

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Dissertação de Mestrado

Avaliação da Estabilidade de Tensão Utilizando Índice Rápido  
e a Metaheurística Colônia de Formigas

Michelle Ferreira Leite

Campina Grande – Paraíba – Brasil

©Michelle Ferreira Leite, Outubro de 2013

Michelle Ferreira Leite

Avaliação da Estabilidade de Tensão Utilizando Índice Rápido  
e a Metaheurística Colônia de Formigas

*Dissertação apresentada à Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande, em cumprimento às exigências para obtenção do Grau de Mestre em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Processamento de Energia

Benemar Alencar de Souza, D.Sc.

Orientador

Niraldo Roberto Ferreira

Orientador

Campina Grande – Paraíba – Brasil

Outubro de 2013



L533a

Leite, Michelle Ferreira.

Avaliação da estabilidade de tensão utilizando índice rápido e a metaheurística colônia de formigas / Michelle Ferreira Leite. - Campina Grande, 2013.

56 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática, 2013.

"Orientação: Prof. Dr. Benemar Alencar de Souza, Prof. Dr. Nivaldo Roberto Ferreira".

Referências.

1. Sistema Elétrico de Potência. 2. Estabilidade de Tensão. 3. FVSI. 4. ACO. 5. Dissertação - Engenharia Elétrica. I. Souza, Benemar Alencar de. II. Ferreira, Nivaldo Roberto. III. Universidade Federal de Campina Grande - Campina Grande (PB). IV. Título

CDU 621.313.52(043)

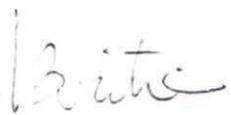
**"AVALIAÇÃO DA ESTABILIDADE DE TENSÃO UTILIZANDO ÍNDICE RÁPIDO E A  
METAHEURÍSTICA COLÔNIA DE FORMIGAS"**

**MICHELLE FERREIRA LEITE**

**DISSERTAÇÃO APROVADA EM 25/10/2013**

  
**BENEMAR ALENCAR DE SOUZA, D.Sc., UFCG**  
Orientador(a)

  
**NIRALDO ROBERTO FERREIRA, Dr., UFBA**  
Orientador(a)

  
**NUBIA SILVA DANTAS BRITO, D.Sc., UFCG**  
Examinador(a)

  
**WELLINGTON SANTOS MOTA, Ph.D., UFCG**  
Examinador(a)

**CAMPINA GRANDE - PB**

*A persistência é o menor caminho do êxito.*  
*(Charles Chaplin)*

# Agradecimentos

Agradeço a Deus por ter me dado força, saúde e persistência para que pudesse iniciar e finalizar este trabalho.

Aos professores Benemar Alencar de Souza e Niraldo Roberto Ferreira pela orientação, dedicação, ajuda e confiança prestados.

Aos meus pais Félix e Lourdinha pelo amor incondicional sempre demonstrado a mim e a toda nossa família. Espero um dia poder retribuir todo esforço e amor dedicados.

Aos meus irmãos Rodrigo, Pâmella e Renato pelo amor, apoio, companhia e amizade. Há amigos mais chegados que irmãos e irmãos que são verdadeiros amigos. Com certeza vocês são meus irmãos e meus amigos.

A minha cunhada Pamela pelo senso de organização e disciplina se tornarem tão agradáveis e a minha sobrinha Malu por, mesmo ainda recém-nascida, me ensinar o valor da vida.

Aos amigos da UFCG Célio, Ferdinando, Ana Vitória, Wilker, Nelson, Francisco, Patrocínio, Renato e Helon pelas discussões e apoio nas horas em que precisei de ajuda e opiniões acadêmicas.

Agradeço a Luciana Silva Araujo por me mostrar que há muito valor nos momentos simples da vida e por me fazer voltar a acreditar em algo que há tempos havia estudado em um grupo de discipulado: a crescer na vida simples.

Agradeço a Rosa Emília Araújo Idalino por estar presente há tanto tempo em minha vida, por me acompanhar nas minhas andanças em busca de trabalho e por não me deixar sozinha com meus pensamentos em horas cruciais.

Aos funcionários da COPELE Ângela, Pedro e Suênia, assim como aos funcionários do Laboratório de Alta Tensão – LAT, na época em que frequentava o laboratório: Adriano, Eduardo, Francisco, Lourdes, Selma e Simone.

Ao apoio financeiro concedido pela CAPES.

*Michelle Ferreira Leite*

# Sumário

Lista de Figuras.....	v
Lista de Tabelas .....	vi
Glossário .....	vii
Lista de Símbolos .....	viii
Resumo .....	x
Abstract.....	xi
Capítulo 1.....	1
Introdução .....	1
1.1 Considerações Iniciais .....	1
1.2 Motivação .....	2
1.3 Objetivo .....	2
1.4 Metodologia .....	2
1.5 Contribuições .....	3
1.6 Organização do Trabalho.....	3
Capítulo 2.....	5
Revisão Bibliográfica .....	5
2.1 Estabilidade de Tensão .....	5
2.1.1 <i>Fast Voltage Stability Index</i> – FVSI .....	9
2.2 Metaheurística Colônia de Formigas .....	10
Capítulo 3.....	14
Fundamentação Teórica.....	14
3.1 Aspectos Sobre a Estabilidade de Tensão – Conceitos Básicos .....	14
3.2 Transmissão de Potência.....	15

3.2.1	Relação Entre Potência e Tensão .....	17
3.3	Métodos Utilizados para Avaliação da Estabilidade de Tensão .....	18
3.3.1	Curvas <i>PV</i> .....	19
3.3.2	Curvas <i>QV</i> .....	20
3.3.3	Índice Margem .....	22
3.3.4	FVSI .....	24
Capítulo 4	.....	27
Otimização por Colônia de Formigas .....		27
4.1	<i>Ant System</i> – AS .....	29
4.2	<i>Ant Colony Optimization</i> – ACO: Aplicação ao Problema.....	31
Capítulo 5	.....	33
Método Proposto e Resultados .....		33
5.1	FVSI para Determinação da Capacidade de Carregamento Máximo .....	33
5.1.1	Carregamento Máximo de Barramento Individual .....	33
5.1.2	Carregamento Máximo de um SEP .....	34
5.2	ACO .....	34
5.3	Resultados .....	35
5.3.1	Programação do Fluxo de Carga <i>Newton-Raphson</i> .....	36
5.3.2	FVSI do IEEE 14 Barras para o Caso Base .....	36
5.3.3	Carregamento do IEEE 14 Barras por Porcentagem.....	38
5.3.4	Carregamento do IEEE 14 Barras com ACO.....	40
Conclusões .....		49
Referências Bibliográficas .....		51
Anexo I – Sistema IEEE 14 Barras.....		55
Apêndice A – Publicações em Eventos .....		56

# Lista de Figuras

Figura 2.1 – Grupos de soluções para a avaliação da estabilidade de tensão. ....	5
Figura 3.1 – Circuito representativo. ....	15
Figura 3.2 – Domínio de existência de soluções do fluxo de carga. ....	16
Figura 3.3 – Tensão como função das potências ativa e reativa. ....	17
Figura 3.4 – Curva $PV$ . ....	19
Figura 3.5 – Curva $QV$ . ....	21
Figura 3.6 – Curvas $QV$ para diversos valores de potência ativa. ....	22
Figura 3.7 – Curva $PV$ e Índice Margem ( $IM$ ). ....	23
Figura 3.8 – Duas barras de um SEP. ....	24
Figura 4.1 – (a) Escolha aleatória do caminho; (b) Escolha do menor caminho. ....	28
Figura 5.1 – Fluxograma para o algoritmo ACO. ....	34
Figura 5.2 – Sistema teste IEEE 14 barras. ....	35
Figura 5.3 – Comparação do FVSI antes e após carregamento por porcentagem. ....	40
Figura 5.4 – Comparação do FVSI antes e após carregamento por porcentagem e com ACO. ....	44
Figura 5.5 – Curva $QV$ para a barra 4 do IEEE 14 barras. ....	45
Figura 5.6 – Curva $QV$ para a barra 5 do IEEE 14 barras. ....	46
Figura 5.7 – Curva $QV$ para a barra 7 do IEEE 14 barras. ....	46
Figura 5.8 – Curva $QV$ para a barra 9 do IEEE 14 barras. ....	46
Figura 5.9 – Curva $QV$ para a barra 10 do IEEE 14 barras. ....	47
Figura 5.10 – Curva $QV$ para a barra 11 do IEEE 14 barras. ....	47
Figura 5.11 – Curva $QV$ para a barra 12 do IEEE 14 barras. ....	47
Figura 5.12 – Curva $QV$ para a barra 13 do IEEE 14 barras. ....	48
Figura 5.13 – Curva $QV$ para a barra 14 do IEEE 14 barras. ....	48

# Lista de Tabelas

Tabela 5.1 – Valores de parâmetros do ACO.....	35
Tabela 5.2 – Comparação entre tensões do fluxo de carga ANAREDE <sup>®</sup> versus MATLAB <sup>®</sup> .....	36
Tabela 5.3 – Comparação entre valores do FVSI para o caso base do IEEE 14 barras. .....	37
Tabela 5.4 – Carregamentos máximos do IEEE 14 barras por porcentagem. ....	38
Tabela 5.5 – FVSI para o IEEE 14 barras: caso base e caso pós-carregamento por porcentagem.....	39
Tabela 5.6 – Carregamentos máximos do IEEE 14 barras com o ACO.....	41
Tabela 5.7 – Comparação entre classificação dos barramentos do IEEE 14 barras. ....	42
Tabela 5.8 – FVSI para o IEEE 14 barras: caso base e caso pós-carregamento com ACO.....	43
Tabela 5.9 – Comparação do FVSI para o IEEE 14 barras: caso base e casos pós-carregamento por porcentagem e com ACO. ....	44
Tabela 5.10 – Comparação da margem de reativos para o IEEE 14 barras: caso base e casos pós-carregamento por porcentagem e com ACO.....	45

# Glossário

ACO	<i>Ant Colony Optimization.</i>
ACS	<i>Ant Colony System.</i>
AETA	Análise de Estabilidade de Tensão Automática.
ANFIS	<i>Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System.</i>
AS	<i>Ant System.</i>
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior.
CEPEL	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica.
CHESF	Companhia Hidro Elétrica do São Francisco.
COPELE	Coordenação de Pós-graduação em Engenharia Elétrica.
EAS	<i>Elitist Ant System.</i>
FVSI	<i>Fast Voltage Stability Index.</i>
IA	Inteligência Artificial.
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronic Engineers.</i>
LAT	Laboratório de Alta Tensão.
LOLC	<i>Loss of Load Cost.</i>
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico.
PE	Programação Evolutiva.
PET	Planejamento da Expansão da Transmissão.
RNA	Redes Neurais Artificiais.
RPROP	<i>Resilient Propagation.</i>
SEP	Sistema Elétrico de Potência.
TSP	<i>Traveling Salesman Problem.</i>
VSA	<i>Voltage Stability Assessment.</i>
WECC	<i>Western Electricity Coordinating Council.</i>

# Lista de Símbolos

$\theta, \delta$	Ângulos entre a tensão e a corrente de um barramento.
$\rho$	Coefficiente entre zero e um que representa a taxa de evaporação do feromônio.
$\alpha$ e $\beta$	Coefficientes que ponderam a concentração de feromônio (conhecimento coletivo) e a informação heurística (conhecimento individual).
$\eta_{ij}$	Conhecimento individual de cada formiga sobre o caminho a ser trilhado.
$\Psi$	Conjunto dos caminhos que podem ser escolhidos pelas formigas.
$M$	Constante para cálculo do feromônio a ser adicionado.
$Q$	Constante utilizada para cálculo de incremento.
$I$	Corrente elétrica de um circuito.
$L_k$	Distância percorrida pela formiga $k$ após trilhar todos os caminhos.
$Q_j$	Fluxo de potência reativa chegando no barramento $j$ .
$Q_i$	Fluxo de potência reativa no barramento $i$ .
$k$	Formiga individual.
$\Delta\tau_{ij}$	Incremento a ser realizado pela formiga $k$ no caminho $ij$ , no instante $t$ .
$IM$	Índice Margem.
$FVSI_{ij}$	Índice rápido de estabilidade de tensão da linha de transmissão que liga o barramento $i$ ao barramento $j$ .
$t$	Instante de tempo.
$Z_{ij}$	Módulo da impedância de uma linha de transmissão do barramento $i$ para o barramento $j$ .
$\tau_0$	Nível inicial de feromônio.
$n$	Número de barras de um sistema.
$t_{max}$	Número máximo de iterações.
$n_f$	Número total de formigas.

$P_{cm}$	Ponto de carregamento máximo de um sistema ou ponto de colapso de tensão.
$P_{cb}$	Ponto de carregamento para o caso base de um sistema.
$S$	Potência aparente de um sistema.
$S_i$	Potência aparente no barramento $i$ .
$S_j$	Potência aparente no barramento $j$ .
$P$	Potência ativa de um sistema.
$P_i$	Potência ativa no barramento $i$ .
$P_j$	Potência ativa no barramento $j$ .
$Q$	Potência reativa de um sistema.
$P_{ij}$	Probabilidade de uma formiga ir de um local $i$ para um local $j$ .
$\tau_{ij}$	Quantidade de feromônio sobre o caminho $ij$ .
$X$	Reatância de um circuito.
$X$	Reatância de uma linha.
$X_{ij}$	Reatância de uma linha de transmissão do barramento $i$ para o barramento $j$ .
$R$	Resistência elétrica de uma linha.
$V$	Tensão de um barramento.
$E$	Tensão de uma fonte ideal.
$V_i$	Tensão no barramento $i$ .
$V_j$	Tensão no barramento $j$ .
$\Delta P$	Variação de potência ativa de um sistema.
$\Delta V$	Variação de tensão de um barramento.

# Resumo

Este trabalho apresenta uma técnica de otimização de carregamento máximo de um Sistema Elétrico de Potência (SEP) utilizando conjuntamente um índice rápido de estabilidade de tensão (FVSI) e a metaheurística colônia de formigas (ACO). Uma rotina de fluxo de carga utilizando o método *Newton-Raphson* foi programada em MATLAB<sup>®</sup>. Também foi programado o índice FVSI em MATLAB<sup>®</sup>. Após a solução do fluxo de carga do caso base, realizou-se incremento de potência reativa em todos os barramentos de carga do sistema. Em seguida calculou-se o valor do índice FVSI de todas as linhas, de forma que elas fossem avaliadas quanto aos seus carregamentos e quanto à estabilidade de tensão. Caso alguma linha do sistema apresente valor de FVSI próximo à unidade (condição de estabilidade do sistema), as barras do sistema param de receber incrementos de potência reativa. A metaheurística colônia de formigas foi empregada com a finalidade de obter os valores de carregamentos máximos de potência reativa nas barras de carga do SEP testado de forma que otimize tal carregamento. A rotina programada para o *Ant Colony Optimization* distribuiu as formigas nos barramentos do sistema e através de uma função de probabilidade elas escolheram a quantidade de reativos que devia ser incrementada em cada barramento através de cooperação mútua e das condições de restrição do sistema (limites de FVSI) avaliando, dessa forma, a estabilidade de tensão do sistema com relação ao seu carregamento máximo. Uma grande contribuição do método é a construção de uma alternativa para avaliação da estabilidade de tensão de SEP que pode ser usada pelos operadores dos sistemas de forma *on-line*.

**Palavras-Chave:** Sistema elétrico de potência, estabilidade de tensão, FVSI, ACO.

# Abstract

This paper presents an optimization technique for maximum loading of an electric power system jointly using Fast Voltage Stability Index (FVSI) and metaheuristic Ant Colony Optimization (ACO). A routine for using the load flow Newton-Raphson method was programmed in MATLAB<sup>®</sup>. Was also programmed in MATLAB<sup>®</sup> index. After the solution of the load flow base case, there was an increase of reactive power at all buses system load. Then if the calculated index value FVSI all line , so that they were evaluated for their loads and the voltage stability . If any line of the system has value FVSI close to unity (stability condition of the system), the system buses stop receiving reactive power increments. The ant colony metaheuristic was used in order to obtain the values of maximum reactive power loads in load buses SEP tested manner that optimizes such loading. Routine scheduled for distributed Ant Colony Optimization ants on the buses of the system and through a probability function they chose the amount of reactive power that must be incremented on each bus through mutual cooperation and restrictive conditions of the system (limits FVSI) assessing thus the voltage stability of the system with respect to its maximum load. A major contribution of this method is the construction of an alternative to evaluate the stability of SEP voltage that can be used by system operators to form on-line.

**Keywords:** Electric power system, voltage stability, FVSI, ACO.

# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Considerações Iniciais

Nos últimos anos o setor elétrico vem sofrendo grandes modificações em sua estrutura, principalmente as decorrentes do rápido crescimento da demanda de potência e interconexões. Tais modificações têm levado os sistemas elétricos a operarem próximos aos limites de capacidade de transferência de potência. Investimentos precários e uma má reestruturação do setor podem não garantir alguns requisitos básicos de operação segura do sistema elétrico.

A estabilidade pode ser definida como a propriedade de um Sistema Elétrico de Potência (SEP) operar em equilíbrio aceitável com relação aos perfis de tensão, sejam em condições normais de operação ou em casos em que esteja submetido às perturbações (Kundur, 1994). Não sendo satisfeita a condição de estabilidade, o SEP muito provavelmente ingressará sua operação em estado de instabilidade.

Os termos estabilidade de tensão e estabilidade angular possuem uma forte ligação entre si, o que causa certa dificuldade em separar as formas de evolução destes fenômenos. Muitas vezes a estabilidade de tensão está relacionada com problemas de natureza angular. Entretanto, na maioria das vezes, existe certa predominância de uma forma em relação à outra, o que permite que a análise seja feita focando-se aspectos específicos para cada caso (Sodré, 2006).

