

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE MINAS GERAIS / PUC MINAS
Programa de Pós graduação em Engenharia Elétrica

Sidnei do Nascimento

**Análise e Melhoria da Estabilidade de Tensão em Sistemas Elétricos de
Potência com Alocação Automática de Dispositivos FACTS**

Belo Horizonte
2016

Sidnei do Nascimento

**Análise e Melhoria da Estabilidade de Tensão em Sistemas Elétricos de
Potência com Alocação Automática de Dispositivos FACTS**

Dissertação apresentada ao Programa de
Pós graduação em Engenharia Elétrica da
Pontifícia Universidade Católica de Minas
Gerais, como requisito para obtenção do tí-
tulo de Mestre em Engenharia Elétrica .

Orientador: Prof. Dr. Maury Meirelles Gouvea
Junior

Área de concentração: Sistemas de Energia
Elétrica (SEE)

Belo Horizonte
2016

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Biblioteca da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

N244a Nascimento, Sidnei do
Análise e melhoria da estabilidade de tensão em sistemas elétricos de potência com alocação automática de dispositivos FACTS / Sidnei do Nascimento. Belo Horizonte, 2016.
86 f. : il.

Orientador: Maury Meirelles Gouvea Júnior
Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

1. Sistemas de energia elétrica - Controle. 2. Sistemas de energia elétrica - Proteção. 3. Potência reativa (Engenharia elétrica). 4. Algoritmos. 5. Segurança de sistemas. I. Gouvea Júnior, Maury Meirelles. II. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.

SIB PUC MINAS

CDU: 621.315

Sidnei do Nascimento

**Análise e Melhoria da Estabilidade de Tensão em Sistemas Elétricos de
Potência com Alocação Automática de Dispositivos FACTS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós graduação em Engenharia Elétrica da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, como requisito para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica em Programa de Pós graduação em Engenharia Elétrica.

Prof. Dr. Maury Meirelles Gouvea Junior - PUC Minas (Orientador)

Prof. Dr. Eduardo Gonzaga da Silveira- CEFET-MG (Banca Examinadora)

Prof. Dr. Petr Iakovlevitch Ekel- PUC Minas (Banca Examinadora)

Belo Horizonte, 30 de agosto de 2016

Para minha família que sempre me leva adiante.

AGRADECIMENTOS

A minha família pelo apoio sempre. A PUC-Minas pela oportunidade de estudar em uma excelente universidade. A CAPES pelo incentivo em se fazer o mestrado. Ao orientador Prof. Dr. Maury Meirelles Gouvea Junior por ter me acompanhado durante toda a pesquisa.

Porque, agora, vemos em partes, como em um espelho; mas então veremos face a face e então saberemos o que é a verdade e ela nos libertará. ()

RESUMO

Nos últimos anos, pesquisas buscam por métodos e dispositivos que melhore o desempenho dos sistemas elétricos de potência, pois a expansão destes possuem, cada vez mais, restrições econômicas e ambientais. Assim, os sistemas de energia elétrica operam cada vez mais próximos dos seus limites de segurança, aumentando o risco de colapso de tensão que tem como principal causa a instabilidade de tensão. Estudos na área têm buscado alternativas que melhorem o desempenho do sistema elétrico sem necessidade de expansão. Com o desenvolvimento da eletrônica de potência aplicada aos sistemas elétricos de potência, surgiram os dispositivos flexíveis, denominados FACTS (do inglês, *Flexible Alternating Current Transmission Systems*). Os dispositivos FACTS possibilitam o controle mais eficiente do fluxo de potência e desempenham mais de uma função na rede de transmissão. Um dos problemas envolvendo a utilização de um dispositivo FACTS está relacionado ao melhor local para sua instalação e ajuste dos seu parâmetros visando um melhor desempenho do sistema. Tal problema envolve otimização com variáveis inteiras e reais, o que inviabiliza o uso de técnicas de otimização clássica como gradiente descendente. Este trabalho apresenta uma proposta de alocação automática de dispositivos FACTS em sistemas elétricos de potência utilizando algoritmo evolucionário adaptativo. Além de encontrar a melhor localização dos dispositivos FACTS e a sua injeção de potência reativa, o método proposto ajusta as demais variáveis de decisão do sistema a fim de melhorar a estabilidade de tensão do ponto de vista de indicadores específicos, a saber, o perfil de tensão dos barramentos de carga, a perda total de potência reativa e a margem de colapso de tensão do sistema. O método proposto utiliza um algoritmo evolucionário adaptativo como método de solução, que prevê duas abordagens, uma mono objetivo, utilizando os indicadores de desempenho supracitados, e outra multiobjetivo, combinando os mesmos indicadores. O método foi testado em estudos experimentais utilizando sistemas padrão IEEE, comparando os seus resultados com os de métodos probabilísticos e um heurístico. Os resultados mostraram que o método proposto melhorou a estabilidade de tensão dos sistemas utilizados e obteve melhor desempenho em relação aos demais métodos testados, incluindo o algoritmo evolucionário padrão.

Palavras-chave: Estabilidade de Tensão. Colapso de Tensão. Dispositivos FACTS. Fluxo de Potência Reativa. Algoritmos Evolucionários. Otimização Multiobjetivo.

ABSTRACT

In recent years, research studies have sought methods and devices which enhance the performance of power systems, since the more these systems are expanded, the greater the economic and environmental constraints. Thus, electric energy systems to an ever greater extent operate close to their security limits, thereby increasing the risk of voltage collapse, the main cause of which is the voltage instability. Research studies in this area have sought alternatives which improve the performance of power systems without needing to expand them. With the development of the power electronics applied to power systems, flexible devices, called Flexible Alternating Current Transmission Systems (FACTS), have sprung up. FACTS devices make it possible to control the power flow more efficiently and perform more than one function in the transmission network. A problem related to the use of a FACTS device is where best to install and adjustment its parameters in order to improve the performance of the system. This problem involves optimization with integer and real variables, which prevents the use of classical optimization techniques such as gradient descent. This work sets out a method for automatically allocating FACTS devices in power systems for which an adaptative evolutionary algorithm is used. The proposed method seeks to determine not only where best to install FACTS devices and to supply them with reactive power but also to adjust other decision variables of a power system in order to enhance voltage stability while taking the following indicators into account: the profile of the voltages of the load buses, the total loss of reactive power, and the voltage collapse margin. This method uses an adaptive evolutionary algorithm to solve the problem, and provides two approaches: a single objective one, by using the performance indicators cited above, and a multiobjective one, which combines the same indicators. The method was tested in experimental studies by using standard IEEE systems, and comparing the results from these with those of probabilistic methods and a heuristic technique. The results showed that the proposed method enhanced the voltage stability of systems and outperformed the other methods, including the standard evolutionary algorithm.

Keywords: Voltage Stability. Voltage Collapse. FACTS Devices. Reactive Power Flow. Evolutionary Algorithms. Multiobjective Optimization.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Estabilidade de Sistema de Potência	23
FIGURA 2 – Dinâmica de tensão Curva V-Q Pré e Pós distúrbio	25
FIGURA 3 – Modelo 2 barras	27
FIGURA 4 – Configuração básica SVC	33
FIGURA 5 – Circuito equivalente SVC	33
FIGURA 6 – Configuração básica TCSC	34
FIGURA 7 – Circuito equivalente A TCSC	34
FIGURA 8 – Configuração básica SSSC	36
FIGURA 9 – Circuito equivalente SSSC	36
FIGURA 10 – Configuração básica STATCOM	38
FIGURA 11 – Circuito equivalente STATCOM	38
FIGURA 12 – Configuração básica UPFC	39
FIGURA 13 – Circuito equivalente UPFC	39
FIGURA 14 – Codificação das variáveis de decisão	45
FIGURA 15 – Cruzamento por corte simples	46
FIGURA 16 – Cruzamento com mescla de valores	46
FIGURA 17 – Cruzamento X violação	47
FIGURA 18 – Indivíduo com violação	47
FIGURA 19 – Mutação de um descendente	48
FIGURA 20 – IEEE 14 função Objetivo <i>L-index</i>	60
FIGURA 21 – IEEE 14: desvio de Tensão	61
FIGURA 22 – IEEE 14: perda de potência reativa	62
FIGURA 23 – IEEE 14 Função Multiobjetivo - Maxmin	64
FIGURA 24 – IEEE 14 Função Multiobjetivo Agregação Soma	65
FIGURA 25 – IEEE 57 Função Objetivo <i>L-index</i>	66
FIGURA 26 – IEEE 57 Função Objetivo Desvio de Tensão	67
FIGURA 27 – IEEE 57 Função Objetivo Perda de Potência Reativa	69
FIGURA 28 – IEEE 57 Função Multiobjetivo - Maxmin	70

FIGURA 29 – IEEE 57 Função Multiobjetivo Agregação Soma	71
FIGURA 30 – IEEE118 Função Objetivo L -index	73
FIGURA 31 – IEEE 118 barras: desvio de Tensão	74
FIGURA 32 – IEEE 118: perda de potência reativa	75
FIGURA 33 – IEEE 118 Função Multiobjetivo Maxmin	76
FIGURA 34 – IEEE 118 Função Multiobjetivo Agregação Soma	77

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Variáveis de decisão do SEP	56
TABELA 2 – Variáveis de decisão dos FACTS	57
TABELA 3 – Quantidade de variáveis de decisão por sistema	57
TABELA 4 – Parâmetros fixos do AEA e AE	58
TABELA 5 – Parâmetros fixos do OEP	58
TABELA 6 – Parâmetros fixos RS	59
TABELA 7 – IEEE 14: função objetivo <i>L-index</i>	59
TABELA 8 – IEEE 14: desvio de tensão nas barras PQ	61
TABELA 9 – IEEE 14: perda de potência reativa	62
TABELA 10 – IEEE 14 Resultados análise multiobjetivo – Maxmin	63
TABELA 11 – IEEE 14 resultados análise multiobjetivo – Agregação	63
TABELA 12 – IEEE 14 Nível de satisfação das funções objetivo	64
TABELA 13 – IEEE 57 barras: função objetivo <i>L-index</i>	66
TABELA 14 – IEEE 57 barras: desvio de tensão dos barramentos de carga	67
TABELA 15 – IEEE 57 barras: perda de potência reativa	68
TABELA 16 – IEEE 57 barras: resultados análise multiobjetivo – MaxMin	68
TABELA 17 – IEEE 57 barras: análise multiobjetivo – Agregação Soma	69
TABELA 18 – IEEE 57 barras: nível de satisfação das funções objetivo	71
TABELA 19 – IEEE 118 barras: função objetivo <i>L-index</i>	72
TABELA 20 – IEEE 118 barras: desvio de tensão nos barramentos de carga	72
TABELA 21 – IEEE 118: perda de potência reativa	72
TABELA 22 – IEEE 118 barras: análise multiobjetivo – MaxMin e Agregação	73
TABELA 23 – IEEE 118 barras: nível de satisfação das funções objetivo	74
TABELA 24 – IEEE 14 barras: comparação com análise modal	77
TABELA 25 – IEEE 57 barras: comparação com análise modal	78
TABELA 26 – IEEE 118 barras: comparação com análise modal	78
TABELA 27 – IEEE 14 barras: estudos de contingências	79
TABELA 28 – IEEE 57 barras: estudos de contingências	79
TABELA 29 – IEEE 118 barras: estudos de contingências	80

LISTA DE SIGLAS

FACTS – Flexible Alternating Current Transmission System
IEEE – Institute of Electrical and Electronic Engineers
SVC – Static Var Compensator
TCSC – Thyristor Controlled Series Compensator
PTT – power transfer transactions
ATC – Available Transfer Capability
UPFC – Unified Power Flow Controller
AC – Alternate current
DC – Direct current
TRM – Transmission Reliability Margin
CBM – Capacity Benefit Margin
CPF – continuation power flow
STATCOM – static synchronous compensator
SSSC – static synchronous series compensator
CSC – Controllable Series Compensator
HSA – Harmony search algorithm
GA – Genetic Algorithm
TTC – Total transfer capacity
PSAT – Power System Analysis Toolbox
PSS – power system stabilizer
HVDC – High-Voltage Direct Current
VSI – Voltage stability index
SEP – Sistema Elétrico de Potência
TSR – Thyristor Switched Reactor
TSC – Thyristor Switched Capacitor
AE – Algoritmo Evolucionário
OEP – Otimização por enxame de partículas
PSO – Particle Swarm Optimization
RS – Recozimento simulado
SA – Simulated Annealing

FOPA – Fluxo Ótimo de Potência Ativa

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 Trabalhos relacionados	17
1.2 Objetivos	20
1.3 Justificativa	21
1.4 Organização do trabalho	21
2 ESTABILIDADE EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA	23
2.1 Estabilidade de tensão	24
2.2 Métodos de análise de estabilidade de tensão	26
2.2.1 <i>Índice de estabilidade da barra de carga</i>	26
2.2.2 <i>Índice de estabilidade da linha de transmissão</i>	29
2.2.3 <i>Estabilidade por análise modal da matriz jacobiana</i>	30
3 DISPOSITIVOS FACTS	32
3.1 Compensador estático de potência reativa	32
3.2 Compensador série controlado a tiristor	33
3.3 Compensador estático série síncrono	35
3.4 Compensador estático síncrono	37
3.5 Controlador universal de fluxo de potência	38
4 MELHORIA DA ESTABILIDADE DE TENSÃO COM AE	42
4.1 Algoritmo evolucionário	42
4.1.1 <i>Modelagem da solução do problema</i>	44
4.1.2 <i>Codificação das variáveis de decisão</i>	44
4.1.3 <i>Cruzamento</i>	45
4.1.4 <i>Mutação</i>	47
4.1.5 <i>Controle da diversidade</i>	47
4.2 Outros métodos de otimização	49
4.2.1 <i>Otimização por enxame de partículas</i>	49
4.2.2 <i>Otimização por recozimento simulado</i>	51
4.3 Funções objetivo	52
5 ESTUDO EXPERIMENTAL	56
5.1 Variáveis de decisão e parametrização dos algoritmos	56
5.2 Experimentos com o sistema IEEE 14 barras	59
5.3 Experimentos com o sistema IEEE 57 barras	65
5.4 Experimentos com o sistema IEEE 118 barras	71
5.5 Experimentos com análise modal de estabilidade	74
6 CONCLUSÃO	81
6.1 Trabalhos futuros	82
Referências	83

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, o estudo de técnicas e dispositivos que melhorem o desempenho dos sistemas elétricos de potência tem despertado interesse de pesquisadores e empresas do setor elétrico (GUPTA; TRIPATHI; SHUKLA, 2010; AJJARAPU; LEE, 1998). As principais razões são as restrições econômicas e ambientais, e a expansão do sistema elétrico não ter acompanhado o aumento da demanda de energia elétrica (KHANI; YAZDANKHAH; KOJABADI, 2012; KARTHIKEYAN; RAGLEND; KOTHARI, 2013). Assim, os sistemas de energia elétrica operam cada vez mais próximos dos seus limites de segurança.

Os limites de segurança dos sistemas elétricos de potência estão principalmente ligados à estabilidade estática e dinâmica. A estabilidade estática está relacionada com a capacidade dos equipamentos manterem o ponto de operação do sistema dentro de seus limites de controle. A estabilidade dinâmica está relacionada com a capacidade do sistema de geração, transmissão e controle restabelecer o equilíbrio da rede após uma perturbação.

O estudo de estabilidade estática de tensão analisa os limites de carregamento das linhas de transmissão, o perfil de tensão dos barramentos e o risco de colapso de tensão do sistema, quando há sobrecarga ou desligamento parcial do sistema. A instabilidade de tensão é a principal causa de colapso, quando a tensão cai monotonicamente e o sistema não consegue mais recuperar um novo ponto de equilíbrio. Nessa situação, é necessário reduzir a demanda ou adicionar novas fontes de potência reativa para recuperar o equilíbrio (SINGH; SHARMA; TIWARI, 2010).

Várias soluções foram apresentadas com o objetivo de aumentar a estabilidade do sistema elétrico. Em vários pontos da rede são instalados bancos de capacitores, compensadores síncronos e transformadores defasadores a fim de aumentar o suporte de potência reativa e a controlabilidade do fluxo de potência. No entanto, tais equipamentos controlam poucas variáveis de decisão do sistema, restringindo suas aplicações a objetivos específicos e limitados (EREMIA; SHAHIDEHPOUR, 2013).

Com o desenvolvimento da tecnologia dos semicondutores tornou-se possível a fabricação de chaves estáticas de alta potência aplicadas ao sistema elétrico de potência, permitindo um controle estático e dinâmico que proporciona maior flexibilidade ao sistema de transmissão (HINGORANI, 1988). Os dispositivos FACTS (do inglês, *Flexible Alternating Current Transmission System*) foram originalmente desenvolvidos para resolver problemas emergentes no final de 1980, pelas restrições em se construir novas linhas de transmissão e para facilitar a importação/exportação de energia elétrica entre concessionárias. Os principais objetivos dos dispositivos FACTS eram aumentar a capacidade de transferência de energia

em sistemas de transmissão e estabelecer o fluxo de potência em determinadas rotas (SONG; JOHNS, 1999).

Os equipamentos FACTS possibilitam uma melhora na utilização da infraestrutura existente e adaptação a diferentes condições de operação do sistema. As principais aplicações dos equipamentos FACTS são o controle de fluxo de potência, aumento da capacidade de transmissão, controle de tensão, compensação de energia reativa, melhoria da estabilidade, dentre outras (HINGORANI, 1988; SONG; JOHNS, 1999). Entretanto, as exigências práticas e benefícios oferecidos pelos dispositivos FACTS devem ser considerados para se justificar o investimento em sua instalação (ZHANG; REHTANZ; PAL, 2012).

Os dispositivos FACTS têm mostrado bons resultados no suporte de potência reativa, pelo seu controle e velocidade na mudança dos parâmetros da rede elétrica (SINGH et al., 2012; TAHER; AMOOSHAHI, 2012). No entanto, a localização do suporte de potência reativa dada pelos equipamentos FACTS tem extrema importância para melhorar a segurança do sistema elétrico, pois é preciso identificar os pontos sensíveis do sistema, sejam linhas de transmissão ou barramentos. Assim, pode-se aproveitar ao máximo desempenho desses equipamentos, tornando-os viáveis econômica e tecnicamente.

Devido a complexidade dos sistemas elétricos de potência, avaliar a configuração da rede para se chegar a melhor localização de um dispositivo FACTS não é uma tarefa trivial. Os métodos clássicos de otimização, como gradiente descendente (LASDON, 2002), em geral, necessitam de um modelo analítico, de funções que sejam diferenciáveis em todo o espaço de busca e fazem buscas locais. Nesse sentido, métodos de otimização probabilísticos de busca global, baseados em populações, são boas opções, pois, em geral, não necessitam de um modelo analítico e buscam em quase todo espaço de soluções. Ademais, muitos desses métodos podem ser aplicados em qualquer tipo de problema.

Este trabalho apresenta um estudo sobre a melhoria da estabilidade estática de tensão utilizando um algoritmo evolucionário. O método proposto prevê ajustes nas variáveis de decisão do sistema assim como a alocação automática de dispositivos FACTS nos barramentos mais sensíveis. O algoritmo evolucionário utiliza um método adaptativo para controle da diversidade da população. Para análise e melhoria da estabilidade de tensão, propõe-se a utilização de três indicadores de desempenho, a saber, o método *L-index*, que avalia a margem de colapso de tensão do sistema, o perfil de tensão dos barramentos de carga e a perda total de potência reativa. A avaliação da estabilidade de tensão é feita em dois tipos de abordagens, uma mono objetiva, utilizando cada um dos indicadores supracitados, e outra multiobjetiva, considerando a composição dos mesmos indicadores. O método proposto é validado em um estudo experimental com sistemas IEEE . O modelo é compa-

rado com dois métodos probabilísticos e um heurístico de alocação de dispositivos FACTS nos sistemas IEEE 14, 57 e 118 barramentos.

1.1 Trabalhos relacionados

Vários trabalhos relacionados a estabilidade de tensão sugerem o uso de uma meta-heurística ou análise de modos de estabilidade para definir o melhor local de instalação do equipamento FACTS e ajuste de seus parâmetros.

Nireekshana, Rao e Raju (2012) Analisam o uso de dispositivos SVC e TCSC para maximizar a PTT em condição normal de operação e em situações de contingência. A análise é feita considerando-se os limites térmicos e de tensão. É utilizada uma ferramenta de otimização, algoritmo genético, para determinar os parâmetros e localização do SVC e TCSC. O teste é feito em um sistema IEEE14 e IEEE24 barras. O SVC melhora o ATC em regiões com problema de perfil de tensão enquanto o TCSC melhora o ATC em regiões com problema de restrição térmica. Neste estudo o TCSC mostrou-se melhor que o SVC em condição normal de operação e sob contingência.

Rani, Amarnath e Kamakshaiah (2011) Usam o algoritmo genético para alocação ótima de equipamentos do tipo TCSC e UPFC para aumentar a ATC. O ATC é calculado utilizando fatores de transmissão de potência AC e DC baseados no limite máximo de transmissão, no entanto os fatores TRM e CBM são desconsiderados. A proposta foi testada em um sistema IEEE 24 barras e o resultado mostrou uma melhora no ATC quando os equipamentos TCSC e UPFC são instalados em pontos ótimos.

Kazemi e Badrzadeh (2004) Modelam controladores FACTS do tipo SVC e TCSC e avaliam o uso deles para o ponto máximo de carregamento do sistema. Análise de bifurcação do sistema é utilizada para encontrar a localização ótima e os efeitos destes controladores são avaliados utilizando o fluxo de potência continuado (CPF). Esta metodologia considera um sistema equilibrado e é testada em um sistema de 173 barras.

Sode-Yome e Mithulananthan (2004) comparam os efeitos dos equipamentos capacitor *shunt*, SVC e STATCOM na estabilidade de tensão de um SEP em diferentes condições de carga. Estes equipamentos são instalados no barramento mais sensível do sistema onde está mais propício ao colapso de tensão. O barramento mais sensível é determinado pela análise de vetor tangente do fluxo de potência continuado, então um compensador síncrono sem limite de potência reativa é instalado no barramento mais sensível para se determinar a quantidade de potência reativa a ser injetada pelos equipamentos capacitor, SVC ou STATCOM. É veri-

ficado que todos estes equipamentos podem aumentar a estabilidade de tensão, porém o SVC e STATCOM conseguem manter um melhor perfil de tensão na barra enquanto o capacitor pode deixar a tensão além do limite máximo do barramento, o que pode ser um problema.

