial V_m} = V_k(G_{km}\sin\theta_{km} - B_{km}\cos\theta_{km}) \tag{2.42}$$

$$L_{kk} = \frac{\partial Q_k}{\partial V_k} = \frac{Q_k - V_k^2 B_{kk}}{V_k} \tag{2.43}$$

2.4.2. Controles e Limites Reativos

Além das equações de fluxo de potência, diversos controles e limites estão presentes em um SEP. Alguns desses controles são: controle de tensão nas barras PV através da injeção de potência reativa, transformadores com controle automático de tap a fim de manter a tensão de uma determinada barra dentro de uma faixa de valores, defasadores com controle de fluxo de potência em uma linha e controle de intercâmbio de potência entre áreas. Além dos controles, temos limitações que implicam em mudanças nas equações do SEP. Por exemplo, uma barra PV que atinge seu limite de injeção reativa (seja o limite superior ou inferior) deverá tornar-se PQ e as equações que regem o sistema serão alteradas.

O programa de fluxo de carga desenvolvido contempla o controle de tensão em barras PV e a violação de limites de injeção de potência reativa nas mesmas. Para incluir essa limitação na resolução do fluxo de carga, a cada iteração do método de Newton-Raphson verifica-se se o limite de injeção de potência reativa de alguma barra PV foi violado. Em caso positivo, a barra torna-se PQ com injeção de potência reativa igual ao limite violado. As equações são então reformuladas, as dimensões do sistema ajustadas e o programa monitora a tensão na barra com o limite violado. Se em alguma iteração posterior, a tensão na barra com limite violado passar por seu valor especificado, a barra torna-se PV novamente com a magnitude de tensão original.

A Figura 4 ilustra o algoritmo utilizado para tratar violações de limites de injeção reativa. Durante a implementação, considerou-se verificar violações a cada duas ou três

iterações para aumentar a eficiência do programa. Esse procedimento, apesar de apresentar menor tempo de execução na maior parte dos casos, acabou divergindo em alguns casos cuja solução estava próxima da fronteira de segurança operativa do sistema.

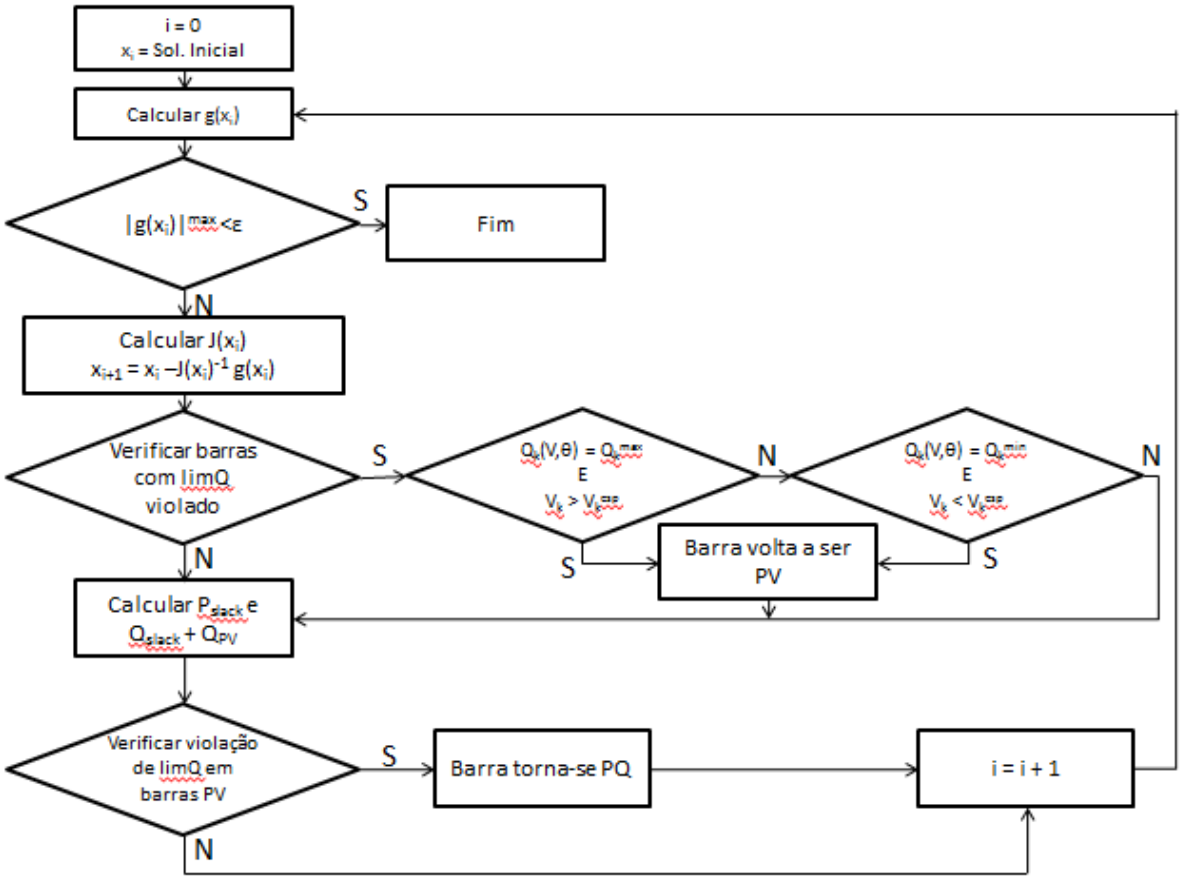

Figura 4 - Algoritmo do Fluxo de Carga pelo método de Newton-Raphson considerando limites de injeção de potência reativa

3. FLUXO DE CARGA CONTINUADO

Neste capítulo é apresentado o programa computacional implementado para a resolução do fluxo de carga através do método da continuação. Essa ferramenta visa verificar a possibilidade do sistema operar em diferentes despachos de geração, até que o sistema entre em colapso.

3.1. Introdução

Conforme mencionado previamente, o aumento das dimensões dos SEP, interligação de sistemas outrora isolados e a crescente demanda por energia elétrica aumentam a dificuldade de se operar o sistema e planejar sua expansão. Além disso, a necessidade de altos investimentos no sistema de transmissão faz com que este acabe operando próximo à sua capacidade máxima.

Conforme um SEP opera próximo de sua capacidade transmissão, a estabilidade de tensão ganha importância na avaliação de segurança do mesmo. Neste capítulo, conceitos básicos de estabilidade de tensão são apresentados, assim como a ferramenta computacional desenvolvida para avaliação de segurança de SEP.

3.2. Conceitos Básicos

Durante a operação, os SEP estão sujeitos a diversos tipos de perturbações. Para que se possa avaliar seu nível de segurança, diversas análises devem ser feitas para distúrbios específicos. Basicamente, as análises podem ser divididas em três grupos:

- Estabilidade Angular: Avalia a capacidade dos geradores de um SEP de manter sincronismo diante de uma perturbação que implique em um desbalanço entre torque elétrico e mecânico no rotor de geradores.
- Estabilidade de Frequência: Relacionada à capacidade de um SEP de manter sua freqüência nominal diante de variações de carga.
- Estabilidade de Tensão: Relacionada com a capacidade do sistema de prover potência reativa para manter a tensão no nível desejado.

Este trabalho situa-se no contexto de estabilidade de tensão, onde observamos o comportamento do sistema diante de variações lentas no despacho e na carga.

Variações lentas de carga e despacho são modeladas através da variação de um parâmetro do sistema. O parâmetro pode ser utilizado, por exemplo, para modelar incrementos de carga no sistema. Eventualmente, um incremento de carga pode fazer com que o ponto de equilíbrio estável em que o sistema operava torne-se instável (Bifurcação induzida por limites) ou então, desapareça (Bifurcação sela-nó). Essas mudanças qualitativas do comportamento dinâmico do sistema estão associadas à teoria de bifurcações [4], que podem ser locais ou globais.

O presente trabalho aborda os dois tipos de bifurcações locais mencionados previamente, no contexto de análise estática de SEP.

3.2.1. Bifurcação Sela-Nó

Na bifurcação sela-nó (BSN), a variação do parâmetro aproxima dois pontos de equilíbrio, que se encontram e desaparecem. Também com a variação do parâmetro, um autovalor da jacobiana sobre o ponto fixo estável se aproxima de zero, sendo originalmente negativo [4]. Frequentemente, no contexto de SEP, a BSN se dá quando o sistema atinge seu limite máximo de transferência de potência. Na atual modelagem do SEP, em que a magnitude de tensão não afeta a carga, a jacobiana sobre o ponto de máxima transferência de potência é singular.

Em sistemas em que as cargas são modeladas como injeções constantes, como é o caso deste trabalho, o ponto de BSN coincide com o ponto da máxima transferência de potência, que pode ser visualizado em uma curva PV típica.

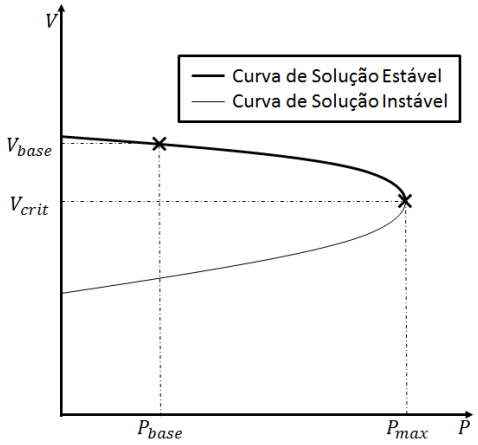

Figura 5 - Curva PV Típica

Neste trabalho, o ponto de BSN é um dos pontos utilizados para se determinar a fronteira da região de operação segura.