A ocorrência de fenômenos relacionados à estabilidade de tensão, por exemplo, o colapso de tensão, vem se tornando um assunto de grande preocupação entre a comunidade científica e as empresas do setor elétrico. Na última década foram registrados alguns casos de instabilidade de tensão (que evoluíram para um colapso de tensão) com repercussão mundial, como o ocorrido no Brasil, em 1999, que afetou grande parte do território brasileiro e parte do Paraguai, os ocorridos na costa oeste dos Estados Unidos da América e do Canadá (NERC *Welcomes U.S. – Canada Power System Outage Task Force Final Report*, 2004) e na Itália (Corsi & Sabelli, 2004), em 2003.

A estabilidade de tensão em sistemas de potência é complexa e não linear, necessitando, portanto, de cautela para o seu estudo e análise. Obter soluções que permitam o seu estudo com o objetivo de possibilitar o desenvolvimento de ferramentas para análise, planejamento e operação dos sistemas de potência tem sido o trabalho de vários pesquisadores e igualmente deste trabalho.

## 1.2 Motivação

A extensa pesquisa que vem sendo desenvolvida em todo o mundo para analisar a estabilidade de tensão tem proporcionado vários métodos e ferramentas para avaliação do nível de segurança dos sistemas de potência. O emprego de metaheurísticas para solução de problemas de otimização tem se mostrado eficiente ao lidar com as peculiaridades do problema em questão.

Uma motivação para este estudo se constitui no fato de que há pouco material na literatura englobando estudos de Sistemas Elétricos de Potência (SEP) e *Ant Colony Optimization* (ACO) aplicados na avaliação do problema da estabilidade de tensão com relação à segurança do sistema elétrico de potência através da obtenção do máximo carregamento de reativos.

## 1.3 Objetivo

O principal objetivo desse trabalho é o emprego combinado do *Fast Voltage Stability Index* (FVSI) e do *Ant Colony Optimization* para obtenção do máximo carregamento de reativos de um SEP, de forma que este sistema opere de forma segura com relação à estabilidade de tensão.

## 1.4 Metodologia

A estabilidade de tensão de um sistema de potência será avaliada nesta pesquisa utilizando o índice de linha *Fast Voltage Stability Index*.

O *Fast Voltage Stability Index* é um índice que tem por objetivo indicar as linhas críticas de um sistema de potência com relação aos seus carregamentos. Neste trabalho todas as linhas do sistema de potência serão avaliadas pelo índice. Com o objetivo de realizar os cálculos dos valores do índice para cada linha de transmissão, serão obtidos os parâmetros do sistema de potência necessários à simulação, bem como será programada em MATLAB® uma rotina computacional de fluxo de potência utilizando o método de *Newton-Raphson*, com a qual serão calculados os valores de potência reativa e de tensão utilizados no *Fast Voltage*

*Stability Index*. Os resultados da rotina serão validados comparando-se os valores das tensões (módulos e ângulos) obtidos pelo *software* ANAREDE<sup>®</sup>, que é o programa computacional mais utilizado no Brasil na área de sistema elétrico de potência, de acordo com o Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL (PROGRAMA ..., 2011). O programa realiza cálculos de fluxo de potência, análise de contingências, análise de sensibilidade de tensão e fluxo e análise de segurança de tensão, entre outras aplicações.

A metaheurística colônia de formigas será utilizada nesta pesquisa com o intuito de obter os valores de carregamentos máximos de potência reativa nas barras de carga de um sistema elétrico de potência. A função objetivo a ser otimizada pelo *Ant Colony Optimization* a fim de que possa ser realizada a avaliação da estabilidade de tensão será função do *Fast Voltage Stability Index* de cada linha do sistema. O *Ant Colony Optimization* também será programado em MATLAB<sup>®</sup>.

Com os programas do *Fast Voltage Stability Index* e do *Ant Colony Optimization* em MATLAB<sup>®</sup>, serão realizadas simulações do sistema IEEE 14 barras para obtenção do máximo carregamento otimizado.

## 1.5 Contribuições

Principais contribuições desse trabalho:

- Analisar o estado da arte quanto à utilização do *Fast Voltage Stability Index* e do *Ant Colony Optimization* para solução do problema da estabilidade de tensão;
- Pesquisar o tipo e forma de incremento do feromônio no *Ant Colony Optimization*;
- Programar em computador o *Fast Voltage Stability Index* e o *Ant Colony Optimization*;
- Fornecer os valores de carregamento máximo de um sistema elétrico de potência utilizando o *Fast Voltage Stability Index* e o *Ant Colony Optimization* para avaliação da estabilidade de tensão.

## 1.6 Organização do Trabalho

Com a finalidade de alcançar os objetivos propostos, esta dissertação está organizada de acordo com a estrutura que segue adiante:

O capítulo 1 possui uma breve introdução sobre o problema da estabilidade de tensão, assim como o objetivo geral da dissertação, bem como motivações para a pesquisa e contribuições ao tema abordado.

No capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica acerca da estabilidade de tensão e da metaheurística *Ant Colony Optimization*.

A fundamentação teórica sobre a estabilidade de tensão, bem como métodos utilizados para a sua avaliação são apresentados no Capítulo 3. Ainda nesse capítulo são apresentados os critérios utilizados para classificar os sistemas elétricos de potência quanto à sua segurança em relação à estabilidade. O desenvolvimento matemático do *Fast Voltage Stability Index* também é descrito nesse capítulo.

A metaheurística *Ant Colony Optimization* é detalhada no capítulo 4. Os parâmetros adotados para o cálculo da função objetivo proposta são apresentados.

O método proposto apresentado emprega o *Fast Voltage Stability Index* e o *Ant Colony Optimization* para obtenção do carregamento máximo otimizado de reativos de um sistema elétrico de potência no capítulo 5, assim como os resultados obtidos. A validação do método proposto é feita comparando os resultados obtidos com os encontrados na literatura. O sistema teste escolhido para aplicação do método é o IEEE 14 barras.

Ao final são apresentadas as conclusões, assim como são indicadas possibilidades de continuidade da pesquisa como propostas para trabalhos futuros.

# Capítulo 2

## Revisão Bibliográfica

Uma breve revisão bibliográfica é apresentada sobre os temas que se caracterizam como objeto principal desta pesquisa.

### 2.1 Estabilidade de Tensão

Com a finalidade de agrupar melhor os estudos desenvolvidos para o problema da avaliação da estabilidade de tensão, seis grandes grupos foram formados para comportar os variados métodos de análise do problema, conforme a Figura 2.1.



Figura 2.1 – Grupos de soluções para a avaliação da estabilidade de tensão.

Os grupos de análise em regime, pequenos sinais e simulação no tempo são as primeiras técnicas utilizadas com o intuito de entender e solucionar o problema da estabilidade de tensão.

Já os grupos formados pela análise rápida, simulação rápida no tempo e inteligência artificial tem como objetivo solucionar o problema em um menor espaço de tempo e de forma eficiente, sendo habitualmente utilizadas para avaliação da segurança de um sistema, seja em tempo real ou em modo *off-line*.

Nas pesquisas a seguir são descritas importantes referências aos grupos formados pela análise rápida, simulação rápida no tempo e inteligência com a finalidade de contextualizar o problema proposto por este trabalho.

### ***Análise Rápida***

Este grupo é constituído por métodos que diferem entre si de forma extrema, com uma característica comum entre eles: a aplicação de técnicas tradicionais de análise em regime permanente ou de transitórios eletromecânicos. Vários estudos realizados por este grupo empregam aproximações nas técnicas tradicionais aplicadas, a fim de que se obtenha agilidade quanto ao cálculo dos índices utilizados para a avaliação da estabilidade de tensão. Alguns trabalhos que utilizam as técnicas de análise propostas por este grupo podem ser resumidamente descritos a seguir.

Uma metodologia para avaliar a estabilidade de tensão de forma *on-line* é proposta por de Souza, *et al.* (2000). A metodologia consiste em empregar um estimador de estados que modela a operação do sistema de potência em poucos segundos, a fim de detectar o quão próximo ele se encontra de um colapso de tensão. O ponto de colapso de tensão é determinado através da utilização de uma técnica de extrapolação empregada no cálculo do vetor tangente obtido pelo método da continuação, mostrando-se útil para a identificação de áreas críticas do sistema utilizado como teste (IEEE 14 barras). Os demais resultados para vários cenários do sistema teste indicam que a monitoração da carga local pode ser mais eficaz para determinar ações de controle e para evitar que o colapso de tensão ocorra no sistema de potência.

Outro método empregado para a avaliação da estabilidade de tensão em tempo real é proposta por Jardim, *et al.* (2000) que, inicialmente, comenta sobre as principais necessidades e problemas quanto à implementação de um sistema de segurança para avaliação global que seja capaz de lidar com as estabilidades de tensão e angular, sobrecargas e outras restrições dinâmicas. Para que fosse possível analisar ao mesmo tempo todos os procedimentos tradicionais para a avaliação da segurança foi adotada a automação desses procedimentos através da computação sistemática do fluxo de carga e de transitórios eletromecânicos para vários cenários de operação do sistema analisado – condições de carga, de geração e de rede. Como o esforço computacional se torna enorme devido ao grande número de simulações efetuadas para obtenção e avaliação das margens de segurança, também é analisada a possibilidade da utilização das técnicas de Inteligência Artificial (IA) para superar alguns problemas desse contexto.

Na pesquisa feita por Bao, Huang & Xu (2003), é apresentado um método sistemático e prático capaz de avaliar a estabilidade de tensão através do nível de reserva de reativos do

sistema. É considerado que a margem de estabilidade de tensão do sistema é linearmente relacionada a uma reserva “equivalente” de reativos, através da equação:  $M = k.Q_{rt} + b$ , onde  $Q_{rt}$  é a reserva “equivalente” de reativos do sistema,  $k$  e  $b$  são os parâmetros da função linear que relaciona  $Q_{rt}$  e a margem de estabilidade de tensão  $M$ . Considera-se ainda que a reserva “equivalente” de reativos é determinada por uma função linear, onde cada fonte de reativos do sistema coopera para a reserva equivalente através de uma soma ponderada, ou seja, em certos cenários de operação do sistema algumas fontes de reativos são mais importantes que outras. Estes vários cenários estão relacionados à existência de contingências em áreas diferentes do sistema, assim como a crescimentos de carga. Os sistemas testes utilizados foram o sistema de 1000 barras da BC *Hydro* e o sistema de 1800 barras de *Alberta* no Canadá. É citada ainda a importância quanto à procura de métodos alternativos capazes de correlacionar a margem de estabilidade com a reserva de reativos.

### ***Simulação Rápida no Tempo***

Este grupo engloba os trabalhos que utilizam um algoritmo de simulação quasi-estática, que é demasiadamente rápido, pois só considera a dinâmica de longo termo dos componentes de controle do sistema de potência. Algumas pesquisas que utilizam as técnicas de análise propostas por este grupo são apresentadas adiante.

No trabalho de Kundur & Morison (1998) um ponto de operação de um sistema de potência é analisado com relação à estabilidade provendo cálculos rápidos para tomada de decisão do operador, caso alguma contingência avaliada mostre-se capaz de conduzir o sistema a operar de forma insegura. É descrito o desenvolvimento das avaliações das estabilidades de tensão e transitória – principais aspectos da avaliação da segurança dinâmica *on-line*. Para a avaliação da estabilidade de tensão, a estrutura do pacote *on-line* VSA (*Voltage Stability Assessment*), proposto pelos autores, conta com um módulo de simulação rápida no domínio do tempo, que simula detalhadamente uma sequência de eventos apontada por uma falta e comporta simulações de 200 a 1000 vezes mais velozes em relação à simulação convencional.

Uma ferramenta para avaliação da segurança de tensão é proposta em Nativel, *et al.* (2000), que está fundamentada na simulação rápida no domínio do tempo. As peculiaridades desta ferramenta são: a simulação da dinâmica lenta e do fenômeno da estabilidade de tensão, a computação de diferentes espécies de margens de segurança e a sugestão e validação de

ações corretivas. O objetivo principal do desenvolvimento desta ferramenta foi preparar a operação do sistema um dia à frente, assim como a operação em tempo real.

A avaliação da segurança de tensão *on-line* é proposta em Van Cutsem, *et al.* (2005) utilizando a ferramenta OMASES-AET, que pode operar de três formas: (a) *real-time*, (b) *study* e (c) *expert*. Operando no modo (a), a plataforma é alimentada pelas soluções obtidas de um estimador de estados. No modo (b), a avaliação da estabilidade de tensão é feita pelo usuário de forma manual e a plataforma OMASES possui um banco de dados para operar neste modo. Tem-se acesso a ferramentas de diagnóstico mais avançadas, como análises de sensibilidade e dos autovetores da matriz jacobiana no modo de operação (c). A fundamentação para a rapidez quanto à realização de todos os cálculos envolvidos nas análises é a utilização de métodos de simulação rápida no domínio do tempo.

### ***Inteligência Artificial***

Este grupo combina os trabalhos que utilizam as técnicas de Inteligência Artificial (IA), mais comumente as redes neurais e os sistemas *fuzzy*.

Sodré (2006) apresenta em sua tese de doutorado pesquisa referente à avaliação da segurança dos sistemas de potência em relação à estabilidade de tensão utilizando Redes Neurais Artificiais (RNA) e o sistema neuro-*fuzzy* ANFIS (*Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System*) arranjados hibridamente. O desempenho do arranjo proposto pela tese é comparado com outros resultados de redes neurais existentes na literatura, assim como com outros resultados para lógica *fuzzy*. A eficiência do método proposto foi validada através de simulações com sistemas de potência reais, a saber: o sistema Sul-Sudeste do Brasil para o ano de 1996 (77 barras) e o sistema Norte-Nordeste do Brasil para o ano de 2010 (482 barras).

Machado (2009) apresenta o desenvolvimento de uma ferramenta computacional capaz de avaliar a segurança de um sistema de potência em relação à instabilidade de tensão, utilizando técnicas de Inteligência Artificial (IA). O método proposto é composto por um arranjo híbrido de uma rede neural *Resilient Propagation* (RPROP) em série com uma *Levenberg-Marquardt*. As bases de dados utilizadas para treinamento, validação e teste da rede neural foram construídas utilizando-se a área leste do subsistema Nordeste, pertencente à rede básica da CHESF, com dados simulados através do *software* ANAREDE<sup>®</sup>. O desempenho desse sistema foi comparado com a técnica desenvolvida por Sodré (2006) e obteve resultados satisfatórios na avaliação da estabilidade de tensão quanto à porcentagem de acertos de seguro/inseguro dos sistemas testados na rede neural programada.

### 2.1.1 *Fast Voltage Stability Index* – FVSI

Vários métodos e índices para solucionar o problema da estabilidade de tensão são propostos na literatura, por exemplo: traçado de curvas – PV e QV, que são índices de barras, e o *Fast Voltage Stability Index* (FVSI), que é um índice de linha.

O *Fast Voltage Stability Index* (FVSI), desenvolvido por Mussirin, *et al.* (2002a), baseado na equação quadrática da tensão na extremidade de recepção de um sistema de duas barras, é utilizado como indicador da condição de estabilidade de tensão de um sistema de potência. O maior valor para o FVSI deve ser achado para que a capacidade de máximo carregamento de um sistema de potência seja encontrada. O valor do FVSI deve ser inferior à unidade para garantir que o SEP se mantenha estável. Qualquer linha do sistema cujo valor FVSI exceda à unidade indica que o fenômeno da instabilidade de tensão ocorreu nas imediações, ocasionando a redução na tensão do barramento correspondente sobrecarregado e a instabilidade do sistema global.

Mussirin *et al.* (2002a) propõe a utilização do FVSI na análise da estabilidade dos sistemas de transmissão como indicador do máximo carregamento de um sistema de potência e classificador de suas barras. Tomando por base simulações no sistema teste IEEE 30 barras, o método consiste em calcular o fluxo de potência para o caso base do sistema teste e escolher barras de carga para incremento de potência reativa com a finalidade de avaliar o máximo valor dessa potência que seja possível carregar em cada barra teste sem comprometimento da estabilidade do sistema. O trabalho apresenta os passos para implementação do FVSI, entretanto, não deixa claro o critério de escolha das barras teste, nem tampouco esclarece se as linhas consideradas mais fracas para cada barramento incrementado estão necessariamente ligadas a ele.

Em Mussirin *et al.* (2002b) a estabilidade estática é utilizada nas análises, embora a dinâmica provoque várias interrupções nos sistemas. Sua utilização é justificada pela facilidade em modelar as cargas para a realização das simulações, assim como em obter resultados para posteriores comparações com outras técnicas. A técnica é utilizada para análise *off-line*, podendo ser empregada em estudos de planejamento e expansão dos sistemas de transmissão. Os barramentos a serem testados são escolhidos de forma randômica, ou seja, sem nenhum critério. Também não fica clara a forma de incremento de potência reativa nos testes. As cargas nos barramentos escolhidos teriam sido incrementadas simultaneamente ou

não? Essa dúvida dificulta uma análise mais detalhada a respeito dos resultados obtidos. O FVSI também é utilizado como índice de linha para análise da estabilidade de tensão.

Mussirin *et al.* (2002c) utiliza o FVSI como técnica para avaliação *on-line* da estabilidade de tensão baseado na classificação de contingências. O sistema IEEE 24 barras é utilizado nos testes. Carregamentos pré-definidos de barramentos são utilizados para os testes. Segundo os autores, para as análises de contingências não se faz necessário realizar o incremento de potência reativa nas barras teste escolhidas e não fica claro nessa pesquisa o motivo pelo qual o incremento não é feito. Os resultados obtidos para as contingências são comparados com outras técnicas. As barras são escolhidas de forma aleatória para justificar a gravidade das faltas que poderiam ocorrer no sistema, entretanto, aparentemente, não há consistência de que essa justificativa seja plausível.

Reis (2005) descreve alguns índices de barras e de linhas para análise da estabilidade de tensão, entre eles o FVSI, assim como realiza testes com todos os índices descritos. O FVSI é utilizado para indicar algumas linhas críticas dos sistemas teste (IEEE 14 barras, 30 barras e 57 barras), assim como para classificar os barramentos que foram utilizados como teste. Não fica clara a forma de escolha dos barramentos testados.