Sode-Yome, Mithulanathan e Lee (2005) comparam a estabilidade de tensão para equipamentos FACTS shunt e série. O sistema de teste é o IEEE 14 barras e os equipamentos utilizados são STATCOM, TCSC e o SSSC. A localização do STATCOM foi determinada pela análise de vetor tangente presente em Sode-Yome e Mithulanathan (2004) e no caso do TCSC e SSSC foi avaliado em várias tentativas até se achar a melhor localização. O resultado mostrou que o STATCOM possui maior margem de estabilidade de tensão do que o TCSC e SSSC. Por serem compensação série o TCSC e SSSC tiveram pouca influência no suporte de potência reativa e por isso fizeram pouca diferença no aumento da margem de estabilidade de tensão.

Kamarposhti e Lesani (2011) fazem um estudo parecido com Sode-Yome, Mithulanathan e Lee (2005), no qual ele compara os equipamentos STATCOM, TCSC, SSSC e UPFC na estabilidade de tensão. Com o uso da técnica de bifurcação e do programa PSAT foi avaliado o máximo carregamento do sistema até o colapso de tensão e o desempenho destes equipamentos. Como esperado, os resultados mostram que a compensação reativa *shunt* dos equipamentos STATCOM e UPFC são mais eficientes do que a compensação série dos dispositivos TCSC e SSSC.

Gasperic e Mihalic (2015) estudam a estabilidade de tensão em uma barra infinita utilizando dois dispositivos FACTS séries chamados CSC e SSSC. Comparando as curvas PV o CSC tem maior impacto no ponto de colapso de tensão do que o SSSC. O SSSC é mais eficiente em manter o perfil de tensão do barramento e em operações com baixa tensão o CSC mostrou-se mais eficiente na prevenção de colapso do que o SSSC. Neste artigo também é feita uma análise dinâmica, na qual avalia-se o uso destes dispositivos para amortecimento de oscilações do sistema devido a faltas. Nesta análise o SSSC mostrou-se mais eficiente que o CSC.

Em Parizad, Khazali e Kalantar (2009) duas ferramentas de otimização, *Harmony search algorithm* (HSA) e Genetic Algorithm (GA), são utilizadas para determinar a localização de equipamentos FACTS para melhorar a estabilidade de tensão e reduzir as perdas do sistema. O problema é formulado a partir um índice de estabilidade de tensão *L-index* na qual o objetivo é localizar três tipos de equipamentos FACTS, separadamente ou em conjunto, afim de aumentar a estabilidade de tensão. O modelo é testado em um sistema IEEE 30 barras e é verificada a redução nas perdas do sistema e melhora no perfil de tensão nas barras.

Em Esmaeili e ESMAEILI (2013) é usado o algoritmo HSA para determinar o melhor ponto para se instalar três tipos de equipamentos FACTS tendo em vista o

aumento da capacidade total de transmissão (TTC), redução do congestionamento das linhas e redução de perdas no sistema. O modelo é testado em um sistema IEEE 30 barras e em um sistema real do sudeste Iraniano 230 kV. Os resultados mostram que o desempenho dado pelas funções objetivo é mais bem atingido quando são aplicados mais de um FACTS simultaneamente. Em comparação com outras técnicas de otimização, como o GA e PSO, o HSA mostrou melhor característica de precisão e convergência.

Gupta e Sharma (2014) aplicam o algoritmo genético para buscar melhor localização, tipo e dimensão do equipamento de dois tipos de dispositivos FACTS, SVC e TCSC, a fim de maximizar a estabilidade de tensão e reduzir perdas no sistema. O problema é formulado a partir da penalização exponencial do desvio de tensão e cálculo das perdas no sistema. O modelo teórico é testado em um sistema IEEE 30 barras sob diferentes condições de carregamento para validar o algoritmo. Os resultados mostram uma redução nas perdas do sistema e melhora no perfil de tensão nas barras.

Em Esmaili, Shayanfar e Moslemi (2014) é utilizado o *Modified augmented e-constraint method* para se determinar o melhor local e ajuste de um equipamento FACTS para aumentar estabilidade de tensão e transitória do sistema. Apesar de neste trabalho ser considerado o TCSC o método proposto pode ser estendido para outros tipos de equipamentos FACTS. O problema multiobjetivo considera o custo total de operação, estabilidade de tensão e transitória em um dado ponto de operação do sistema. Após obtido o Pareto de solução do problema multiobjetivo é utilizada a tomada de decisão *Fuzzy* para determinar a solução de maior preferência.

Em Canizares e Faur (1999) são avaliados os efeitos quanto à estabilidade de tensão dos equipamentos SVC e TCSC. No artigo é apresentado com detalhes o modelo por ângulo de disparo das válvulas tiristores destes equipamentos e o colapso de tensão é avaliado por análise de bifurcação do sistema, quando o determinante da matriz jacobiana do fluxo de potência torna-se nulo. O melhor local para se instalar o SVC é avaliado com base nos autovetores associados ao autovalor nulo da matriz jacobiana. Já o TCSC é instalado na linha de transmissão onde há o maior aumento de potência no ponto de colapso. A metodologia apresentada é testada em um sistema real europeu composto de 560 barras, 129 geradores, 723 linhas e transformadores e 14 áreas.

Kazemi, Vahidinasab e Mosallanejad (2006) fazem um estudo dos equipamentos STATCOM e UPFC na estabilidade de tensão. A localização é determinada a partir da análise de bifurcação do sistema e a estabilidade de tensão é avaliada pelo fluxo de potência continuado. Os equipamentos são testados em dois sistemas IEEE 6 e 14 com o auxílio do programa PSAT. Aplicando estes equipamentos no barramento

mais sensível do sistema verifica-se uma melhora no perfil de tensão e com isso o aumento da capacidade do sistema.

Diante dos trabalhos relacionados verifica-se que ainda é possível atuar nas meta-heurísticas de otimização de forma a melhorar a solução apresentadas por elas, pois o ótimo global nem sempre é garantido. A solução meta-heurística é baseada em probabilidades enquanto métodos clássicos avaliam a sensibilidade do sistema. Sendo assim, este trabalho apresenta um algoritmo evolucionário adaptativo capaz de solucionar o problema de alocação de equipamentos FACTS e ajuste dos parâmetros de rede afim de aumentar a estabilidade estática de tensão. O resultado é comparado entre meta-heurísticas e modos de estabilidade.

Os primeiros resultados dos estudos envolvendo o método proposto foram publicados no *2016 International Conference on Power and Energy Engineering* (PEENG 2016) por meio do artigo intitulado **Voltage Stability Enhancement in Power Systems with Automatic FACTS Device Allocation**.

1.2 Objetivos

Esta dissertação vem como complemento ao estudo de estabilidade estática de tensão em sistemas elétricos de potência. Os parâmetros da rede são otimizados bem como a inserção de novos equipamentos FACTS afim de se obter uma maior estabilidade de tensão segundo indicadores como *L-index*, desvio de tensão e perda de potência reativa.

O objetivo deste trabalho é fazer uma nova abordagem acerca da estabilidade de tensão, principais fatores e soluções eficientes, tendo em vista implementar um algoritmo evolucionário adaptativo versátil capaz de ajustar os parâmetros de rede, fazer a alocação ótima de equipamentos FACTS e ajuste de suas variáveis de controle afim de melhorar a estabilidade do sistema elétrico de potência do ponto de vista da estabilidade estática de tensão. O algoritmo está implementado em ambiente Matlab e os testes são validados em um banco de dados *benchmark* IEEE. O fluxo de potência é obtido com ajuda de um pacote de simulação de código aberto MatPower.

Os objetivos específicos são:

- a) Estudar os diversos métodos de análise de estabilidade de tensão em sistemas elétricos de potência.
- b) Avaliar os tipos de dispositivos FACTS que melhorem o desempenho da rede em relação a estabilidade de tensão.

- c) Implementar em ambiente Matlab um algoritmo evolucionário adaptativo para solucionar o problema multiobjetivo de localização do dispositivo FACTS.
- d) Publicar os resultados obtidos em congressos e/ou revistas da área.

1.3 Justificativa

O sistema elétrico se tornou um grande desenvolvedor da sociedade e da economia do mundo. A cada dia aumenta-se o número de consumidores e a demanda por energia elétrica dos grandes centros de consumo. As agências reguladoras exigem das empresas de energia elétrica qualidade do serviço prestado, o que significa estabilidade e continuidade do fornecimento. Devido as restrições econômicas e ambientais para se construir novas infraestruturas o sistema elétrico opera próximo dos limites de segurança.

Um exemplo do problema de se operar perto dos limites de segurança são as ocorrências de apagão, em que há desligamento parcial ou total do sistema. Pode-se citar algumas ocorrências de apagão relacionados a estabilidade de tensão na França 1965, 1976, 1978 e 1987; Flórida 1977, 1982 e 1985; Japão 1970 e 1987 e Brasil 1986 (AJJARAPU, 2007). Outras ocorrências mais recentes são em 2003 na Itália, Londres, Croácia e Bósnia; em 2004 na Grécia, em 2005 na Rússia, em 2006 na Alemanha (ALTHOWIBI; MUSTAFA, 2013).

Nesse cenário de perda econômica devido a desligamentos da rede e restrições para se expandir a infraestrutura é importante o estudo de métodos e técnicas que visam melhorar a estabilidade e infraestrutura existente. Com isto, justifica-se o uso de equipamentos FACTS, que desempenham mais de uma função no SEP, como aumento da capacidade de transmissão, controle do fluxo de potência, estabilidade dinâmica, aumentando desta forma o desempenho do sistema elétrico (SHAHEEN; RASHED; CHENG, 2010).

1.4 Organização do trabalho

No capítulo 2 são apresentados os conceitos gerais sobre estabilidade em sistema elétrico de potência e mais detalhadamente sobre estabilidade estática de tensão. Nesse capítulo são apresentados os métodos de análise de estabilidade de tensão e o embasamento matemático.

No capítulo 3 são apresentados os principais conceitos sobre equipamentos FACTS. Nesse capítulo são estudados os equipamentos de primeira e segunda geração, apli-

cações na rede e formulação matemática dando um foco no nos equipamentos SVC e TCSC que são utilizados nesta dissertação.

No capítulo 4 é apresentado a metodologia utilizada para ajuste dos parâmetros da rede e alocação dos equipamentos FACTS para melhoria na estabilidade estática do sistema.

No capítulo 5 são apresentados os resultados das simulações do algoritmo proposto e comparação de resultados.

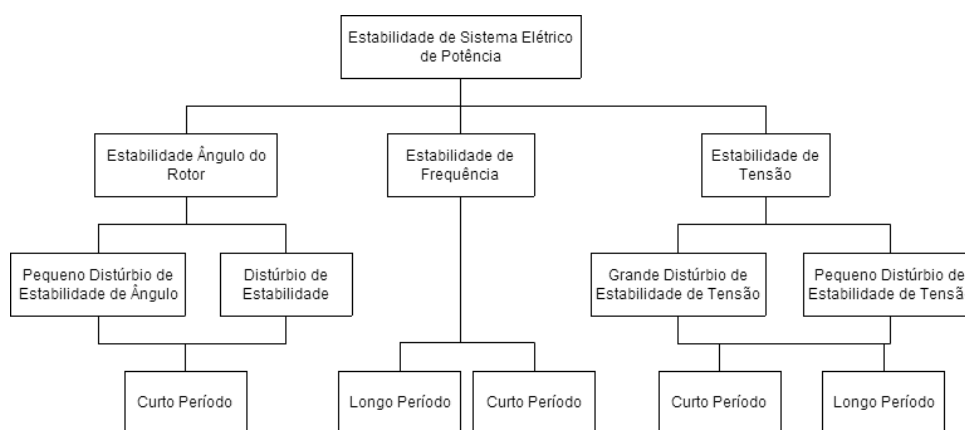
No capítulo 6 é apresentado a conclusão do trabalho e também as propostas para trabalhos futuros.

2 ESTABILIDADE EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

A estabilidade do sistema elétrico de potência se refere à capacidade da rede, a partir de uma dada condição de equilíbrio operacional, se recuperar a um estado de funcionamento após ser submetido a uma perturbação, com as variáveis do sistema limitadas e permanecendo íntegro praticamente todo restante do sistema (FARMER, 2001).

Por causa da grande dimensão e complexidade dos problemas de estabilidade em sistema elétrico de potência, algumas suposições e simplificações são feitas usando um critério adequado de detalhe do sistema a fim de ajudar na análise técnica (SINGH, 2011). A análise de estabilidade inclui identificar os fatores que contribuem para instabilidade e a elaboração de métodos para melhoria da segurança do sistema. De forma a identificar os tipos de estabilidade, a Figura 1 mostra a classificação dos tipos de estabilidade em sistemas elétricos.

Figura 1 – Estabilidade de Sistema de Potência



Fonte: Adaptado de (FARMER, 2001)

A estabilidade do ângulo do rotor se refere à capacidade de um conjunto de máquinas síncronas de um sistema elétrico interligado manterem o sincronismo depois de submetidas a uma perturbação. A instabilidade pode ocorrer devido a um desequilíbrio entre o torque mecânico e eletromagnético das máquinas. Isto pode resultar no aumento das oscilações angulares de alguns geradores levando a perda de sincronismo. Este problema envolve o estudo de oscilações eletromecânicas inerentes ao sistema elétrico de potência (FARMER, 2001).

Estabilidade de frequência está relacionada com a capacidade do sistema elétrico de potência manter constante a frequência quando este esteve sujeito a um grande distúrbio causando um desbalanceamento entre geração e demanda, ou seja, a estabilidade dependerá da capacidade da rede restaurar o equilíbrio entre carga e geração com o mínimo de perda possível (FARMER, 2001).

Uma parte importante também no estudo da estabilidade é a estabilidade dinâmica. Os dispositivos de controle utilizados para melhorar a estabilidade dinâmica são chamados de PSS, do inglês *power system stabilizer* e controladores FACTS. O problema consiste em achar o melhor local para se instalar estes controladores e o tipo de sinal de controle.

2.1 Estabilidade de tensão

Estabilidade de tensão está relacionada com a capacidade do sistema elétrico manter o perfil de tensão nos barramentos da rede dentro dos limites aceitáveis em operação normal e após algum distúrbio (CUTSEM; VOURNAS, 1998; FARMER, 2001). Em outras palavras, a estabilidade de tensão depende da habilidade do sistema equilibrar demanda e geração.

Instabilidade de tensão pode ocorrer por queda ou sobretensão em alguns barramentos do sistema. A instabilidade pode ocorrer por diversos fatores tais como saída de um grande consumidor de energia, faltas em linhas de transmissão, perda de sincronismo de um conjunto de geradores (EREMIA; SHAHIDEHPOUR, 2013).

A estabilidade de tensão pode ser dividida em quatro grupos: pequeno e grande distúrbio de tensão; e estabilidade de curto e longo período.

Grande distúrbio de tensão está relacionado com a habilidade do sistema manter o perfil de tensão em perturbações fortes na rede como faltas, perda de geração ou contingências. Esta habilidade será determinada pelas características do sistema de geração e consumo e pela interação dos sistemas de controle e proteção (SINGH, 2011).

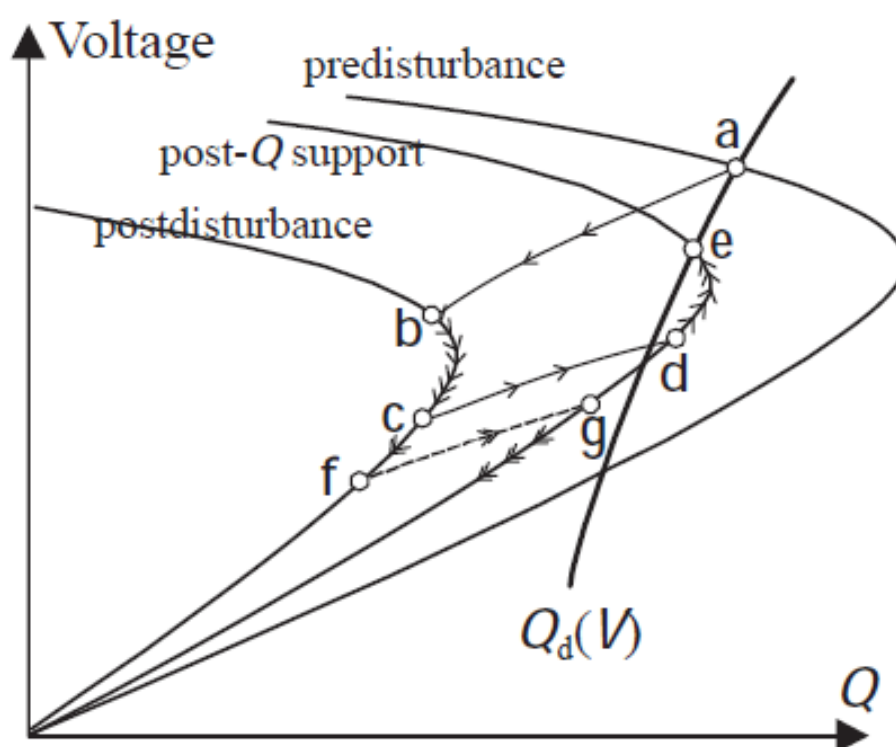
Pequeno distúrbio de estabilidade de tensão se refere a capacidade do sistema manter o perfil de tensão nos barramentos da rede quando sujeito a pequenas perturbações tais como aumento da demanda. O perfil de estabilidade neste caso será influenciado pelas características de carga, controle contínuo e discreto de um dado intervalo de tempo (SINGH, 2011).

Estabilidade de tensão de curto período envolve a dinâmica de componentes de carga de ação rápida como motores de indução, cargas eletronicamente controladas e conversores HVDC. O período de interesse é da ordem de segundos e a análise envolve a solução de equações diferenciais (SINGH, 2011).

Estabilidade de tensão de longo período envolve análise de equipamentos de ação lenta como mudança de TAP de transformadores, cargas termostaticamente controladas e limitadores de corrente de geradores. O período de interesse é da ordem de minutos e a performance dinâmica do sistema depende da simulação de estabilidade de longo período (SINGH, 2011).

A figura 2 mostra um exemplo de problema de estabilidade de tensão quando ocorre a interrupção de uma linha de transmissão em que se reduz a capacidade de transmissão de potência da rede para a carga e a importância do tempo de resposta dos dispositivos de controle. O sistema pode ser representado por três curvas características: Pré-distúrbio, Pós-distúrbio e Pós-distúrbio com suporte de potência reativa.

Figura 2 – Dinâmica de tensão Curva V-Q Pré e Pós distúrbio



Fonte: (EREMIA; SHAHIDEHPOUR, 2013)

Em condição normal, o sistema opera no ponto a, intercessão da curva de carga $Q_d(V)$ com a curva pré-distúrbio. Após um distúrbio, a capacidade de suprir potência reativa diminui levando o sistema para o ponto b. O sistema responde à perturbação tentando restaurar a demanda de potência reativa. O aumento da corrente para restabelecer a potência reativa aumenta a queda de tensão nas linhas de transmissão e o sistema segue para o ponto c ou f. Se um suporte de potência reativa for ativada em um curto espaço de tempo, o sistema passará do ponto c para o d, desta forma o suprimento de potência é maior que a carga e o sistema restabelece o equilíbrio em e. No entanto, se o suporte de potência reativa demorar a ser acionado o sistema passará do ponto f para o g e a tensão tende ao colapso.

2.2 Métodos de análise de estabilidade de tensão

Vários métodos para identificar o ponto de colapso foram desenvolvidos, sendo os mais usuais a fluxo de potência contínuo, métodos modais e índices. Curvas P-V são utilizadas tradicionalmente como ferramenta gráfica para o estudo de estabilidade de tensão em sistema elétrico de potência.

Análise modal é usada para determinar as margens de estabilidade do sistema e os limites da rede. Ela calcula os autovalores e autovetores da matriz jacobiana reduzida do fluxo de potência. Os autovalores definem os modos de estabilidade e a amplitude dos autovetores indicam a proximidade do sistema a instabilidade de tensão do sistema.

Os índices de estabilidade de tensão normalmente são baseados em uma matriz híbrida da teoria de circuitos. Em geral as barras são divididas em barras de geração e barras de carga. A vantagem deste método é que ele precisa somente de uma solução do fluxo de potência e o cálculo do índice requer um baixo custo computacional e ainda este índice permite ao operador do sistema avaliar a margem de estabilidade de tensão (PARIZAD; KHAZALI; KALANTAR, 2009).

Fluxo de potência contínuo consiste em cálculos sucessivos do fluxo de potência com incrementos nas barras de carga até a infactibilidade de solução. Este método permite traçar a curva P-V. A vantagem deste método é que ele produz uma informação adicional sobre o comportamento do sistema com o incremento de carga, no entanto para aplicação em grandes sistemas de muitas barras ele tem um custo computacional alto (CAÑIZARES, 1998).

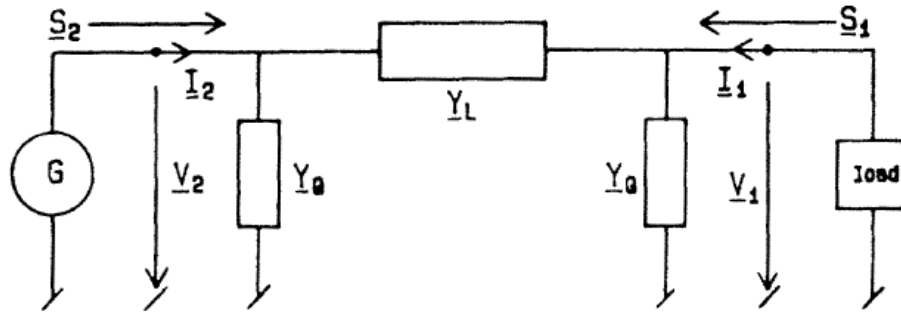
2.2.1 Índice de estabilidade da barra de carga

O VSI é uma maneira de mensurar a proximidade do estado atual do sistema até o colapso. A formulação de um índice para avaliar a proximidade da rede ao colapso de tensão parte de um sistema mais simples de duas barras (KESSEL; GLAVITSCH, 1986; BALAMOUROUGAN; SIDHU; SACHDEV, 2004; WANG et al., 2013).

Na Figura 3 o nó 1 é a barra de carga onde é avaliada o comportamento da tensão e o nó 2 é a barras de geração.