3.2.2. Bifurcação Induzida por Limites

Um segundo tipo de bifurcação encontrado em SEP é a bifurcação induzida por limites (BIL). Enquanto a BSN está relacionada ao limite de transmissão de potência do SEP, a BIL está ligada ao limite de geração de potência reativa de um ou mais geradores [4]. A BIL pode ocorrer durante um aumento de carga que implique na violação do limite de injeção de potência reativa de um gerador, fazendo com que um ponto de equilíbrio estável torne-se instável. A barra PV que modela o gerador é então feita PQ, adicionando uma equação e uma incógnita ao sistema. Então dois casos são possíveis:

- O sistema com as novas equações possui um ponto de equilíbrio estável próximo a solução anterior
- O sistema com as novas equações não possui ponto de equilíbrio estável e o colapso de tensão ocorre

A Figura 6 - Curvas PV: A esquerda o limite de reativo de um gerador é violado, mas o sistema continua estável. À direita o limite do gerador acaba causando uma BIL ilustra o primeiro caso, em que a violação de limites não implica em uma BIL e o segundo caso, em que a BIL ocorre antes da BSN.

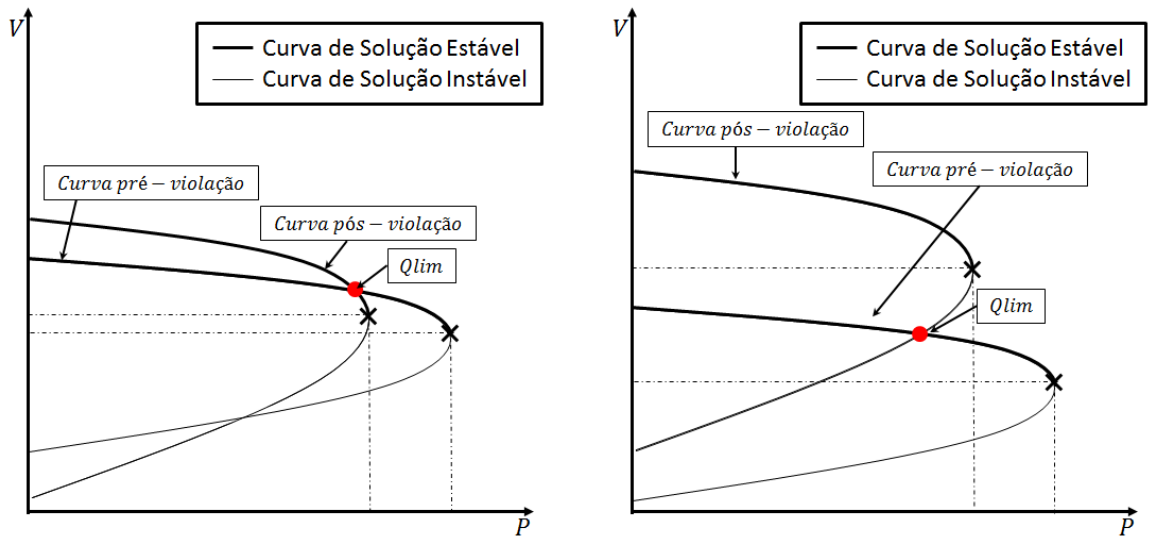

Figura 6 - Curvas PV: A esquerda o limite de reativo de um gerador é violado, mas o sistema continua estável. À direita o limite do gerador acaba causando uma BIL

3.3. Método da Continuação Aplicado ao Problema do Fluxo de Carga

Métodos continuados são ferramentas úteis para se gerar curvas de sistemas de equações algébricas não lineares com variação de parâmetros. A aplicação de métodos continuados nesse trabalho é focada na variação de despacho, enquanto sua aplicação mais comum é verificar o ponto de máximo carregamento do SEP dado uma direção de crescimento de carga.

A utilização de métodos continuados neste trabalho é motivada pela sua eficiência computacional, que é superior à execução de sucessivos fluxos de carga com variação de parâmetro. Além disso, o método implementado nesse trabalho é capaz de verificar o ponto de carregamento máximo, mesmo quando a jacobiana do método de Newton-Raphson convencional se apresentaria singular.

3.4. Modelagem

Pode-se representar um SEP através do seguinte modelo:

$$0 = f(x, \lambda) = f(x) - \lambda b \tag{3.1}$$

Em que x representa as variáveis de estado do sistema, b representa a direção da variação e λ representa o parâmetro de controle. No programa implementado, b é a direção da geração de potência ativa, carga ativa e reativa, mas para gerar nomogramas, varia-se

apenas a geração ativa. As equações dos resíduos de potência ativa das barras geradoras passam então a ser:

$$\Delta P_k = P_k^{base} + \lambda b_k - P_k(\theta, V) \tag{3.2}$$

Os SEP são sistemas dinâmicos que normalmente operam próximos a um ponto de equilíbrio estável. Conforme carga e geração variam, a posição do ponto de equilíbrio muda, mas o ponto de equilíbrio continua estável. A equação (3.1) modela tal situação especificando a posição do ponto de equilíbrio em função de λ.

Eventualmente, uma variação em λ pode fazer com que o ponto de equilíbrio desapareça ou então se torne instável. O desaparecimento do ponto de equilíbrio estável é dado quando um ponto de equilíbrio instável se aproxima do ponto de equilíbrio estável. Estes então coalescem e desaparecem [4].

Na sequência, são apresentados os principais elementos do programa implementado e então o método da continuação é descrito.

3.5. Parametrização

Para que se identifique a solução obtida previamente e a solução a ser calculada, pode-se empregar técnicas de parametrização. Abaixo, são apresentadas as três técnicas de parametrização consideradas para o desenvolvimento do software proposto.

3.5.1. Parametrização Física

Esse tipo de parametrização consiste em utilizar o fator de carregamento λ como parâmetro exclusivo. Dessa forma, a jacobiana, utilizada no corretor, é adicionada de uma linha e uma coluna, conforme a equação (3.3):

$$J_{aumentada} = \begin{bmatrix} & & & \frac{\partial g_1}{\partial \lambda} \\ & J_{original} & & \vdots \\ & & & \frac{\partial g_n}{\partial \lambda} \\ 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix} \tag{3.3}$$

Sendo

$$\frac{\partial g_k}{\partial \lambda} = \lambda b_k \tag{3.4}$$

A linha adicionada à jacobiana faz com que o sistema seja parametrizado por λ e faz com que o sistema aumentado seja determinado. A Figura 7 ilustra esse tipo de parametrização.

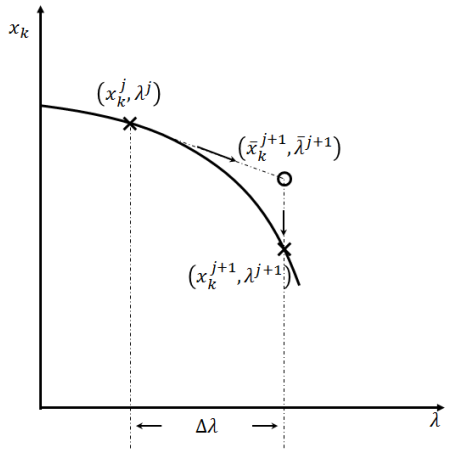

Figura 7- Representação gráfica da parametrização física

Sendo (x_k^j, λ^j) uma solução já conhecida, $(\bar{x}_k^{j+1}, \bar{\lambda}^{j+1})$ uma estimativa da próxima solução, (x_k^j, λ^{j+1}) a solução obtida a partir da correção da estimativa e Δx_k o tamanho da variação em x_k.

Apesar desse tipo de parametrização apresentar significado físico, ele apresenta dificuldades numéricas nas vizinhanças de um ponto de bifurcação sela-nó, onde a jacobiana original é singular. Um possível problema é a fixação de λ em um valor cuja solução não seja factível.

3.5.2. Parametrização Local

Qualquer componente do vetor de estados do sistema pode ser utilizado na parametrização local, inclusive λ. O valor da variação no parâmetro local é definido e o tamanho de passo deve ser adequado a essa variação.

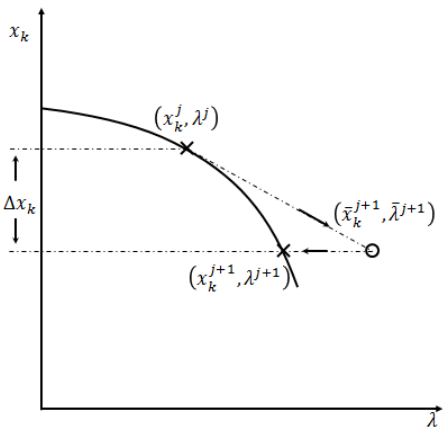

Figura 8 - Representação gráfica da parametrização local

A Figura 7 ilustra o caso da parametrização local em que o parâmetro escolhido está associado à λ, ou seja, a parametrização física. Na Figura 8 a parametrização local por uma determinada variável de estado x_k é representada.