## **2.2 Metaheurística Colônia de Formigas**

A metaheurística colônia de formigas encontra-se nos grupos de estudo da estabilidade de tensão formados pela análise rápida, simulação rápida no tempo e inteligência artificial. Pode-se dizer que essa metaheurística faz parte de um novo subgrupo denominado de algoritmos bio-inspirados, pois se utiliza de comportamentos encontrados na natureza para tentar solucionar, principalmente, problemas de otimização em menos tempo e de forma eficiente.

Alguns trabalhos com aplicações direcionadas aos sistemas de potência são apresentados a seguir.

### ***Aplicações do ACO em Sistemas de Potência***

No âmbito dos sistemas de potência algumas aplicações para o ACO vêm sendo desenvolvidas. Algumas delas são: reconfiguração de sistemas de distribuição, alocação de bancos de capacitores, otimização do despacho econômico de energia elétrica, planejamento da expansão da geração, planejamento da expansão da transmissão e estudos para a estabilidade de tensão. A seguir, são descritos resumidamente alguns trabalhos.

O ACO foi utilizado para resolver o problema da reconfiguração de sistemas de distribuição por Pereira *et al.* (2006, 2008), Guerra & Kagan (2008). Contudo, alguns destes trabalhos foram realizados sem se desvincularem por completo do problema do caixeiro viajante, que serviu para a proposição original. Souza, *et al.* (2009) propôs um ACO em que as peculiaridades deste problema são consideradas, obtendo assim maior eficiência, na medida em que todas as soluções intermediárias são factíveis. O objetivo do trabalho foi minimizar as perdas de potência ativa em um sistema de distribuição mediante o alcance de sua configuração ótima. Um sistema de cinco barras e sete ligações foi utilizado como teste. O problema de otimização teve como restrição a condição de que a configuração final fosse radial que, no, caso correspondeu a apenas 21 das 128 configurações possíveis para o sistema teste. Nas simulações realizadas, verificou-se que a quantidade fracionada de feromônio deixada sobre as ligações da rede foi um fator preponderante na rapidez da descoberta da topologia que representa o ótimo global. Outro fator importante para a velocidade de convergência do processo referido anteriormente foi uma sobrevida dada à formiga tendo em vista que, na busca no espaço de soluções, há a possibilidade dela se perder, percorrendo um mesmo caminho num e noutro sentido indefinidamente.

A solução para a alocação ótima de bancos de capacitores foi proposta por Annaluru *et al.* (2004) e Pimentel Filho, *et al.* (2008), sendo que no primeiro trabalho a alocação foi feita utilizando a metaheurística colônia de formigas com o vetor gradiente fornecendo à metaheurística uma medida do impacto causado pela injeção de potência reativa nas perdas do sistema, a fim de acelerar a convergência do algoritmo. No segundo trabalho a função a ser otimizada foi definida como as perdas ativas totais do sistema e foram adicionados bancos de capacitores pelas formigas até quando o valor da função objetivo não mostrou mais progressos. O desempenho do método proposto no segundo trabalho foi avaliando em três sistemas de distribuição.

Coelho, *et al.* (2008) apresenta uma nova abordagem híbrida ACO e quase-Newton para a solução do problema de despacho econômico de energia elétrica. O ACO foi empregado na busca global e o quase-Newton na sintonia fina das soluções obtidas pelo ACO. A metodologia híbrida foi validada em um sistema teste que consiste de 13 unidades térmicas com função incremental do custo de combustível levando em consideração os efeitos do ponto de válvula. O método híbrido proposto supera e provê soluções de qualidade em termos de eficiência quando comparadas com aquelas obtidas pelos métodos ACO e quase-Newton

quando aplicados de forma isolada e também em relação às técnicas de otimização apresentadas na literatura para a solução do problema em questão.

Guedes, *et al.* (2009) propôs uma abordagem ao problema do planejamento da expansão da geração através da implementação de uma ferramenta computacional complementar as já existentes para a solução do problema do planejamento. A ferramenta proposta visou como características principais a utilização de otimização multi-objetivo, a integração geração-transmissão, programação em código aberto, entre outros. Para que fossem alcançadas tais características, fez-se uso do ACO, cuja natureza contemplou de forma vantajosa vários objetivos delimitados pela ferramenta computacional para solução do problema. A técnica proposta foi testada através de simulações para um despacho em um sistema hidrotérmico de grande porte, com horizonte de 17 anos em base mensal e os resultados desta aplicação foram comparados com outros que não consideraram o uso da técnica de otimização proposta (ACO). A utilização do ACO nas simulações realizadas para otimização do processo de solução do problema apresentou melhorias econômicas e no risco de déficit, isto é, o sistema operou durante todo o horizonte com maior folga de energia armazenada.

Da pesquisa realizada por Rezende, *et al.* (2008) resultou uma nova metodologia para solução de problemas de planejamento da expansão da transmissão (PET) em sistemas de potência, também baseada na metaheurística ACO. O problema PET incluiu a busca pela solução de menor custo, considerando custos de investimento e restrições de confiabilidade. Restrições de confiabilidade foram consideradas através do índice LOLC (*Loss of Load Cost*). Um sistema teste e um sistema real de subtransmissão foram utilizados para as aplicações do método proposto.

No trabalho desenvolvido por Kalil *et al.* (2006), devido à capacidade do ACO em resolver problemas de otimização, foi proposta sua aplicação como técnica para a busca do ponto ótimo de máximo carregamento de uma barra de carga. A obtenção de forma *off-line* de um ponto ótimo de máximo carregamento ajuda os operadores de um sistema de transmissão a identificarem barras fracas, capacidade de transmissão de reativos nas linhas e, conseqüentemente, avaliarem a estabilidade de tensão. O sistema utilizado nas simulações para a aplicação da técnica foi o IEEE 30 barras. Estudos comparativos foram realizados com relação à Programação Evolutiva (PE) e a Análise de Estabilidade de Tensão Automática (AETA), que foram empregadas na solução do problema em questão. A técnica proposta utilizando ACO se mostrou mais eficiente que as demais com relação à exatidão do ponto de

máximo carregamento e ao tempo computacional gasto. Além disso, os números menores de iteração, pequeno número de formigas e menor número de barras indicaram que o ACO foi capaz de reduzir o esforço computacional do processo de otimização. Pequenas modificações no ACO proposto foram sugeridas como estudos futuros para que a técnica possa ser empregada em sistemas de transmissão de grande porte. O ACO é utilizado como técnica para a busca do ponto de máximo carregamento. Não há incremento de carga em todas as barras simultaneamente. O incremento é feito em um barramento por vez, pois é a forma mais adversa de carregamento, entretanto, a utilização da técnica de carregar um barramento por vez dificulta uma possível classificação desses barramentos em relação à capacidade de carregamento máximo para um sistema de grande porte.

Uma nova abordagem usando a técnica ACO para determinar os valores ideais de ajuste de *tap* de transformadores foi proposta por Mustafar, *et al.* (2007). Os principais objetivos do emprego da técnica foram a melhoria do perfil de tensão e, conseqüentemente, a minimização das perdas do sistema de potência, quando este opera com condições de carga elevada. Foi realizada a procura de uma solução para as melhores combinações possíveis de ajuste de *tap* para quatro transformadores do sistema teste IEEE 30 barras. Os resultados mostraram que a técnica proposta obteve valores ideais de ajuste de *tap* para os quatro transformadores do sistema teste, promovendo assim a redução nas perdas da barra teste (barra 19), assim como melhoria no perfil de tensão da mesma barra.

# Capítulo 3

## Fundamentação Teórica

Apresentam-se a seguir alguns conceitos fundamentais relacionados com a estabilidade de tensão, assim como as técnicas utilizadas tradicionalmente para sua avaliação e análise.

### 3.1 Aspectos Sobre a Estabilidade de Tensão – Conceitos Básicos

De acordo com Kundur (1994), a estabilidade pode ser definida como sendo uma propriedade do sistema de potência que permite seu funcionamento em equilíbrio aceitável com relação aos valores de tensões quando este é submetido às condições normais ou de perturbação. Alguns fatores que afetam a estabilidade da tensão são: variação automática de *tap* de transformadores, operação de limitadores de sobre-excitação de geradores, uso de bancos de capacitores para compensação de potência reativa em excesso, sistemas de potência sobrecarregados devido à falta de reforço na transmissão e a falta de investimentos na geração.

O fenômeno da instabilidade de tensão ocorre quando a condição de estabilidade de tensão é violada. Esse fenômeno está relacionado com a deficiência de um sistema quanto ao seu suporte de reativos. Quando um SEP opera próximo ao seu limite de transferência de potência e as reservas de geração de reativos encontram-se praticamente esgotadas nos centros de carga, a ocorrência de perturbações poderá levá-lo ao estado de instabilidade. O prolongamento da operação do sistema no estado de instabilidade de tensão pode desencadear um fenômeno denominado de colapso de tensão.

O fenômeno do colapso de tensão é caracterizado pela depreciação progressiva da tensão de um sistema quando este atinge uma condição de equilíbrio com perfis de tensão abaixo dos valores aceitáveis. Tal depreciação pode ser causada, por exemplo, em situações de extremo carregamento, ou por contingências que provocam desequilíbrio entre a produção e o consumo de potência reativa. Em tal situação, o SEP se torna sensível às variações de carregamento.

### 3.2 Transmissão de Potência

Para entendimento da transmissão de potência é feita uma análise do circuito apresentado na Figura 3.1 em Van Cutsem & Vournas (1998):

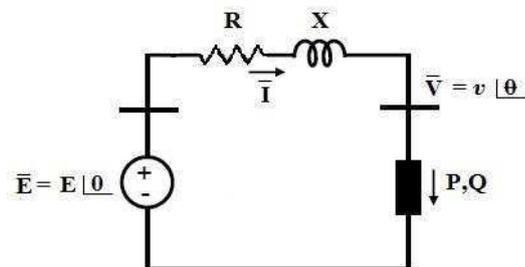


Figura 3.1 – Circuito representativo.

Algumas considerações são feitas com a finalidade de simplificar o desenvolvimento das equações:  $R = 0$ ; a fonte de tensão ideal é referência de fase e é definida como  $\bar{E} = E \angle 0$ ; a tensão na carga é definida por  $\bar{V} = v \angle \theta$ .

Da Figura 3.1 obtêm-se:

$$\bar{V} = \bar{E} - jX\bar{I}. \quad (3.1)$$

Por definição de potência complexa:

$$S = P + jQ = \bar{V}\bar{I}^*. \quad (3.2)$$

Substituindo os valores de tensão, corrente e impedância na equação (3.2):

$$S = \bar{V} \frac{\bar{E}^* - \bar{V}^*}{-jX} = \frac{j}{X} (EV \cos \theta + jEV \sin \theta - V^2). \quad (3.3)$$

Decompondo (3.3), têm-se as equações (3.4) e (3.5):

$$P = -\frac{EV}{X} \sin \theta, \quad (3.4)$$

$$Q = -\frac{V^2}{X} + \frac{EV}{X} \cos \theta. \quad (3.5)$$

Eliminando  $\theta$  das equações (3.4) e (3.5) obtêm-se a expressão (3.6):

$$(V^2)^2 + (2QX - E^2)V^2 + X^2(P^2 + Q^2) = 0. \quad (3.6)$$

A expressão (3.6) é uma equação quadrática na variável  $V^2$ . Para que possua raízes reais seu discriminante deve ser igual ao valor zero, como em Van Cutsem & Vournas (1998):

$$(2QX - E^2)^2 - 4X^2(P^2 + Q^2) \geq 0. \quad (3.7)$$

Que pode ser simplificada em:

$$-P^2 - \frac{E^2}{X}Q + \left(\frac{E^2}{2X}\right)^2 \geq 0. \quad (3.8)$$

A relação (3.8) corresponde a uma parábola no plano  $(P, Q)$  apresentada na Figura 3.2. Todos os pontos dentro da parábola satisfazem a relação (3.8) e levam a duas soluções do fluxo de carga: fora da parábola não há solução para o fluxo de carga e na parábola há apenas uma solução.

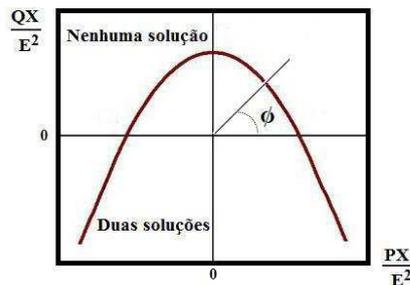


Figura 3.2 – Domínio de existência de soluções do fluxo de carga.

O objetivo da parábola da Figura 3.2 é representar graficamente os pontos de potência máxima. Para valores de potência ativa  $P$  negativos há uma geração máxima, enquanto que os valores positivos correspondem à carga máxima para um determinado fator de potência. Mudando os valores de  $P$  e analisando os valores para o eixo  $\frac{QX}{E^2}$ , observa-se que a potência máxima que pode ser injetada na extremidade de uma barra de carga é exatamente igual à potência máxima que pode ser absorvida, sem levar em consideração a resistência da linha.

Fazendo  $P = 0$  em (3.8) em Van Cutsem & Vournas (1998), obtém-se:

$$Q \leq \frac{E^2}{4X}. \quad (3.9)$$

Como  $\frac{E^2}{X}$  é a potência de curto-circuito na barra de carga, isto é, o produto da tensão  $E$  pela corrente de curto-circuito  $\frac{E}{X}$ , o máximo de carregamento puramente reativo é um quarto da potência de curto-circuito, em Van Cutsem & Vournas (1998).

Fazendo  $Q = 0$  em (3.8), obtém-se:

$$P \leq \frac{E^2}{2X}, \quad (3.10)$$

que é o mesmo limite de potência oriundo de uma linha sem perdas com fator de potência unitário, e corresponde à metade da potência de curto-circuito, em Van Cutsem & Vournas (1998).

Com as relações descritas anteriormente, é possível distinguir a diferença fundamental entre potência ativa e potência reativa: qualquer potência ativa pode ser consumida desde que haja reativos suficientes para isso ( $Q < 0$ ), enquanto que o carregamento de potência reativa nunca pode exceder  $\frac{E^2}{4X}$ . Essa diferença vem da natureza indutiva do sistema de transmissão e ilustra ainda mais a dificuldade de transportar grandes quantidades de potência reativa. É ainda válido observar que, na prática, o suporte de grandes quantidades de potência reativa é requerido por maiores quantidades de potência ativa, resultando, muitas vezes, em tensões inaceitáveis nos barramentos do sistema, como em Van Cutsem & Vournas (1998).

### 3.2.1 Relação Entre Potência e Tensão

De acordo com a relação (3.8) em Van Cutsem & Vournas (1998), as duas soluções para a relação (3.6) são dadas por:

$$V = \sqrt{\frac{E^2}{2} - QX \pm \sqrt{\frac{E^4}{4} - X^2 P^2 - XE^2 Q}}. \quad (3.11)$$

A relação (3.6) define duas superfícies no espaço  $(P, Q, V)$ , como apresentado na Figura 3.3 de Van Cutsem & Vournas (1998):

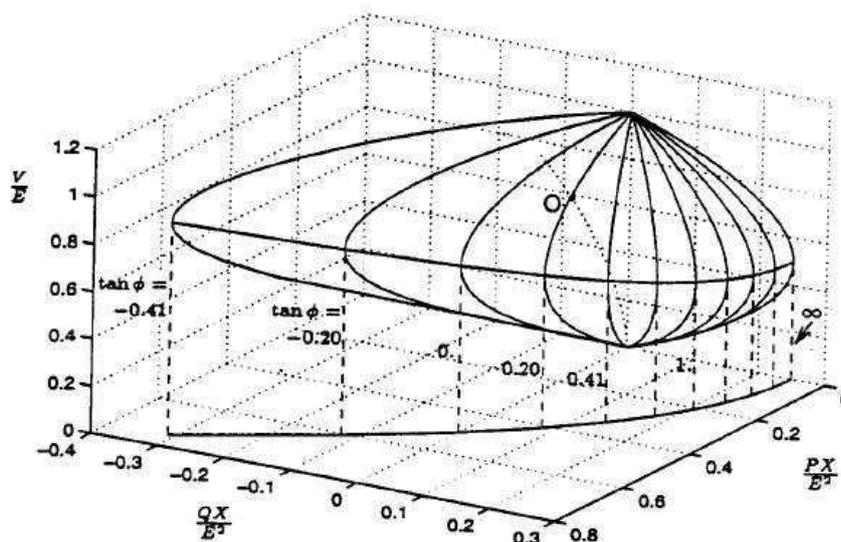


Figura 3.3 – Tensão como função das potências ativa e reativa.

A Figura 3.3 possui uma linha “equatorial” que divide as duas soluções encontradas para a relação (3.11), assim como é o ponto onde as duas soluções possuem valores iguais. Essa linha corresponde à potência máxima de um SEP considerando a transmissão sem perdas. A parte superior da superfície representada corresponde à solução da relação (3.11) com o sinal de adição, assim como a parte inferior à solução com o sinal de subtração. A projeção do limite dessa curva para o plano  $(P, Q)$  coincide com a parábola apresentada na Figura 3.2. As divisões com as linhas sólidas correspondem às interseções com o plano vertical  $Q = P \tan \phi$ .

Projetando-se as divisões sobre o plano  $(P, V)$ , obtêm-se as curvas de tensão como função da potência ativa para vários valores de  $\tan \phi$ , conhecidas como curvas  $PV$ , que são obtidas considerando um valor constante de potência reativa  $Q$ .

De modo semelhante ao anterior, projetando-se as divisões sobre o plano  $(Q, V)$ , obtêm-se as curvas de tensão como função da potência reativa, conhecidas como curvas  $QV$ , que são obtidas considerando um valor constante de potência ativa  $P$ .

### 3.3 Métodos Utilizados para Avaliação da Estabilidade de Tensão

Através da análise da estabilidade de tensão é possível executar estratégias que visem garantir o suprimento de energia com qualidade, evitando ou minimizando, a interrupção do fornecimento de energia aos consumidores. Logo, se faz necessário utilizar métodos capazes de prever o colapso de tensão nos sistemas de potência quantificando as margens de estabilidade e os limites de transferência de potência, identificando os pontos fracos de tensão, as áreas susceptíveis à instabilidade e os fatores chave para sua ocorrência e sensibilidade, com a finalidade de adotar ações corretivas.