As propriedades do nó 1 pode ser formulada a partir da matriz admitância.

$$Y_{11} \cdot V_1 + Y_{12} \cdot V_2 = I_1 = \frac{S_1^*}{V_1^*} \quad (1)$$

Figura 3 – Modelo 2 barras

Fonte: (KESSEL; GLAVITSCH, 1986)

Os elementos Y_{11} , Y_{12} , Y_{21} , Y_{22} são elementos da matriz admitância $[Y]$ e S é a potência na forma complexa.

$$S_1 = V_1 \cdot I_1^* \quad (2)$$

Substituindo 2 em 1

$$V_1^2 + V_0 \cdot V_1^* = \frac{S_1^*}{Y_{11}} = a_1 + j \cdot b_1 \quad (3)$$

Onde a_1 e b_1 são as componentes reais e imaginárias e V_0 é dado por

$$V_0 = \frac{Y_{12}}{Y_{11}} \cdot V_2 = -\frac{Y_L}{Y_L + Y_Q} \cdot V_2 \quad (4)$$

Reescrevendo 3 na forma trigonométrica

$$|V_1^2| + |V_0| \cdot |V_1| \cdot (\cos \theta + j \cdot \sin \theta) = a_1 + j \cdot b_1 \quad (5)$$

Onde θ é o ângulo entre V_0 e V_1 . As componentes reais e imaginárias de 5 podem ser divididas em

$$|V_0| \cdot |V_1| \cdot \cos \theta = a_1 - |V_1^2| \quad (6)$$

$$|V_0| \cdot |V_1| \cdot \sin \theta = b_1 \quad (7)$$

Eliminando θ de 6 e 7

$$|V_1|^4 - (2 \cdot a_1 + |V_0|^2) \cdot |V_1|^2 + a_1^2 + b_1^2 = 0 \quad (8)$$

Resolvendo 8

$$|V_1|^2 = \frac{(|V_0|^2 + 2.a_1) \pm \sqrt{(|V_0|^2 + 2.a_1)^2 - 4.(a_1^2 + b_1^2)}}{2} \quad (9)$$

Quando $(|V_0|^2 + 2.a_1)^2 - 4.(a_1^2 + b_1^2)$ for igual a 0, existe uma única solução para $|V_1|^2$. No ponto crítico

$$2. |V_1|^2 = |V_0|^2 + 2.a_1 \quad (10)$$

$$|V_1|^2 = \sqrt{(a_1^2 + b_1^2)} = \left| \frac{S^*}{Y_{11}} \right| \quad (11)$$

Substituindo 11 em 3 no ponto de colapso

$$\left| 1 + \frac{V_0}{V_1} \right| = \left| 1 + \frac{\frac{Y_{12}}{Y_{11}} \cdot V_2}{V_1} \right| = 1 \quad (12)$$

Estendendo para um sistema de n barras o índice que identifica a proximidade do sistema ao colapso pode ser definido como

$$L_j = \left| 1 - \sum_{i=1}^{n_G} C_{ji} \frac{V_i}{V_j} \right| \quad (13)$$

Onde

n_G é o número de barras de geração

V_i é a Tensão na forma complexa da barra de geração i

V_j é a Tensão na forma complexa da barra de carga j

C_{ji} é o Elemento da matriz C obtida a partir de:

$$[C] = -[Y_{LL}]^{-1} [Y_{LG}] \quad (14)$$

As matrizes $[Y_{LL}]$ e $[Y_{LG}]$ são submatrizes da Y_{bus} .

$$\begin{bmatrix} I_L \\ I_G \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{LL} & Y_{LG} \\ Y_{GL} & Y_{GG} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_L \\ V_G \end{bmatrix} \quad (15)$$

2.2.2 Índice de estabilidade da linha de transmissão

O critério L_{mn} de estabilidade de tensão se baseia no fluxo de potência em uma linha de transmissão. Este mesmo conceito pode ser ampliado para cada linha de um sistema elétrico de potência. Cada linha pode ser representada pelos seguintes parâmetros. Analisando o modelo “ π ” da linha, o fluxo de potência pode ser expresso por:

$$S_r = \frac{|V_s||V_r|}{Z} \angle (\theta - \delta_s + \delta_r) - \frac{|V_r|^2}{Z} \angle \theta \quad (16)$$

$$S_s = \frac{|V_s|^2}{Z} \angle \theta - \frac{|V_s||V_r|}{Z} \angle (\theta + \delta_s - \delta_r) \quad (17)$$

A potência aparente na barra r pode ser separada em potência ativa e reativa

$$P_r = \frac{V_s V_r}{Z} \cos \angle (\theta - \delta_s + \delta_r) - \frac{V_r^2}{Z} \cos \angle \theta \quad (18)$$

$$Q_r = \frac{V_s V_r}{Z} \sin \angle (\theta - \delta_s + \delta_r) - \frac{V_r^2}{Z} \sin \angle \theta \quad (19)$$

Fazendo $\delta = \delta_s - \delta_r$ e resolvendo a equação 19 para V_r

$$V_r = \frac{V_s \sin (\theta - \delta) \pm \sqrt{[V_s \sin (\theta - \delta)]^2 - 4ZQ_r \sin \theta}}{2 \sin \theta} \quad (20)$$

Como $Z \sin \theta = X$ a equação 20 fica na forma

$$V_r = \frac{V_s \sin (\theta - \delta) \pm \sqrt{[V_s \sin (\theta - \delta)]^2 - 4XQ_r}}{2 \sin \theta} \quad (21)$$

O critério para solução real da equação 21 pode ser utilizado como índice de estabilidade ou seja

$$\{[V_s \sin (\theta - \delta)]^2 - 4XQ_r\} \geq 0 \quad (22)$$

Assim o indicador L_{mn} pode ser definido como

$$L_{mn} = \frac{4XQ_r}{[V_s \sin (\theta - \delta)]^2} \leq 1 \quad (23)$$

O critério de estabilidade L_{mn} é usado como índice de estabilidade de tensão em cada linha de um sistema elétrico de potência interconectado. Quanto menor seu valor, próximo de zero, maior estabilidade do sistema quando este aproxima-se de um o sistema tende a instabilidade e colapso de tensão.

2.2.3 Estabilidade por análise modal da matriz jacobiana

A estabilidade de tensão em um sistema elétrico de potência pode ser feita por uma análise modal da matriz jacobiana do fluxo de potência. A ideia principal é que no ponto limite de estabilidade de tensão o determinante da matriz jacobiana torna-se zero. Para esta análise são avaliados os autovalores e autovetores da matriz jacobiana. A Matriz jacobiana é definida usando as equações do fluxo de potência no ponto de operação do sistema .

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{P\theta} & J_{PV} \\ J_{Q\theta} & J_{QV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (24)$$

Da matriz jacobiana 24 pode-se fazer duas reduções

$$\Delta V = J_{RQV}^{-1} \Delta Q \rightarrow \Delta P = 0 \quad (25)$$

$$\Delta \theta = J_{RP\theta}^{-1} \Delta P \rightarrow \Delta Q = 0 \quad (26)$$

Onde:

$$J_{RQV} = J_{QV} - J_{Q\theta} J_{P\theta}^{-1} J_{PV} \quad (27)$$

$$J_{RP\theta} = J_{P\theta} - J_{PV} J_{QV}^{-1} J_{Q\theta} \quad (28)$$

Utilizando decomposição em valores singulares J_{RQV} pode ser escrito como

$$J_{RQV} = U \Lambda V^T \quad (29)$$

$$\Lambda = \begin{bmatrix} D & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (30)$$

$$D = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n) \quad (31)$$

Onde U e V são, respectivamente, os autovetores esquerda e direita do valor singular σ e Λ é a matriz contendo os valores singulares de J_{RQV}

Fazendo a transformação inversa pela teoria da álgebra linear

$$J_{RQV}^{-1} = U \Lambda^{-1} V^T \Leftrightarrow U D^{-1} V^T \quad (32)$$

$$D^{-1} = \text{diag}\left(\frac{1}{\lambda_1}, \frac{1}{\lambda_2}, \dots, \frac{1}{\lambda_n}\right) \quad (33)$$

Sendo

$$U = (u_1, u_2, \dots, u_n) \quad (34)$$

$$V = (v_1, v_2, \dots, v_n) \quad (35)$$

Da equação 25 tem-se

$$\Delta V_i = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_i} u_i v_i \Delta Q_i \quad (36)$$

Desta forma pode-se observar a relação entre $\lambda_i u_i$ e v_i com o índice de sensibilidade $\left(\frac{\Delta V_i}{\Delta Q_i}\right)$. Assim a barra com o menor autovalor e maior autovetor é chamada de barra mais sensível, ou seja, a barra que está sujeita a instabilidade de tensão.

3 DISPOSITIVOS FACTS

O conceito de sistema flexível de transmissão AC (FACTS) consiste em controlar os principais parâmetros do sistema elétrico de potência (SEP) : fluxo de potência ativa e reativa, tensão nos barramentos e impedância das linhas de transmissão (HINGORANI, 1988). Os equipamentos FACTS são utilizados por desempenharem mais de uma função no SEP como aumento da capacidade de transmissão, controle do fluxo de potência, estabilidade dinâmica, aumentando desta forma o desempenho de uma infraestrutura de SEP pronta (SHAHEEN; RASHED; CHENG, 2010).

Baseado no tipo de conexão dos elementos reativos do FACTS, eles podem ser divididos em Series, *Shunt*, Series-series, *Series-shunt*; e classificados em primeira, segunda e terceira geração. Dentre os vários controladores FACTS podem se destacar o SVC, TCSC, SSSC, STATCOM e UPFC (SINGH et al., 2012; SINGH; MUKHERJEE; TIWARI, 2015).

3.1 Compensador estático de potência reativa

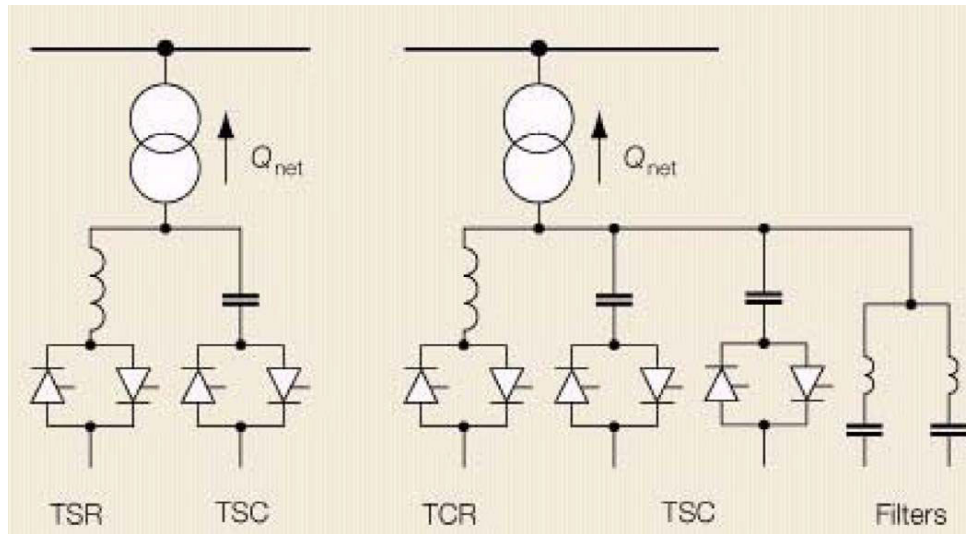
O compensador estático de potência reativa, do inglês SVC (*Static Var Compensator*), é um dispositivo FACTS baseado em bancos de capacitores e indutores chaveados a tiristor, TSR e TSC , que são ligados em paralelo com o barramento ou em alguns casos são ligados no ponto central da linha de transmissão (SONG; JOHNS, 1999; JANKE et al., 2010). A Figura 4 apresenta uma das configurações do SVC onde o chaveamento dos tiristores permite aumentar ou diminuir a injeção de potência reativa na barra.

A sua principal aplicação é para controle da tensão em pontos do sistema de maior sensibilidade a variação de potência reativa. A configuração do SVC permite variar a compensação de potência reativa capacitiva ou indutiva da barra, que como resultado, dentro dos seus limites de operação, permite manter a tensão do barramento dentro dos limites mínimo e máximo do sistema (HINGORANI; GYUGYI, 2000).

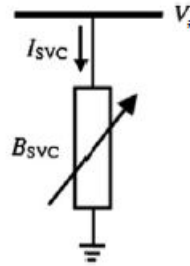
A partir do circuito equivalente do SVC na Figura 5, a potência reativa fornecida pelo equipamento quando inserido numa barra i pode ser modelada como:

$$Q_{SVC} = B_{SVC} \cdot V_i^2 \quad (37)$$

Assim, para o fluxo de potência a matriz admitância modificada é expressa por:

Figura 4 – Configuração básica SVC

Fonte: (JANKE et al., 2010)

Figura 5 – Circuito equivalente SVC

Fonte: (NIREEKSHANA; RAO; RAJU, 2012)

$$Y^{mod} = Y + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_{SVC} & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (38)$$

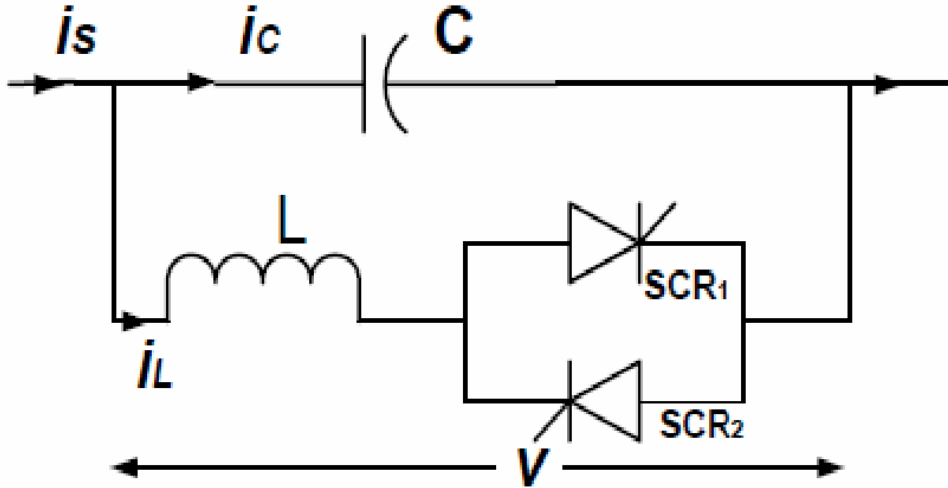
i_{coluna}
 j_{coluna}
 i_{linha}
 j_{linha}

3.2 Compensador série controlado a tiristor

O compensador série controlado a tiristor, TCSC (*Thyristor Controlled Series Compensator*), é um equipamento FACTS que é ligado em série com a linha de transmissão com o intuito de controlar a sua impedância. Uma configuração do

TCSC é constituído de um capacitor chaveado a tiristor na qual é possível variar a compensação série da linha.

Figura 6 – Configuração básica TCSC

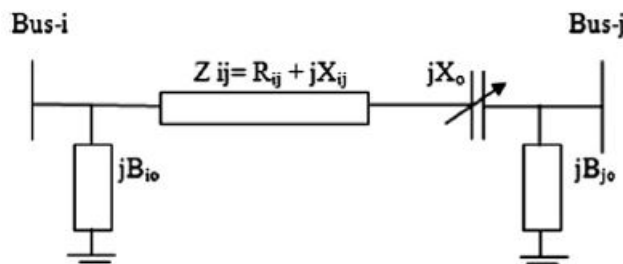


Fonte: (SAMIMI; NADERI, 2012)

Como apresentado na Figura 6, o TCSC tem a capacidade de variar a impedância da linha de transmissão através do ângulo de disparo dos tiristores, dessa forma é possível controlar o fluxo de potência nesta linha. Uma das principais vantagens em se utilizar o TCSC é a possibilidade de aumentar a capacidade de transmissão da linha com o mínimo risco de ressonância subsíncrona.

Conforme Figura 7, após a inserção do TCSC na linha ij sua admitância pode ser descrita por:

Figura 7 – Circuito equivalente TCSC



Fonte: (NIREEKSHANA; RAO; RAJU, 2012)

$$\Delta y_{ij} = y_{ij}^{mod} - y_{ij} = (g_{ij}^{mod} + jb_{ij}^{mod}) - (g_{ij} + jb_{ij}) \quad (39)$$

$$g_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sqrt{r_{ij}^2 + x_{ij}^2}} \quad (40)$$

$$b_{ij} = -\frac{x_{ij}}{\sqrt{r_{ij}^2 + x_{ij}^2}} \quad (41)$$

$$g_{ij}^{mod} = \frac{r_{ij}}{\sqrt{r_{ij}^2 + (x_{ij} + x_{TCSC})^2}} \quad (42)$$

$$b_{ij}^{mod} = -\frac{x_{ij} + x_{TCSC}}{\sqrt{r_{ij}^2 + (x_{ij} + x_{TCSC})^2}} \quad (43)$$

A matriz admitância modificada usada no fluxo de potência pode ser definida como:

$$Y^{mod} = Y + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \Delta_{ij} & 0 & \dots & 0 & -\Delta_{ij} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\Delta_{ij} & 0 & \dots & 0 & \Delta_{ij} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (44)$$

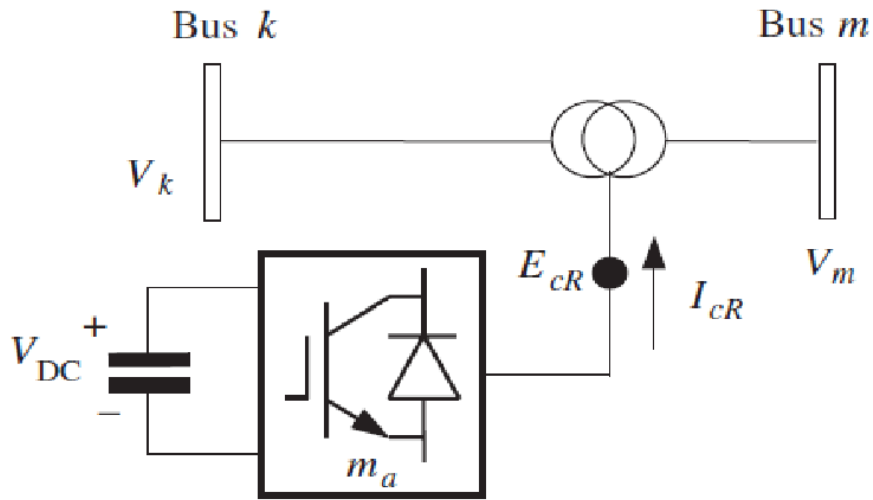
i_{coluna} j_{coluna}

3.3 Compensador estático série síncrono

O compensador estático série síncrono, SSSC (*static synchronous series compensator*), tem um objetivo parecido com o TCSC na qual se deseja controlar ou aumentar o fluxo de potência por uma linha de transmissão. No SSSC, Figura 8, a compensação da linha é feita pela inserção de uma fonte de tensão síncrona em série que pode estar em fase ou em quadratura com a corrente da linha (SONG; JOHNS, 1999; HINGORANI; GYUGYI, 2000; MATHUR; VARMA, 2002).

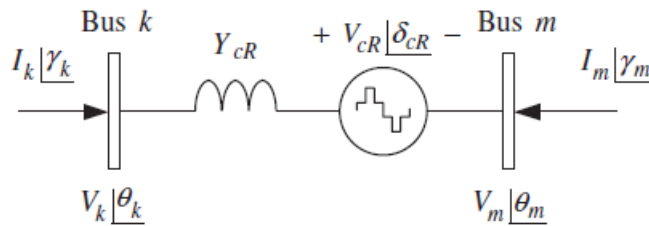
Quando a tensão do SSSC está em fase com a corrente da linha é possível controlar o fluxo de potência ativa da linhas, se a tensão estiver em quadratura com a corrente da linha então é possível controlar o fluxo de potência reativa (SONG; JOHNS, 1999; MATHUR; VARMA, 2002).

Desta forma o SSSC apresenta maiores vantagens do que o TCSC porque ele é capaz de controlar não só o fluxo de potência reativa como também o fluxo de potência ativa sem alterar de forma significativa a impedância da linha (MATHUR; VARMA, 2002).

Figura 8 – Configuração básica SSSC

Fonte: (ACHA et al., 2004)

Para o SSSC, considere uma fonte de tensão de magnitude e fase controláveis instalada em série com a linha de transmissão que interliga as barras na barra i e j , $V_{cR} \angle \delta_{cR}$. Desta forma, conforme Figura 9 as equações do fluxo de potência podem ser alteradas como segue:

Figura 9 – Circuito equivalente SSSC

Fonte: (ACHA et al., 2004)

$$P_{km} = V_k^2 \cdot G_{kk} - V_k \cdot V_m \cdot [G_{km} \cdot \cos(\theta_k - \theta_m) + B_{km} \cdot \sin(\theta_k - \theta_m)] - V_k \cdot V_{cR} \cdot [G_{km} \cdot \cos(\theta_k - \theta_{cR}) + B_{km} \cdot \sin(\theta_k - \theta_{cR})] \quad (45)$$

$$Q_{km} = -V_k^2 \cdot B_{kk} - V_k \cdot V_m \cdot [G_{km} \cdot \sin(\theta_k - \theta_m) - B_{km} \cdot \cos(\theta_k - \theta_m)] - V_k \cdot V_{cR} \cdot [G_{km} \cdot \sin(\theta_k - \theta_{cR}) + B_{km} \cdot \cos(\theta_k - \theta_{cR})] \quad (46)$$

$$P_{mk} = V_m^2 \cdot G_{mm} - V_k \cdot V_m \cdot [G_{km} \cdot \cos(\theta_m - \theta_k) + B_{km} \cdot \sin(\theta_m - \theta_k)] + V_k \cdot V_{cR} \cdot [G_{km} \cdot \cos(\theta_m - \theta_{cR}) + B_{km} \cdot \sin(\theta_m - \theta_{cR})] \quad (47)$$

$$Q_{mk} = -V_m^2 \cdot B_{mm} - V_k \cdot V_m \cdot [G_{km} \cdot \sin(\theta_m - \theta_k) - B_{km} \cdot \cos(\theta_m - \theta_k)] + V_k \cdot V_{cR} \cdot [G_{km} \cdot \sin(\theta_m - \theta_{cR}) - B_{km} \cdot \cos(\theta_m - \theta_{cR})] \quad (48)$$

3.4 Compensador estático síncrono

O compensador estático síncrono, STATCOM (*static synchronous compensator*), no sistema elétrico de potência tem a importante função de compensar potência reativa. Ele é ligado paralelo com o barramento e opera como um compensador síncrono, na qual a variação de tensão em seus terminais irá determinar o fornecimento de potência reativa indutiva ou capacitiva para o sistema.