3.5.3. Parametrização por Comprimento de Arco

Esse tipo de parametrização utiliza a distância entre duas soluções como parâmetro, nesse caso a variação no comprimento de arco é definido como:

$$\Delta s = \left(\sum_{i=1}^{n} (x_i - x_i(s))^2 + (\lambda - \lambda(s))^2 \right)^{1/2} \qquad (3.5)$$

Sendo x_i e λ associados à solução anterior, obtida pelo corretor e $x_i(s)$ e $\lambda(s)$ cujos valores iniciais são obtidos pelo preditor.

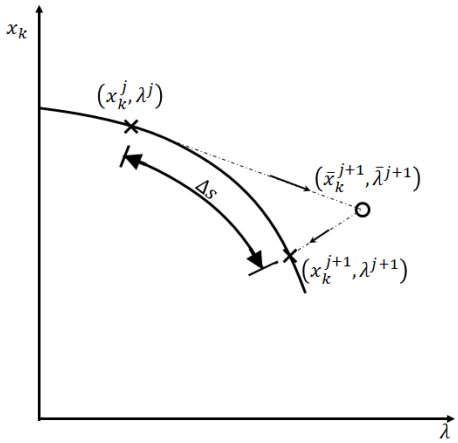

Figura 9 - Representação gráfica da parametrização por comprimento de arco

Na Figura 9 a estimativa é representada por $\left(\bar{x}_k^{j+1}, \bar{\lambda}^{j+1}\right)$, que é o valor inicial de $\left(x_i(s), \lambda(s)\right)$ durante o processo de correção. O tamanho de passo em s introduz a seguinte restrição:

$$\sum_{i=1}^{n}(x_i - x_i(s))^2 + (\lambda - \lambda(s))^2 - (\Delta s)^2 = 0 \qquad (3.6)$$

Então resolvemos o sistema de n+1 equações e n+1 incógnitas abaixo:

$$f(x, \lambda) = 0 \qquad (3.7)$$

$$\sum_{i=1}^{n}(x_i - x_i(s))^2 + (\lambda - \lambda(s))^2 - (\Delta s)^2 = 0 \qquad (3.8)$$

De acordo com [2], pode ser demonstrado que esse conjunto de equações é bem condicionado, mesmo no ponto de bifurcação sela-nó.

3.6. Preditores

A ferramenta desenvolvida utiliza dois preditores diferentes, assim como em [2]. A princípio, utiliza-se o preditor tangente, pois apenas a solução no caso base é conhecida. O preditor tangente exige o cálculo das derivadas de cada uma das variáveis de estado do sistema e λ em relação ao comprimento de arco, o que pode ser custoso computacionalmente. Para evitar esse cálculo e aumentar a eficiência computacional da ferramenta, uma vez que se tem conhecimento de pelo menos duas soluções, passa-se a utilizar o preditor pelo método da secante.

3.6.1. Método da Tangente

Como dito previamente, o método da tangente exige o cálculo de das derivadas das variáveis de estado e λ em relação ao comprimento de arco s. Diferenciando (3.7) em relação a s:

$$0 = f_x \frac{dx}{ds} + f_\lambda \frac{d\lambda}{ds} \qquad (3.9)$$

O que nos leva a um sistema linear de n equações e n+1 incógnitas:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \cdots & \frac{\partial f_1}{\partial x_k} & \cdots & \frac{\partial f_1}{\partial x_{n+1}} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \ddots & & \cdots & & \cdots \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \frac{\partial f_n}{\partial x_2} & \cdots & \frac{\partial f_n}{\partial x_k} & \cdots & \frac{\partial f_n}{\partial x_{n+1}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{dx_1}{ds} \\ \vdots \\ \frac{dx_k}{ds} \\ \vdots \\ \frac{dx_{n+1}}{ds} \end{bmatrix} = 0 = D_f \frac{dx}{ds} \qquad (3.10)$$

Sendo $1 \leq k \leq n+1$ e $\lambda = x_{n+1}$.

Para garantirmos que s seja o comprimento de arco na solução, precisamos da seguinte equação:

$$\left(\frac{dx_1}{ds}\right)^2 + \cdots + \left(\frac{dx_n}{ds}\right)^2 + \left(\frac{dx_{n+1}}{ds}\right)^2 = 1 \qquad (3.11)$$

As equações (3.9) e (3.11) formam um sistema de n+1 equações e n+1 incógnitas, em que (3.9) é um conjunto de equações lineares e (3.11) é não linear. Isso pode ser resolvido através do procedimento seguinte.

Suponha que:

$$\frac{dx_k}{ds} \neq 0 \qquad (3.12)$$

Para algum k entre 1 e n+1, e seja D_{f_k} a matriz D_f após a remoção da coluna k. Se D_{f_k} é não singular, então podemos resolver (3.9) na seguinte forma:

$$\frac{dx_i}{ds} = \beta_i \frac{dx_k}{ds} \quad i \neq k, i = 1, \dots, n+1 \qquad (3.13)$$

Os coeficientes β_i podem ser obtidos através do método da eliminação de Gauss executado na matriz D_{f_k}. Substituindo (3.13) em (3.11), se obtém:

$$\left(\frac{dx_k}{ds}\right)^2 = \left(1 + \sum_{i=1, i\neq k}^{n+1} \beta_i^2\right)^{-1} \qquad (3.14)$$

As equações (3.13) e (3.14) expressam as derivadas da curva $x(\lambda)$ passando pelo j-ésimo ponto (x^j, λ^j) em relação ao comprimento de arco s. O passo preditor pode então ser expressado através de (3.15) onde h é o tamanho do passo:

$$\hat{x}_i^{j+1} = x_i^{j+1} + h\frac{dx_i}{ds}, \qquad i = 1, \dots, n+1 \qquad (3.15)$$

Note que esse passo preditor implica no cálculo dos coeficientes β_i, o que torna o método computacionalmente custoso. Isso sugere a utilização de um método mais eficiente, uma vez que temos duas soluções conhecidas.

3.6.2. Método da Secante

O método da secante utiliza uma reta passando pela solução atual e pela anterior para estimar a próxima solução:

$$\left(\bar{x}^{i+1}, \bar{\lambda}^{i+1}\right) = (x^i, \lambda^i) + h(x^i - x^{i-1}, \lambda^i - \lambda^{i-1}) \qquad (3.16)$$

Sendo que h é o tamanho de passo. A escolha do preditor pelo método da secante é baseada no seu baixo custo computacional. O processo é ilustrado na Figura 10.

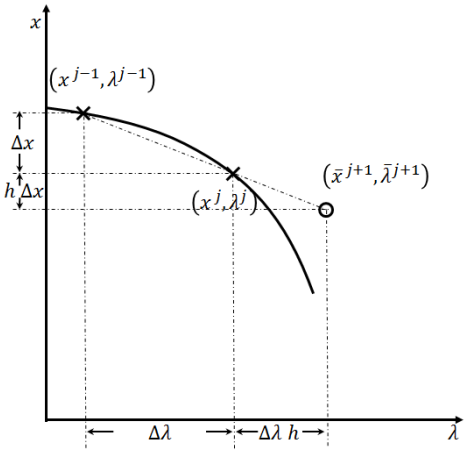

Figura 10 - Método das Secantes

Depois de se obter a primeira solução através da correção da previsão do método da tangente, o preditor utilizado passa a ser o que executa o método da secante, evitando o cálculo das derivadas das variáveis de estado em relação ao comprimento de arco.

3.7. Corretor

O corretor utilizado é o próprio método de Newton-Raphson mencionado previamente, que é de ordem cúbica e pode ser ineficiente se a condição inicial está afastada da solução. Apesar da possibilidade de se utilizar outros métodos numéricos para a resolução de sistemas de equações algébricas não lineares, o método de Newton-Raphson apresenta bons resultados de convergência enquanto o preditor executar boas estimativas.

Note que, o método de Newton-Raphson utilizado no método da continuação com parametrização por comprimento de arco resolve (3.7) e (3.8), apresentando a seguinte jacobiana aumentada:

$$J_{aumentada} = \begin{bmatrix} & & & \frac{\partial g_1}{\partial \lambda} \\ & J_{original} & & \vdots \\ & & & \frac{\partial g_n}{\partial \lambda} \\ \frac{\partial(\Delta x^2)}{\partial x_1(s)} & \frac{\partial(\Delta x^2)}{\partial x_2(s)} & \cdots & \frac{\partial(\Delta x^2)}{\partial x_{n+1}(s)} \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

Sendo que:

$$x_{n+1} = \lambda \quad (3.18)$$

$$\frac{\partial g_k}{\partial \lambda} = \lambda b_k \quad (3.19)$$

$$\frac{\partial(\Delta x)^2}{\partial x_k(s)} = \frac{\partial(x_k - x_k(s))^2}{\partial x_k(s)} = 2(x_i - x_i(s)) \quad (3.20)$$

3.8. Controle de Tamanho de Passo

A escolha do tamanho de passo deve procurar um equilíbrio entre eficiência computacional e robustez. Para passos muito grandes, o corretor requer um maior número de iterações ou, em casos extremos, a convergência pode não ser atingida. Já a escolha de um passo pequeno, apesar de apresentar mais robustez e segurança, pode tornar o método continuado lento.