Existem duas classificações para os métodos que avaliam a estabilidade: estáticos e dinâmicos. Os métodos estáticos se fundamentam na análise de sistemas de equações algébricas obtidas a partir do modelo de fluxo de carga. Os métodos dinâmicos se fundamentam em soluções no tempo de sistemas de equações diferenciais e algébricas, de modo que haja uma representação do comportamento dinâmico dos elementos de um sistema de potência. Embora a estabilidade de tensão seja um processo dinâmico, proveniente do comportamento dinâmico das cargas e da interação dos mecanismos de controle, os métodos de avaliação estática são bastante importantes, visto que em algumas condições a análise estática produz resultados similares à dinâmica, com uma eficiência computacional superior.

Geralmente os métodos estáticos buscam determinar o estado de operação do sistema relativo ao limite de estabilidade de tensão.

Vários métodos e índices para avaliar e solucionar o problema da estabilidade de tensão são propostos na literatura, sendo que alguns serão brevemente abordados nesta pesquisa, a saber: o traçado de curvas *PV* e *QV*, o índice margem e o *Fast Voltage Stability Index* (FVSI).

### 3.3.1 Curvas *PV*

As curvas *PV* se constituem em um dos métodos mais utilizados para análise dos estudos de estabilidade de tensão. O objetivo do método consiste em determinar os limites de carregamento de um SEP em regime permanente.

A obtenção das curvas *PV* é feita através de sucessivas soluções do fluxo de carga e representa a variação da tensão em um barramento do sistema em função do incremento de potência ativa. A curva *PV* é apresentada na Figura 3.4:

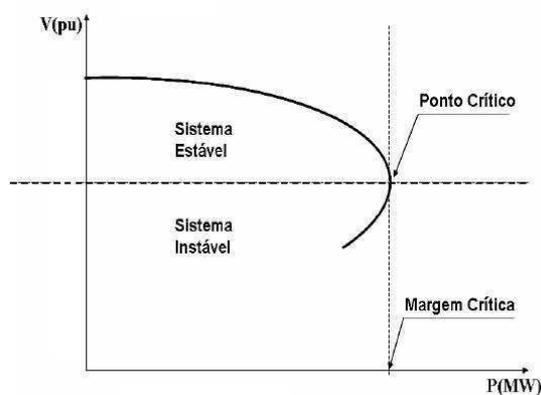


Figura 3.4 – Curva *PV*.

Cada ponto da curva representa um estado operativo do sistema associado a um nível de carregamento. O “extremo” da curva é denominado ponto crítico de carregamento, ou ponto de bifurcação estática. Para uma dada condição de carga, em adição à solução normal do fluxo de carga, que é tipicamente o ponto de operação atual, muitas outras soluções podem ser encontradas. A solução mais próxima ao ponto de equilíbrio estável (operação atual) é o ponto de equilíbrio instável. Estes pontos de equilíbrio se aproximam um do outro enquanto o sistema for sendo carregado, até o ponto onde somente uma única solução existe. Neste ponto de bifurcação, um autovalor real do Jacobiano do fluxo de carga se torna zero, isto é, a matriz

[ $J$ ] se torna singular. Logo, para pontos de operação próximos ao ponto crítico, esta se torna numericamente mal condicionada e o sistema é numericamente instável (Sodré, 2006).

Algumas observações são feitas para as curvas  $PV$ :

- Para uma carga com valores abaixo do máximo carregamento possível existem duas soluções para a relação (3.11) apresentada anteriormente: uma com tensão mais alta e corrente mais baixa e outra com tensão mais baixa e corrente mais alta. Apenas a primeira solução é aceitável operacionalmente, com tensões mais próximas às da fonte;
- Como a carga é atualmente muito compensada, a potência máxima aumenta, elevando consigo os valores de tensão. Essa situação é perigosa, pois a capacidade de transferência máxima pode ser atingida com tensões próximas dos valores normais de funcionamento. Outro fator a ser observado nessa situação é que as duas soluções de tensão possíveis se tornam muito próximas, dificultando a decisão de qual seria uma solução normal se não houver análises mais detalhadas;
- Para cargas excessivamente compensadas, existe uma parte da curva  $PV$  ao longo da qual a tensão aumenta com a potência da carga, pois com o fator de potência negativo, quanto mais potência ativa é consumida, mais potência reativa é produzida pela carga. Para valores baixos de carga, a queda de tensão oriunda do aumento de potência ativa é compensada pelo aumento de tensão devido ao aumento de potência reativa.

### 3.3.2 Curvas $QV$

As curvas  $QV$  mostram a sensibilidade que um barramento possui em relação à variação de sua tensão quando há injeção ou absorção de potência reativa nesse barramento.

Para determinação da curva  $QV$  de um barramento, deve-se considerá-lo como uma fonte variável e infinita de potência reativa. Assim como nas curvas  $PV$ , as curvas  $QV$  são obtidas através de sucessivas soluções do fluxo de carga. As tensões no barramento em que se deseja determinar a curva  $QV$  são alteradas para que sejam obtidos os valores de potência reativa necessários à manutenção dessas tensões especificadas. Uma típica curva  $QV$  é apresentada na Figura 3.5:

Figura 3.5 – Curva  $QV$ .

Por meio das curvas  $QV$  pode-se determinar o nível crítico de tensão, que corresponde ao mínimo da curva e à derivada  $\left(\frac{\partial Q}{\partial V} = 0\right)$ , ponto este que representa o limite de estabilidade de tensão e define o valor de potência mínima necessária para que o SEP opere de forma estável. A partir do nível crítico de tensão é observado que para diminuições dos valores de tensão há aumento na geração de potência reativa.

No lado direito da curva (onde a derivada  $\frac{\partial Q}{\partial V}$  é positiva) encontram-se os pontos de operação estável, enquanto que no lado esquerdo (onde a derivada  $\frac{\partial Q}{\partial V}$  é negativa), os pontos representam situações de instabilidade do SEP. O valor mínimo de potência reativa que é necessário para garantir que o sistema se mantenha estável é o ponto que corresponde à derivada nula da curva.

A distância entre o eixo horizontal e o ponto mínimo da curva  $QV$  representa a margem de potência reativa do ponto de operação do sistema escolhido para o traçado da curva e com relação a essa margem tem-se que:

- Com o mínimo da curva acima do eixo horizontal, o SEP encontra-se com deficiência de potência reativa;
- Para o mínimo da curva abaixo do eixo horizontal, o sistema possui alguma margem de potência reativa;
- Quando a curva  $QV$  é traçada para o ponto de operação do SEP em que há máximo carregamento (ponto crítico da curva  $PV$ ), não haverá margem de potência reativa e o ponto de mínimo será tangente ao eixo horizontal.

A Figura 3.6 ilustra os três pontos descritos acima.

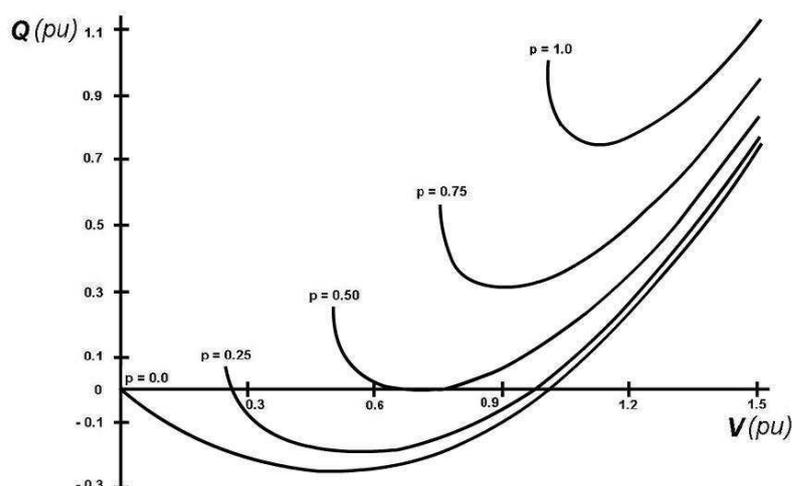


Figura 3.6 – Curvas  $QV$  para diversos valores de potência ativa.

### 3.3.3 Índice Margem

Um dos indicadores mais importantes de segurança de tensão de um sistema elétrico de potência em relação à estabilidade é conhecido como Índice Margem ( $IM$ ), o qual é baseado na análise da curva  $PV$  (Taylor, 1994). Este índice pode ser obtido através do cálculo de uma suposta margem de carregamento a partir de um ponto de operação até o ponto de máxima transferência de potência, quantificando a carga máxima que o sistema pode suportar até que seu limite de estabilidade de tensão estática seja atingido.

O ponto de carregamento máximo ou ponto de colapso de tensão ( $P_{cm}$ ) é característico da curva  $PV$ . A distância entre esse ponto e o de operação do caso base ( $P_{cb}$ ) do sistema determina a margem de estabilidade estática de tensão do sistema (também referenciada como índice margem). Logo, com o conhecimento desta margem é possível avaliar se diante de um distúrbio o sistema poderá operar de forma segura no novo ponto de operação.

A Figura 3.7 apresenta o índice margem. São destacados dois pontos para a curva  $PV$  traçada: o ponto de operação para o caso base do sistema e o seu ponto crítico.

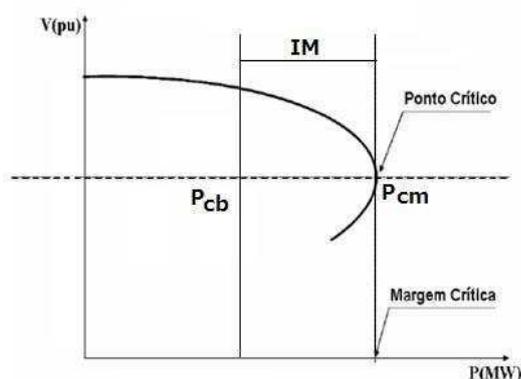


Figura 3.7 – Curva  $PV$  e Índice Margem ( $IM$ ).

O Índice margem é dado por:

$$IM = \Delta P = P_{cm} - P_{cb} \quad (3.12)$$

e em termos percentuais:

$$IM(\%) = \left( \frac{P_{cm}}{P_{cb}} - 1 \right) \cdot 100\%. \quad (3.13)$$

Quanto menor o valor de  $IM$  maior será a probabilidade do SEP em apresentar problemas operativos caso seja submetido a uma contingência. A explicação para esse fenômeno se dá pelo fato de que quanto mais próximo o SEP estiver operando do ponto crítico da curva  $PV$ , as tensões apresentarão um progresso rápido no declínio de seus valores em função de pequenas variações de carga. Estas variações de carga são devidas à grande parcela de potência reativa que se apresenta no pico de demanda do sistema.

Uma observação importante é o fato de que o  $IM$  calculado para um SEP operando com um caso base é maior que o  $IM$  para um que tenha sido submetido a uma contingência. A curva  $PV$  para o ponto de operação após a contingência apresenta uma relação de variação da tensão ( $\Delta V$ ) em relação à variação de potência ( $\Delta P$ ) maior que a curva  $PV$  para a operação normal.

### ***Critérios de Segurança***

Tendo em vista melhorias na operação, atendimento às demandas de potência e segurança dos sistemas elétricos, assim como diminuição e prevenção de grandes prejuízos financeiros ocasionados aos fenômenos de instabilidade, os agentes reguladores no mundo inteiro estabeleceram algumas diretrizes que regem os estudos, análises e funcionamento desses sistemas.

Uma diretriz importante para estudos do problema da estabilidade de tensão refere-se aos critérios de segurança definidos para funcionamento dos sistemas elétricos, seja em condições normais de operação ou em condição de perturbação. O valor do IM é utilizado mundialmente como critério que avalia a segurança de um sistema de potência.

O agente regulador *Western Electricity Coordinating Council* (WECC) dos Estados Unidos da América sugere uma margem de tensão mínima de 5% ao ocorrerem contingências simples no sistema. Para contingências duplas, uma margem de 2,5%. Outra recomendação é feita quanto à operação do sistema em condições normais: o valor de margem deve ser maior que o obtido em condições de contingência simples (WCC, 1998).

O Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), atuante no Brasil, recomenda como critério geral para os estudos de ampliação, reforços e de planejamento da operação, um valor mínimo de *IM* definido em 7% para condições normais de operação e de 4% para operação com contingências (ONS, 2007). É comum encontrar na literatura estudos de casos com sistemas de potência nacionais que utilizam como valor de margem um mínimo de 6% para contingências simples, visto que até meados de 2007 esse era o valor sugerido como diretriz pelo ONS no início de seus estudos (ONS, 2002).

### 3.3.4 FVSI

Inicialmente o FVSI foi formulado derivando a equação quadrática de tensão para duas barras de um sistema, na extremidade da recepção, conforme apresentado na Figura 3.8.

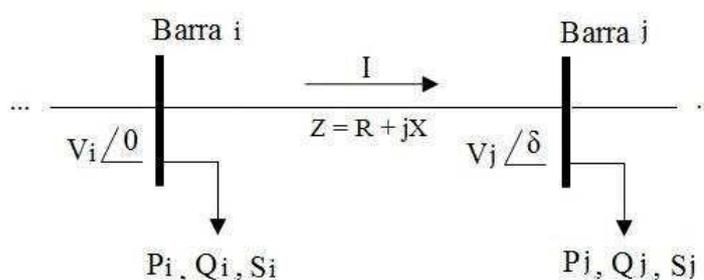


Figura 3.8 – Duas barras de um SEP.

A relação entre as tensões das duas barras da Figura 3.8 é a seguinte Mussirin *et al.* (2002a):

$$V_j^2 - \left(\frac{R}{X} \sin \delta + \cos \delta\right) V_i V_j + \left(X + \frac{R^2}{X}\right) Q^2 = 0, \quad (3.14)$$

que, como se vê, é uma equação quadrática. Portanto, suas raízes podem ser determinadas aplicando a fórmula de *Bhaskara*<sup>1</sup>:

$$V_j = \frac{-\left(-\left(\frac{R}{X} \sin \delta + \cos \delta\right) V_i\right) \pm \sqrt{\left[-\left(\frac{R}{X} \sin \delta + \cos \delta\right) V_i\right]^2 - 4\left[\left(X + \frac{R^2}{X}\right) Q^2\right]}}{2}. \quad (3.15)$$

Para que as raízes da equação (3.14) sejam reais seu discriminante (radicando na expressão 3.15) deve ser maior ou igual a zero, logo:

$$\left[-\left(\frac{R}{X} \sin \delta + \cos \delta\right) V_i\right]^2 - 4\left[\left(X + \frac{R^2}{X}\right) Q^2\right] \geq 0. \quad (3.16)$$

Rearranjando a relação (3.16):

$$\frac{4(X^2 + R^2)Q_j X}{[(R \sin \delta + X \cos \delta)V_i]^2} \leq 1. \quad (3.17)$$

Para  $\delta$  igual a zero (considerando apenas a potência reativa):

$$\frac{4(X^2 + R^2)Q_j}{XV_i^2} \leq 1. \quad (3.18)$$

Substituindo-se  $X^2 + R^2$  em (3.18) por  $Z^2$ :

$$\frac{4Z^2 Q_j}{XV_i^2} \leq 1. \quad (3.19)$$

Tem-se a seguinte expressão do FVSI:

$$FVSI_{ij} = \frac{4Z_{ij}^2 Q_j}{V_i^2 X_{ij}}, \quad (3.20)$$

sendo:

- $Z_{ij}$  → Módulo da impedância da linha  $ij$ ;
- $X_{ij}$  → Reatância da linha  $ij$ ;
- $V_i$  → Tensão na barra que injeta potência reativa;
- $Q_j$  → Fluxo reativo chegando na barra  $j$ .

Como descrito anteriormente na expressão (3.9) para transferência de potência, o índice FVSI é oriundo do máximo carregamento puramente reativo de um sistema e é um

<sup>1</sup> Desenvolvida pelo matemático e astrônomo indiano Bhaskara Akaria, a qual se exprime a idéia de que:  
 $x = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$ .

quarto da potência de curto-circuito. Sua explicação física é de que um SEP não deverá operar com carregamento máximo de reativos superior à  $\frac{E^2}{4X}$ . Caso exceda esse valor, o suporte de reativos do sistema fica comprometido, resultando, muitas vezes, em tensões inaceitáveis nos barramentos e operação instável do sistema.

# Capítulo 4

## Otimização por Colônia de Formigas

O primeiro método de otimização baseado no comportamento de colônia de formigas denominado de *Ant System* (AS), foi proposto por Marco Dorigo em sua tese de Ph.D, no início da década de 90 (Dorigo, 1992). A inspiração do algoritmo baseia-se na observação do comportamento das formigas quando estas saem da sua colônia à procura de alimento.

As aplicações iniciais para o algoritmo colônia de formigas foram sugeridas por Dorigo e Gambardella (1997) na busca de solução para um problema bastante reportado na literatura: o problema do caixeiro viajante (*Traveling Salesman Problem* – TSP). No final da década de 90, a metaheurística colônia de formigas (*Ant Colony Optimization Metaheuristic* – ACO) foi introduzida por Dorigo, Di Caro e Gambardella (Dorigo, *et al.*, 1999), (Dorigo & Di Caro, 1999) e baseia-se em probabilidade, sendo concebida para solucionar problemas de otimização.

A otimização por colônia de formigas é uma metaheurística inspirada no modo como as formigas cooperam em busca de alimento e conseguem descobrir os menores caminhos entre o formigueiro e uma fonte através de um mecanismo de comunicação indireta.