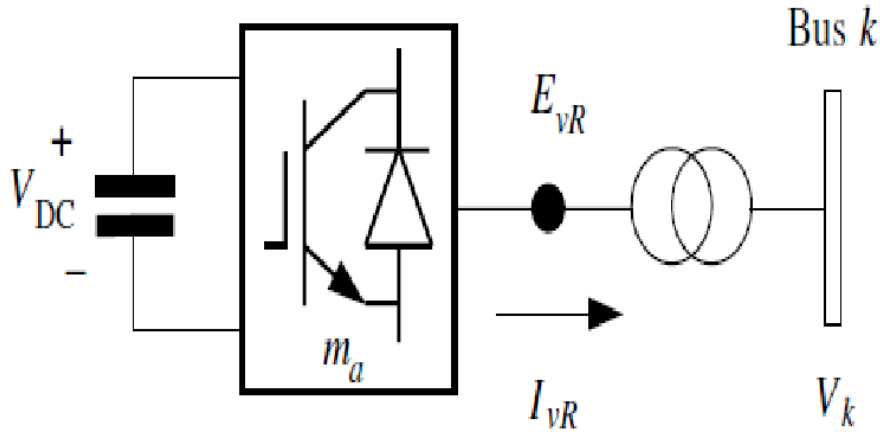
O princípio de funcionamento do STATCOM é similar ao de um compensador síncrono ideal. Quando a tensão terminal está menor que a do barramento diz-se que ele está subexcitado e funciona com uma impedância indutiva fornecendo potência reativa indutiva para o sistema, e quando a tensão terminal está maior que do no barramento ele funciona como uma impedância capacitiva, fornecendo potência reativa capacitiva para o sistema e diz-se que ele está sobre-excitado (SONG; JOHNS, 1999).

Diferente do compensador síncrono, o STATCOM não tem problema de inércia, podendo este variar rapidamente seus parâmetros de injeção ou absorção de potência reativa, não contribui para correntes de curto-circuito e não altera de forma significativa a impedância do sistema (MATHUR; VARMA, 2002). A figura 10 mostra uma configuração básica do STATCOM.

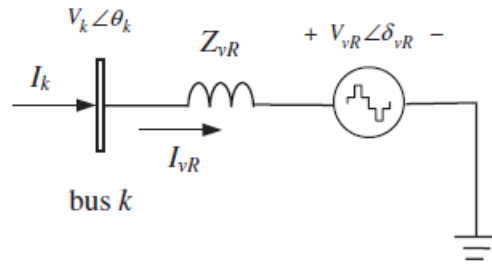
Para o STATCOM, considere uma fonte de tensão de magnitude e fase controláveis instalada na barra k , $V_{vR} \angle \delta_{vR}$. Conforme Figura 11 as equações do fluxo de potência podem ser expressas por:

$$P_k = V_k^2 \cdot G_{vR} + V_k \cdot V_{vR} \cdot [G_{vR} \cdot \cos(\theta_k - \delta_{vR}) + B_{vR} \cdot \sin(\theta_k - \delta_{vR})] \quad (49)$$

$$Q_k = -V_k^2 \cdot B_{vR} + V_k \cdot V_{vR} \cdot [G_{vR} \cdot \sin(\theta_k - \delta_{vR}) - B_{vR} \cdot \cos(\theta_k - \delta_{vR})] \quad (50)$$

Figura 10 – Configuração básica STATCOM

Fonte: (ACHA et al., 2004)

Figura 11 – Circuito equivalente STATCOM

Fonte: (ACHA et al., 2004)

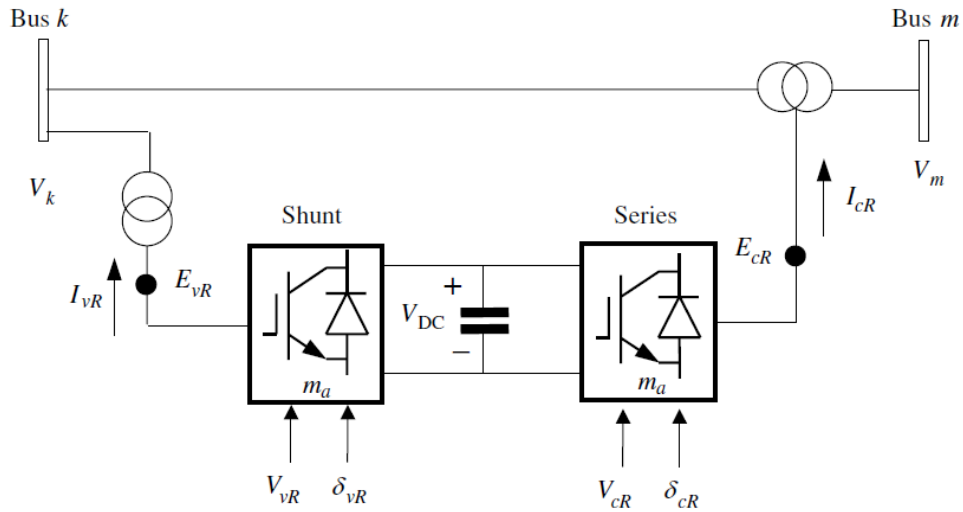
$$P_{vR} = V_{vR}^2 \cdot G_{vR} + V_{vR} \cdot V_k \cdot [G_{vR} \cdot \cos(\delta_{vR} - \theta_k) + B_{vR} \cdot \sin(\delta_{vR} - \theta_k)] \quad (51)$$

$$Q_{vR} = -V_{vR}^2 \cdot B_{vR} + V_{vR} \cdot V_k \cdot [G_{vR} \cdot \sin(\delta_{vR} - \theta_k) - B_{vR} \cdot \cos(\delta_{vR} - \theta_k)] \quad (52)$$

3.5 Controlador universal de fluxo de potência

O Controlador universal de fluxo de potência, UPFC (*Unified Power Flow Controller*), foi desenvolvido com o intuito de controle em tempo real e compensação dinâmica dos sistemas de transmissão AC. O UPFC é capaz de controlar simultaneamente vários parâmetros que afetam a transmissão de potência em uma linha de transmissão, tais como tensão de barra, ângulo de fase e impedância da linha, em outras palavras ele é capaz de controlar o fluxo de potência ativa e reativa.

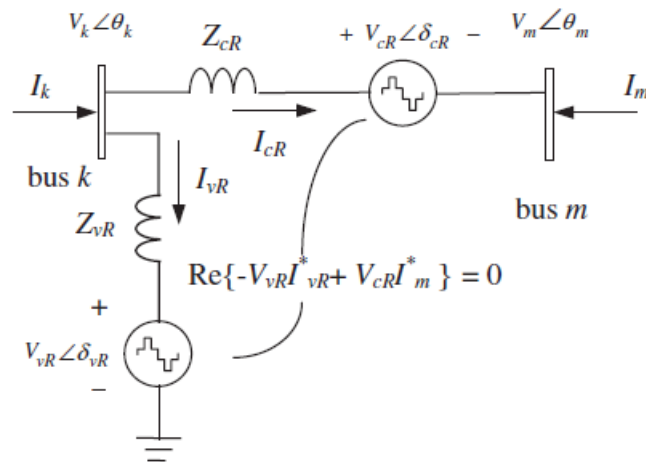
A estrutura básica do UPFC, Figura 12, consiste na combinação de um conver-

Figura 12 – Configuração básica UPFC

Fonte: (ACHA et al., 2004)

Um conversor shunt *STATCOM* e um conversor série *SSSC* com um Link DC em comum. O conversor shunt é capaz de gerar ou absorve potência reativa da rede, já o conversor série age como uma fonte de tensão AC síncrona em série com a linha de transmissão com módulo e fase controláveis. Isto promove o controle do fluxo de potência ativa e reativa pela linha de transmissão.

Para o UPFC, considere duas fontes de tensão de magnitude e fase controláveis, uma instalada em série com a linha de transmissão que interliga as barras na barra k e m , $V_{cR} \angle \delta_{cR}$ e outra instalada shunt com a barra k , $V_{vR} \angle \delta_{vR}$. Desta forma, conforme Figura 13 as equações do fluxo de potência podem ser descritas por:

Figura 13 – Circuito equivalente UPFC

Fonte: (ACHA et al., 2004)

na barra k

$$\begin{aligned}
P_k = & V_k^2 \cdot G_{kk} + V_k \cdot V_m \cdot [G_{km} \cdot \cos(\theta_k - \theta_m) + B_{km} \cdot \sin(\theta_k - \theta_m)] + \\
& V_k \cdot V_{cR} \cdot [G_{km} \cdot \cos(\theta_k - \delta_{cR}) + B_{km} \cdot \sin(\theta_k - \delta_{cR})] + \\
& V_k \cdot V_{vR} \cdot [G_{vR} \cdot \cos(\theta_k - \delta_{vR}) + B_{vR} \cdot \sin(\theta_k - \delta_{vR})]
\end{aligned} \tag{53}$$

$$\begin{aligned}
Q_k = & -V_k^2 \cdot B_{kk} + V_k \cdot V_m \cdot [G_{km} \cdot \sin(\theta_k - \theta_m) - B_{km} \cdot \cos(\theta_k - \theta_m)] + \\
& V_k \cdot V_{cR} \cdot [G_{km} \cdot \sin(\theta_k - \delta_{cR}) - B_{km} \cdot \cos(\theta_k - \delta_{cR})] + \\
& V_k \cdot V_{vR} \cdot [G_{vR} \cdot \sin(\theta_k - \delta_{vR}) - B_{vR} \cdot \cos(\theta_k - \delta_{vR})]
\end{aligned} \tag{54}$$

na barra m

$$\begin{aligned}
P_m = & V_m^2 \cdot G_{mm} + V_m \cdot V_k \cdot [G_{mk} \cdot \cos(\theta_m - \theta_k) + B_{mk} \cdot \sin(\theta_m - \theta_k)] + \\
& V_m \cdot V_{cR} \cdot [G_{mm} \cdot \cos(\theta_m - \delta_{cR}) + B_{mm} \cdot \sin(\theta_m - \delta_{cR})]
\end{aligned} \tag{55}$$

$$\begin{aligned}
Q_m = & -V_m^2 \cdot B_{mm} + V_m \cdot V_k \cdot [G_{mk} \cdot \sin(\theta_m - \theta_k) - B_{mk} \cdot \cos(\theta_m - \theta_k)] + \\
& V_m \cdot V_{cR} \cdot [G_{mm} \cdot \sin(\theta_m - \delta_{cR}) - B_{mm} \cdot \cos(\theta_m - \delta_{cR})]
\end{aligned} \tag{56}$$

no conversor série

$$\begin{aligned}
P_{cR} = & V_{cR}^2 \cdot G_{mm} + V_{cR} \cdot V_k \cdot [G_{km} \cdot \cos(\delta_{cR} - \theta_k) + B_{km} \cdot \sin(\delta_{cR} - \theta_k)] + \\
& V_{cR} \cdot V_m \cdot [G_{mm} \cdot \cos(\delta_{cR} - \theta_m) + B_{mm} \cdot \sin(\delta_{cR} - \theta_m)]
\end{aligned} \tag{57}$$

$$\begin{aligned}
Q_{cR} = & -V_{cR}^2 \cdot B_{mm} + V_{cR} \cdot V_k \cdot [G_{km} \cdot \sin(\delta_{cR} - \theta_k) - B_{km} \cdot \cos(\delta_{cR} - \theta_k)] + \\
& V_{cR} \cdot V_m \cdot [G_{mm} \cdot \sin(\delta_{cR} - \theta_m) - B_{mm} \cdot \cos(\delta_{cR} - \theta_m)]
\end{aligned} \tag{58}$$

no conversor shunt

$$P_{vR} = -V_{vR}^2 \cdot G_{vR} + V_{vR} \cdot V_k \cdot [G_{vR} \cdot \cos(\delta_{vR} - \theta_k) + B_{vR} \cdot \sin(\delta_{vR} - \theta_k)] \tag{59}$$

$$Q_{vR} = V_{vR}^2 \cdot B_{vR} + V_{vR} \cdot V_k \cdot [G_{vR} \cdot \sin(\delta_{vR} - \theta_k) - B_{vR} \cdot \cos(\delta_{vR} - \theta_k)] \tag{60}$$

Assumindo que o conversor não possui perdas ou estas são desprezíveis então:

$$P_{vR} + P_{cR} = 0 \quad (61)$$

Assumindo também que o acoplamento dos transformadores não tem resistência, assim:

$$P_{vR} + P_{cR} = P_k + P_m = 0 \quad (62)$$

4 MELHORIA DA ESTABILIDADE DE TENSÃO COM ALGORITMO EVOLUCIONÁRIO ADAPTATIVO

A estabilidade estática de tensão é um dos problemas mais importantes na análise de sistemas elétricos de potência. O estudo da estabilidade de tensão está relacionado com a compensação do fluxo de potência reativa e com a otimização do seu fluxo nas linhas de transmissão. Assim, o sistema elétrico pode operar na região de segurança, aumentando o máximo possível a margem de colapso de tensão. A compensação de potência reativa pode ser feita por compensadores síncronos, bancos de capacitores e reatores *shunt* e equipamentos FACTS. A melhoria da estabilidade estática de tensão é feita por meio de ajustes das variáveis de decisão do sistema e identificando pontos sensíveis, onde deverão ser alocados equipamentos FACTS, neste trabalho SVC e TCSC, de modo mais eficiente. Para isto é necessário uma ferramenta de otimização poderosa capaz de encontrar soluções ótimas ou sub-ótimas o mais breve possível.

Este trabalho utiliza um algoritmo evolucionário adaptativo para ajustar as variáveis de decisão do sistema e encontrar pontos sensíveis do sistemas elétrico, onde podem ser instalados equipamentos FACTS. O modelo proposto utiliza vários indicadores de desempenho do ponto de vista da estabilidade de tensão, a saber, o *L-index*, que avalia a margem de colapso de tensão, o perfil de tensão e a perda total de potência reativa. O modelo proposto considera esses indicadores como funções objetivo em um problema mono-objetivo, e também propõe uma análise considerando todos os indicadores em uma só função multiobjetivo. A proposta analisa o caso base e as n contingências. Além de atuar no ajuste das variáveis de decisão, o modelo proposto encontra os pontos mais sensíveis do sistema elétrico e propõe a instalação de diferentes dispositivos FACTS, assim como sua injeção de potência reativa.

Este capítulo está organizado como segue. A Seção 4.1 faz uma introdução ao algoritmo evolucionário e como o problema foi modelado, a Seção 4.3 apresenta as funções objetivos utilizadas para a análise de estabilidade estática de tensão e o modelo de análise multiobjetivo.

4.1 Algoritmo evolucionário

Desde os anos de 1960 tem crescido o interesse da comunidade acadêmica por algoritmos baseados em comportamento dos seres vivos que sejam robustos na resolução de problemas de otimização de grande complexidade. O termo que se tem

usado é o de computação evolucionária. Um bom exemplo é o algoritmo Evolucionário AE desenvolvido por Holland, baseado na teoria evolutiva de Darwin (GEN; CHENG, 2000). Algoritmo evolucionário é uma ferramenta poderosa e de grande aplicação para busca estocástica e otimização, um dos mais conhecidos métodos de computação evolucionária. Em geral, o algoritmo evolucionário pode ser resumido em 5 componentes básicos:

- a) Parametrização do algoritmo
- b) Representação genética da solução do problema
- c) Criação de uma população inicial
- d) Avaliação da qualidade da solução (*Fitness*)
- e) Criação de novos indivíduos a partir da população inicial: Operações evolucionárias (Cruzamento, Mutação)

O Algoritmo 1 apresenta uma estrutura clássica de otimização evolucionária. Os algoritmos evolucionários mantêm a população inicial (pais) $P(t)$ por t gerações. Cada representante de uma potencial solução é avaliada segundo um indicador (*Fitness*). Alguns indivíduos sob transformações estocásticas (operações genéticas) formam novos indivíduos. Existe dois tipos de transformação: mutação, na qual novos indivíduos são criados mudando apenas um indivíduo, e cruzamento, na qual cria-se novos indivíduos combinando partes de dois indivíduos. Então estes novos indivíduos (filhos) $C(t)$ são avaliados. Uma nova população é formada pela seleção dos melhores indivíduos dentre pais e filhos. Após várias gerações o algoritmo converge para o melhor indivíduo, o qual representa o valor ótimo ou subótimo do problema.

Algoritmo 1: Algoritmo Evolucionário Clássico

```

1 início
2   Gera população inicial
3   repita
4     Avalia Fitness
5     Seleção
6     Cruzamento
7     Mutação
8   até que condição de parada seja atendida;
9   Mostra resultado
10 fim
```

4.1.1 Modelagem da solução do problema como algoritmo evolucionário

A solução da proposta de melhoria da estabilidade de tensão de sistemas elétricos é encontrada por um algoritmo evolucionário adaptativo, cuja diversidade é controlada pela taxa de mutação.

O processo evolucionário de otimização é descrito no Algoritmo 2. O primeiro passo do processo é otimizar o despacho de potência ativa do ponto de vista do custo mínimo de geração (ZIMMERMAN; MURILLO-SANCHEZ, 2015). A população inicial é formada por indivíduos cujo genes são inicializados com valores dentro das restrições de tensão e despacho de potência reativa. Em seguida, os indivíduos são avaliados segundo a função mono ou multiobjetivo considerada. Na sequência, executa-se o processo evolucionário, cruzamento, mutação e seleção da nova população, até que o critério de parada seja satisfeito.

Algoritmo 2: Algoritmo Evolucionário

```

1 início
2   Executa o despacho ótimo de potência ativa
3   Gera população inicial
4   repita
5     Avalia Fitness
6     Seleção
7     Cruzamento
8     Verifica limites
9     Mutação
10    Verifica limites
11  até que condição de parada seja atendida;
12  Mostra resultado
13 fim

```

4.1.2 Codificação das variáveis de decisão como indivíduos

O indivíduo é codificado por genes que representam as variáveis de decisão, localização e produção de potência reativa dos dispositivos FACTS, como segue:

- a) Módulo de tensão nos barramentos de geração
- b) Potência reativa produzida/consumida pelos geradores
- c) Potência reativa produzida pelos bancos de capacitores *shunt*

- d) *Tap* dos transformadores
- e) Localização e despacho de potência reativa dos equipamentos SVC
- f) Localização e compensação da linha de transmissão dos equipamentos TCSC

A Figura 14 mostra a forma que o indivíduo é codificado, sendo $V_i \in \Psi_G$ o módulo de tensão do barramento i , $Q_j \in \Psi_Q$ a injeção de potência reativa por meio de bancos de capacitores do barramento j , $T_k \in \Psi_T$ o ajuste do *tap* do transformador do barramento k e o par (B, F) o barramento B onde é instalado o dispositivo FACTS com a injeção de potência reativa F .

Figura 14 – Codificação das variáveis de decisão como um indivíduo

V_I	...	V_{N_G}	Q_I	...	Q_{N_Q}	T_I	...	T_{N_T}	b_{x_I}, F_I	...	b_{x_I}, F_{N_F}
-------	-----	-----------	-------	-----	-----------	-------	-----	-----------	----------------	-----	--------------------

Fonte: Elaborado pelo autor

4.1.3 Cruzamento

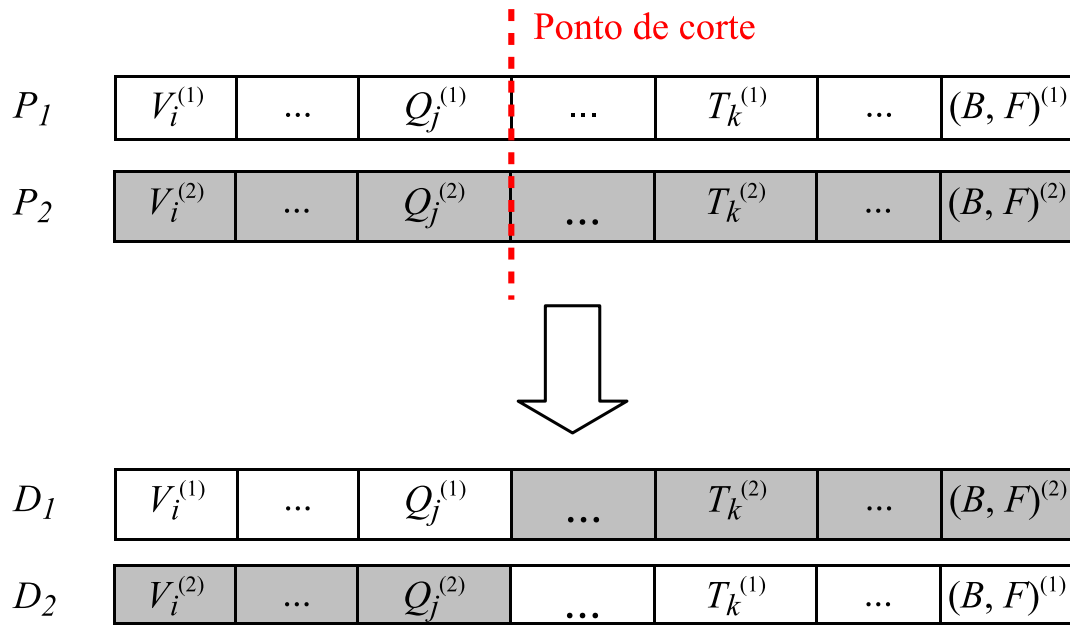
O cruzamento de indivíduos da população resulta em uma busca local no espaço de soluções. No modelo proposto, usa-se o cruzamento por corte simples. Inicialmente, seleciona-se N_p indivíduos que formam os candidatos a pais. Em seguida, seleciona-se dois indivíduos, dentre os candidatos a pais, que cruzam e geram dois descendentes de acordo com uma probabilidade p_c . Se os dois pais não cruzarem, gera-se dois descendentes idênticos aos pais ou clonados. Esse processo é repetido até que se gere N_d descendentes. Cada candidato a pais pode ser escolhido para o cruzamento mais de uma vez.

No cruzamento por corte simples, determina-se, aleatoriamente, um mesmo ponto de corte nos dois progenitores, P_1 e P_2 , como mostra a Figura 15. Os descendentes são gerados mesclando-se as partes dos progenitores. Os sobrescritos (1) e (2) nos genes da Figura 15 indicam a que progenitor pertence a variável de decisão.