É interessante fazer com que o passo seja maior no trecho em que as variáveis de estado se apresentam pouco sensíveis a variações no parâmetro e menor conforme essas sensibilidades aumentam. Apesar disso, no programa implementado desconhecemos estas sensibilidades e isso dificulta a tarefa de controle de tamanho de passo.

A ferramenta desenvolvida executa o cálculo do comprimento de arco no espaço de estados, fazendo com que passos maiores sejam tomados nos trechos menos sensíveis da solução e passos menores nos trechos com maior variação dos estados em relação ao comprimento de arco. Em situações que grandes variações no despacho implicam em pequenas variações no estado do sistema, a variação no despacho é grande, se aproximando do comprimento de arco especificado. Já quando as variáveis de estado se apresentam mais sensíveis a uma variação no despacho, estas contribuem para que a variação no despacho seja menor em relação ao comprimento de arco. O tamanho de passo utilizado nos dois preditores procura se aproximar do comprimento do arco.

3.9. Algoritmo

Apresenta-se, na sequência, o algoritmo implementado do fluxo de carga continuado.

i) Entrada de dados, incluindo vetor b para direcionar a variação do despacho

ii) Verifica a solução no caso base através do Newton-Raphson convencional

iii) Preditor tangente: Calcula $\frac{dx}{ds}$, calcula o tamanho de passo e calcula a estimativa

iv) Corretor: Resolve o sistema aumentado partindo do ponto obtido pelo preditor tangente

v) Preditor secante: calcula próxima estimativa

vi) Se λ estimado for maior que λ anterior, volte ao passo iv. Caso contrário, fim do algoritmo

4. NOMOGRAMAS

Como mencionado previamente, nomogramas são utilizados para se obter uma análise visual para estudos de planejamento da expansão do sistema, ilustrando possíveis pontos de operação do sistema ao se considerar determinadas restrições e condições de carregamento.

Neste capítulo são demonstradas as técnicas desenvolvidas para a construção de nomogramas. A princípio, a metodologia do redespacho é explicada, a construção de nomogramas pelo método ponto a ponto é apresentada, seguida da construção pelo método do fluxo de carga continuado. Finalmente, fala-se sobre a paralelização dos métodos desenvolvidos.

4.1. Redespacho de Geração

Para obtermos uma representação gráfica em duas dimensões, precisamos separar os geradores de um SEP em três grupos. Dessa maneira, controla-se o despacho dos três grupos, respeitando a equação (1.1). Na Figura 11, a geração do terceiro grupo é omitida e o processo construtivo de uma das direções de um nomograma é ilustrado.

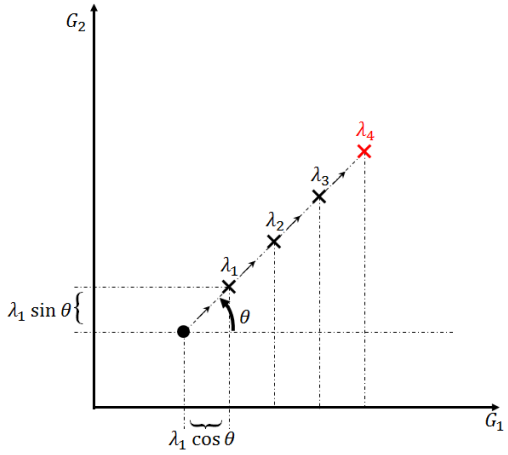

Figura 11 - Construção de um Nomograma

Dentro de cada grupo, cada barra de geração possui um fator de participação representado por f_{b_i}, em que b_i representa a barra i. Na atual implementação, f_{b_i}tem seu valor igual à potência gerada pela barra no caso base. O grupo, como um todo, possui um fator de participação que, a princípio, é igual à somatória dos fatores de participação de

cada barra. O objetivo desta formulação é manipular a geração de um grupo proporcionalmente entre as barras de geração. Dessa forma, temos:

$$F_k = \alpha_k \sum_{b_i \in G_k} f_{b_i} \tag{4.1}$$

$$P_{b_i}^{ger} = f_{b_i}(1 + \lambda \alpha_k) \tag{4.2}$$

Em que F_ké o fator de participação do grupo k, α_k é o fator de correção do grupo k, G_k representa o grupo k, $P_{b_i}^{ger}$ é a geração da barra i e λ é o parâmetro utilizado para variar o despacho uma vez que a direção foi determinada. Inicialmente, o valor de α_k é unitário. Se variamos F_k, corrigimos α_k para manter a equação (4.1) verdadeira, alterando o resultado de (4.2), que expressa a geração da barra i.

Assim, a geração em cada grupo passa a ser dada por:

$$P_k = P_k^{base} + \lambda F_k \tag{4.3}$$

$$P_k^{base} = \sum_{b_i \in G_k} f_{b_i} \tag{4.4}$$

Dessa forma, reescrevemos (3.2) em função de α_k e f_{b_i}:

$$\Delta P_i = f_{b_i} + \lambda \alpha_k f_{b_i} - P_i(V, \theta) \tag{4.5}$$

Sendo que a barra i é uma barra de geração pertencente ao grupo k. O vetor b, presente em (3.2), pode então ter seus elementos expressos por:

$$b_k = \alpha_k f_{b_i} \tag{4.6}$$

Sendo que os elementos de b_k que correspondem aos resíduos de potência ativa e reativa de barras fora dos grupos são nulos.

Para determinar a direção da variação do despacho, basta atribuir valores aos fatores de participação dos grupos, o que implica na atualização do fator de correção dos respectivos grupos, que consequentemente ajusta os valores dos elementos de b. O programa desenvolvido utiliza esta formulação para configurar o despacho em cada ponto do nomograma.

4.2. Nomogramas ponto a ponto

O processo de construção de nomogramas pelo método ponto a ponto, consiste em resolver fluxos de carga sucessivos, com diferentes despachos. A princípio, especifica-se

um valor para o ângulo θ, ilustrado na Figura 11. Os fatores de participação de cada grupo são então colocados em função de θ. O primeiro grupo tem seu fator igual ao coseno de θ, o segundo igual ao seno e o terceiro igual ao complemento da soma dos outros fatores de participação. Passa-se a incrementar λ e verificar a convergência do método de Newton-Raphson no novo ponto de operação. Esse procedimento é realizado até que a solução não seja encontrada para um determinado valor de λ.

Esse processo é realizado para diferentes valores de θ, a fim de se obter retas radiais partindo do caso base até o primeiro ponto que o fluxo de carga deixe de convergir.

Uma grande desvantagem desse método, é que a não convergência do método de Newton-Raphson não garante que a fronteira tenha sido encontrada. A divergência pode ser conseqüência de um incremento muito grande em λ, especialmente quando o sistema opera próximo à fronteira.

Além disso, o método utiliza uma solução prévia do fluxo de carga como condição inicial para a resolução do próximo ponto. A ausência de um preditor apropriado implica em um maior número de iterações necessárias, o que diminui a eficiência computacional do método.

A Figura 12 ilustra o algoritmo descrito baseando-se na estratégia de redespacho enunciada previamente.

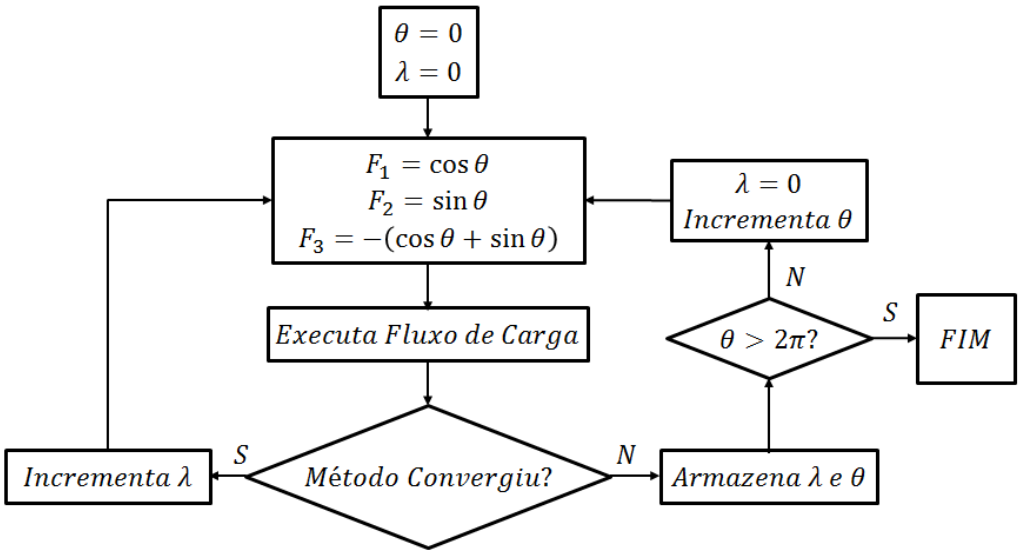

Figura 12 - Algoritmo do método ponto a ponto

4.3. Nomogramas com Método da Continuação

Através do método da continuação pode-se determinar, de maneira mais precisa, a fronteira da região de operação segura do sistema. A construção de nomogramas através do método da continuação é muito semelhante ao método ponto a ponto, mas o critério de parada é diferente, já que o método continuado passa pelo ponto de BSN sem apresentar problemas de convergência.