Ao se movimentar sobre o ambiente, uma formiga deposita uma substância química denominada feromônio, criando assim uma trilha. Quando esta descobre uma fonte de alimento, ela retorna ao formigueiro seguindo essa trilha criada e, dessa maneira, reforça o depósito de feromônio. Esta substância atrai as outras formigas da colônia para a coleta do alimento encontrado, as quais seguem a trilha construída e reforçam cada vez mais o feromônio sobre ela. Caso existam várias trilhas com feromônio que conduzem a uma fonte de alimento, as formigas fazem a seleção da trilha a ser percorrida de forma probabilística, baseadas na concentração de feromônio sobre as trilhas existentes.

As formigas que percorrem a trilha menor até a fonte de alimento retornam ao formigueiro antes daquelas que escolhem trilhas maiores. A trilha menor possuirá uma maior concentração de feromônio que as demais, atraindo um número maior de formigas. Deste modo, a colônia é capaz de selecionar o menor caminho para uma determinada fonte de alimento de forma cooperativa. Tal processo é exemplificado na Figura 4.1.

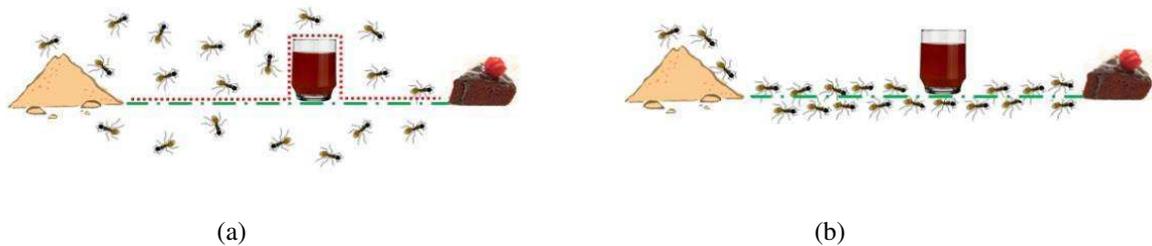


Figura 4.1 – (a) Escolha aleatória do caminho; (b) Escolha do menor caminho.

Inicialmente as formigas partem do formigueiro de forma aleatória em busca de alimento (Figura 4.1a). Com o passar do tempo elas passam a percorrer o menor caminho, já que se constitui o trajeto que possui maior concentração de feromônio (Figura 4.1b).

O ACO possui como principais características os seguintes pontos (Vittori, *et al.*, 2008):

- Os agentes cooperam entre si para obtenção de uma solução ótima para o problema através do compartilhamento da informação coletada por eles enquanto se deslocam sobre o ambiente;
- Os agentes se deslocam entre estados vizinhos do ambiente buscando sempre as menores trilhas;
- Enquanto as formigas reais modificam o ambiente depositando feromônio sobre ele, os agentes mudam uma informação numérica sobre as condições do ambiente, informação esta que é armazenada em cada estado visitado;
- Os agentes selecionam suas ações de forma probabilística, baseados na informação local sobre o ambiente;
- O movimento dos agentes se caracteriza por transições entre estados discretos;
- Os agentes possuem capacidade de memória relacionada com as ações passadas;
- A quantidade de feromônio depositado pode ocorrer em função da qualidade da solução obtida e o momento em que este depósito ocorre é dependente do problema;
- Os agentes podem utilizar outros mecanismos extras para melhorar o desempenho do ACO com relação à descoberta da solução ótima, como otimização local, consideração de ações passadas ou estados futuros.

Um aspecto importante no comportamento das colônias de formigas é que os agentes sempre procuram o menor caminho entre a colônia e a fonte de alimento e, uma vez encontrado, é mantido pela colônia.

Devido à volatilidade do feromônio, há evaporação dessa substância nos caminhos em que as formigas percorrem. Essa evaporação se dá a uma determinada taxa por unidade de tempo e se constitui de um processo natural com a finalidade de evitar que as formigas persistam em caminhos que não sejam os melhores. Essa propriedade do feromônio possibilita que as formigas encontrem o caminho ótimo até a fonte de alimentos.

#### 4.1 *Ant System* – AS

O *Ant System* (AS) foi o primeiro método de otimização baseado no comportamento de colônia de formigas empregado para solucionar problemas combinatoriais, como o problema do caixeiro viajante (TSP).

No método AS os agentes selecionam pseudo aleatoriamente um ponto de partida para depois seguirem suas trajetórias tomando novas decisões de destino em cada estágio alcançado. O depósito de feromônio é feito de forma indiscriminada ou proporcional à qualidade da solução encontrada, havendo assim níveis diferenciados de feromônio relacionados a cada opção disponível de trajeto, com probabilidade de escolha dada por:

$$P_{ij} = \begin{cases} \frac{\tau_{ij}^{\alpha} \eta_{ij}^{\beta}}{\sum_{u \in \Psi} \tau_{iu}^{\alpha} \eta_{iu}^{\beta}}, & \text{se } j \in \Psi \\ 0, & \text{caso contrário,} \end{cases} \quad (4.1)$$

sendo:

$P_{ij}$  → Probabilidade de uma formiga ir de um local  $i$  para um local  $j$ ;

$\tau_{ij}$  → Quantidade de feromônio sobre o caminho  $ij$ ;

$\eta_{ij}$  → Conhecimento individual de cada formiga sobre o caminho;

$\alpha$  e  $\beta$  → Coeficientes que ponderam a concentração de feromônio (conhecimento coletivo) e a informação heurística (conhecimento individual);

$\Psi$  → Conjunto dos caminhos que podem ser escolhidos pela formiga  $i$ .

Para eliminar a influência do conhecimento individual de cada formiga sobre o caminho (visibilidade), por exemplo, faz-se  $\beta$  igual a zero e  $\alpha$  diferente de zero. Com isso, as decisões levarão em consideração apenas o nível de feromônio nas trilhas.

Uma etapa importante nos modelos baseados em colônia de formigas diz respeito ao incremento de feromônio, pois seu nível influencia de forma direta o cálculo da probabilidade. É de fundamental importância a elaboração de uma estratégia de atualização das taxas de

feromônio nos diversos trechos do problema, procurando evitar não apenas a insistência em alternativas não ótimas, como também a ineficiência na exploração de outros trechos em virtude de altas taxas de feromônio concentradas em poucas alternativas (Guedes, 2012).

No *Ant System*, a atualização dos níveis de feromônio é feita da seguinte forma:

$$\tau_{ij}(t) = (1 - \rho)\tau_{ij}(t - 1) + \sum_{k=1}^{n_f} \Delta\tau_{ij}^k, \quad (4.2)$$

sendo:

$\rho$  → Coeficiente que representa a taxa de evaporação ( $0 < \rho < 1$ );

$\tau_{ij}(t)$  → Nível de feromônio no caminho  $ij$  para o instante  $t$ ;

$n_f$  → Número total de agentes;

$\Delta\tau_{ij}$  → Incremento a ser realizado pelo agente  $k$  nesse mesmo caminho no instante  $t$ , dado por:

$$\Delta\tau_{ij}^k = \begin{cases} \frac{Q}{L_k}, & \text{se } k \text{ percorre o caminho } ij \text{ em sua solução} \\ 0, & \text{caso contrário,} \end{cases} \quad (4.3)$$

onde:

$Q$  → Constante;

$L_k$  → Distância percorrida pela formiga  $k$  após trilhar todos os caminhos.

A primeira decisão de todas as formigas é tomada ao acaso, as demais levam em consideração a equação de probabilidade (4.1) e os níveis de feromônio iniciais devem ser diferentes de zero para evitar divisão por zero nessa expressão. Após a realização de uma expedição, isto é, ter completo uma solução do problema, atualiza-se o nível de feromônio de cada etapa da solução, de acordo com a expressão (4.2), evaporando parte do feromônio já depositado para que seja reduzida a influência de decisões passadas. O processo é repetido até o algoritmo encontrar o conjunto de decisões que promovam a melhor solução (Guedes, 2012).

Alguns algoritmos foram desenvolvidos a partir do AS, como por exemplo: *Elitist Ant System* (EAS), *Ant Q*, *Ant Colony System* (ACS). As diferenças entre eles se constituem quanto à forma de atualização dos níveis de feromônio e tomada de decisão sobre o próximo caminho a ser trilhado.

## 4.2 *Ant Colony Optimization* – ACO: Aplicação ao Problema

O ACO será utilizado nesta pesquisa com o objetivo de otimizar o carregamento de potência reativa do sistema testado.

Alguns parâmetros do sistema são inicializados para o algoritmo, de forma que o primeiro grupo de formigas não possui conhecimento algum do espaço de busca, fazendo com que todos os caminhos tenham igual chance de serem percorridos. Os parâmetros a serem inicializadas são:  $n$ ,  $n_f$ ,  $t_{max}$ ,  $\beta$ ,  $\rho$ ,  $\alpha$ , e  $\tau_0$ ,

onde:

$n$  → Número de barras do sistema;

$n_f$  → Número de formigas;

$t_{max}$  → Número de iterações máximo;

$\beta$  → Parâmetro que define a importância do conhecimento individual de cada formiga;

$\rho$  → Coeficiente que representa a taxa de evaporação ( $0 < \rho < 1$ );

$\alpha$  → Peso atribuído à concentração do feromônio nas ligações percorridas;

$\tau_0$  → Nível inicial de feromônio.

Cada parâmetro requer um valor fixo de inicialização para limitar o intervalo de busca do algoritmo, evitando, desta forma, maiores esforços computacionais.

As formigas que estão localizadas na barra  $i$  irão escolher a próxima barra a ser visitada com base na equação de probabilidade (4.1).

Nesta pesquisa, é considerado que as formigas não possuem conhecimento individual sobre as decisões de carregamento a ser realizado, visto que não é conhecida nenhuma alternativa ótima para o carregamento máximo inicial. Para isso,  $\beta = 0$  e a equação de probabilidade (4.1) se reduz à equação (4.4):

$$P_{ij} = \begin{cases} \frac{\tau_{ij}^\alpha}{\sum_{u \in \Psi} \tau_{iu}^\alpha}, & \text{se } j \in \Psi \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (4.4)$$

Ao retornarem ao formigueiro, o primeiro grupo de formigas atualiza o feromônio aos caminhos percorridos, influenciando o próximo grupo de formigas. Os eventos fundamentais para a atualização são a evaporação e o depósito do feromônio.

A adição de feromônio é feita de acordo com Pimentel Filho, *et al.* (2008), pela relação (4.5):

$$\tau_{ij} = \tau_{ij} + \sum \Delta\tau_{ij}, \text{ se } j \in \Psi \quad (4.5)$$

e a evaporação do feromônio é dada por (4.6), também de acordo com Pimentel Filho, *et al.* (2008):

$$\tau_{ij} = (1 - \rho)\tau_{ij}, \text{ se } j \in \Psi, \quad (4.6)$$

onde:

$\Psi$  → Conjunto dos caminhos percorridos;

$\Delta\tau_{ij}$  → Quantidade de feromônio adicionado ao caminho  $ij$ , que depende do sucesso ou do fracasso das formigas ao percorrerem seus caminhos.

A carga de feromônio adicionada em um caminho é diretamente proporcional à quantidade de incremento de reativos nas barras de carga. Caso haja divergência do fluxo de carga, o valor de adição do feromônio será nulo, considerando que a formiga não conseguiu completar o seu percurso.

A expressão (4.7) é utilizada nesta pesquisa como critério para adição de feromônio:

$$\Delta\tau_{ij} = \frac{\text{Soma\_FVSI}}{M}, \quad (4.7)$$

onde:

$M$  → Constante, cujo valor é definido para garantir que quanto maior o carregamento, maior a taxa de feromônio adicionada ao caminho e que carregamentos próximos tenham diferença significativa no incremento de feromônio;

$\text{Soma\_FVSI}$  → Soma dos valores de FVSI de todas as linhas do SEP.

O valor obtido para o incremento máximo de feromônio deve ser pequeno ( $10^{-3}$ ) para que o método não fique viciado em soluções não desejadas.

# Capítulo 5

## Método Proposto e Resultados

As duas subseções a seguir apresentam a aplicação do método FVSI e da metaheurística ACO para avaliar o problema da estabilidade de tensão através da obtenção da capacidade de máximo carregamento de potência reativa do sistema elétrico. Em seguida, são apresentados os resultados obtidos.

### 5.1 FVSI para Determinação da Capacidade de Carregamento Máximo

#### 5.1.1 Carregamento Máximo de Barramento Individual

A busca pelo ponto de carregamento máximo para uma determinada barra do sistema de potência envolve a análise do fluxo de carga, do qual depende o cálculo dos valores do FVSI, que é repetido para o mesmo número de vezes que forem executados o fluxo de carga. Apresenta-se a seguir o procedimento para identificação do ponto de capacidade de carregamento máximo em um barramento de um SEP utilizando o FVSI (Musirin & Rahman, 2002):

- a. Executar o programa de fluxo de carga para o caso base;
- b. Avaliar o valor do FVSI para cada linha do sistema;
- c. Incrementar o carregamento de potência reativa em uma barra selecionada até que uma das linhas do sistema tenha valor de FVSI próximo à unidade. Devem ser calculados os valores de FVSI para todos os incrementos de carga;
- d. Selecionar a linha cujo índice FVSI tenha o valor mais elevado dentre todas as ligadas à mesma barra, que será considerada a mais fraca;
- e. Escolher outra barra e repetir os passos (a) a (d);
- f. Obter os valores de tensão para os máximos valores de FVSI computados antes da divergência do fluxo de carga. Este procedimento pode ser obtido a partir de (c) e determina a tensão crítica de uma barra;
- g. Computar os valores de máximo carregamento de potência reativa correspondentes aos do índice FVSI de todas as barras. Este procedimento pode ser obtido em (e) e determina a capacidade de máximo carregamento de uma barra.

### 5.1.2 Carregamento Máximo de um SEP

A diferença entre obter os valores do FVSI para um barramento individual e para um SEP é que ao invés de escolher um barramento por vez para incremento de reativos e cálculo do FVSI, são incrementadas todas as barras de carga do SEP simultaneamente, até que uma de suas linhas possua valor de FVSI próximo à unidade.

Ao carregar-se um barramento por vez, tem-se o pior caso de incremento desse barramento, pois ele suportará uma maior quantidade de reativos do que se fosse carregado simultaneamente com outro(s) barramento(s). Nesta pesquisa, para obtenção do carregamento máximo otimizado, todas as barras do SEP são incrementadas simultaneamente, pois esse tipo de carregamento representa mais realisticamente o funcionamento de um SEP com relação ao fluxo de reativos.

## 5.2 ACO

O algoritmo ACO utilizado nesta pesquisa é apresentado na Figura 5.1:

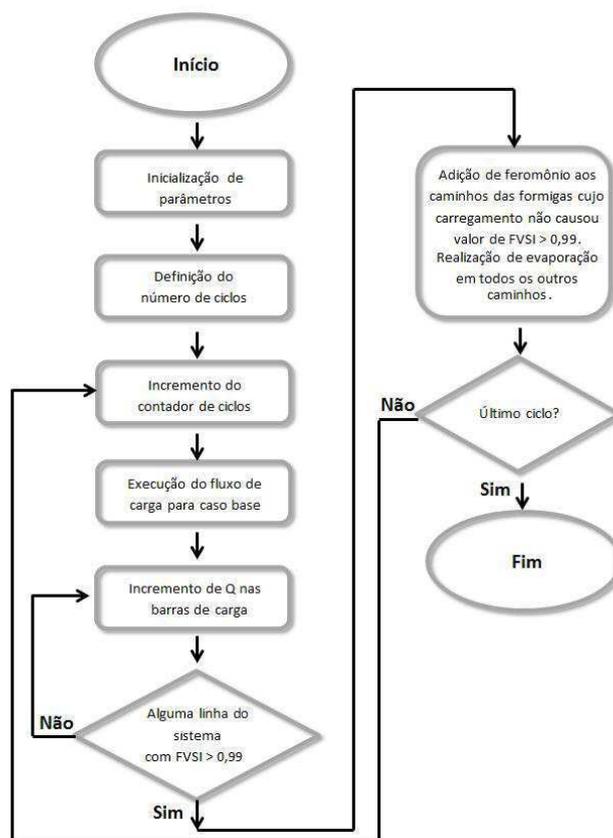


Figura 5.1 – Fluxograma para o algoritmo ACO.

O único valor que não foi definido experimentalmente para o algoritmo foi o número de barras de carga do SEP, que é nove. O número de formigas utilizadas, o número máximo de iterações, os valores de  $\beta$ ,  $\alpha$  e  $\rho$ , o valor inicial de feromônio, o valor da constante e a quantidade de ciclos foram todos definidos de forma empírica. Os parâmetros de inicialização do ACO são apresentados na Tabela 5.1:

Tabela 5.1 – Valores de parâmetros do ACO.

Parâmetro	Valor Utilizado
$n$ (número de barras de carga do sistema)	9
$nf$ (número de formigas)	20.000
$tmax$ (número máximo de iterações)	25
$\beta$ (importância do conhecimento individual)	0
$\alpha$ (importância do conhecimento coletivo)	1
$\rho$ (evaporação de feromônio)	1
$\tau_0$ (valor inicial de feromônio)	0,25
$M$ (constante)	1.000
Quantidade de ciclos	15

### 5.3 Resultados

Para realização dos testes propostos, o sistema teste do *Institute of Electrical and Electronic Engineers* (IEEE) com 14 barras foi escolhido (*University of Washington Electrical Engineering, 2012*).

O sistema IEEE 14 barras representa uma parte do sistema de energia elétrica americano e são fornecidos para teste, com acesso mundial.

Na Figura 5.2 é apresentado o sistema teste IEEE 14 barras.

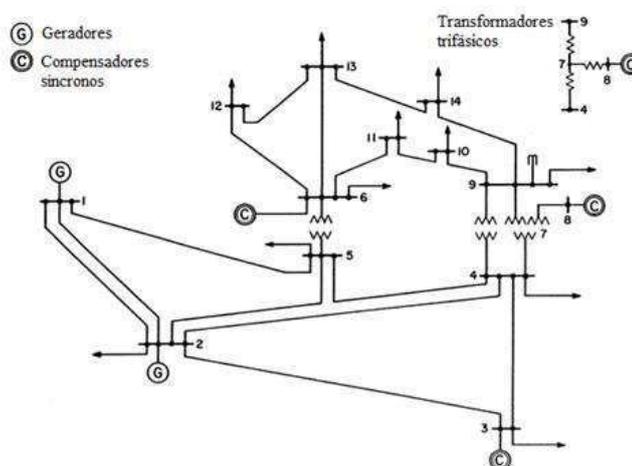


Figura 5.2 – Sistema teste IEEE 14 barras.