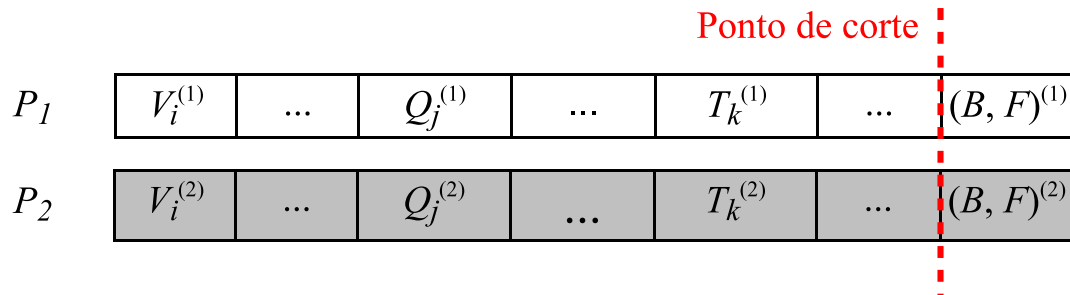
Se o seguimento correspondente aos equipamentos FACTS for igual a 1, i.e. programa-se instalar apenas 1 dispositivo FACTS no sistema, e o ponto de corte for na posição do dispositivo FACTS, como mostra a Figura 16, então pode-se optar por mesclar as injeções de potência reativa, como segue:

$$D_1(i) = \alpha * P_1(i) + (1 - \alpha) * P_2(i) \quad (63)$$

$$D_2(i) = \alpha * P_2(i) + (1 - \alpha) * P_1(i) \quad (64)$$

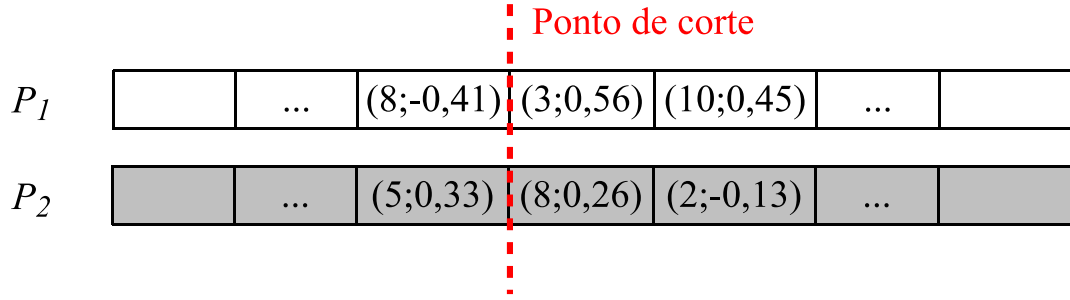
Figura 15 – Cruzamento por corte simples**Fonte: Elaborado pelo autor**

sendo D_1 e D_2 os descendentes do cruzamento, P_1 e P_2 os progenitores e i a posição do vetor indivíduo onde é feito o corte.

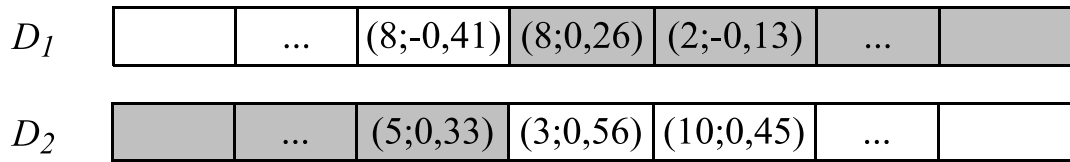
Figura 16 – Cruzamento por corte simples com mescla de valores**Fonte: Elaborado pelo autor**

O cruzamento pode, também, gerar um problema nos descendentes nos seguimentos dos dispositivos FACTS. Por exemplo, a Figura 17 mostra dos progenitores de um cruzamento. Se o corte for feito entre as posições correspondentes aos barramentos 8 e 3 do progenitor 1, os descendentes resultarão em vetores como os mostrados na Figura 18, i.e., ocorrerá uma violação no descendente 1, que terá o equipamento FACTS instalado mais de uma vez no mesmo local.

Para evitar esse problema, o mecanismo permite escolher o cruzamento real para vetores maiores que 1; assim, são alterados apenas os valores da potência reativa.

Figura 17

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 18

Fonte: Elaborado pelo autor

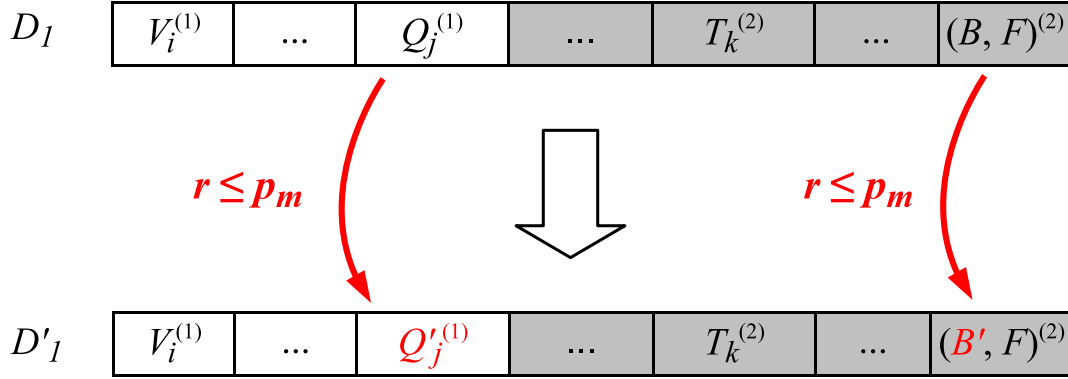
4.1.4 Mutação

A mutação, realizada logo após o cruzamento, é uma variação aleatória dos valores dos genes (variáveis de decisão) segundo uma taxa de mutação, $p_m \in [0, 1]$. As mutações ocorrem dentro dos limites das restrições das variáveis de decisão em função de uma distribuição de probabilidade uniforme. No modelo proposto, a mutação é realizada nas variáveis de decisão, na localização dos dispositivos FACTS e nas suas injeções de potência reativa. A mutação da localização dos dispositivos FACTS ocorre no conjunto de barramentos onde é possível instalar estes dispositivos, Λ_{FT} . Nos genes dos dispositivos FACTS, a mutação da localização e da injeção de potência reativa acontecem independentemente, isto é, pode-se mutar apenas a localização ou a injeção de potência reativa.

A Figura 19 mostra um descendente antes e depois da mutação, sendo $r \in [0, 1]$ uma variável aleatória de distribuição uniforme. Para cada gene no indivíduo, sempre que $r \leq p_m$ o gene é modificado para um novo valor dentro do intervalo de operação. Na Figura 19, os genes mutados $Q_j^{(1)} \in [Q_{min}, Q_{max}]$ e $B' \in \Lambda_{FT}$.

4.1.5 Controle da diversidade

A diversidade determina as semelhanças entre os indivíduos e distribuição da população no espaço de soluções. Em um processo evolucionário, a convergência

Figura 19 – Muta  o de um descendente após o cruzamento**Fonte: Elaborado pelo autor**

prematura da popula  o a uma região específica do espaço de busca   , praticamente, inerente. Assim, a busca global fica comprometida e a soluço ótima pode ser encontrada com mais dificuldade. O controle ou manuten  o da diversidade evita a convergência prematura e aumenta o número de regiões exploradas durante o processo de busca, melhorando, quase sempre, o desempenho do algoritmo evolucionário (GOUVÊA, 2009).

O controle ou manuten  o da diversidade    feito determinando uma forma de calcular a diversidade e estabelecendo um valor ou faixa de referência. Neste trabalho, o cálculo da diversidade    feito pela fun  o de heterozigosidade de Simpson (MAGURRAN, 2013), como segue

$$\Gamma = 1 - \sum_{i=1}^{n_s} p_i^2, \quad (65)$$

sendo p_i a taxa de ocorrência do i -ésimo alelo e n_s o número de alelos. Define-se como alelo um possível valor do gene (variável de decisão). Como a codifica  o das variáveis de decisão    real, o intervalo n_s    sub-dividido, sendo cada parte dessa divisão um alelo.

Neste trabalho, o controle da diversidade    feito ajustado a taxa de muta  o, que representa o principal operador responsável pela explora  o da região de soluço. A cada gera  o, a diversidade de popula  o    comparada com um valor de referência, e a taxa de muta  o    ajustada como segue

$$p_m(k+1) = p_m + \eta (\Gamma_r - \Gamma), \quad (66)$$

sendo η uma constante, Γ_r a diversidade desejada ou de referência e p_m a taxa de muta  o padrão, isto   , o valor utilizado caso não exista desvio entre Γ e Γ_r . A diversidade    definida por uma fun  o rampa que declina linearmente ao longo das gera  es, como segue

$$\Gamma_r = \Gamma_{max} + (\Gamma_{min} - \Gamma_{max}) \frac{ite}{ite_{max}}, \quad (67)$$

sendo Γ_{max} e Γ_{min} constantes que definem, respectivamente, os valores máximo e mínimo da diversidade desejada.

4.2 Outros métodos de otimização

Esta seção apresenta os dois métodos de otimização probabilísticos utilizados nos testes comparativos. O primeiro deles, otimização por enxame de partículas, é baseado em população, como o método proposto. O segundo método, recozimento simulado, é baseado em solução local.

4.2.1 Otimização por enxame de partículas

Inteligência por enxame é um ramo da inteligência artificial que estuda o comportamento e propriedades coletivas de sistemas descentralizados, complexos, auto-organizados com estrutura social. A principal motivação decorre diretamente dos enxames de natureza orgânica, como bandos de aves, cardume de peixes, colônias de formigas e outros rebanhos de animais, que apresentam uma capacidade de adaptação e auto-organização. Tais sistemas são constituídos por agentes que interagem simples organizados em pequenas sociedades (enxames). Embora cada agente tenha um espaço de ação muito limitado e não há nenhum controle central, o comportamento agregado de todo o enxame exibe traços de inteligência, isto é, a capacidade de reagir às mudanças ambientais e capacidades de tomada de decisão. Embora existam diferenças filosóficas e operacionais entre algoritmos de inteligência evolutiva e enxame, todos eles foram categorizados como computação evolutiva em meados dos anos 90. Esta ligação foi feita devido às suas semelhanças inerentes, como estocacidade, o uso de populações, tipos e campos de aplicação dentre outras (LEE; EL-SHARKAWI, 2008).

A otimização por enxame de partículas (OEP) do inglês *Particle Swarm Optimization* foi introduzido por Kennedy e Eberhart, em 1995, como um processo de busca estocástica e otimização de base populacional (LEE; EL-SHARKAWI, 2008). PSO na maioria dos termos básicos pertence ao paradigma de inteligência por enxame, que estuda o comportamento coletivo e características sociais auto-organizada, descentralizada e sistemas complexos conhecidos como enxames. O objectivo é convergir a um ótimo global de uma função ou sistema multidimensio-

nal e possivelmente não linear.

Em um processo de PSO, como segue no Algoritmo 3, um enxame de partículas, cada uma das quais representa uma potencial solução para o problema de otimização, navega através do espaço de busca. As partículas são inicialmente distribuídas aleatoriamente ao longo do espaço de busca, e o objetivo é convergir a um ótimo global de uma função ou um sistema. Cada partícula mantém o controle de sua posição (Equação 69) no espaço de busca e sua melhor solução até no momento alcançado. Este é o melhor valor pessoal (chamado *pbest*) e do processo de PSO também controla a melhor solução global até então alcançado pelo enxame com o seu índice de partículas (o chamado *gbest*). Assim, durante a sua viagem com iterações de tempo discreto, a velocidade (Equação 68) de cada agente na iteração seguinte é calculado como uma função da melhor posição do enxame (posição do *gbest* partícula como a componente social), a melhor posição pessoal da partícula (*pbest* como o componente cognitiva), e a sua velocidade anterior (o termo memória).

$$v(t+1) = wv(t) + C_1rand(pbest(t) - x(t)) + C_2rand(gbest(t) - x(t)) \quad (68)$$

$$x(t+1) = x(t) + v(t+1) \quad (69)$$

Algoritmo 3: Otimização por enxame de partículas

```

1 início
2   Número de partículas, N; Enxame, S; Melhor posição, P.
3    $t \leftarrow 0$ 
4   Inicializa S e faz  $\mathbf{S} \equiv \mathbf{P}$ 
5   Avalia S e define o índice G da melhor posição
6   repita
7     Atualiza S
8     Avalia S e redefine o índice G
9     Atualiza P e redefine G
10     $t \leftarrow t + 1$ 
11  até que condição de parada seja atendida;
12  Mostra resultado
13 fim
```

4.2.2 Otimização por recozimento simulado

Recozimento simulado (RS) , do inglês *Simulated Annealing*, emula o processo físico de recozimento e foi originalmente proposto no domínio da mecânica estatística como meios de modelação do processo natural de solidificação e formação de cristais. Foi somente na década de 1980, no entanto, que uma pesquisa independente feita por Kirkpatrick, Gelatt, Vecchi e Cerny, observou-se as semelhanças entre o processo físico de recozimento e alguns problemas de otimização combinatória (DREO et al., 2006). As duas características principais do processo de recozimento simulado são (1) o mecanismo de transição entre estados e (2) a programação de arrefecimento. Quando aplicado a otimização combinatória, recozimento simulado visa encontrar uma configuração ideal (ou estado com "energia"mínimo) de um problema complexo. Uma solução ótima é associada a um cristal perfeito, ao passo que um cristal com defeitos corresponde com um solução ótima local. As partes mais importantes do algoritmo SA podem ser resumidas nos seguintes 4 passos:

- a) Determinar Temperatura inicial (Temp Hot.).
- b) Determinar temperatura final (Congelamento Temp.).
- c) Definir cronograma de arrefecimento (função de arrefecimento).
- d) Definindo Cadeia de Markov (o número de iterações a cada temperatura).

Cada um dos elementos mencionados no processo de busca pode ser eficaz na obtenção de convergência ao mínimo global e escapar de mínimos locais.

Recozimento simulado é uma das técnicas mais flexíveis disponíveis para resolver problemas combinatórios difíceis. Desde a sua descoberta, o método de recozimento simulado provou a sua eficácia em vários tipos de problemas de otimização. A principal vantagem de SA é que ele pode ser aplicado a diversos problemas, independentemente das condições de diferenciabilidade, continuidade e convexidade que são normalmente necessários em métodos de otimização convencionais. O recozimento simulado geralmente atinge uma solução de boa qualidade. Além disso, é um método geral relativamente fácil de se implementar, para maioria dos problemas que podem potencialmente empregar as técnicas de otimização iterativa.

As desvantagens do uso do Recozimento simulado (SA) são, por vezes, associadas pelo envolvimento de grande número de parâmetros (temperatura inicial, a taxa de diminuição da temperatura, o comprimento das etapas de temperatura, o critério de terminação para o programa...). Em certas aplicações o tempo de processamento envolvido, torna-se excessivo inviabilizando o uso do algoritmo. O

Algoritmo 4 mostra como se dá o processo de otimização por recozimento simulado.

Algoritmo 4: Otimização por recozimento simulado

```

1  início
2  Inicializa ( $T_0$  e  $N_0$ )
3   $k \leftarrow 0$ 
4  Inicializa  $S_i$ 
5  repita
6      repita
7           $S_j = S_i + pert$ 
8          Avalia  $f(S_j)$ 
9          se  $f(S_j) \leq f(S_i)$  então
10              $S_j = S_i$ 
11          senão
12             se  $\exp\left(\frac{f(S_i) - f(S_j)}{T_k}\right) > rand$  então
13                  $S_j = S_i$ 
14             fim
15         fim
16     até que condição de equilíbrio  $N_k$ ;
17      $k \leftarrow k + 1$ 
18     Determina nova temperatura  $T(k)$ 
19     Determina nova condição de equilíbrio  $N(k)$ 
20 até que condição de parada seja atendida;
21 Mostra resultado
22 fim

```

(LEE; EL-SHARKAWI, 2008)

Onde S_i é uma possível solução, $T(k)$ e $N(k)$ são a temperatura e condição de equilíbrio na iteração k .

4.3 Funções objetivo

A ocorrência de distúrbios relacionados à instabilidade de tensão pode resultar em perdas econômicas e impactos sociais. Existem vários índices e indicadores que monitoram o sistema elétrico com o propósito de alertar e evitar problemas relacionados à estabilidade de tensão. Neste trabalho são utilizados indicadores que avaliam a margem de colapso de tensão, a qualidade do fornecimento de energia e a reserva de potência reativa. Duas abordagens são apresentadas e na primeira, esses indicadores são analisados individualmente. Como esses indicadores são con-

flitantes entre si, isto é, a melhoria de um indicador pode ocorrer a penalização do outro, uma segunda abordagem multiobjetivo é proposta com o objetivo de melhorar, o máximo possível, todos os indicadores simultaneamente.

O primeiro indicador, *L-index*, avalia o estado de operação do sistema do ponto de vista da margem de colapso de tensão. Esse indicador é baseado na análise do fluxo de potência e na matriz híbrida da teoria de circuitos. A Seção 2.2.1 mostra com detalhes como esse indicador foi desenvolvido. O *L-index* é avaliado para cada barramento de carga, quanto mais próximo de 1, mais o sistema tende ao colapso de tensão. Assim, deve-se reduzir o valor do *L-index*, avaliando cada barramento de carga. A função objetivo referente à margem de colapso de tensão é definida como segue

$$F_L = \min (\max (L - index)) \quad (70)$$

A qualidade do fornecimento de energia elétrica é avaliada pelo perfil de tensão nos barramentos de carga. Deseja-se que o nível de tensão para os consumidores esteja o mais próximo possível de um determinado valor de referência. Assim, função objetivo que avalia o desvio de tensão nos barramentos de carga, em relação à tensão de referência, é definida como segue

$$F_V = \sqrt{\sum_i^{n_{pq}} (V_i - V_{ref})^2} \quad (71)$$

A estabilidade de tensão tem forte relação com o fluxo de potência reativa. Durante um distúrbio, o fluxo de potência ativa pode não se alterar significativamente; no entanto, o fluxo de potência reativa pode variar drasticamente, pois a queda de tensão nos barramentos devido a contingência reduz a capacidade de suprir potência reativa dos compensadores *shunt* e causar aumento das perda de potência reativa. Dessa forma, é desejado que se tenha reservas de potência reativa suficiente para atender as situações de sobrecarga e contingências (DONG et al., 2005). Neste trabalho, função objetivo que considera a perda de potência reativa é definida como segue

$$F_Q = \sum_{j=1}^{ng} \left(\frac{Q_j^2}{\Delta Q_j} \right) \quad (72)$$

A função objetivo F_Q pondera a injeção de potência reativa Q com a capacidade da unidade geradora j . Sendo que $\Delta Q_j = Q_{jmax} - Q_{jmin}$.

Todas estas funções objetivo estão sujeitas as equações do fluxo de potência do sistema e as restrições operacionais:

$$P_{Gi} - P_{Di} - \sum_{j=1}^{NB} |V_i| \cdot |V_j| \cdot |Y_{ij}| \cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) = 0 \quad (73)$$

$$Q_{Gi} - Q_{Di} - \sum_{j=1}^{NB} |V_i| \cdot |V_j| \cdot |Y_{ij}| \sin(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) = 0 \quad (74)$$

$$P_{Gi}^{min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{max} \quad (75)$$

$$Q_{Gi}^{min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi}^{max} \quad (76)$$

$$|V_g^{min}| \leq |V_g| \leq |V_g^{max}| \quad (77)$$

sendo:

- a) P_{Gi} e P_{Di} as potências ativa de geração e carga na barra i ;
- b) Q_{Gi} e Q_{Di} as potências reativa de geração e carga na barra i ;
- c) P_{Gi}^{min} e P_{Gi}^{max} os limites mínimo e máximo de geração de potência ativa na barra de geração i ;
- d) Q_{Gi}^{min} e Q_{Gi}^{max} os limites mínimo e máximo de geração de potência reativa na barra de geração i ;
- e) V_i^{min} e V_i^{max} os limites mínimo e máximo de tensão na barra i ;
- f) Y_{ij} o elemento da matriz admitância $[Y]$ na posição ij ;
- g) θ_{ij} o ângulo do elemento Y_{ij} ; e
- h) δ_i e δ_j são os ângulos nas barras i e j .

Em geral, os indicadores de estabilidade de tensão são conflitantes entre si, isto é, quando um indicador melhora o outro piora. Assim, é necessário achar um ponto de ajuste que melhore o desempenho do sistema de forma balanceada, isto é, melhorando ao máximo todos os indicadores. A análise multiobjetivo apresenta soluções que atendam de maneira diferente as funções objetivo. Estas soluções são apresentadas a um especialista ou uma equipe de tomada de decisão que avaliará qual a solução mais indicada ou de maior preferência diante dos critérios estabelecidos (PEDRYCZ; EKEL; PARREIRAS, 2011).

Neste trabalho, são utilizados duas abordagens de solução multiobjetivo: na primeira, o problema multiobjetivo é reduzido a um problema mono objetivo pelo

somatório das funções objetivos normalizadas; na segunda abordagem, as funções objetivo também são normalizadas e busca-se aumentar o nível de satisfação da função de pior solução (HAIMES et al., 1989). Para normalizar funções objetivo que se deseja minimizar, utiliza-se

$$F_p = \frac{\max f_p(x) - f_p(x)}{\max f_p(x) - \min f_p(x)}, \quad (78)$$

sendo F_p a função objetivo normalizada e x pertence a região de soluções possíveis. Para normalizar funções objetivo que se deseja maximizar, utiliza-se

$$F_p = \frac{f_p(x) - \min f_p(x)}{\max f_p(x) - \min f_p(x)}. \quad (79)$$

Para a primeira abordagem, agregação, a função objetivo é definida como segue

$$\Phi(x) = \sum_{p=1}^{n_{fo}} F_p(x). \quad (80)$$

Para a segunda abordagem, MaxMin, a função objetivo é definida como segue

$$\Lambda(x) = \max(\min(F_p(x))). \quad (81)$$

5 ESTUDO EXPERIMENTAL

Neste capítulo são apresentados as considerações para análise da estabilidade de tensão em sistemas elétricos de potência, os métodos de otimização utilizados nos testes comparativos e a análise dos resultados dos experimentos.

O modelo proposto é implementado no sistema Matlab[®], os sistemas elétricos de potência utilizados e os programas para análise do fluxo de potência foram obtidos do pacote de simulações do MatPower (ZIMMERMAN; MURILLO-SANCHEZ, 2015). O método proposto é avaliado nos sistemas IEEE 14, 57 e 118 barras, e seus resultados são comparados com o Algoritmo Evolucionário padrão (AE), o método de Otimização por Enxame de Partículas (OEP) e o Recozimento Simulado (RS). Antes da aplicação dos algoritmos os parâmetros de rede dos sistemas são ajustados conforme o fluxo ótimo de potência ativa do Matpower. A avaliação da estabilidade de tensão é feita a partir dos indicadores *L-index*, desvio de tensão nos barramentos de carga e perda total de potência reativa. Os dispositivos FACTS utilizados foram o SVC e o TCSC.

5.1 Variáveis de decisão e parametrização dos algoritmos

O modelo proposto pode atuar nas variáveis de decisão do sistema bem como instalar equipamentos FACTS nos pontos mais críticos afim de aumentar a margem de estabilidade de tensão. Neste trabalho foram utilizadas como variáveis de decisão do sistema os módulos de tensão nos barramentos de geração, as injeções de potência reativa dos bancos de capacitores, os *TAPs* dos transformadores e as localizações e injeções de potência reativa dos dispositivos FACTS. A Tabela 1 apresenta os intervalos das variáveis de decisão do sistema.