A construção de nomogramas com o fluxo de carga continuado consiste em executar o método continuado com diversas direções de crescimento, ou seja, com diferentes conjuntos de valores para b. O vetor b é derivado da estratégia de redespacho apresentada no início deste capítulo. O critério de parada para uma dada direção se baseia na comparação entre o valor estimado $\hat{\lambda}$ e o valor de λ da última solução obtida pelo método de Newton-Raphson. A Figura 13 ilustra o algoritmo do método continuado para a construção de nomogramas.

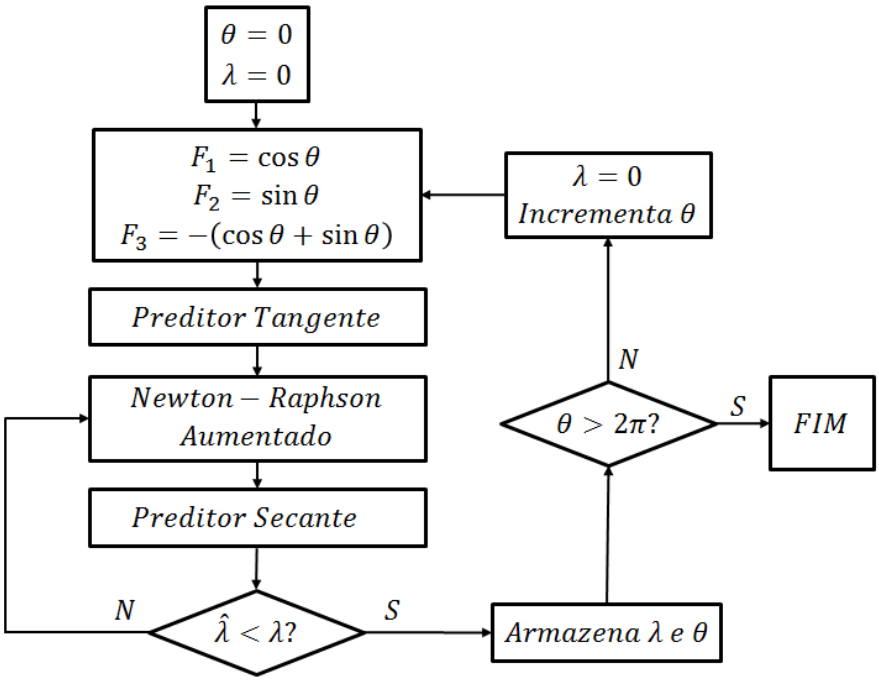

Figura 13 - Fluxograma do método continuado aplicado à construção de nomogramas

O controle do tamanho de passo é realizado nos preditores. Pode-se verificar que tanto para o método ponto a ponto, quanto para o continuado, não há dependência de informação entre os cálculos executados em diferentes direções. Esse fato indica uma maneira simples de se paralelizar o programa implementado, sem necessidade de grandes modificações na ferramenta desenvolvida.

5. PARALELIZAÇÃO

Tradicionalmente, o desenvolvimento de software é dado de maneira sequencial, ou seja, um programa é constituído de uma sequência de instruções que são executadas em determinada ordem. Limitações de *hardware* na capacidade de processamento aliadas à necessidade de se resolver problemas complexos motivaram a utilização de técnicas de paralelização capazes de superar essas limitações. A princípio, apenas supercomputadores de alta performance eram capazes de executar cálculos concorrentemente, mas atualmente diversos dispositivos, incluindo computadores pessoais, possuem mais de um núcleo de processamento e portanto, são capazes de executar programas concorrentemente.

SEP apresentam elevada complexidade e suas análises frequentemente estão atreladas a altos custos computacionais, assim como a ferramenta desenvolvida neste trabalho de conclusão de curso. Dessa forma, uma maneira de se reduzir o tempo necessário para a execução das análises é através da aplicação de técnicas de programação paralela.

5.1. Arquiteturas

De acordo com a taxonomia de Flynn, quatro classes de arquitetura de computadores podem ser definidas:

- ***Single Instruction Single Data:*** Um único fluxo de instruções executado sobre um único conjunto de dados, esse caso corresponde à arquitetura sequencial.
- ***Single Instruction Multiple Data***: Um único fluxo de instruções executado sobre mais de um conjunto de dados, arquitetura amplamente utilizada em *graphical processing units* (GPU).
- ***Multiple Instruction Single Data:*** Múltiplo fluxo de instruções executado sobre um único conjunto de dados. Essa arquitetura pode ser exemplificada através da aplicação de diversos filtros sobre o mesmo sinal.
- ***Multiple Instruction Multiple Data:*** Múltiplo fluxo de instruções executado sobre múltiplos conjuntos de dados. Arquitetura típica de computadores com múltiplos processadores compartilhando memória e operando de maneira assíncrona. Esta é a arquitetura do hardware empregada na execução do programa aqui desenvolvido, com um processador Intel® Core™ i7-2670QM de oito núcleos em 2.2GHz.

5.2. Escolha do *Software*

A ferramenta desenvolvida nesse trabalho foi implementada em C++ com o compilador GCC 4.7 (GNU *Compiler Collection*). Diversas bibliotecas e interfaces de computação paralela estão disponíveis para C++ e nesse trabalho utilizou-se a biblioteca *OpenMP® Application Programming Interface* (API) [5]. A escolha do *OpenMP* foi baseada em conhecimentos prévios sobre a API e sua possibilidade de integração com outra biblioteca conhecida, a *Message Passing Interface* (MPI), que permite a execução concorrente de uma rede de computadores, o que possibilitaria um grande poder de processamento para trabalhos futuros.

Ao se executar um programa, o sistema operacional cria um processo, que pode conter uma ou mais *threads*. Um *thread* é um conjunto de instruções programadas associadas a um processo, uma porção de memória e acesso a alguns recursos computacionais. *Threads* podem compartilhar memória assim como informações sobre o estado do processo que as contém.

Pode-se, sem grandes dificuldades, executar mais de uma instância do mesmo programa sequencial simultaneamente, fazendo com que cada processador execute um processo. A principal desvantagem desse método é a falta de uma memória compartilhada entre os processos para realizar tarefas que precisam trocar informações entre si.

Através do *OpenMP* pode-se explicitar trechos de código fonte que devem ser executados de maneira concorrente, dentro do mesmo processo mas em diferentes *threads*. A API é constituída de diretivas do compilador, funções de *runtime* e variáveis.

- **Diretivas do compilador:** Usadas para explicitar como e quais trechos de código devem ser executados de maneira concorrente.
- **Funções de *runtime*:** Fornecem diversas informações durante a execução do programa. Também podem mudar o valor de variáveis e substituir funções que necessitam de cuidados especiais quando executadas em paralelo, como as funções que retornam o tempo de execução de trechos de código
- **Variáveis:** Mais conhecidas como *environment variables*, são usadas para configurar e obter informações sobre a execução do programa, podem ser acessadas diretamente ou através de funções.

5.3. Implementação

Durante o desenvolvimento do programa, planejou-se que este deveria ser de fácil implementação paralela. Optou-se por realizar a execução de cada direção em paralelo, já que o cálculo de uma direção independe do cálculo de outra. A Figura 14 apresenta um fluxograma descritivo da execução da ferramenta implementada. O bloco "Entrada de Dados" representa a leitura do arquivo PWF e do número natural n que representa a quantidade de segmentos de reta que serão traçados.