Os dados dos barramentos e das linhas de transmissão do sistema IEEE 14 barras encontram-se no Anexo A.

### 5.3.1 Programação do Fluxo de Carga *Newton-Raphson*

Para realizar os sucessivos incrementos de reativos de um SEP foi necessária a programação de uma rotina de fluxo de carga. O método utilizado para a construção da rotina foi o de *Newton-Raphson*. A programação foi feita em MATLAB<sup>®</sup>.

A rotina programada do fluxo de carga *Newton-Raphson* é fundamental para o cálculo do FVSI, visto que duas de suas variáveis necessárias para o seu cálculo (tensão e potência reativa) são obtidas após incremento de reativos e solução do fluxo de carga do SEP. Não menos importante, a determinação dos carregamentos máximos de um SEP utilizando ACO também necessita fundamentalmente dessa rotina.

Com a finalidade de validar a rotina de fluxo de carga programada em MATLAB<sup>®</sup>, os resultados obtidos para a solução do fluxo de carga do caso base do sistema IEEE 14 barras foram comparados com os obtidos através do *software* ANAREDE<sup>®</sup>. Esses resultados são apresentados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Comparação entre tensões do fluxo de carga ANAREDE<sup>®</sup> versus MATLAB<sup>®</sup>.

Barramento	Valores Obtidos com o ANAREDE <sup>®</sup>		Valores Obtidos com o MATLAB <sup>®</sup>		Erro (%)	
	Módulo da Tensão (pu)	Ângulo da Tensão (Graus)	Módulo da Tensão (pu)	Ângulo da Tensão (Graus)	Módulo da Tensão	Ângulo da Tensão
1	1,0600	0,00	1,0600	0,00	0,00%	0,00%
2	1,0450	-5,00	1,0450	-4,98	0,00%	0,39%
3	1,0100	-12,70	1,0100	-12,72	0,00%	0,15%
4	1,0180	-10,30	1,0183	-10,32	0,03%	0,18%
5	1,0200	-8,80	1,0205	-8,79	0,05%	0,17%
6	1,0700	-14,20	1,0700	-14,24	0,00%	0,31%
7	1,0620	-13,30	1,0616	-13,37	0,04%	0,52%
8	1,0900	-13,30	1,0900	-13,37	0,00%	0,52%
9	1,0560	-14,90	1,0559	-14,95	0,01%	0,34%
10	1,0520	-15,10	1,0510	-15,11	0,10%	0,08%
11	1,0570	-14,80	1,0569	-14,81	0,01%	0,06%
12	1,0550	-15,10	1,0552	-15,10	0,02%	0,01%
13	1,0500	-15,10	1,0504	-15,18	0,04%	0,52%
14	1,0360	-16,00	1,0355	-16,05	0,05%	0,31%

A Tabela 5.2 apresenta resultados muito próximos para as soluções do fluxo de carga obtidas pelos dois programas. Dessa forma, a rotina programada é validada para ser utilizada como auxílio fundamental nos cálculos do índice FVSI e nos de carregamento máximo do SEP empregando o ACO.

### 5.3.2 FVSI do IEEE 14 Barras para o Caso Base

O primeiro teste realizado para o índice FVSI consistiu em executar o fluxo de carga através da rotina de *Newton-Raphson* do sistema IEEE 14 para o caso base e calcular os valores de FVSI com a rotina desenvolvida em MATLAB<sup>®</sup> para todas as linhas desse sistema, com a finalidade de comparar os resultados obtidos com os constantes em Costa (2008).

A comparação em questão serve também para validar a programação feita para a rotina do FVSI em MATLAB<sup>®</sup>. É apresentada na Tabela 5.3 a comparação dos valores de FVSI para o caso base do sistema IEEE 14 barras.

Não foi possível realizar mais comparações desse índice devido ao fato de que não foram encontrados na literatura casos semelhantes em que fossem apresentados os valores obtidos para o índice.

Tabela 5.3 – Comparação entre valores do FVSI para o caso base do IEEE 14 barras.

Linha	Valores de FVSI Obtidos com a Programação em MATLAB <sup>®</sup>	Valores de FVSI Apresentados por Costa (2008)	Erro (%)
1 2	0,0476	0,0407	14%
1 5	0,0285	0,0420	47%
2 3	0,0273	0,0294	8%
2 4	0,0138	0,0197	42%
2 5	0,0042	0,0003	93%
3 4	0,0312	0,0310	1%
4 5	0,0268	0,0240	10%
4 7	0,1541	0,1598	4%
4 9	0,1286	0,1262	2%
5 6	0,1700	0,1771	4%
6 11	0,0305	0,0290	5%
6 12	0,0276	0,0266	4%
6 13	0,0414	0,0403	3%
7 8	0,1016	0,1001	2%
7 9	0,0227	0,0212	7%
9 10	0,0145	0,0147	1%
9 14	0,0426	0,0384	10%
10 11	0,0133	0,0134	1%
12 13	0,0121	0,0127	5%
13 14	0,0275	0,0225	18%

Observa-se na Tabela 5.3 que os valores dos índices são bem semelhantes, destacando-se dois valores que não foram tão próximos, a saber, os das linhas 1|5 e 2|5, com diferença entre eles de 47% e de 93%, respectivamente. Essa diferença de valores foi obtida porque em Costa (2008) provavelmente não foram inseridas na programação do fluxo de carga *Newton-Raphson* a modelagem dos transformadores, já na programação feita para esta pesquisa tal modelagem foi inserida. No caso da linha 2|5, o valor obtido nessa pesquisa é maior que o obtido em Costa (2008), o que nos dá uma segurança maior quanto à classificação dessa linha ao suporte de reativos. De posse dessa comparação de valores, a rotina programada foi validada para ser utilizada nos cálculos do índice FVSI.

### 5.3.3 Carregamento do IEEE 14 Barras por Porcentagem

O teste a seguir consiste em incrementar sucessivamente a potência reativa nos barramentos de carga do sistema IEEE 14 barras até que, pelo menos, uma de suas linhas de transmissão apresente um valor de FVSI próximo à unidade, com a finalidade de obter o carregamento máximo do sistema no limite de sua estabilidade de tensão. Todas as barras de carga do sistema são incrementadas simultaneamente de acordo com a expressão abaixo:

$$\text{Incremento\_Reativos} = 1 + (0,05 * Q_j) \quad (5.1)$$

A expressão (5.1) apresenta o incremento realizado conforme os reativos inicialmente existentes na barra de carga  $j$ . O valor “1” está presente na expressão para evitar que não haja incremento em uma barra de carga com valor inicial de reativos igual à zero.

O cálculo do FVSI é feito através de uma rotina desenvolvida em MATLAB<sup>®</sup>. Nesta pesquisa, o valor de 0,98 para o índice FVSI foi utilizado como critério de parada para o incremento potência reativa.

Na Tabela 5.4 são apresentados os valores de carregamento máximo das barras PQ obtido por porcentagem. Foi feito o uso da rotina de fluxo de carga em conjunto com a de FVSI para a obtenção dos resultados. Nessa etapa dos testes, o ACO não está sendo empregado no processo de carregamento máximo, pois o intuito é verificar os valores do índice FVSI e os de carregamento máximo de reativos sem a otimização proporcionada pelo ACO.

Tabela 5.4 – Carregamentos máximos do IEEE 14 barras por porcentagem.

Barramento	Q (Mvar) por Porcentagem
4	45,10
5	50,60
7	49,00
9	65,60
10	54,80
11	50,80
12	50,60
13	54,80
14	54,00
<b>Total (Mvar)</b>	<b>475,30</b>

Através da Tabela 5.4 observa-se que o carregamento máximo de reativos por porcentagem foi de 475,30 Mvar, que corresponde aos valores de reativos suportados pelo sistema operando de forma estável quanto à estabilidade de tensão utilizando esse tipo de carregamento.

Ainda analisando a Tabela 5.4, as barras de carga podem ser classificadas quanto à criticidade de suporte de reativos. Da menor capacidade para a maior, a classificação dos barramentos resultou em: 4, 7, 5, 12, 11, 14, 10, 13 e 9.

Os valores dos índices FVSI para as todas as linhas do sistema IEEE 14 barras são apresentados na Tabela 5.5. Esses índices correspondem aos valores calculados para o caso base do sistema (onde não há incremento de reativos) e após a realização do incremento de potência reativa por porcentagem.

Tabela 5.5 – FVSI para o IEEE 14 barras: caso base e caso pós-carregamento por porcentagem.

Linha	Valores de FVSI para o Caso Base	Valores de FVSI para o Caso Após Incremento de Reativos
112	0,0476	0,0621
115	0,0285	0,2977
213	0,0273	0,0216
214	0,0138	0,3263
215	0,0042	0,2790
314	0,0312	0,4012
415	0,0268	0,0449
417	0,1541	0,2182
419	0,1286	0,6791
516	0,1700	0,3599
6111	0,0305	0,9264
6112	0,0276	0,6513
6113	0,0414	0,6723
718	0,1016	0,6103
719	0,0227	0,4620
9110	0,0145	0,1441
9114	0,0426	0,4218
10111	0,0133	0,4105
12113	0,0121	0,0086
13114	0,0275	0,9676

Os resultados constantes na Tabela 5.5 podem ser interpretados como avisos da operação do SEP com relação à estabilidade de tensão, pois um aumento maior de trânsito de reativos nas linhas com índices FVSI altos pode levar o sistema a operar de forma instável e, conseqüentemente, ao colapso de tensão.

Para uma melhor comparação dos índices FVSI obtidos, é apresentado na Figura 5.3 um gráfico contendo os valores do índice antes e após o carregamento de reativos por porcentagem.

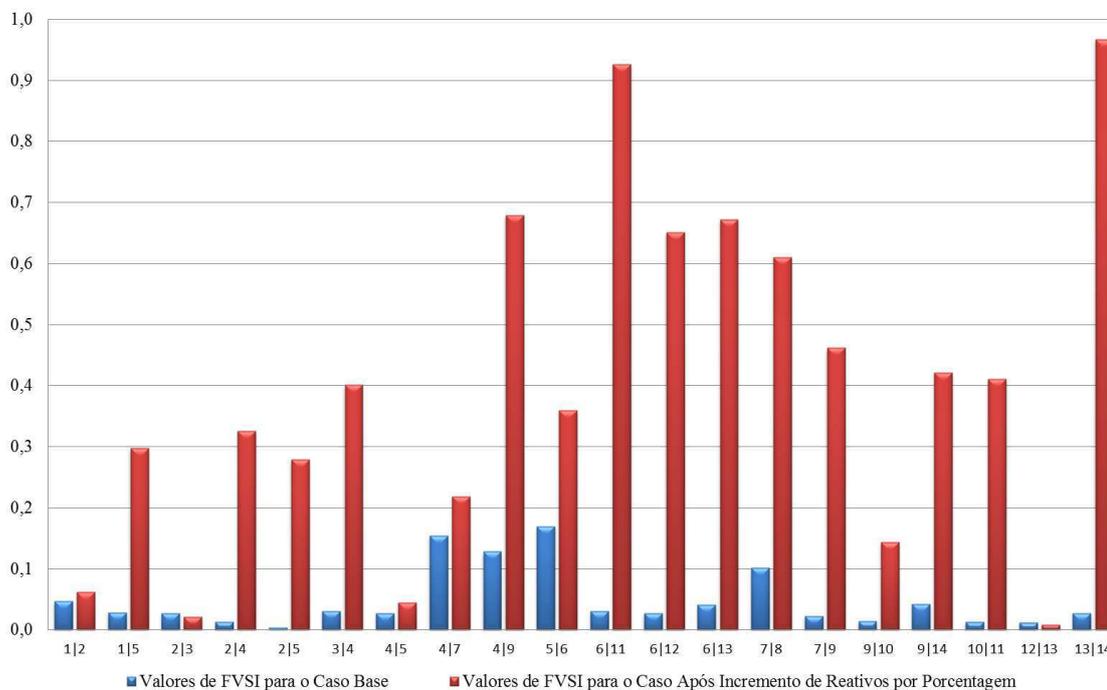


Figura 5.3 – Comparação do FVSI antes e após carregamento por porcentagem.

### 5.3.4 Carregamento do IEEE 14 Barras com ACO

O modo de carregamento de um SEP pode levá-lo a operar de forma instável sem que esse tenha atingido um nível de carregamento considerado o máximo suportável pelo sistema. A obtenção do carregamento máximo de um SEP não é uma tarefa de fácil execução, visto que o problema tratado é não linear.

Para obtenção da solução do problema, na etapa a seguir foi desenvolvida a rotina ACO, programada em MATLAB®, seguindo o fluxograma proposto na Figura 5.1 deste capítulo.

No problema em questão, para dimensionar o espaço de busca, foi considerado que uma formiga pode se deslocar pelas nove barras de carga do SEP através de cem caminhos diferentes, sendo “100” a quantidade de reativos máxima a ser incrementada. Escolheu-se o valor de cem caminhos porque foi observado através de simulações que nenhuma barra de carga do sistema foi carregada com um valor de reativos maior do que este valor. Dessa

forma, para que o esforço computacional não fosse maior, o número total de caminhos do espaço de busca é de:

$$(10^2)^9 = 1.000.000.000.000.000.000$$

Pode-se perceber através da dimensão do espaço de busca que há a necessidade de utilizar um algoritmo de otimização para diminuir o esforço computacional na procura pela solução do problema. Também é possível concluir que o problema se torna muito mais árduo à medida que a quantidade de barras de carga a serem incrementadas aumenta. Com o objetivo de reduzir o esforço computacional na obtenção do valor otimizado para o carregamento máximo, a metaheurística ACO foi utilizada nessa dissertação.

A rotina ACO desenvolvida considerou que o primeiro grupo de formigas não tem conhecimento algum do espaço de busca a ser trilhado. Dessa forma, todos os caminhos são passíveis de serem escolhidos e com igual chance. Os valores iniciais de feromônio são definidos para que essa característica do problema seja satisfeita. Logo após percorrerem a primeira expedição (cada formiga deverá incrementar reativos em todas as barras de carga do SEP), o primeiro grupo de formigas deposita feromônio nas trilhas percorridas, começando então a influenciar os próximos grupos de formigas. O depósito de feromônio está diretamente ligado ao sucesso da formiga em conseguir carregar de forma otimizada as barras de carga do SEP, permitindo-o operar no limite de sua estabilidade. As formigas deslocam-se através das barras PQ do SEP, realizando incremento de reativo específico em cada uma das barras por onde passaram.

Na Tabela 5.6 são apresentados os valores de carregamento máximo das barras PQ do sistema teste através do uso da rotina ACO.

Tabela 5.6 – Carregamentos máximos do IEEE 14 barras com o ACO.

Barramento	Q (Mvar) com ACO
4	100,00
5	47,00
7	62,00
9	75,00
10	76,00
11	31,00
12	80,00
13	58,00
14	42,00
<b>Total (Mvar)</b>	<b>571,00</b>

Através da Tabela 5.6 observa-se que o carregamento máximo de reativos das barras de carga do sistema com a utilização do ACO foi de 571,00 Mvar, que corresponde aos valores de reativos suportados pelo sistema operando de forma estável.

Ainda analisando a Tabela 5.6 as barras de carga podem ser classificadas quanto à criticidade ao suporte de reativos. Da menor capacidade para a maior, a classificação dos barramentos resultou em: 11, 14, 5, 13, 7, 9, 10, 12 e 4.

Uma comparação para a classificação dos barramentos utilizando o carregamento por porcentagem e o carregamento com ACO é apresentada na Tabela 5.7:

Tabela 5.7 – Comparação entre classificação dos barramentos do IEEE 14 barras.

Classificação dos Barramentos	
Por Porcentagem	Com ACO
4	11
7	14
5	5
12	13
11	7
14	9
10	10
13	12
9	4

Observando a Tabela 5.7 pode-se concluir que a classificação de barramentos de um SEP por capacidade de reativos varia de acordo com o tipo de incremento realizado no sistema.

A duração da simulação utilizando ACO foi de 1 hora e 51 minutos.

Para ratificar o esforço computacional empregado na solução do problema exposto (encontrar o carregamento máximo otimizado do IEEE 14 barras), foi feita uma simulação pelo método de Monte Carlo para o sistema teste. O resultado para o carregamento máximo de 571,00 Mvar foi obtido em 5 dias, 17 horas e 46 minutos.

Os valores dos índices FVSI para as todas as linhas do sistema IEEE 14 barras são apresentados na Tabela 5.8. Esses índices correspondem aos valores calculados para o caso base do sistema (onde não há incremento de reativos) e após a realização do incremento de potência reativa por porcentagem.

Tabela 5.8 – FVSI para o IEEE 14 barras: caso base e caso pós-carregamento com ACO.

Linha	Valores de FVSI para o Caso Base	Valores de FVSI para o Caso Após Incremento de Reativos com ACO
1 2	0,0476	0,0684
1 5	0,0285	0,3911
2 3	0,0273	0,0191
2 4	0,0138	0,4769
2 5	0,0042	0,3735
3 4	0,0312	0,5647
4 5	0,0268	0,1075
4 7	0,1541	0,2773
4 9	0,1286	0,8265
5 6	0,1700	0,4117
6 11	0,0305	0,9792
6 12	0,0276	0,9373
6 13	0,0414	0,7830
7 8	0,1016	0,7133
7 9	0,0227	0,5587
9 10	0,0145	0,2064
9 14	0,0426	0,2082
10 11	0,0133	0,6450
12 13	0,0121	0,2631
13 14	0,0275	0,9794

Através da Tabela 5.8 é possível observar que as duas linhas mais críticas do sistema IEEE 14 barras são as 6|11 e a 13|14.