Tabela 1 – Variáveis de decisão do SEP

Variável	Mínimo	Máximo	Unidade
Tensão nas barras PV	0.9	1.1	p.u.
Potência reativa shunt	0	100	MVAR
TAP	0.9	1.1	pu

A Tabela 2 apresenta os parâmetros dos dispositivos FACTS SVC e TCSC utilizados neste trabalho, cujas instalações seguiram os critérios:

- a) Não instala-se equipamento SVC em barras de geração ou onde se tenha alguns tipo de injeção de potência reativa (compensador síncrono, capacitor *shunt*, etc.)

- b) Não instala-se equipamento TCSC entre barras de transformação com ajuste de TAP.

Tabela 2 – Variáveis de decisão dos FACTS

Equipamento	Instalar	Mínimo	Máximo	Unidade
SVC	Barra	-100	100	MVAR
TCSC	LT	0	50	%

A Tabela 3 apresenta a quantidade de variáveis de decisão por sistema que serão manipuladas pelos algoritmos afim de obter os melhores ajuste de acordo com os indicadores de estabilidade de tensão analisados neste trabalho. As variáveis inteiras são relativas à localização dos equipamentos FACTS e a variáveis inteiras são relativas aos parâmetros de ajuste dos FACTS e do SEP. A complexidade do problema de otimização aumenta consideravelmente com o aumento do sistema tendo em vista a quantidade de variáveis de decisão que os algoritmos deverão manipular para encontrar um ajuste ótimo.

Tabela 3 – Quantidade de variáveis de decisão por sistema

Variáveis	IEEE 14	IEEE 57	IEEE 118
Tensão na geração	Vg1 - ... - Vg5	Vg1- ... - Vg7	Vg1 - ... - Vg54
Potência Q shunt	Q1	Q1 - ... - Q3	Q1- ... - Q14
Tap	T1 - ... - T3	T1 - ... - T17	T1 - ... - T9
FACTS série	TCSC1	TCSC1, TCSC2	TCSC1, TCSC2
FACTS shunt	SVC1	SVC1, SVC2	SVC1, SVC2
Total var. inteiras	2	4	4
Total var. reais	11	31	81

O desempenho dos métodos de otimização depende de como foram definidos seus parâmetros. Os parâmetros fixos do AE e algoritmo evolucionário adaptativo (AEA) são apresentados na Tabela 4. Esses parâmetros foram obtidos empiricamente, por meio de simulações.

Tabela 4 – Parâmetros fixos do AEA e AE

Parâmetro	Valor
Tamanho da população	100
Taxa de cruzamento	0.6
Taxa de mutação	0.05
Tipo de seleção	Torneio
Tamanho do grupo	20
Número de selecionados	50
Número de filhos	100
Número de gerações	1000

No processo evolucionário, há uma tendência que a diversidade da população diminua ao longo das gerações. O controle da diversidade tem como objetivo manter um determinado valor ou faixa de diversidade capaz de evitar a convergência prematura e escapar de mínimos locais de forma mais eficiente, sem prejudicar o desempenho do algoritmo. Neste trabalho, a diversidade da população é controlada pela taxa de mutação, $p_m(k)$, que é ajustada segundo a Equação 66, em função do desvio entre a diversidade da população, Γ , e a desejada, Γ_r . O modelo de referência de diversidade desejada utiliza uma função rampa, apresentada na Seção 4.1.5, cujo valor diminui linearmente ao longo das gerações de $\Gamma_{\max} = 0.7$ até $\Gamma_{\min} = 0.3$.

Os parâmetros apresentados na Tabela 5 são fixos para o OEP. Eles foram obtidos com base nos melhores valores apresentados por meio de simulações. A velocidade inicial das partículas são consideradas como 10% da sua posição inicial.

Tabela 5 – Parâmetros fixos do OEP

Parâmetro	Valor
Tamanho do enxame	100
Coefficiente de aceleração C_1	2.0
Coefficiente de aceleração C_2	2.0
Coefficiente de inércia $w_{\max}$	0.9
Coefficiente de inércia $w_{\min}$	0.4
Velocidade inicial	0.1
Número de iterações	1000

Para o RS foram utilizados os parâmetros apresentados na Tabela 6. Eles foram obtidos por meio de simulações e valores usuais da literatura. Afim de fazer uma comparação mais fiel com os outros algoritmos, no caso do RS foram avaliados 100 pontos iniciais para cada simulação, isto é, durante processo de otimização, ao longo das iterações, cada ponto sofre uma perturbação em que esta nova solução é aceita segundo a probabilidade de Boltzmann e a melhor solução é sempre escolhida.

Tabela 6 – Parâmetros fixos RS

Parâmetro	Valor
Número de pontos	100
Temperatura τ	0.2
Coefficiente de resfriamento α	0.9
Iteração por temperatura	100
Probabilidade	Boltzmann
Número de iterações	1000

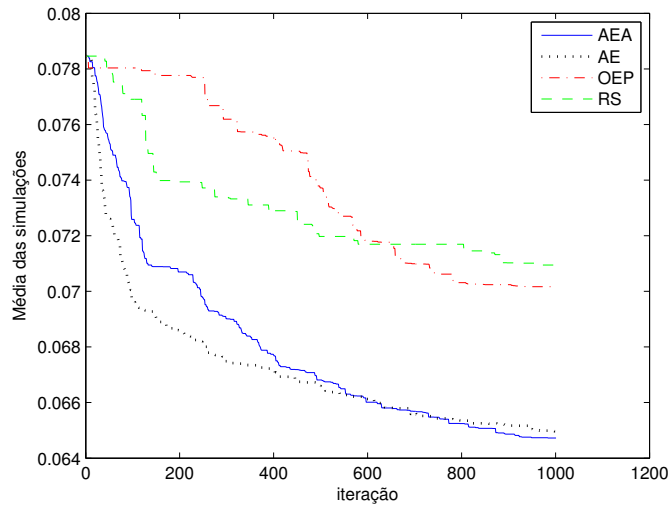
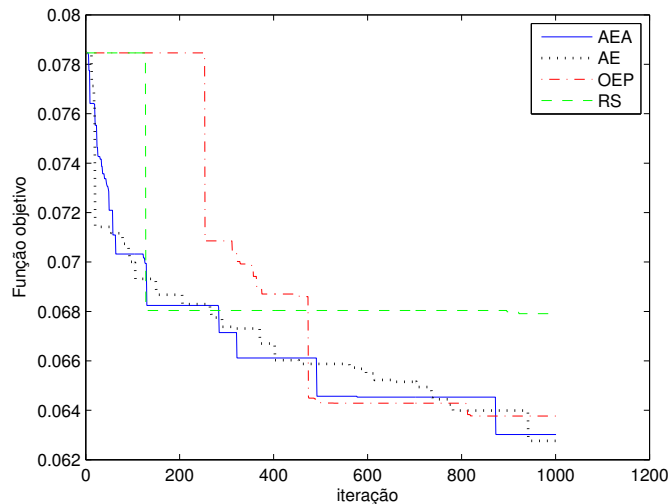
5.2 Experimentos com o sistema IEEE 14 barras

A Figura 20a mostra a média das soluções para a função objetivo que utiliza o *L-index* ao longo as iterações. Como pode-se observar o AEA e AE apresentaram desempenho melhor do que o OEP e RS. O AEA chega ao melhor resultado mais rápido, como mostra a Figura 20b. A Tabela 7 mostra o melhor resultado obtido pelos métodos utilizados com a função objetivo que utiliza o *L-index*. Para essa função objetivo, o AEA, AE e OEP obtiveram uma redução próxima de 20% e 13% em relação ao RS. A piora considerável do desvio de tensão em relação ao FOPA é compreensível, pois porque para melhorar o *L-index* o nível de tensão dos barramentos de carga foram elevados. Apesar disso, os algoritmos diminuiriam a perda de potência reativa com exceção do OEP. Apesar dos resultados próximos, todos os métodos encontraram diferentes pontos para a instalação dos dispositivos SVC e TCSC. AEA, AE e OEP instalaram o TCSC na mesma linha de transmissão (LT); porém, o SVC foi instalado em barramentos diferentes. No AEA e AE, o SVC injeta potência reativa no barramento já para o OEP e RS o SVC absorve potência reativa do barramento. O AEA apresentou menos da metade do valor de injeção potência reativa do que o AE.

Tabela 7 – IEEE 14: função objetivo *L-index*

Algoritmo	SVC		TCSC			<i>L-index</i>	Desvio de tensão	Perda de MVAR
	Barra	Pot.	Ini.	Fim	%			
FOPA	-	-	-	-	-	0.0785	0.1112	27.5104
AEA	10	20.1554	13	14	48.9468	0.0630	0.3207	16.7652
AE	14	50.7231	13	14	46.8531	0.0628	0.3124	16.2783
OEP	5	-34.7372	13	14	47.6400	0.0638	0.3008	39.4719
RS	5	-20.2154	6	13	35.8917	0.0679	0.2899	11.8787

Para a análise da função objetivo que utiliza o desvio de tensão nos barramentos de carga, a Figura 21a mostra que o AE teve o melhor desempenho dentre os métodos utilizados; entretanto, os resultados obtidos pelos métodos AEA, AE e OEP são muito próximos – diferenciarem menos que 1%, como apresenta a Tabela

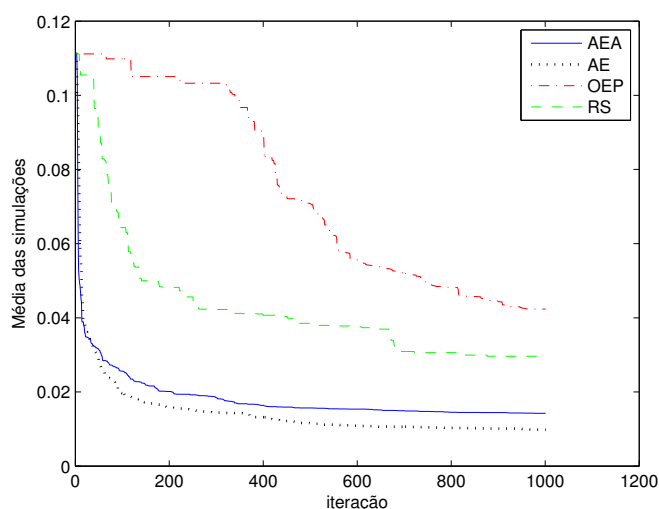
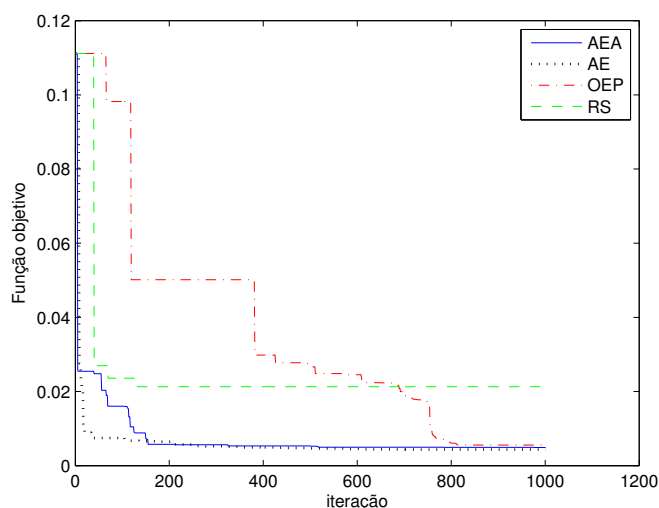
Figura 20 – IEEE 14 função Objetivo L -index**(a) Resultado médio****(b) Melhor resultado**

8. Também observa-se que o resultado obtido pelo RS, mesmo que um pouco pior, foi obtido mais rapidamente do que o OEP. A Tabela 8 mostra que o AEA, AE e OEP instalaram o SVC no mesmo barramento; no entanto, o TCSC foi instalado em LTs diferentes, com destaque para o OEP que ajustou um nível de compensação da LT em menos que 50% do valor ajustado pelos métodos AEA e AE. Avaliando os outros indicadores, o AEA teve uma piora de 1% contra 8% dos outros métodos, em especial o L -index. Na perda de potência reativa, o RS se destacou com uma redução de 81,2%.

Nos experimentos com a função objetivo que utiliza a perda de potência reativa, AEA e AE tiveram quase o mesmo desempenho, sendo o último um pouco mais rápido na obtenção da melhor solução, como mostra a Figura 22a. No final do

Tabela 8 – IEEE 14: desvio de tensão nas barras PQ

Algoritmo	SVC		TCSC			$L-index$	Desvio de tensão	Perda de MVAR
	Barra	Pot.	Ini.	Fim	%			
FOPA	-	-	-	-	-	0.0785	0.1112	27.5104
AEA	14	10.7332	6	13	47.7009	0.0793	0.0049	21.6109
AE	14	11.8354	9	10	45.7789	0.0850	0.0043	20.3636
OEP	14	11.7862	4	5	22.2503	0.0850	0.0055	24.0736
RS	7	10.1230	1	5	14.3616	0.0852	0.0213	4.9600

Figura 21 – IEEE 14: desvio de Tensão**(a) Resultado médio****(b) Melhor resultado**

experimento, todos os métodos apresentaram resultados semelhantes, sendo o RS com um desempenho inferior, como mostra a Figura 22b. Os resultados obtidos da melhor simulação, apresentados na Tabela 9, mostram grande redução da perda de potência reativa – mais de 99% para o AEA, AE e OEP, e 97% para o RS. Todos os

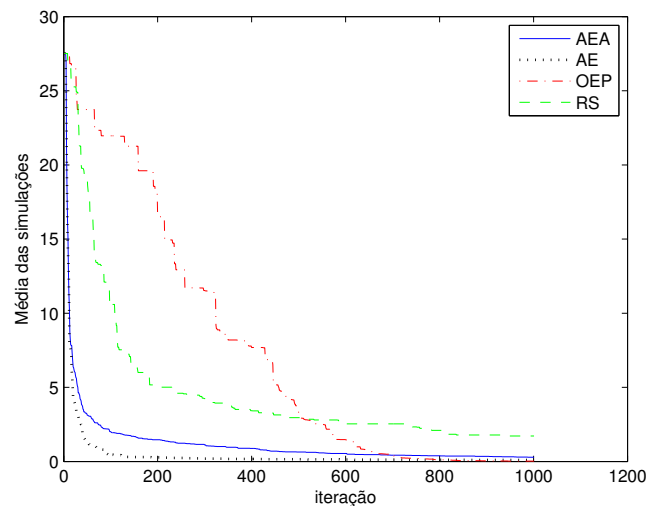
métodos, exceto o OEP, melhoram o perfil de tensão do sistema. O AEA apresentou menor variação no L -index. Os métodos propõem locais diferentes para se instalar os dispositivos FACTS, sendo os menores ajustes apresentados pelo OEP.

Tabela 9 – IEEE 14: perda de potência reativa

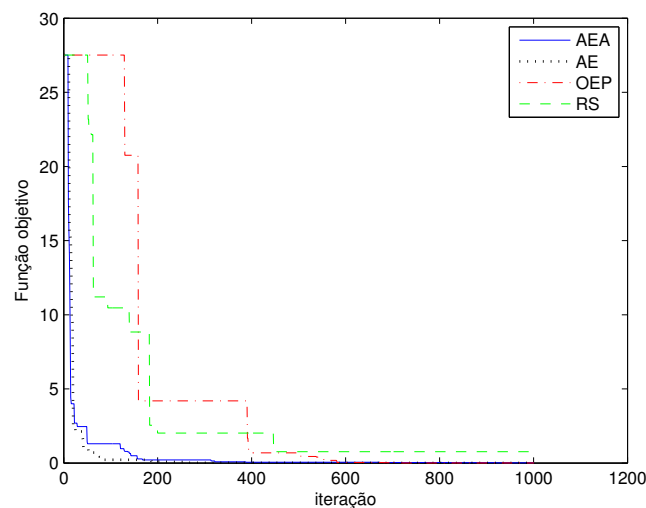
Algoritmo	SVC		TCSC			L -index	Desvio de tensão	Perda de MVAR
	Barra	Pot.	Ini.	Fim	%			
FOPA	-	-	-	-	-	0.0785	0.1112	27.5104
AEA	9	23.4951	9	14	22.0962	0.0795	0.1048	0.0121
AE	4	27.3535	1	5	9.4528	0.0888	0.0772	0.0007
OEP	5	-1.5958	1	2	2.6272	0.0843	0.1432	0.0001
RS	5	56.7133	6	13	28.2441	0.0826	0.0717	0.7656

Figura 22 – IEEE 14: perda de potência reativa

(a) Resultado médio



(b) Melhor resultado



Na análise multiobjetivo, são considerados o *L-index*, o desvio de tensão nos barramentos de carga e a perda de potência reativa, simultaneamente. As funções objetivos são normalizadas pela Equação 78, cujos valores mínimos foram aqueles obtidos nas simulações anteriores. Já os valores máximos das funções objetivos considerados nesta análise são os valores do estado inicial do sistema.

Na primeira análise do problema multiobjetivo, formula-se a função de agregação MaxMin. O AEA apresentou o melhor desempenho, e o RS apresentou o melhor resultado médio, como mostra a Figura 23a. O melhor resultado foi obtido pelo AEA, como mostra a Figura 23b. A Tabela 10 mostra que os métodos instalaram o TCSC na mesma LT e o SVC na mesma barra, com exceção do AE. Os ajustes das variáveis de decisão não apresentaram uma variação significativa.

Tabela 10 – IEEE 14 Resultados análise multiobjetivo – Maxmin

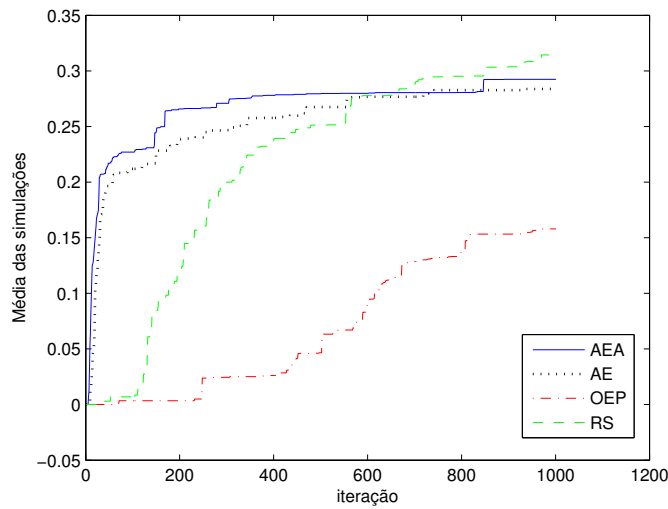
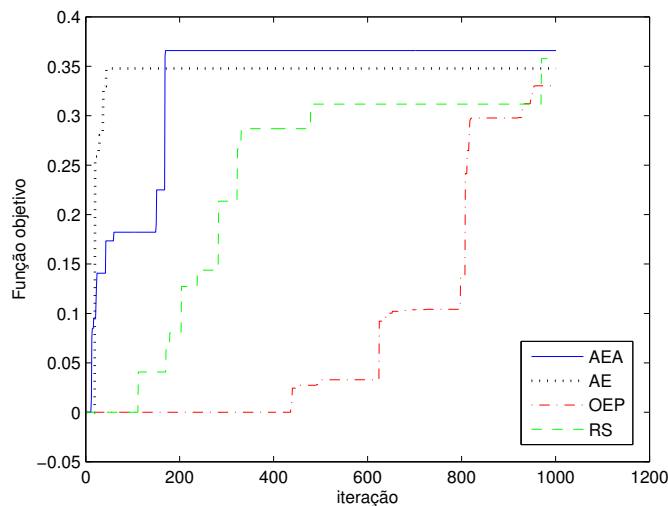
Algoritmo	SVC		TCSC			L-index	Desvio de tensão	Perda de MVAR
	Barra	Pot.	Ini.	Fim	%			
FOPA	-	-	-	-	-	0.0785	0.1112	27.5104
AEA	13	38.0719	13	14	48.4238	0.0728	0.0678	11.9594
AE	14	39.2509	13	14	49.9772	0.0730	0.0721	12.3463
OEP	13	55.8501	13	14	50.0000	0.0733	0.0708	15.3957
RS	13	32.6616	13	14	48.1304	0.0729	0.0632	16.4361

Na segunda análise do problema multiobjetivo, formula-se a função de agregação (soma das funções mono objetivos). Para esta análise não foram utilizados coeficientes ou pesos para as funções objetivo. O AEA e AE tiveram um comportamento próximo, sendo o AEA um pouco mais rápido, como mostra a Figura 24a. O OEP teve o pior desempenho, como mostra as Figura 24a e 24b. O AEA, AE, e RS instalaram o TCSC em uma mesma LT e o SVC na mesma barra, com exceção do AEA, como mostra a Tabela 11. Para o OEP, não foi necessário instalar o TCSC, indicando uma LT com nível de compensação de 0%.

Tabela 11 – IEEE 14 resultados análise multiobjetivo – Agregação

Algoritmo	SVC		TCSC			L-index	Desvio de tensão	Perda de MVAR
	Barra	Pot.	Ini.	Fim	%			
FOPA	-	-	-	-	-	0.0785	0.1112	27.5104
AEA	5	46.1665	13	14	47.5018	0.0760	0.0252	0.8846
AE	13	28.0445	13	14	47.7137	0.0765	0.0184	1.9258
OEP	5	32.8356	6	12	0	0.0853	0.0247	0.0346
RS	13	33.4476	13	14	49.9877	0.0745	0.0296	7.1009

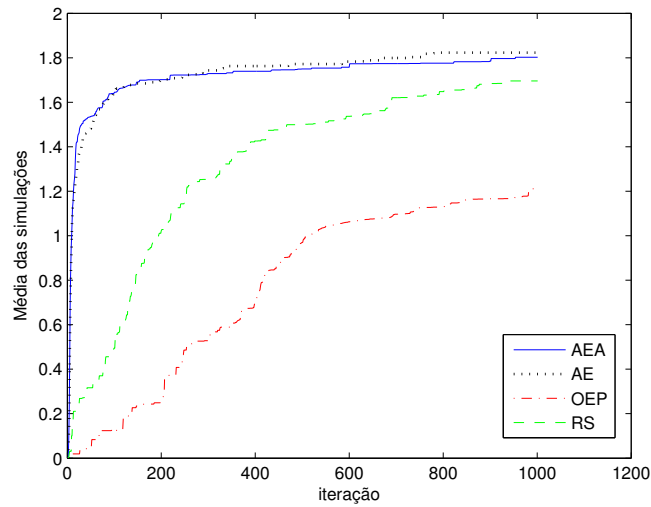
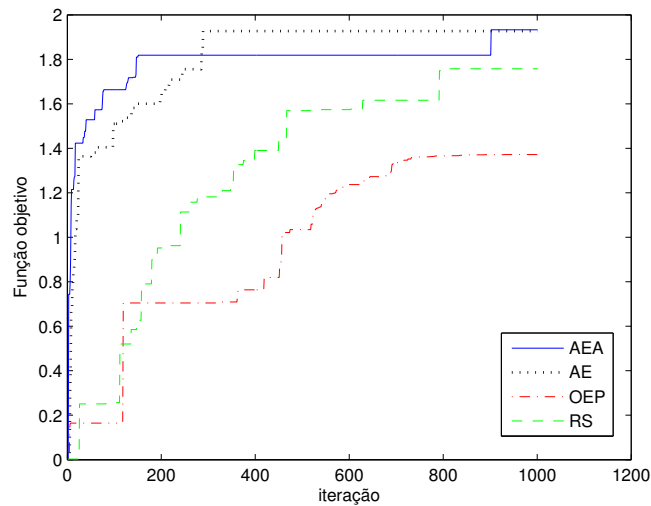
A Tabela 12 resume os resultados obtidos pelas duas abordagens multiobjetivo para o sistema IEEE 14 barras. Os valores são apresentados por nível de satisfação das funções objetivo. É possível verificar que todos os métodos obtiveram melhora nos indicadores nas duas abordagens, exceto o OEP na agregação. Entretanto, OEP obteve nível de satisfação de 100% na função objetivo perda de potência

Figura 23 – IEEE 14 Função Multiobjetivo - Maxmin**(a) Resultado médio****(b) Melhor resultado**

reativa e o indicador *L-index* ficou com 0%. O AEA apresentou os resultados mais harmoniosos, ou seja, não apresentaram discrepância entre as funções objetivo.