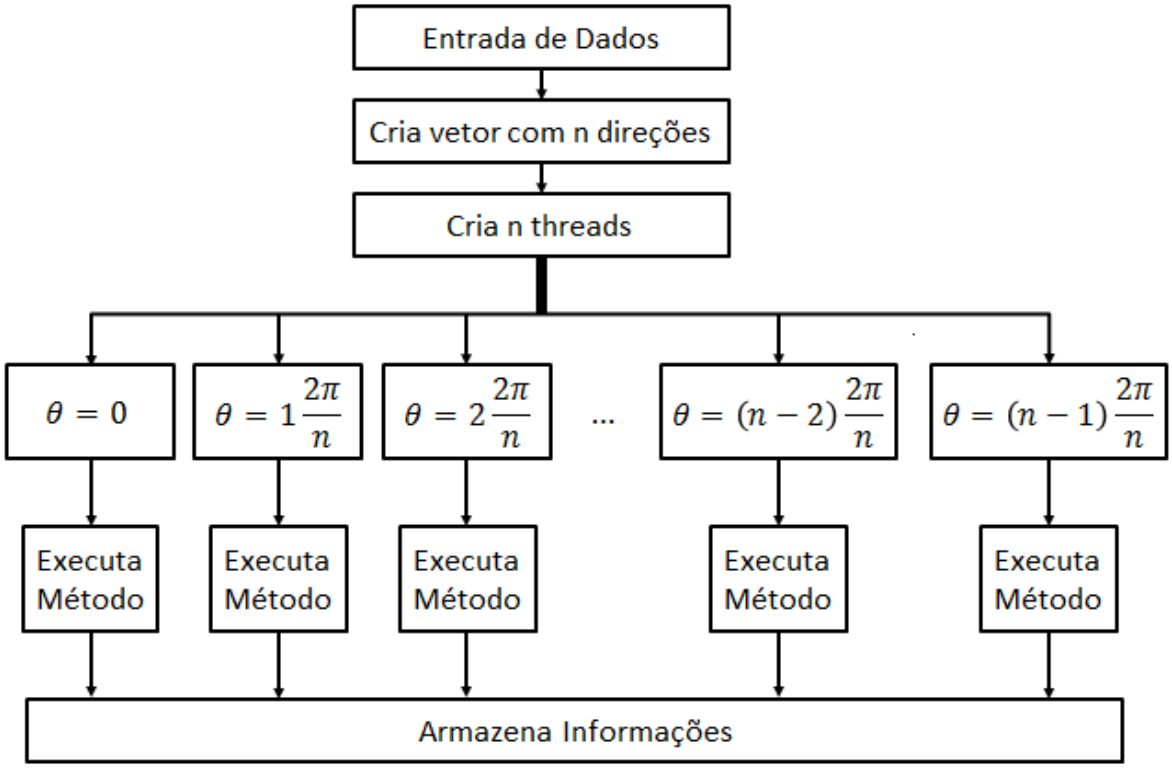

Figura 14 - Fluxograma da execução concorrente do programa desenvolvido

Infelizmente, alguns segmentos de reta estão associadas a um custo computacional muito mais elevado que outros, fazendo com que a redução no tempo de execução seja menor. Como isso não é previsto, pode ser interessante traçar um número de retas menor do que o número de núcleos de processamento disponíveis, a fim de reduzir o tempo ocioso, deixando que os processadores com os traçados mais rápidos possam executar mais de uma direção, enquanto outros núcleos estão lidando com uma alta carga computacional proveniente de um único segmento de reta.

6. RESULTADOS

Os resultados apresentados neste capítulo foram obtidos através da aplicação da ferramenta desenvolvida ao sistema teste de 39 barras New England, fornecido como exemplo pelo software ANAREDE.

Os testes foram feitos com um processador Intel® Core™ i7-2670QM que opera com oito núcleos em 2.2GHz. Os gráficos foram obtidos através do software GNUPlot versão 4.4.

6.1. Curvas λV

Na sequência, são apresentados resultados obtidos com o método continuado. A Figura 15 ilustra a violação do limite de injeção reativa da barra de geração 30 e o comportamento das barras 3 e 7. Na solução seguinte ao ponto de violação da barra 30, há a violação do limite de outra barra de geração, a barra 31, aumentando a sensibilidade da barra 30 a incrementos em λ.

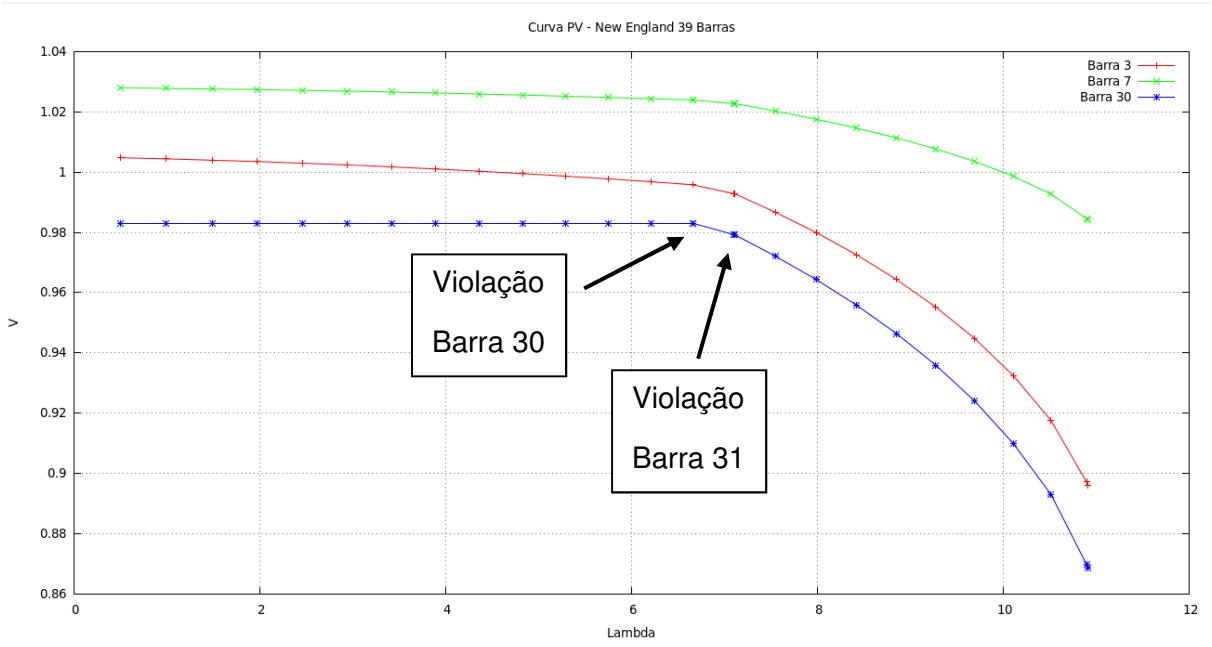

Figura 15 - Curva λV indicando violação de limite reativo da barra de geração 30

A seguir um traçado semelhante é apresentado, mas indicando as respectivas estimativas e correções, sem considerar limites reativos. Os resultados apresentam-se na Figura 16. Verifica-se que o método continuado passa pelo ponto de BSN sem grandes dificuldades.

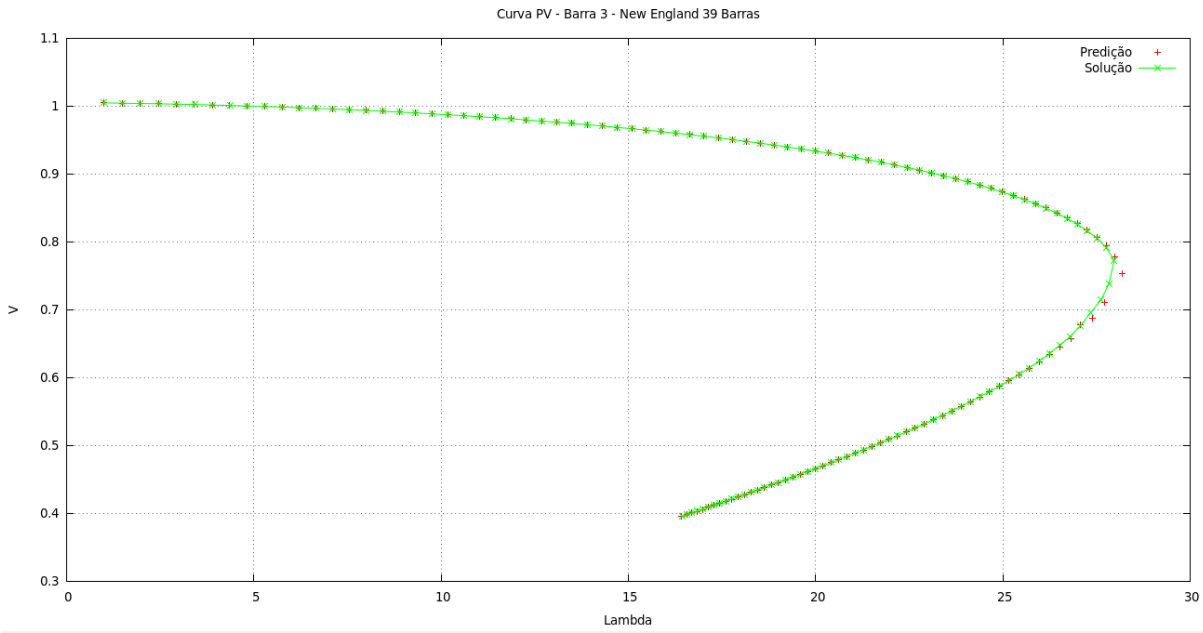

Figura 16 - Curva λV com indicação de previsão e correção sem considerar limites reativos.

. A mesma metodologia foi aplicada considerando violações de limites de injeção reativa. Os resultados são apresentados na Figura 17.

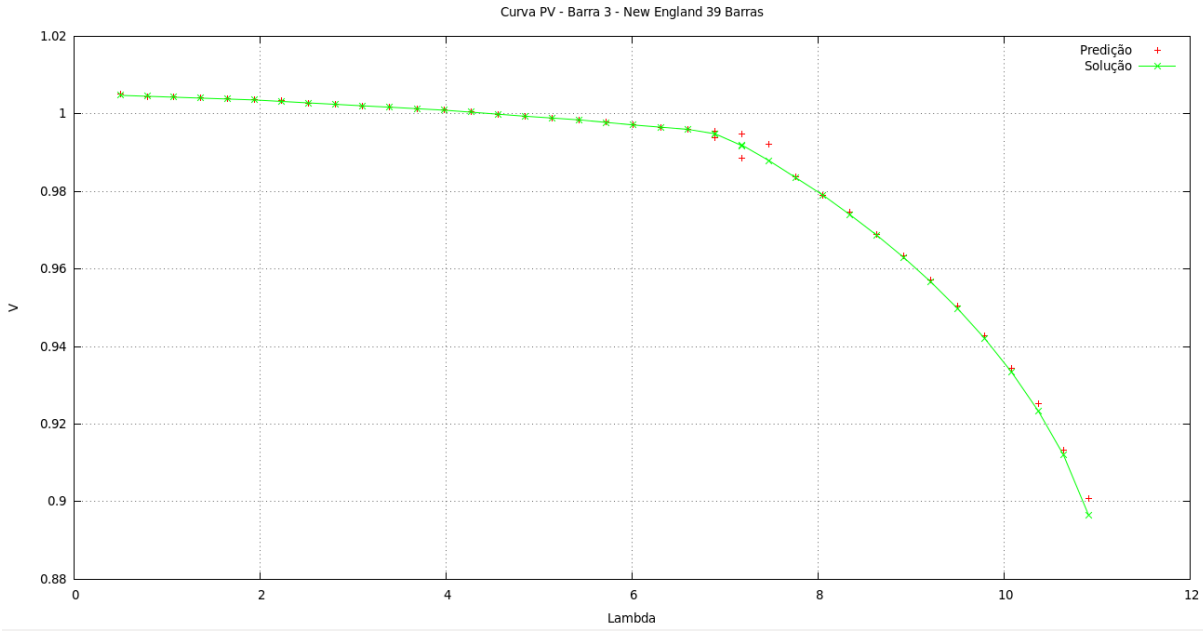

Figura 17 - Curva λV com indicação de previsão e correção considerando limites reativos