É apresentada na Tabela 5.9 uma comparação dos valores de FVSI para o caso base e os casos pós-carregamento. Pode-se perceber que os valores de FVSI nas linhas pós-carregamento utilizando a metaheurística ACO foram maiores que os valores por incremento de reativos através da porcentagem. Através dessa comparação vê-se claramente que com a utilização do ACO houve melhor carregamento de reativos e o sistema se manteve operando de forma estável.

Apesar da classificação dos barramentos ter mudado em função do modo pelo qual o sistema foi incrementado, não houve mudança na classificação das linhas de transmissão do sistema, mantendo-se as linhas 6|11 e 13|14 como as mais críticas.

Tabela 5.9 – Comparação do FVSI para o IEEE 14 barras: caso base e casos pós-carregamento por porcentagem e com ACO.

Linha	Valores de FVSI para o Caso Base	Valores de FVSI para o Caso Após Incremento de Reativos por Porcentagem	Valores de FVSI para o Caso Após Incremento de Reativos com ACO
1 2	0,0476	0,0621	0,0684
1 5	0,0285	0,2977	0,3911
2 3	0,0273	0,0216	0,0191
2 4	0,0138	0,3263	0,4769
2 5	0,0042	0,2790	0,3735
3 4	0,0312	0,4012	0,5647
4 5	0,0268	0,0449	0,1075
4 7	0,1541	0,2182	0,2773
4 9	0,1286	0,6791	0,8265
5 6	0,1700	0,3599	0,4117
6 11	0,0305	0,9264	0,9792
6 12	0,0276	0,6513	0,9373
6 13	0,0414	0,6723	0,7830
7 8	0,1016	0,6103	0,7133
7 9	0,0227	0,4620	0,5587
9 10	0,0145	0,1441	0,2064
9 14	0,0426	0,4218	0,2082
10 11	0,0133	0,4105	0,6450
12 13	0,0121	0,0086	0,2631
13 14	0,0275	0,9676	0,9794

Para uma melhor comparação dos índices FVSI obtidos, é apresentado na Figura 5.4 um gráfico contendo os valores do índice antes e após o carregamento de reativos por porcentagem.

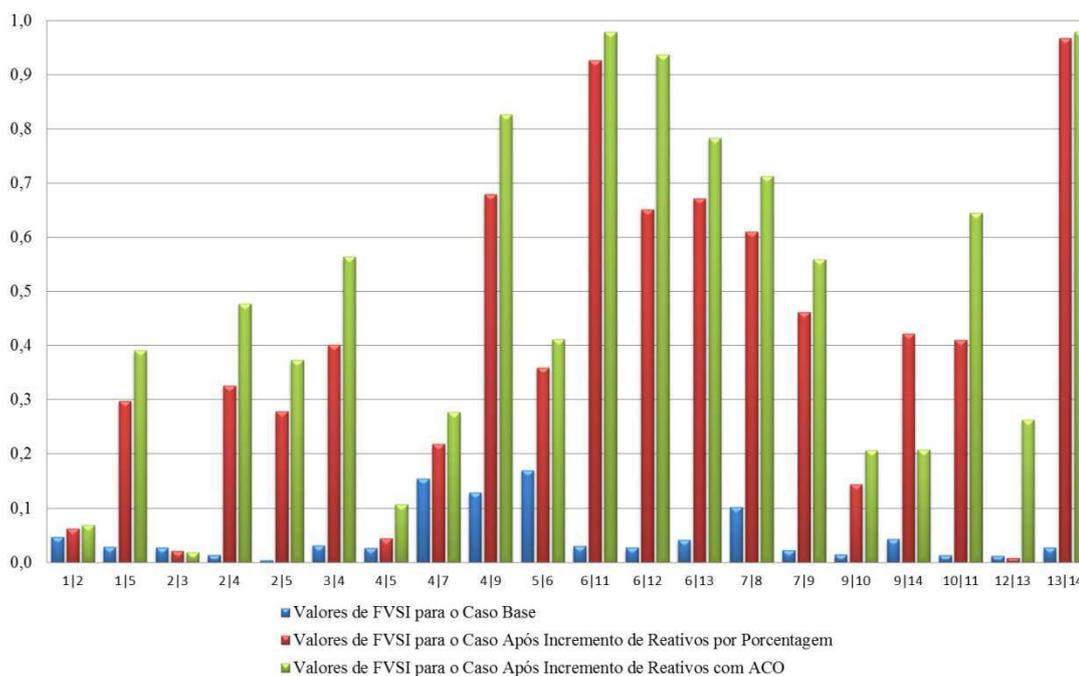


Figura 5.4 – Comparação do FVSI antes e após carregamento por porcentagem e com ACO.

### Curvas $QV$

Como dito no Capítulo 3, a distância entre o eixo horizontal e o ponto mínimo da curva  $QV$  representa a margem de potência reativa do ponto de operação do sistema. Na Tabela 5.10 é apresentada a margem de potência reativa para os casos simulados do sistema IEEE 14 barras.

Tabela 5.10 – Comparação da margem de reativos para o IEEE 14 barras: caso base e casos pós-carregamento por porcentagem e com ACO.

Barramento	Margem de Q (Mvar) Caso Base	Margem de Q (Mvar) por Porcentagem	Margem de Q (Mvar) com ACO
4	608,20	399,20	270,20
5	596,00	443,50	360,90
7	338,40	138,50	87,70
9	237,90	63,80	38,80
10	180,50	50,20	28,60
11	195,70	82,90	65,70
12	175,50	102,90	72,50
13	283,10	145,40	127,40
14	117,20	26,60	24,60

Pode-se concluir através da Tabela 5.10 e das Figura 5.5 à Figura 5.13 que a margem de potência reativa dos barramentos de carga do sistema diminuiu de forma não linear após o incremento de potência reativa, como era esperado.

As curvas  $QV$  para as barras de carga do sistema teste foram obtidas através de simulação pelo *software* ANAREDE<sup>®</sup> e são apresentadas nas Figura 5.5 à Figura 5.13:

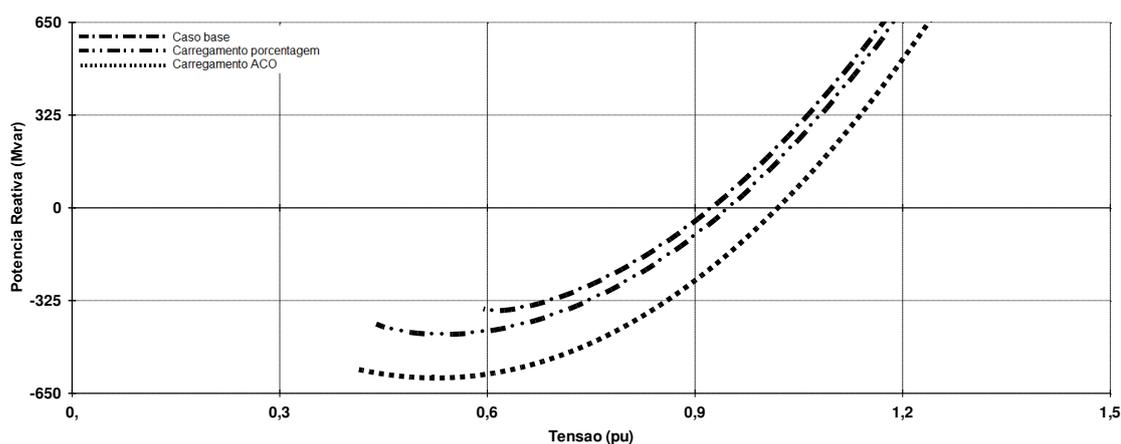


Figura 5.5 – Curva  $QV$  para a barra 4 do IEEE 14 barras.

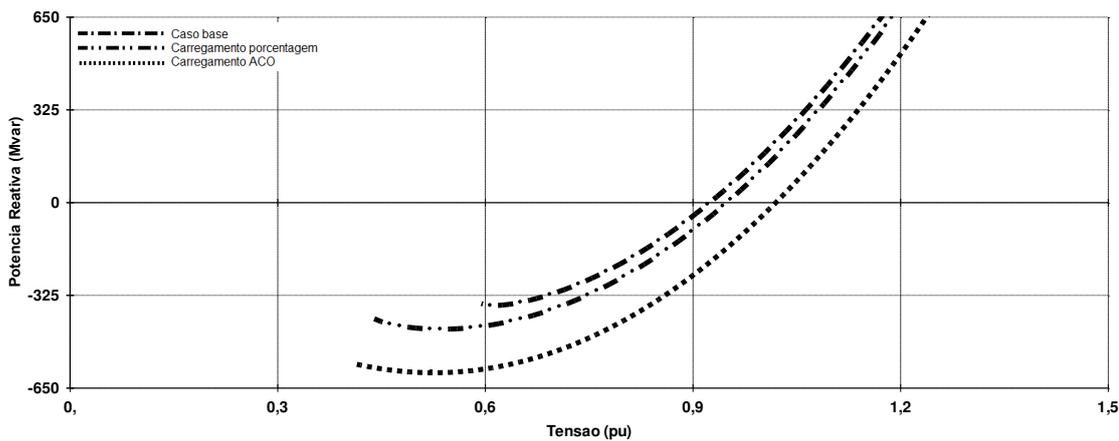


Figura 5.6 – Curva  $QV$  para a barra 5 do IEEE 14 barras.

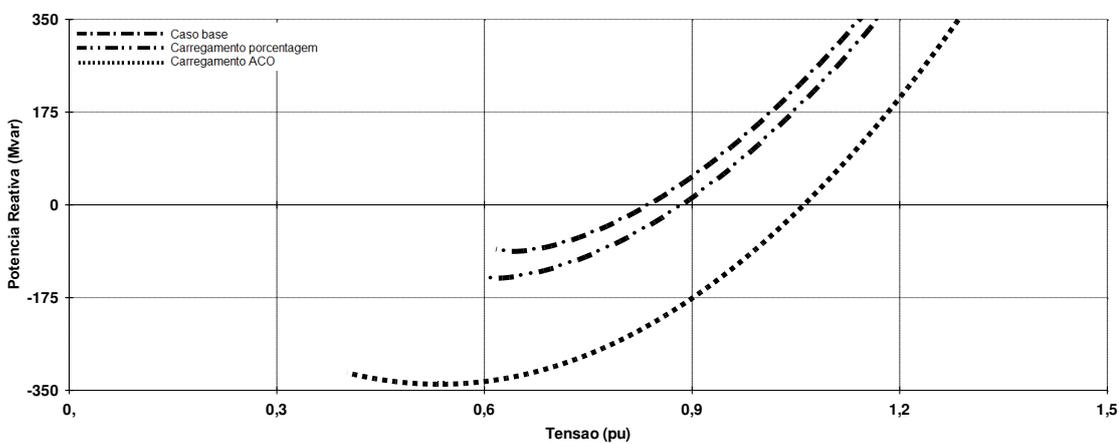


Figura 5.7 – Curva  $QV$  para a barra 7 do IEEE 14 barras.

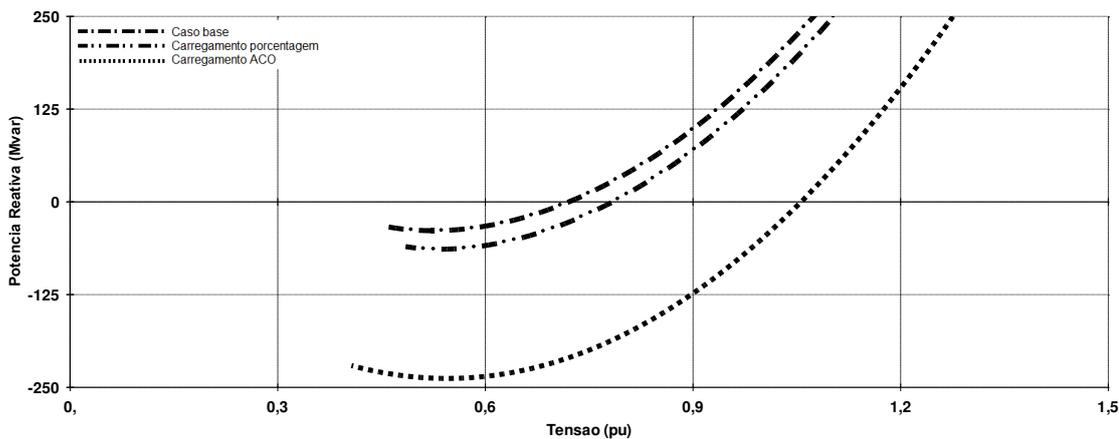


Figura 5.8 – Curva  $QV$  para a barra 9 do IEEE 14 barras.

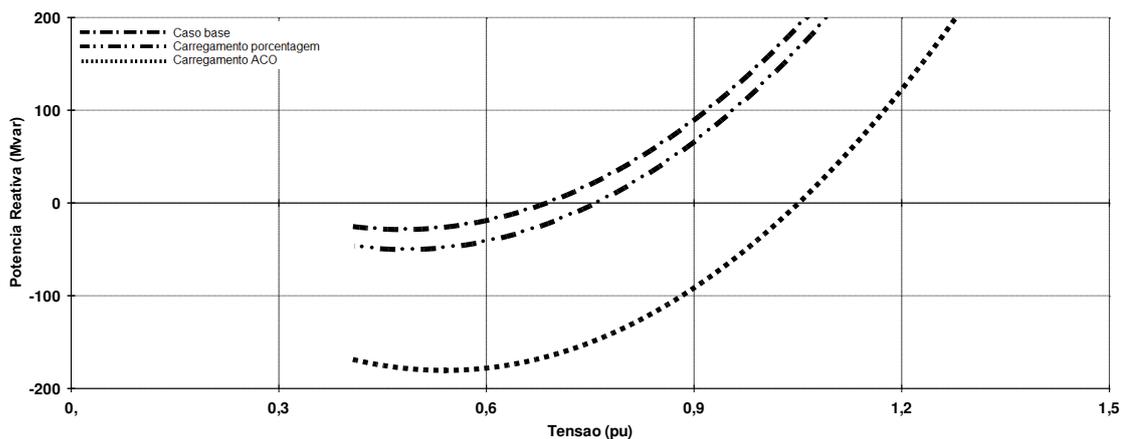


Figura 5.9 – Curva  $QV$  para a barra 10 do IEEE 14 barras.

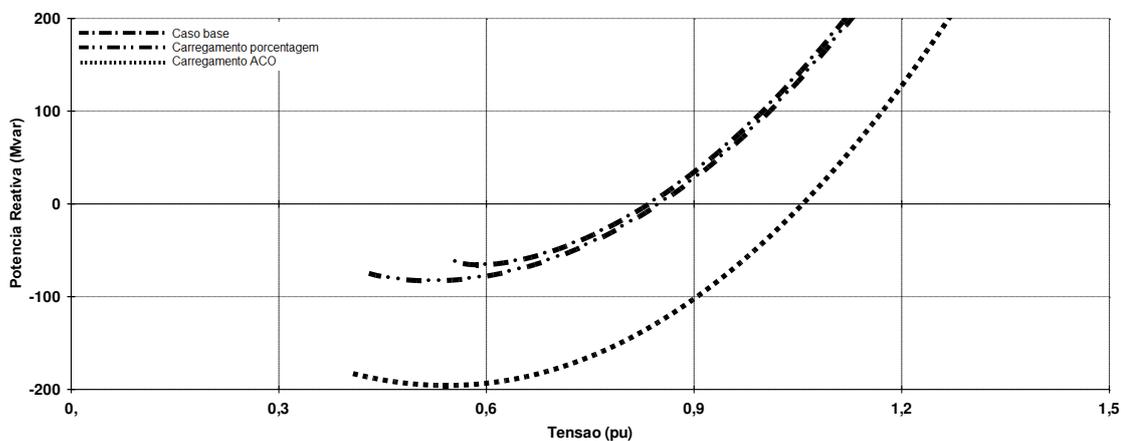


Figura 5.10 – Curva  $QV$  para a barra 11 do IEEE 14 barras.

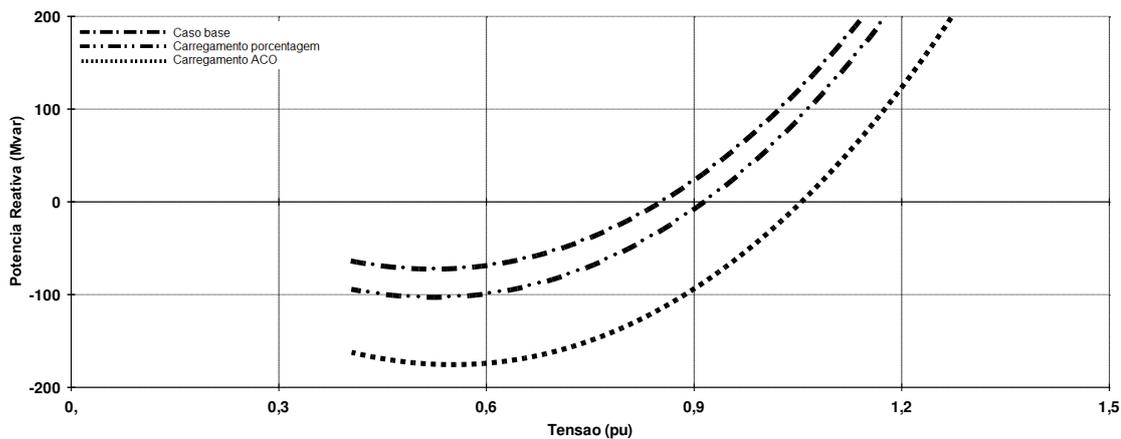


Figura 5.11 – Curva  $QV$  para a barra 12 do IEEE 14 barras.