Tabela 12 – IEEE 14 Nível de satisfação das funções objetivo

Algoritmo	Abordagem	SVC1		TCSC1			L-index	Desvio de Tensão	Perda de MVAR
		Barra	MVAR	Ini.	Fim	%			
AEA	Maxmin	13	38.0719	13	14	48.4238	0.36	0.41	0.57
	Soma	5	46.1665	13	14	47.5018	0.16	0.80	0.98
AE	Maxmin	14	39.2509	13	14	49.9772	0.35	0.37	0.55
	Soma	13	28.0445	13	14	47.7137	0.13	0.87	0.93
OEP	Maxmin	13	55.8501	13	14	50.0000	0.33	0.38	0.44
	Soma	5	32.8356	6	12	0	0	0.81	1
RS	Maxmin	13	32.6616	13	14	48.1304	0.36	0.45	0.40
	Soma	13	33.4476	13	14	49.9877	0.25	0.76	0.74

Figura 24 – IEEE 14 Função Multiobjetivo Agregação Soma**(a) Resultado médio****(b) Melhor resultado**

5.3 Experimentos com o sistema IEEE 57 barras

Nos experimentos com a função objetivo com o *L-index*, o AEA teve o melhor desempenho na média das execuções, como mostra a Figura 25a. No entanto, o melhor resultado dentre as simulações foi obtido pelo OEP, Figura 25b. A Tabela 13 mostra que para a melhor solução os métodos sugerem pontos diferentes para instalação do dispositivo FACTS. O OEP apresenta uma redução de mais de 40% no *L-index* contra 35% do AEA. No resultado do RS, os SVC absorvem potência reativa da barra. Para o OEP, um SVC injeta potência reativa na barra e o outro absorve, e sugere a instalação de um TCSC, pois apesar de indicar a LT o nível de

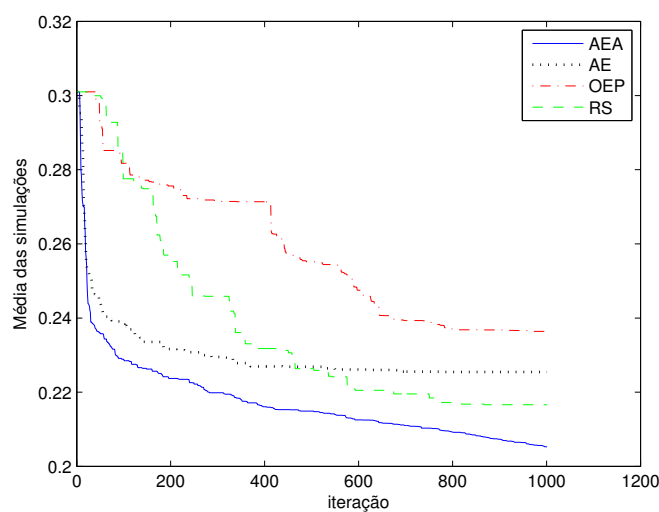
compensação é 0%.

Tabela 13 – IEEE 57 barras: função objetivo L -index

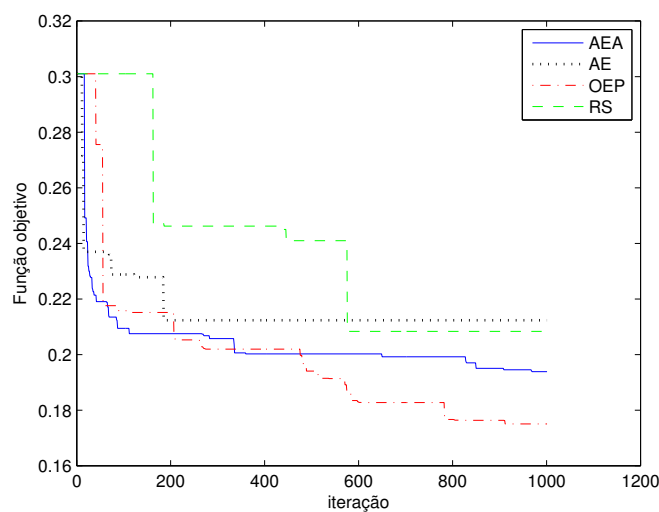
Algoritmo	SVC1		SVC2		TCSC1			TCSC2			L -index	Desvio de tensão	Perda de MVAR
	Bar.	MVAR	Bar.	MVAR	Ini.	Fim	%	Ini.	Fim	%			
FOPA	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.3010	0.1956	92.0447
AEA	35	51.5461	56	87.6345	3	15	41.3139	1	15	50.0000	0.1939	1.5562	46.0117
AE	47	112.1879	20	41.7650	9	10	28.3666	1	17	19.0007	0.2124	1.2002	139.4631
OEP	36	119.1123	18	-109.9928	36	40	0	54	55	48.8321	0.1751	1.8069	62.8345
RS	38	-6.3190	7	-85.7790	9	10	48.2351	56	41	3.6128	0.2084	1.1409	59.6841

Figura 25 – IEEE57 Função Objetivo L -index

(a) Resultado médio



(b) Melhor resultado



As Figuras 26a e 26b mostram o melhor desempenho do AEA para a função objetivo do desvio de tensão nos barramentos de carga. O RS não conseguiu melhorar a função objetivo. A Tabela 14 mostra que o AEA reduziu em 65% o desvio de

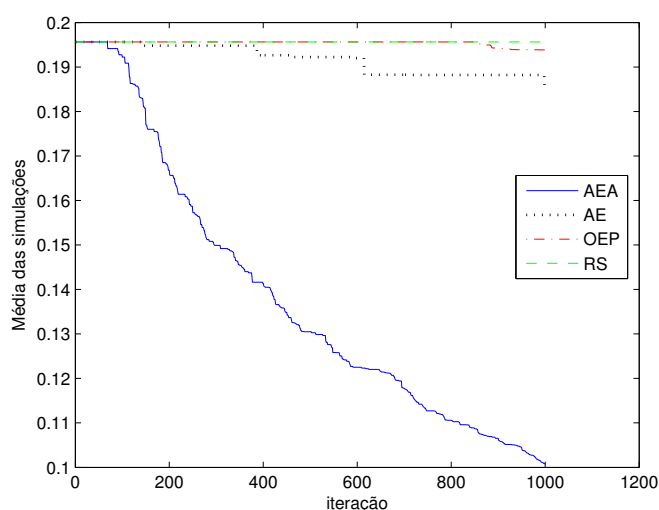
tensão. O nível de potência reativa injetada no barramento pelo SVC sugerido pelo AEA é menor que a dos outros métodos. Avaliando os outros indicadores, o *L-index* variou menos que 2%, o AE reduziu em 51% na perda de potência reativa contra 34% do AEA e 13% do OEP.

Tabela 14 – IEEE 57 barras: desvio de tensão dos barramentos de carga

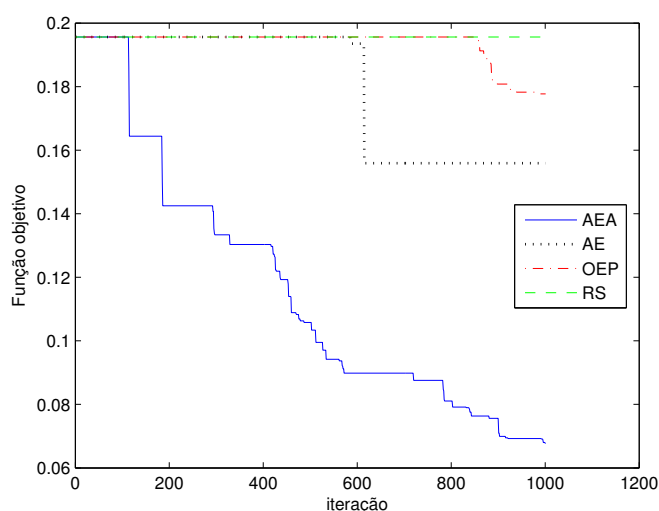
Algoritmo	SVC1		SVC2		TCSC1			TCSC2			<i>L-index</i>	Desvio de tensão	Perda de MVAR
	Barra	MVAR	Barra	MVAR	Ini.	Fim	%	Ini.	Fim	%			
FOPA	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.3010	0.1956	92.0447
AEA	56	10.2213	36	23.7419	5	6	45.4756	14	15	22.1491	0.3047	0.0677	60.3760
AE	42	24.4921	46	52.6807	1	17	15.5758	46	47	23.3213	0.2947	0.1559	45.3859
OEP	7	14.0604	37	42.3979	28	29	1.8626	38	49	19.5786	0.2989	0.1777	80.3452
RS	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.3010	0.1956	92.0447

Figura 26 – IEEE 57 Função Objetivo Desvio de Tensão

(a) Resultado médio



(b) Melhor resultado



Para a função objetivo baseada na perda de potência reativa, o AE apresentou

melhor desempenho seguido do AEA. OEP e RS alcançaram resultados semelhantes, como mostra a Figura 27a. O melhor resultado foi obtido pelo método AEA, como mostra a Figura 27b. Os resultados apresentados na Tabela 15 mostram uma redução de mais de 94% da perda de potência reativa com destaque para o AEA, que melhora em mais de 99% este indicador. Os métodos sugeriram locais diferentes para instalação dos dispositivos FACTS. Porém, o menor nível de ajuste é obtido pelo AEA. Apesar dos bons resultados apresentados pelos métodos, apenas o resultados apresentados pelos algoritmos AEA e AE são factíveis, pois os resultados obtidos pelos métodos OEP e RS levam o sistema ao colapso de tensão, isto é, *L-index* foi 1.

Tabela 15 – IEEE 57 barras: perda de potência reativa

Algoritmo	SVC1		SVC2		TCSC1			TCSC2			<i>L-index</i>	Desvio de tensão	Perda de MVAR
	Barra	MVAR	Barra	MVAR	Ini.	Fim	%	Ini.	Fim	%			
FOPA	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.3010	0.1956	92.0447
AEA	34	-3.5757	16	57.7922	41	43	6.6698	7	8	21.9022	0.2467	0.7694	0.0343
AE	17	94.3191	33	19.0892	12	17	10.2896	46	47	37.3275	0.2517	1.0446	4.8458
OEP	40	147.9336	34	159.5246	1	16	8.1435	21	22	0	1.0000	1.4186	2.5529
RS	43	-78.3896	38	4.6959	32	33	4.4890	9	10	5.0637	1.0000	2.0340	5.3299

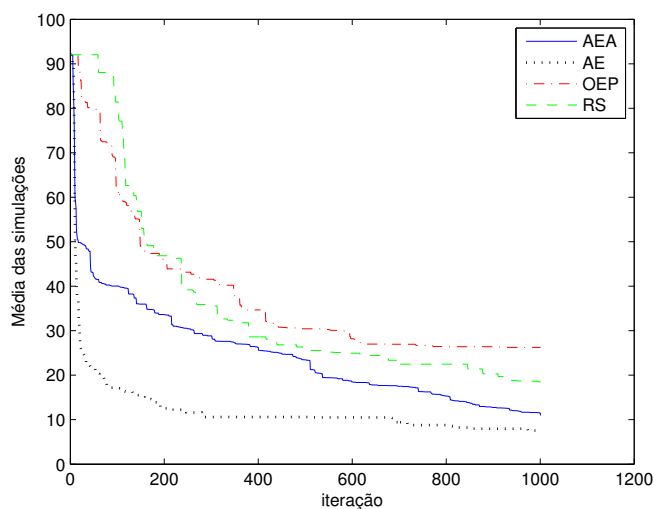
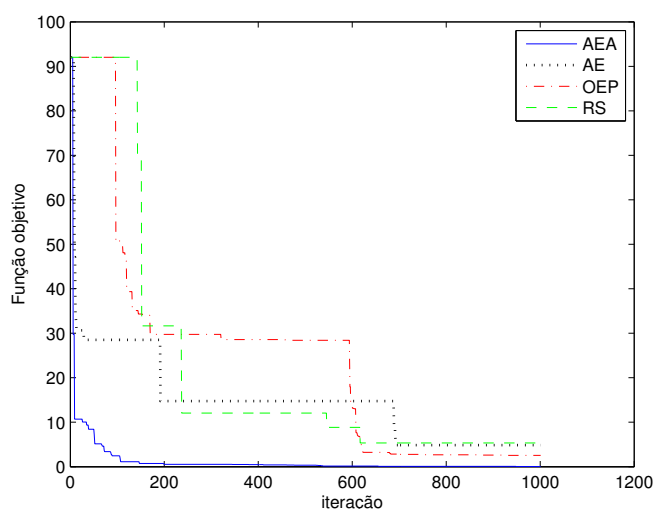
Para os experimentos multiobjetivo, foram considerados o *L-index*, o desvio de tensão nos barramentos de carga e a perda de potência reativa, simultaneamente. As funções objetivos são normalizadas pela Equação 78, cujos valores mínimos foram obtidos nos experimentos anteriores. Já os valores máximos das funções objetivos considerados nesta análise são os valores do estado inicial do sistema.

Na primeira análise, o problema multiobjetivo é formulado com a função de agregação MaxMin. As Figuras 28a e 28b mostram o desempenho superior do AEA. O AEA chega em uma solução de boa qualidade com um número menor de iterações. Para essa análise, o OEP não conseguiu obter um resultado que melhorasse o sistema. A Tabela 16 mostra que os métodos sugerem instalar os equipamentos FACTS em pontos diferentes do sistema. O nível de ajuste das variáveis não tem grande variação, porém o melhor resultado é obtido pelo AEA.

Tabela 16 – IEEE 57 barras: resultados análise multiobjetivo – MaxMin

Algoritmo	SVC1		SVC2		TCSC1			TCSC2			<i>L-index</i>	Desvio de tensão	Perda de MVAR
	Barra	MVAR	Barra	MVAR	Ini.	Fim	%	Ini.	Fim	%			
FOPA	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.3010	0.1956	92.0447
AEA	31	-13.5888	37	55.6739	4	5	21.5787	30	31	33.3201	0.2788	0.1715	53.1746
AE	50	10.1300	36	43.9074	7	8	33.9156	36	37	50.0000	0.2880	0.1770	59.3952
OEP	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.3010	0.1956	92.0447
RS	56	12.2214	37	45.5927	28	29	46.0510	27	28	3.5694	0.2931	0.1602	76.2744

Na segunda análise com o problema multiobjetivo, formula-se uma função de agregação. O AEA novamente se destaca pelo desempenho, como mostra as Figuras 29a e 29b. O OEP teve o pior desempenho, seguido do RS e AE. Os métodos sugerem a instalação dos dispositivos FACTS em diferentes locais com diferentes parâmetros de ajuste, como mostra a Tabela 17. No resultado apresentado pelo

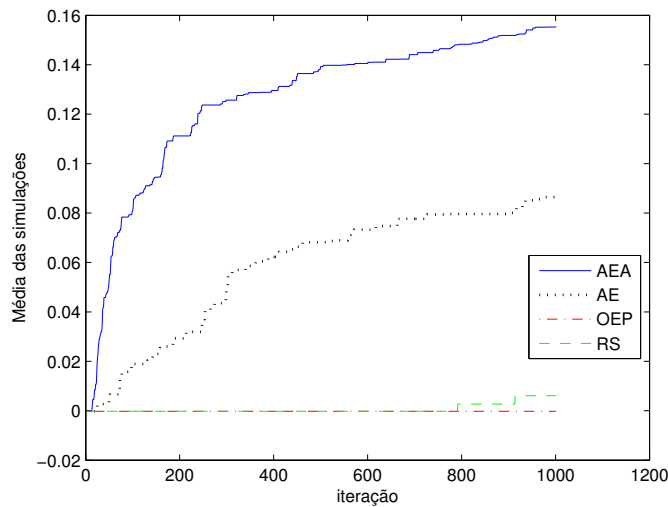
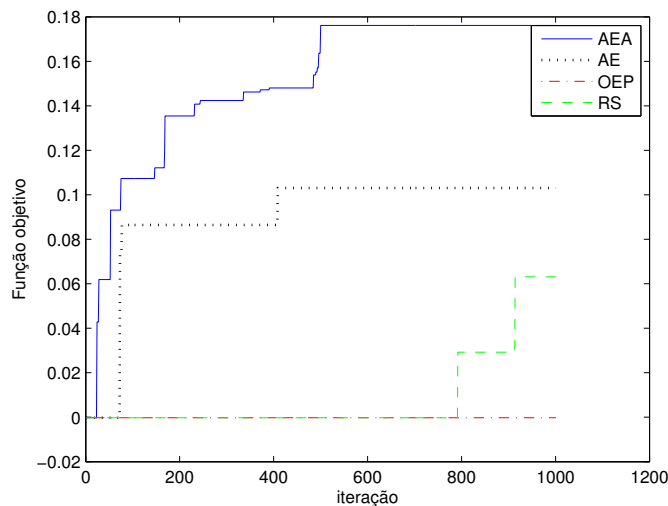
Figura 27 – IEEE 57 barras: função objetivo perda de potência reativa**(a) Resultado médio****(b) Melhor resultado**

OEP, não foi necessário instalar o TCSC, pois este indicou uma LT com nível de compensação de 0%. Ademais, apesar de melhorar os indicadores *L-index* e perda de potência reativa, o desvio de tensão aumentou.

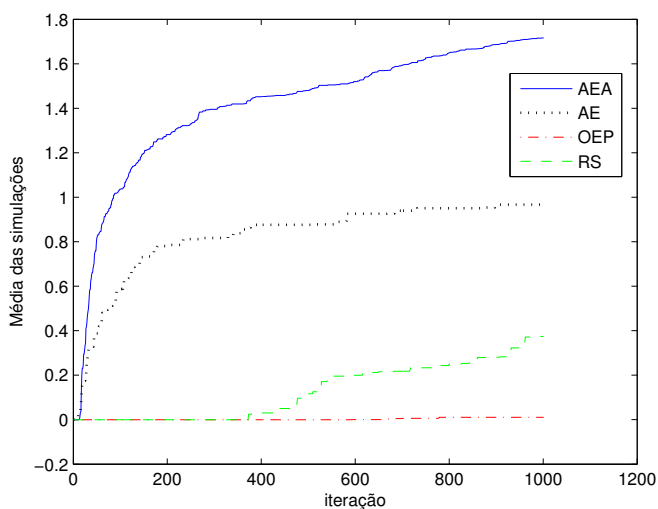
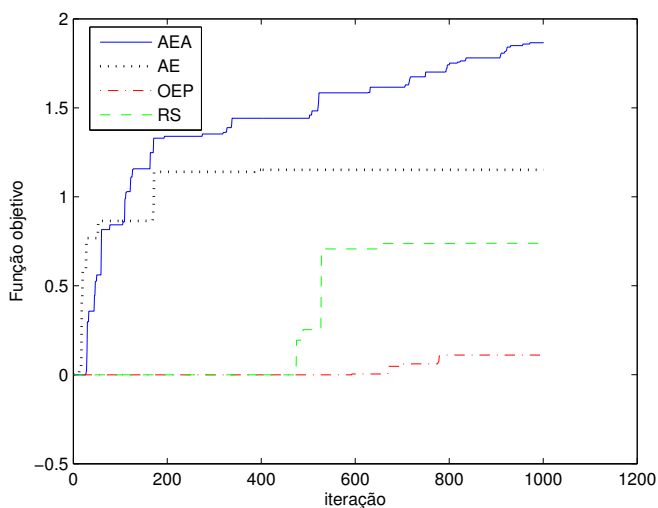
Tabela 17 – IEEE 57 barras: análise multiobjetivo – Agregação Soma

Algoritmo	SVC1		SVC2		TCSC1			TCSC2			<i>L-index</i>	Desvio de tensão	Perda de MVAR
	Barra	MVAR	Barra	MVAR	Ini.	Fim	%	Ini.	Fim	%			
FOPA	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.3010	0.1956	92.0447
AEA	38	85.1280	56	28.1202	30	31	49.5532	19	20	4.1464	0.2979	0.0746	9.7554
AE	40	44.7853	47	50.5528	36	40	50.0000	52	53	13.1391	0.3000	0.1459	22.5783
OEP	38	38.3761	55	45.7649	57	56	0.2420	3	15	0	0.2984	0.2678	31.8056
RS	37	56.4268	4	5.4324	4	5	28.4544	1	2	13.9272	0.3002	0.1497	57.6689

A Tabela 18 resume os resultados obtidos pelas duas abordagens multiobjetivo para o sistema IEEE 57 barras. Os valores apresentados são separados por nível

Figura 28 – IEEE 57 barras: função multiobjetivo – MaxMin**(a) Resultado médio****(b) Melhor resultado**

de satisfação das funções objetivo. É possível verificar que todos métodos obtiveram melhora nos indicadores nas duas abordagens, exceto o OEP, que não obteve bom resultado na análise MaxMin. Na agregação, o nível de satisfação da função objetivo desvio de tensão nos barramentos de carga foi de 0%, sendo esta uma solução inadmissível. O AEA apresentou os resultados mais harmoniosos dentre as funções objetivo.