A região onde o preditor apresenta resultados mais afastados da curva de solução é onde as duas violações de limites reativos acontecem, das barras 30 e 31. Ainda assim, o método é capaz de voltar a apresentar bons resultados de predição. Esse comportamento é consequência da metodologia utilizada para se tratar violações de limites reativos.

6.2. Nomogramas

Para a construção dos nomogramas, os grupos foram separados por área, pode-se visualizar a área no arquivo PWF sob o campo “Are” no código de execução DBAR. Além disso, os únicos controles e limites considerados foram o controle de tensão em barras PV e seus respectivos limites de injeção de potência reativa. A Tabela 1 apresenta os grupos, seus elementos e o despacho dos grupos no caso base. Note que a barra 39, a Slack, não foi incluída em nenhum grupo.

Tabela 1 – Distribuição de barras de geração em grupos

Grupo	Barra	Potência [MW]	Potência [MW]
Grupo 1	30	250	1473,2
	31	573,2	
	32	650	
Grupo 2	33	632	1790
	34	508	
	35	650	
Grupo 3	36	560	1930
	37	540	
	38	830	

Os nomogramas foram construídos com 16 segmentos de reta e os valores da potência injetada estão em p.u.(100MW). Nos casos que BIL foram consideradas, sua detecção é dada através da não convergência do método. No caso de BSN, o critério de parada é baseado na comparação entre o valor de $\hat{\lambda}$ e λ. Caso o valor estimado seja menor que o valor da última solução, o método termina.

Primeiramente, uma análise sobre a influência de limites reativos sobre a região de convergência é apresentada na Figura 18. Verifica-se que a consideração de limites reativos modifica significativamente os resultados obtidos, reduzindo a região de convergência do método. Apesar disso, as duas regiões calculadas apresentam forma semelhante.

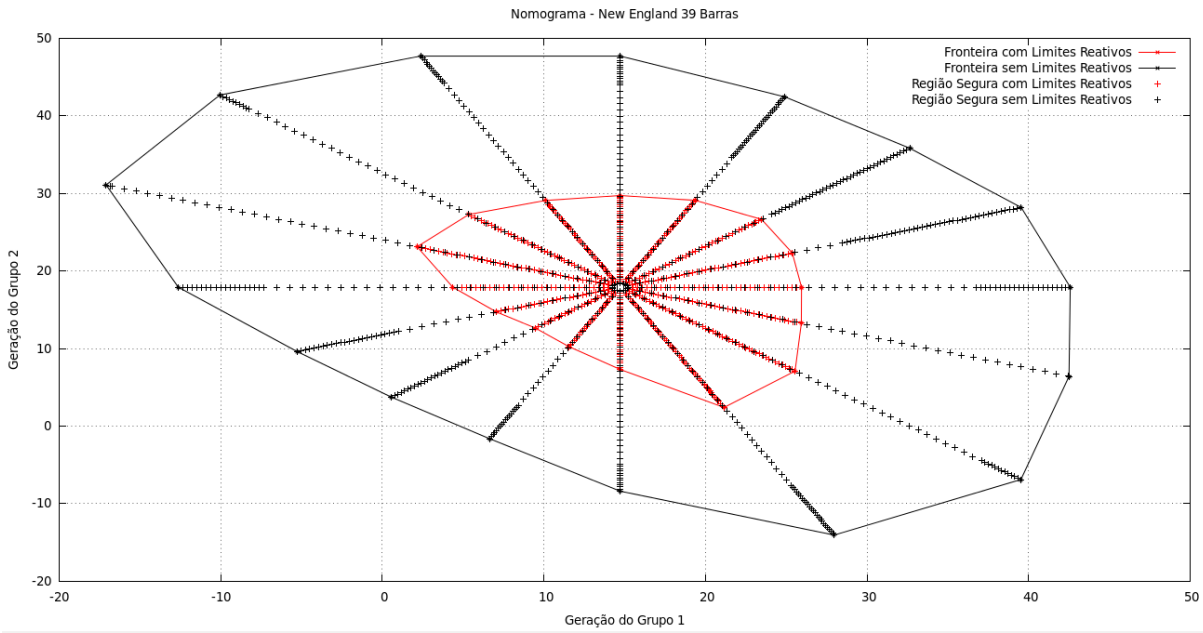

Figura 18 - Comparação de Nomogramas construídos através do método continuado com ou sem consideração de limites de injeção reativa

Outra comparação realizada foi entre o nomograma obtido com o método continuado e o obtido com o método ponto a ponto. A superposição dos nomogramas é apresentada na Figura 19.

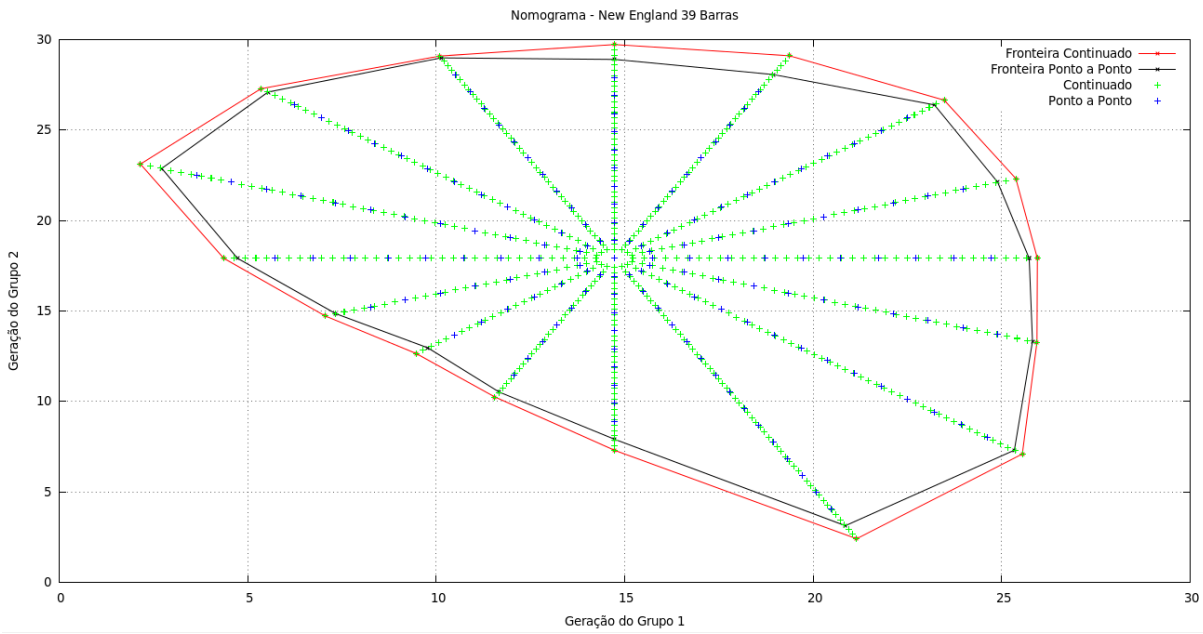

Figura 19 - Comparação entre resultados obtidos com o método ponto a ponto e o método continuado.

Observa-se que o método ponto a ponto obteve resultados mais conservadores, devido ao tamanho do incremento em λ, que foi de 1p.u.(o que implica em uma variação de potência de 100MW).

Acredita-se que o método continuado obteve resultados mais precisos, uma vez que os resultados obtidos em curvas PV indicaram que o método calcula soluções próximas ao ponto de BSN sem grandes dificuldades.

A Tabela 2 apresenta os respectivos tempos de execução dos métodos utilizados para a construção de nomogramas.

Tabela 2 - Comparação entre tempos de execução sequencial e paralela dos métodos ponto a ponto e continuado, em segundos.

Execução Sequencial		Execução Paralela	
Continuado	Ponto a Ponto	Continuado	Ponto a Ponto
16,3 s	8,4 s	10,6 s	5,3 s

Evidencia-se que a paralelização foi capaz de reduzir o tempo de execução para 35% do tempo sequencial. Isso está associado principalmente a um único traçado que requer mais esforço computacional, devido principalmente ao número de soluções necessárias. Além disso, a paralelização do programa implica em um determinado *overhead*, que diminui a eficiência do método.