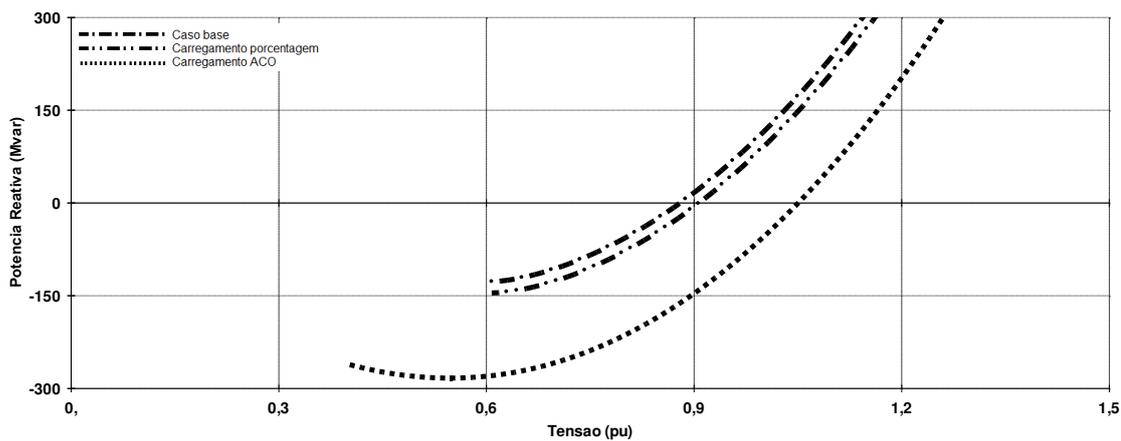


Figura 5.12 – Curva  $QV$  para a barra 13 do IEEE 14 barras.

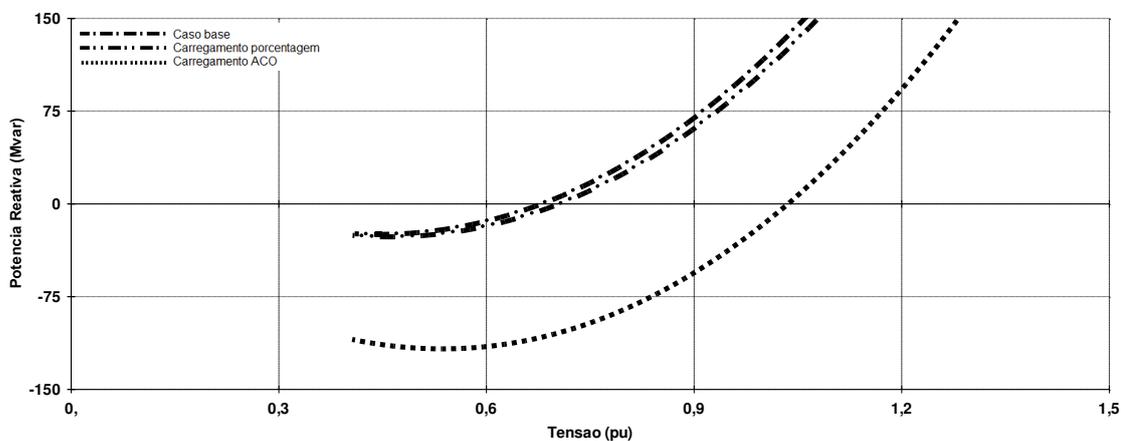


Figura 5.13 – Curva  $QV$  para a barra 14 do IEEE 14 barras.

# Conclusões

Como etapa inicial e primordial da pesquisa, foi estudada a fundamentação teórica sobre a estabilidade de tensão e seus índices de análise, a saber: curva PV, curva QV e FVSI. O intuito desse estudo foi obter base teórica para conhecer os problemas de estabilidade de tensão e verificar como eles são analisados e resolvidos.

Uma etapa importante na análise do problema da estabilidade de tensão é o cálculo do fluxo de carga do sistema de potência através do método de *Newton-Raphson*, que foi programado em MATLAB<sup>®</sup>. Para validação da programação, foi utilizado como teste o sistema IEEE 14 barras. A solução do fluxo de carga dos sistemas teste foi obtida pelo programa feito em MATLAB<sup>®</sup> para o método de *Newton-Raphson* e pelo *software* ANAREDE<sup>®</sup>, sendo os valores de potências ativa e reativa, ângulos e módulos das tensões comparados entre os dois programas, validando-se a programação feita em MATLAB<sup>®</sup>.

O índice FVSI foi programado em MATLAB<sup>®</sup> e verificado que sua utilização nas análises para o problema da estabilidade de tensão é eficiente, pois, mesmo sendo um índice de linha, ele pode ser empregado no sistema de potência para obtenção do máximo carregamento em termos de potência reativa, dando condições ao operador de fazer a classificação de barras fracas, além de auxiliar no planejamento e análise de um sistema de potência quanto à sua estabilidade de tensão.

Com a programação realizada em MATLAB<sup>®</sup> do ACO, foi possível a obtenção do carregamento ótimo de reativos no sistema de potência testado (IEEE 14 barras), bem como classificar tais barras com relação ao suporte máximo de reativos quando todo o SEP está sendo incrementado simultaneamente.

A importância da pesquisa realizada consistiu em obter conhecimento sobre uma técnica de avaliação da estabilidade de tensão de um SEP e utilizá-la conjuntamente com um algoritmo de otimização, com a finalidade de saber qual o limite de carregamento de reativos suportado pelo sistema, sem que este opere de forma instável. Tal informação permite uma melhor análise e planejamento do carregamento de reativos das barras de um sistema.

Como trabalhos futuros é sugerido:

- Ajustar os parâmetros do algoritmo com a finalidade de que haja convergência mais rápida, reduzindo ainda mais o esforço computacional empregado nas soluções do problema;
- Utilizar como função objetivo do algoritmo outros índices de estabilidade de tensão para possíveis avaliações e comparações com o exposto nesta pesquisa;
- Testar o algoritmo da pesquisa em outros sistemas de potência com maior quantidade de barras de carga.

# Referências Bibliográficas

- Annaluru, R. Das, S. & Pahwa, A., (2004). “Multilevel ant Colony Algorithm for Optimal Placement of Capacitors in Distribution Systems”, *in: Congress on Evolutionary Computation – CEC*, 2004.
- Bao, L., Huang, Z., & Xu, W., (2003). “Online Voltage Stability Monitoring Using Var Reserves”, *in: IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 18, n° 4, November 2003.
- Coelho, L. S., Sierakowski, C. A. & Mariani, V. C., (2008). “Algoritmo Inspirado em Colônia de Formigas e Método de Busca Local Aplicado à Otimização de Despacho Econômico de Energia Elétrica: Fundamentos de um Estudo de Caso”, *in: Congresso Brasileiro de Automática – CBA*, Juiz de Fora – Minas Gerais.
- Corsi, S. & Sabelli, C., (2004). “General Blackout in Italy Sunday September 28, 2003, h. 03: 28: 00”, *in: Proceedings of IEEE Power Engineering Society General Meeting*, vol. 2, pp. 1691-1702.
- Costa, A. F. M., (2008). “Índices de Estabilidade de Tensão num Sistema Eléctrico de Energia”, Dissertação de Mestrado – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, 2008.
- Dorigo, M. (1992). “Optimization, Learning and Natural Algorithms”, PhD thesis, Dipartimento di Elettronica e Informazione, Politecnico di Milano, Italian, 1992.
- Dorigo, M. & Gambardella, L. M., (1997). “Ant Colony System: A Cooperative Learning Approach to the Traveling Salesman Problem”, *in: IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, pp. 53-66.
- Dorigo, M. & Di Caro, G., (1999). “The Ant Colony Optimization Metaheuristic”, *in: New Ideas in Optimization*, D. Corne et al., Eds. McGraw Hill, London – UK, pp. 11–32.
- Dorigo M., Di Caro G., & Gambardella L. M., (1999). “Ant Algorithms for Discrete Optimization”, *in: Artificial Life*, vol. 5, n° 2, pp. 137-172.
- Guedes, D. F., Vieira, J. M., Melo, G. H. S., Sodré, E., Alves, F., Silva, C. A. L., (2009). “Uma Proposta para o Planejamento da Expansão de Longo Prazo Utilizando Otimiza o Colônia de Formigas”, *in: XIII Encontro Regional Iberoamericano do Cigré – ERIAC*, Puerto Iguazú – Argentina, 2009.

- Guedes, D. F., (2012). “Otimização por Colônia de Formigas Aplicada na Solução do Problema da Operação de Sistemas Hidrotérmicos”, Dissertação de Mestrado – UFCG, Campina Grande – PB, Outubro de 2012.
- Guerra, W. & Kagan, N., (2008). “Reconfiguração de Sistemas de Distribuição Utilizando Colônia de Formigas”, *in: Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos – SBSE*, Belo Horizonte – MG, 2009.
- Jardim, J. L., (2000). “Online Dynamic Security Assessment: Implementation Problems and Potential Use of Artificial Intelligence”, *in: Power Engineering Society Summer Meeting*, 2000. IEEE, vol. 1, July, pp. 340-345.
- Kalil, M. R., Musirin, I. & Othman, M. M., (2006). “Ant Colony Optimization for Maximum Loadability Search in Voltage Control Study”, *in: First International Power and Energy Conference – PECon*, Putrajaya – Malaysia, 2006.
- Kundur, P., (1994). *Power System Stability and Control*, McGraw-Hill, Inc.
- Kundur, P. & Morison, K., (1998). “On-line Dynamic Security Assessment of Power Systems”, *in: SEPOPE – Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica*, Salvador – BA, 1998.
- Machado, F. F., (2009). “Desenvolvimento de Ferramenta Computacional baseado em Técnicas de Inteligência Artificial para Avaliação de Estabilidade de Tensão”, Dissertação de Mestrado – UFCG, Campina Grande – PB, Outubro de 2009.
- Musirin, I. & Rahman, T. K. A. (2002a). “Novel Fast Voltage Stability Index (FVSI) for Voltage Stability Analysis in Power Transmission System”, *in: Student Conference on Research and Development Proceedings*, Shah Alam, Malaysia, pp. 265 – 268.
- Musirin, I. & Rahman, T. K. A. (2002b). “Estimating Maximum Loadability for Weak Bus Identification Using FVSI”, *in: IEEE Power Engineering Review*, vol. 22, pp. 50-52.
- Musirin, I. & Rahman, T. K. A. (2002c). “On-line Voltage Stability Based Contingency Ranking Using Fast Voltage Stability Index (FVSI)”, *in: Transmission and Distribution Conference and Exhibition, Asia Pacific*, vol. 2, pp. 1118-1123.
- Mustafar, M. F., Musirin, I. & Kalil, M. R., (2007). “Ant Colony Optimization (ACO) Based Technique for Voltage Control and Loss Minimization Using Transformer Tap Setting”, *in: The 5<sup>th</sup> Student Conference on Research and Development – SCORED*, Malaysia.

- Nativel, G., Jacquemart, Y., Sermanson, V., & Nérin, G., (2000). “Integrated Framework for Voltage Security Assessment”, in: *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 15, n° 4, November, 2000.
- ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico), (2007). *Módulo 23 – Critérios para Estudos*.
- ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico), (2002). *Módulo 23 – Critérios para Estudos*.
- Pereira, F. S., Vittori, K., & da Costa, G. R. M., (2006). “Reconfiguração de Sistemas de Distribuição para Redução de Perdas Ativas Baseada no Comportamento de Colônias de Formigas”, in: *Anais do Congresso Brasileiro de Automática – CBA*, Salvador – BA, pp.1956-1961.
- Pereira, F. S., Vittori, K., & da Costa, G. R. M. (2008). “Ant Colony Based Method for Reconfiguration”, in: *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition*, Bogotá, pp. 1-5.
- Pimentel Filho, M. C., Lacerda, E. G. M. & Medeiros Júnior, M. F., (2008). “Alocação de Capacitores usando Colônia de Formigas e o Gradiente”, in: *Conferência Internacional de Aplicações Industriais – Induscon*, Poços de Caldas – MG.
- Programa ANAREDE – Análise de Redes Elétricas. Disponível em: <<http://www.anarede.cepel.br/>>. Acesso em: 11 dez. 2011.
- Reis, C. S. M. M., (2005). “Determinação de Índices de Estabilidade de Tensão”, Dissertação de Mestrado – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, 2005.
- Rezende, L. S., Silva, A. M. L. & Manso, L. F., (2008). “Aplicação de Colônia de Formigas ao Planejamento Cronológico da Expansão da Transmissão Considerando Restrições de Confiabilidade”, in: *Congresso Brasileiro de Automática – CBA*, Juiz de Fora – MG.
- de Souza, A. C. Z., de Souza, J. C. S. & Silva, A. M. L., (2000). “On-Line Voltage Stability Monitoring”, in: *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 15, n° 4, Novembro, 2000.
- Sodré, E., (2006). “Avaliação da Estabilidade de Tensão através das Técnicas de Inteligência Artificial”, Tese de Doutorado – UFCG, Campina Grande – PB, Abril de 2006.
- Souza, B. A., Cabral Neto, J. P., Leite, M. F. & Vittori, K., (2009). “Configuração de Redes de Distribuição Via Algoritmo de Formigas”, in: *Anais do Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente – SBAI*, Brasília – DF, pp. 861-865.
- Taylor, C. W. (1994). *Power System Voltage Stability*, McGraw-Hill, Inc.

- University of Washington Electrical Engineering. Disponível em: <<http://www.ee.washington.edu/research/pstca/index.html>. Acesso em: 10 mar. 2011.
- U.S. – Canada Power System Outage Task Force (2004). “Final Report on the August 14, 2003 Blackout in the United States and Canada: Causes and Recommendations”. Disponível em: <<http://www.iwar.org.uk/cip/resources/blackout-03/index.htm>. Acesso em: 05 ago. 2012.
- Van Cutsem, T., Vournas, C., (1998). “Voltage Stability of Electric Power Systems”, Kluwer Academic Publishers (Power Electronics and Power Systems Series).
- Van Cutsem, T., Kabouris J., Christoforidis G., & Vournas C. D., (2005). “Application of Real-Time Voltage Security Assessment to the Hellenic Interconnected System”, *in: IEE, Proc.- Gener. Transm. Distrib.*, vol. 152, n° 1, Janeiro, 2005.
- Vittori, K., Costa, G. R. M., Pereira, F. S., Oliveira, N. S. & Souza, B. A., (2008). “Comparação entre Algoritmos Genéticos e Algoritmos de Formigas na Reconfiguração de Redes de Distribuição”, *in: Congresso Ibero Latino Americano de Métodos Computacionais em Engenharia – CILAMCE*, Maceió – AL, 2008.
- WSCC (Western Systems Coordinating Council) Report, (1998). “Voltage Stability Criteria, Undervoltage Load Shedding Strategy, and Reactive Power Reserve Monitoring Methodology”.

# Anexo I

## Anexo I – Sistema IEEE 14 Barras

A seguir são apresentados os dados dos barramentos e das linhas de transmissão do sistema IEEE 14 barras.

```

TITU
IEEE 14 Bus Test Case - winter 1962
DBAR
(Num)OETGb( nome )gl( V)( A)( Pg)( Qg)( Qn)( Qm)(Bc )( P1)( Q1)( Sh)Are(vf)
1 2 Barra-01--HV 1060 0.0232.4-16.9 1 1 1
2 1 Barra-02--HV 1045-4.9 40.0 42.4-40.0 50.0 2 21.7 12.7 1
3 1 Barra-03--HV 1010-12. 0.0 23.4 0.0 40.0 3 94.2 19.0 1
4 0 Barra-04--HV 1019-10. 47.8 -3.9 1
5 0 Barra-05--HV 1020-8.7 7.6 1.6 1
6 1 Barra-06--LV 1070-14. 0.0 12.2 -6.0 24.0 6 11.2 7.5 1
7 0 Barra-07--ZV 1062-13. 1
8 1 Barra-08--TV 1090-13. 0.0 17.4 -6.0 24.0 8 1
9 0 Barra-09--LV 1056-14. 29.5 16.6 19.0 1
10 0 Barra-10--LV 1051-15. 9.0 5.8 1
11 0 Barra-11--LV 1057-14. 3.5 1.8 1
12 0 Barra-12--LV 1055-15. 6.1 1.6 1
13 0 Barra-13--LV 1050-15. 13.5 5.8 1
14 0 Barra-14--LV 1036-16. 14.9 5.0 1
99999
DLIN
(De) d o d(Pa )NCEP ( R% )( X% )(Mvar)(Tap)(Tmn)(Tmx)(Phs)(Bc )(Cn)(Ce)Ns
1 2 1 1.938 5.917 5.28
1 5 1 5.40322.304 4.92
2 3 1 4.69919.797 4.38
2 4 1 5.81117.632 3.40
2 5 1 5.69517.388 3.46
3 4 1 6.70117.103 1.28
4 5 1 1.335 4.211
4 7 1 0.00020.912 0.978
4 9 1 0.00055.618 0.969
5 6 1 0.00025.202 0.932
6 11 1 9.49819.890
6 12 1 12.29125.581
6 13 1 6.61513.027
7 8 1 0.00017.615
7 9 1 0.00011.001
9 10 1 3.181 8.450
9 14 1 12.71127.038
10 11 1 8.20519.207
12 13 1 22.09219.988
13 14 1 17.09334.802
99999
FIM

```

# Apêndice A

## Apêndice A – Publicações em Eventos

- Leite, M. F., Souza, B. A., Guedes, D. F., & Ferreira, N. R., (2013). “Avaliação da Estabilidade de Tensão Via ACO”, *in: Anais do 1<sup>st</sup> BRICS Countries Congress on Computational Intelligence (BRICS-CCI) & 11<sup>th</sup> Brazilian Congress on Computational Intelligence (CBIC 2013)*, Porto de Galinhas – PE. (Artigo apresentado em 11/09/2013).
- Leite, M. F., Souza, B. A., (2013). “Classificação de Barras de um SEP Utilizando Algoritmo de Formigas”, *in: Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente – SBAI*, Fortaleza – CE. (Artigo apresentado em 15/10/2013).
- Leite, M. F., Souza, B. A., Guedes, D. F., & Ferreira, N. R., (2013). “Avaliação da Estabilidade de Tensão Através de Índice Rápido e da Metaheurística Colônia de Formigas”. *in: XXXIV Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering – CILAMCE*, Pirenópolis – GO, 2013. (Resumo aceito em 28/05/2013).