7. CONCLUSÕES

Neste trabalho foram aplicadas técnicas de resolução de fluxo de carga pelo método de Newton-Raphson e pelo método da continuação para a construção de nomogramas. Além disso, técnicas de computação paralela foram utilizadas para diminuir o esforço computacional necessário para a construção dos nomogramas.

Os nomogramas obtidos com o método ponto a ponto acabaram sendo conservadores, pois muitas vezes, divergem devido ao tamanho do passo dado em direção à fronteira da região segura. Já os nomogramas construídos via o método continuado apresentaram resultados mais precisos, mas tempos de execução maiores.

As técnicas de computação paralela implementadas possibilitaram um tempo de execução aproximadamente 3 vezes menor do que a implementação sequencial. Isso ainda pode ser melhorado através da utilização de um maior número de processadores.

7.1. Trabalhos Futuros

Futuramente, considera-se implementar a construção de nomogramas baseada na metodologia desenvolvida em [5], que a partir de duas soluções é capaz de prever a BSN de um SEP. Uma vez encontrado um ponto da fronteira da região segura, pode-se tratar θ como um parâmetro adicional e então resolver um sistema aumentado, utilizando o autovetor da jacobiana associado a um autovalor nulo no ponto de BSN. Além disso, pretende-se estudar métodos para previsão de BIL e sua utilização na construção de nomogramas.

Quanto à execução concorrente, pretende-se considerar novas abordagens de paralelização, com foco em tarefas menores para que se evite o ócio nos processadores. Além disso, a utilização de redes de computadores com MPI pode reduzir o tempo da análise significativamente.

BIBLIOGRAFIA

[1] QUADROS, M. A., et al. Aplicação da avaliação dinâmica e estática do SIN nos centros de operação do ONS. São Paulo: EDAO, 2008.

[2] CHIANG, H.-D.; et al. 1995. CPFLOW: A Practical Tool for Tracing Power System Steady State Stationary Behavior Due to Load and Generation Variations. New York: IEEE transactions on Power Systems, 1995. V. 10, n. 2, p. 623,634

[3] MONTICELLI, A., 1983. Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica. S.1, : Edgar Blucher, 1983

[4] SALIM, K. C. de O., Metodologia de Avaliação de Margem de Estabilidade Devido a Bifurcações em Sistemas Elétricos de Potência. 2012. 190 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica e Área de Concentração em Sistemas Elétricos de Potência) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2012.

[5] OPENMP ARB. Disponível em: www.openmp.org. Acesso em: 7 de dezembro de 2013

[6] CHIANG, H.-D., et al. Look-ahead Voltage and Load Margin Contingency Selection Functions for Large-Scale Power Systems. IEEE Transactions on Power Systems, Piscataway, NJ, v.12, n.1, fevereiro 1997.

APÊNDICE

Neste apêndice é apresentado o arquivo PWF com as configurações do sistema teste. Note que as áreas das barras estão associadas com seus respectivos grupos, nos nomogramas.

```
TITU
Sistema Teste - New England
DCTE
(Mn) ( Val) (Mn) ( Val) (Mn) ( Val) (Mn) ( Val) (Mn) ( Val) (Mn) ( Val)
BASE   100. DASE   100. TEPA     .1 EXST     .4 TETP     .5 TBPA     5.
TLPP     1. TEPR     .1 QLST     .4 TLPR     1. TLPQ     2. TSBZ    .01
TSBA     5. ASTP    .05 VSTP     .1 TLVC     .5 TLTC     .1 TSFR    .01
ZMAX   500. TLPV     .5 VDVM   150. VDVN    50. TUDC    .01 TADC    .01
PGER    30. TPST     .1 VFLD    70. ZMIN    .01 HIST    470 LFIT     10
ACIT     90 LFCV      1 DCIT     10 VSIT     10 LPIT     20 LFLP      5
PDIT      1 LCRT     24 LPRT     60 CSTP   500.
ICIT     30 DMAX      5 FDIV     2. ICMN    .05 VART     5. TSTP     32
ICMV     .5 APAS    90. CPAR    70. VAVT     2. VAVF     5. VMVF    15.
VPVT     2. VPVF     5. VPMF    10. VSVF    20. VINF     1. VSUP     1.
99999
DBAR
(Num)OETGb(    nome    )Gl( V)( A)( Pg)( Qg)( Qn)( Qm)(Bc  )( Pl)( Ql)( Sh)Are(Vf)
    1 L    BARRA-001     1048-9.5                                          41000
    2 L    BARRA-002     1049-6.9                                          41000
    3 L    BARRA-003     1031-9.8                          322.   2.4      41000
    4 L    BARRA-004     1004-11.                          500.  184.      41000
    5 L    BARRA-005     1005-9.4                                          41000
    6 L    BARRA-006     1007-8.7                                          41000
    7 L    BARRA-007      997-11.                         233.8   84.      41000
    8 L    BARRA-008      996-11.                          522.  176.      41000
    9 L    BARRA-009     1028-11.                                          41000
   10 L    BARRA-010     1017-6.3                                          41000
   11 L    BARRA-011     1013-7.1                                          41000
   12 L    BARRA-012     1000-7.1                           8.5   88.      41000
   13 L    BARRA-013     1014 -7.                                          41000
   14 L    BARRA-014     1012-8.7                                          41000
   15 L    BARRA-015     1016-9.1                          320.  153.      41000
   16 L    BARRA-016     1032-7.7                         329.4 32.3       41000
   17 L    BARRA-017     1034-8.7                                          41000
   18 L    BARRA-018     1031-9.5                          158.   30.      41000
   19 L    BARRA-019     1050 -3.                                          41000
   20 L    BARRA-020      991-4.5                          680.  103.      41000
   21 L    BARRA-021     1032-5.3                          274.  115.      41000
   22 L    BARRA-022     1050-.82                                          41000
   23 L    BARRA-023     1045 -1.                         247.5 84.6       41000
   24 L    BARRA-024     1038-7.6                         308.6-92.2       41000
   25 L    BARRA-025     1058-5.5                          224.  47.2      41000
   26 L    BARRA-026     1052-6.8                          139.   17.      41000
   27 L    BARRA-027     1038-8.8                          281.  75.5       41000
   28 L    BARRA-028     1051-3.3                          206.  27.6       41000
   29 L    BARRA-029     1050-.54                         283.5 26.9       41000
   30 L1   BARRA-030     1048-4.5 250.146.3 -200  200                      11000
   31 L1   BARRA-031      982.115573.2207.1 -200  300        9.2   4.6     11000
   32 L1   BARRA-032      9831.73 650.205.3 -200  300                      11000
   33 L1   BARRA-033      9972.17 632.108.6 -200  200                      21000
   34 L1   BARRA-034     1012.734 508.166.5 -200  250                      21000
   35 L1   BARRA-035     10494.14 650.209.3 -200  300                      21000
   36 L1   BARRA-036     10646.83 560.102.1 -200  200                      31000
   37 L1   BARRA-037     10281.24 540..4102 -200  200                      31000
   38 L1   BARRA-038     10276.52 830.23.02 -200  200                      31000
   39 L2   BARRA-039     1030-11.1000.87.43-999999999      1104.  250.     41000
99999
```

Figura 20 - Primeira parte do arquivo PWF

```
DLIN
(De )d o d(Pa )NcEP ( R% )( X% )(Mvar)(Tap)(Tmn)(Tmx)(Phs)(Bc  )(Cn)(Ce)Ns
    1         2 1      .35  4.11 69.87
    1        39 1       .1   2.5   75.
    2         3 1      .13  1.51 25.72
    2        25 1       .7   .86  14.6
    2        30 1           1.81      1.025
    3         4 1      .13  2.13 22.14
    3        18 1      .11  1.33 21.38
    4         5 1      .08  1.28 13.42
    4        14 1      .08  1.29 13.82
    5         6 1      .02   .26  4.34
    5         8 1      .08  1.12 14.76
    6         7 1      .06   .92  11.3
    6        11 1      .07   .82 13.89
    6        31 1            2.5       1.07
    7         8 1      .04   .46   7.8
    8         9 1      .23  3.63 38.04
    9        39 1       .1   2.5  120.
   10        11 1      .04   .43  7.29
   10        13 1      .04   .43  7.29
   10        32 1             2.       1.07
   12        11 1      .16  4.35      1.006
   12        13 1      .16  4.35      1.006
   13        14 1      .09  1.01 17.23
   14        15 1      .18  2.17  36.6
   15        16 1      .09   .94  17.1
   16        17 1      .07   .89 13.42
   16        19 1      .16  1.95  30.4
   16        21 1      .08  1.35 25.48
   16        24 1      .03   .59   6.8
   17        18 1      .07   .82 13.19
   17        27 1      .13  1.73 32.16
   19        20 1      .07  1.38       1.06
   19        33 1      .07  1.42       1.07
   20        34 1      .09   1.8      1.009
   21        22 1      .08   1.4 25.65
   22        23 1      .06   .96 18.46
   22        35 1           1.43      1.025
   23        24 1      .22   3.5  36.1
   23        36 1      .05  2.72         1.
   25        26 1      .32  3.23  51.3
   25        37 1      .06  2.32      1.025
   26        27 1      .14  1.47 23.96
   26        28 1      .43  4.74 78.02
```

Figura 21 - Segunda parte do arquivo PWF