Figura 29 – IEEE 57 Função Multiobjetivo Agregação Soma**(a) Resultado médio****(b) Melhor resultado****Tabela 18 – IEEE 57 barras: nível de satisfação das funções objetivo**

Algoritmo	Abordagem	SVC1		SVC2		TCSC1			TCSC2			<i>L-index</i>	Desvio de tensão	Perda de MVAR
		Barra	MVAR	Barra	MVAR	Ini.	Fim	%	Ini.	Fim	%			
AEA	Maxmin	31	-13.5888	37	55.6739	4	5	21.5787	30	31	33.3201	0.18	0.19	0.42
	Soma	38	85.1280	56	28.1202	30	31	49.5532	19	20	4.1464	0.02	0.95	0.89
AE	Maxmin	50	10.1300	36	43.9074	7	8	33.9156	36	37	50.0000	0.10	0.16	0.35
	Soma	40	44.7853	47	50.5528	36	40	50.0000	52	53	13.1391	0.01	0.39	0.75
OEP	Maxmin	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0	0
	Soma	38	38.3761	55	45.7649	57	56	0.2420	3	15	0	0.02	0	0.65
RS	Maxmin	56	12.2214	37	45.5927	28	29	46.0510	27	28	3.5694	0.06	0.28	0.17
	Soma	37	56.4268	4	5.4324	4	5	28.4544	1	2	13.9272	0.01	0.36	0.37

5.4 Experimentos com o sistema IEEE 118 barras

Nestes experimentos, todos os algoritmos melhoraram a função objetivo *L-index*. O OEP mostrou-se mais rápido em chegar na melhor solução; porém, o AEA apre-

sentou melhores resultados, como mostra as Figuras 30a e 30b. Analisando os dados da Tabela 19, observa-se que todos algoritmos instalaram um TCSC na mesma LT e os demais dispositivos em pontos diferentes. O AEA reduziu em 40% o *L-index* contra 34% dos demais métodos. Com a melhora do *L-index*, o desvio de tensão e perda de potência reativa pioram sensivelmente.

Tabela 19 – IEEE 118 barras: função objetivo *L-index*

Algoritmo	SVC1		SVC2		TCSC1			TCSC2			<i>L-index</i>	Desvio de tensão	Perda de MVAR
	Bar.	MVAR	Bar.	MVAR	Ini.	Fim	%	Ini.	Fim	%			
FOPA	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0634	0.3145	473.2
AEA	44	129.1249	95	73.8218	45	46	49.2471	94	100	48.4687	0.0383	0.6627	55507
AE	45	107.7836	67	-7.5829	45	46	45.0476	94	95	46.3582	0.0423	0.4405	15187
OEP	53	118.7873	57	5.2108	45	46	50.0000	83	85	33.0489	0.0424	0.7438	146760
RS	48	-16.5661	43	80.5725	94	95	39.3749	45	46	49.6531	0.0415	0.5422	79525

Para a função objetivo com o desvio de tensão, AEA e AE mostraram-se superiores ao OEP e RS sendo que o AEA apresentou os melhores resultados como pode-se observar nas Figuras 31a e 31b. A Tabela 20 mostra que os métodos instalaram os dispositivos FACTS em pontos diferentes com ajustes variados. Para o OEP, apenas um TCSC foi necessário pois o outro dispositivo FACTS foi ajustado em 0. O AEA melhorou o desvio de tensão em mais de 85%, seguido do AE com 82%. Com a melhora do desvio de tensão, o *L-index* piorou em torno de 10% para o AEA e AE, e a perda de potência reativa aumentou sensivelmente.

Tabela 20 – IEEE 118 barras: desvio de tensão nos barramentos de carga

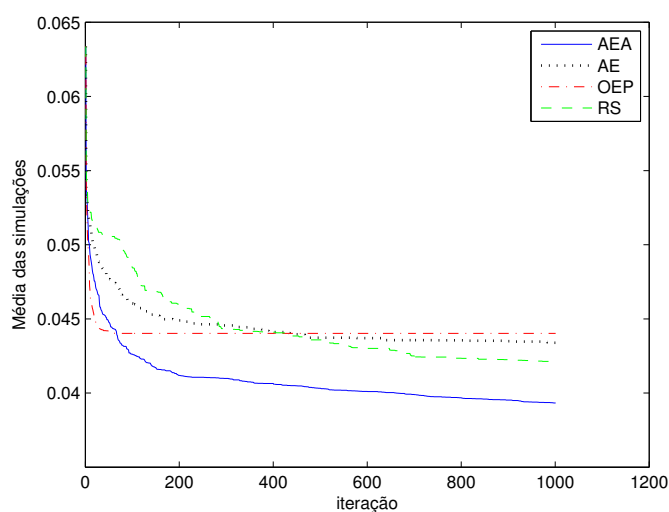
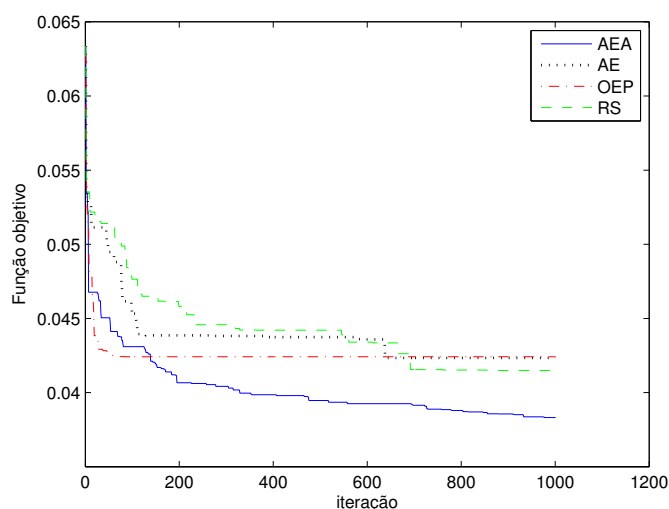
Algoritmo	SVC1		SVC2		TCSC1			TCSC2			<i>L-index</i>	Desvio de tensão	Perda de MVAR
	Bar.	MVAR	Bar.	MVAR	Ini.	Fim	%	Ini.	Fim	%			
FOPA	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0634	0.3145	473.2
AEA	13	19.2459	102	-16.9070	23	24	50.0000	49	69	4.7175	0.0700	0.0409	13251
AE	97	34.8217	11	-17.9987	70	71	48.9086	17	113	44.0576	0.0695	0.0576	18231
OEP	97	47.2941	83	-9.5501	49	51	8.5806	65	68	0	0.0655	0.0765	46508
RS	3	68.9543	20	-42.6689	27	32	50.0000	51	52	12.4281	0.0675	0.1332	107280

A simulação com a função objetivo perda de potência reativa mostra um resultado promissor para o algoritmo proposto neste trabalho, pois somente ele foi capaz de otimizar o sistema como mostra as Figuras 32a e 32b. Apesar de serem conflitantes as funções objetivo, como mostra os resultados das simulações para os sistemas IEEE14 e IEEE57, no caso do sistema IEEE118 quando a perda de potência reativa foi otimizada, os outros indicadores também foram melhorados como pode ser verificado na Tabela 21.

Para a análise multiobjetivo, foram considerados o *L-index*, o desvio de tensão nos barramentos de carga e a perda de potência reativa, simultaneamente. As Fi-

Tabela 21 – IEEE 118: perda de potência reativa

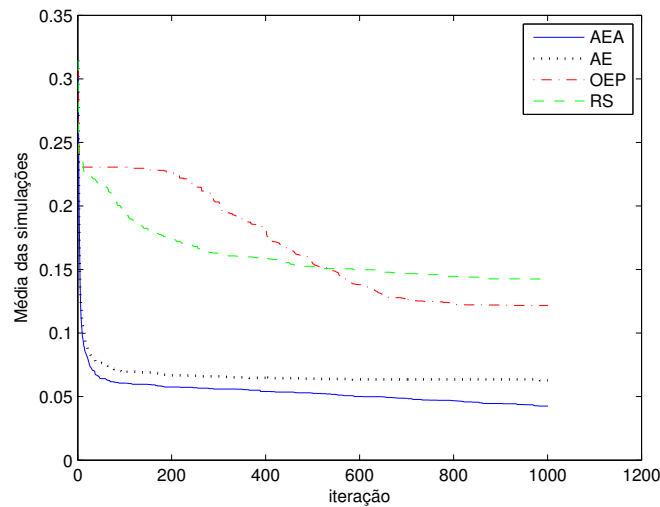
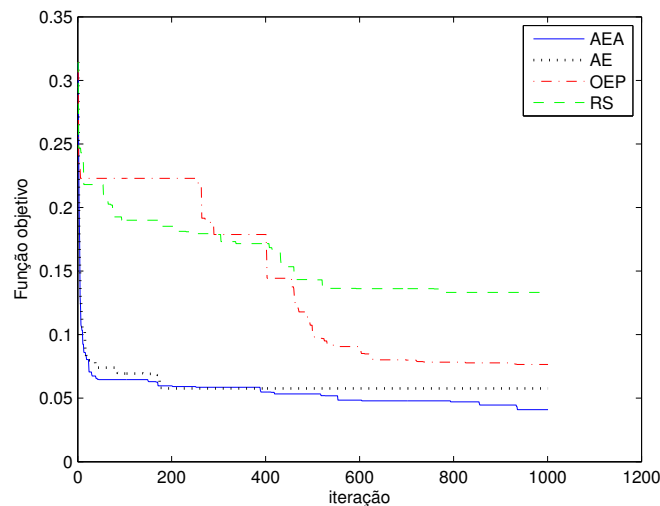
Algoritmo	SVC1		SVC2		TCSC1			TCSC2			<i>L-index</i>	Desvio de tensão	Perda de MVAR
	Bar.	MVAR	Bar.	MVAR	Ini.	Fim	%	Ini.	Fim	%			
FOPA	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0634	0.3145	473.2
AEA	38	-20.1424	98	20.5834	4.0000	5.0000	31.2535	49.0000	54.0000	17.9257	0.0612	0.2210	345.0

Figura 30 – IEEE 118 barras: função objetivo L -index**(a) Resultado médio****(b) Melhor resultado**

guras 33a e 33b mostram a solução de todos os métodos para a abordagem MaxMin e as Figuras 34a e 34b para a abordagem de agregação. Observa-se que o AEA obteve melhor para as duas abordagens. A Tabela 22 mostra o resultado obtido pelo AEA e a Tabela 23 o nível de satisfação das funções objetivo para as duas abordagens. Dos resultados obtidos apenas o da abordagens MaxMin é aceitável, pois na abordagem de agregação o nível de satisfação do indicador L -index foi 0%.

Tabela 22 – IEEE 118 barras: análise multiobjetivo – MaxMin e Agregação

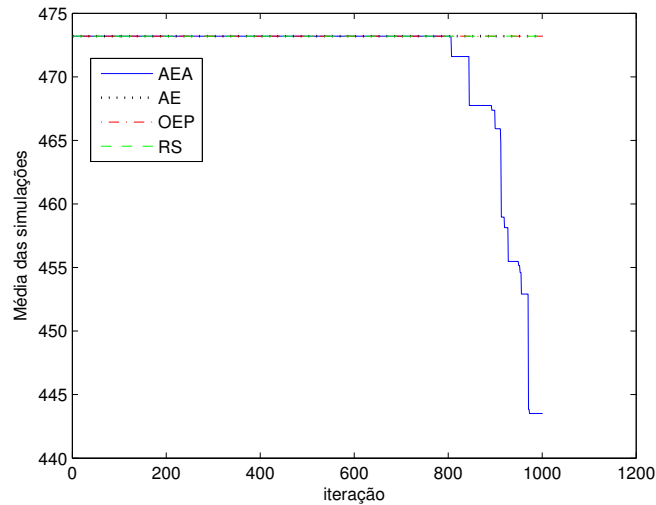
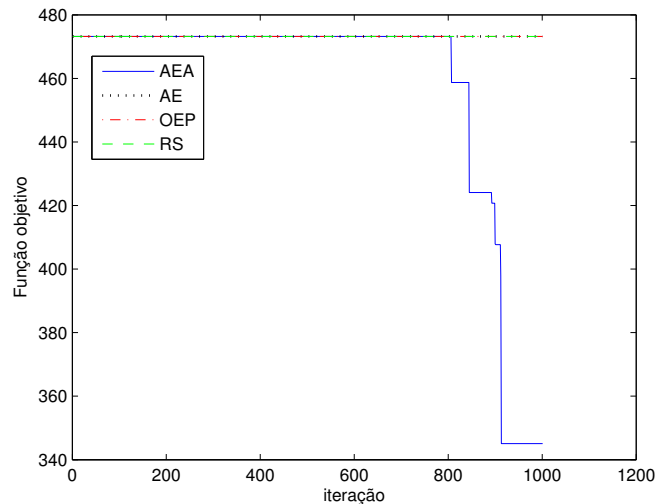
Algoritmo	SVC1		SVC2		TCSC1			TCSC2			L -index	Desvio de tensão	Perda de MVAR
	Bar.	MVAR	Bar.	MVAR	Ini.	Fim	%	Ini.	Fim	%			
FOPA	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0634	0.3145	473.2
AEA-Maxmin	57	-2.2110	13	3.0964	42	49	3.7402	21	22	13.7610	0.0595	0.2631	410.8
AEA-Soma	13	43.4069	20	-5.3519	37	40	13.8648	105	108	37.0202	0.0637	0.2042	389.7

Figura 31 – IEEE 118 barras: desvio de tensão**(a) resultado médio****(b) Melhor resultado****Tabela 23 – IEEE 118 barras: nível de satisfação das funções objetivo**

Algoritmo	SVC1		SVC2		TCSC1			TCSC2			<i>L-index</i>	Desvio de tensão	Perda de MVAR
	Bar.	MVAR	Bar.	MVAR	Ini.	Fim	%	Ini.	Fim	%			
AEA-Maxmin	57	-2.2110	13	3.0964	42	49	3.7402	21	22	13.7610	0.15	0.19	0.49
AEA-Soma	13	43.4069	20	-5.3519	37	40	13.8648	105	108	37.0202	0	0.40	0.65

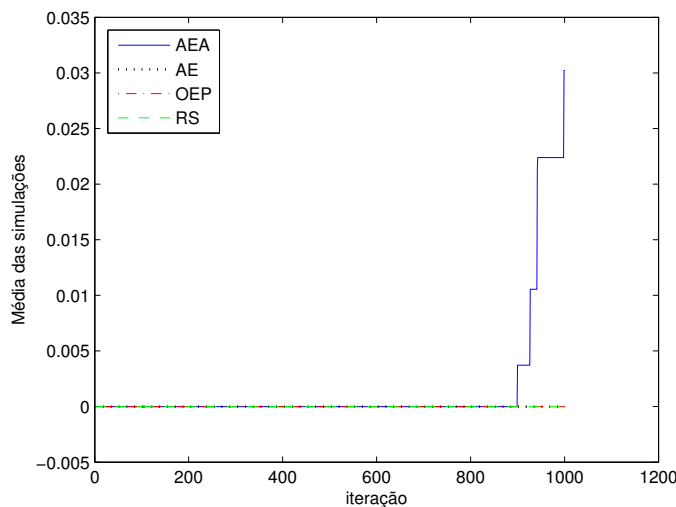
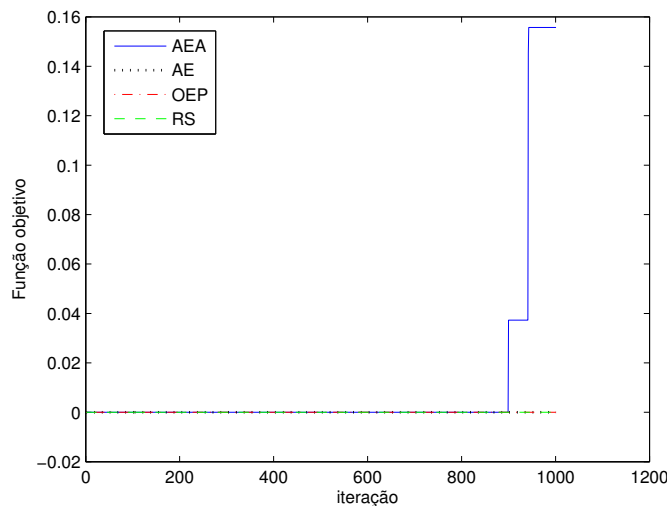
5.5 Experimentos com análise modal de estabilidade

A análise modal do sistema elétrico de potência avalia os modos de estabilidade a partir da análise da matriz jacobiana das equações do fluxo de potência a fim de encontrar os pontos sensíveis à variação de potência. Os pontos de maior sensibilidade são os mais indicados a se instalar compensação reativa ou dispo-

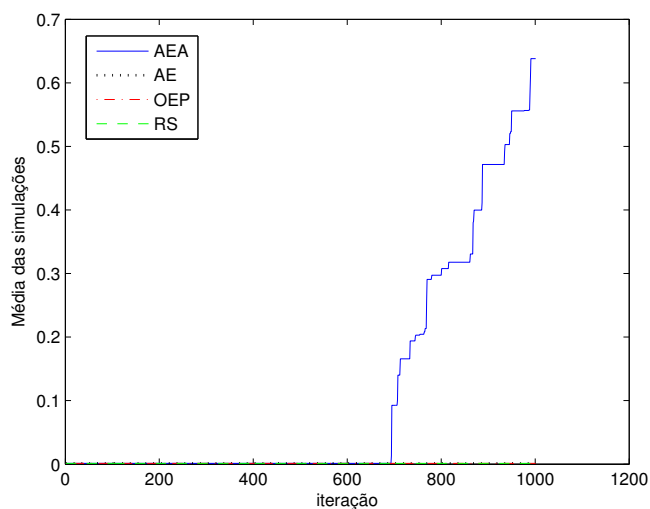
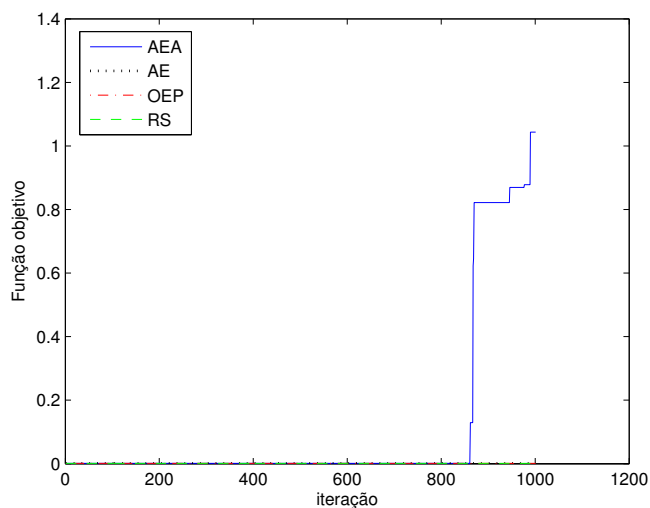
Figura 32 – IEEE 118 barras: perda de potência reativa**(a) Resultado médio****(b) Melhor resultado**

sitivos FACTS. Esse método não apresenta referência de ajuste das variáveis de controle do sistema, ficando a cargo dos métodos de otimização. Para compensação reativa *shunt* deseja-se manter a tensão da barra no valor de referência, porém para compensação série não existe uma referência pré-definida, ficando a critério de procedimentos empíricos ou usando algum método de otimização.

A Tabela 24 apresenta os resultados para análise modal do sistema IEEE 14 sob diferentes ajustes dos parâmetros da rede. A primeira linha, FOPA, apresenta o valor dos indicadores de estabilidade de tensão do estado original do sistema após aplicar o fluxo ótimo de potência ativa (custo mínimo de geração). A segunda linha, AEA, está o resultado obtido das simulações anteriores sob o ponto de vista multiobjetivo, pela abordagem MaxMin. Em seguida são apresentados três abor-

Figura 33 – IEEE 118 Função Multiobjetivo Maxmin**(a) Resultado médio****(b) Melhor resultado**

dados diferentes para ajuste das variáveis da rede e localização dos dispositivos FACTS. O método de análise de sensibilidade da matriz jacobiana indica o ponto de maior sensibilidade onde deve ser instalado o dispositivo FACTS. Em Modal 1, as variáveis da rede são otimizadas do ponto de vista dos indicadores de estabilidade de tensão e em seguida os dispositivos FACTS são instalados nos pontos de maior sensibilidade. A referência de ajuste dos equipamentos FACTS, para análise Modal 1 e 2, é o módulo de tensão igual a 1 pu na barra onde está o SVC e 35% de compensação da LT para o TCSC. Em Modal 2, as variáveis do sistema são ajustadas com o mesmo valor obtido em AEA. No Modal 3, os parâmetros de ajuste das variáveis da rede e dos dispositivos FACTS são os mesmos obtidos por AEA, diferenciando apenas a localização dos dispositivos FACTS que foi obtida pela análise

Figura 34 – IEEE 118 barras: função multiobjetivo de agregação**(a) Resultado médio****(b) Melhor resultado**

de sensibilidade.

Analisando a Tabela 24, percebe-se que o resultado obtido pelo AEA mostrou-se melhor que os Modal 1, 2 e 3. Do ponto de vista do *L-index*, Modal 1 e 2 melhoraram a margem de colapso de tensão.

Tabela 24 – IEEE 14 barras: comparação com análise modal

Algoritmo	SVC		TCSC			<i>L-index</i>	Desvio de tensão	Perda de MVAR
	Barra	Pot.	Ini.	Fim	%			
FOPA	-	-	-	-	-	0.0785	0.1112	27.5104
AEA	13	38.0719	13	14	48.4238	0.0728	0.0678	11.9594
Modal 1	14	-11.7607	7	8	35	0.0759	0.1000	38.6048
Modal 2	14	-11.7607	7	8	35	0.0808	0.0425	66.1101
Modal 3	14	38.0719	7	8	48.4238	0.0736	0.1205	7.8674

A Tabela 25 mostra que a análise modal do sistema IEEE 57 barras, do ponto de vista do *L-index*, apresentou melhor resultado do que o AEA, porém o desvio de tensão aumentou 30% para Modal 1 e 78% para Modal 2. No Modal 3, aos valores das variáveis de decisão ajustados pelos métodos de otimização, o algoritmo que calcula os fluxos de potência não convergiu.

Tabela 25 – IEEE 57 barras: comparação com análise modal

Algoritmo	SVC1		SVC2		TCSC1			TCSC2			<i>L-index</i>	Desvio de tensão	Perda de MVAR
	Barra	MVAR	Barra	MVAR	Ini.	Fim	%	Ini.	Fim	%			
FOPA	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.3010	0.1956	92.0447
AEA	31	-13.5888	37	55.6739	4	5	21.5787	30	31	33.3201	0.2788	0.1715	53.1746
Modal 1	31	3.4625	33	1.6800	13	49	35	40	56	35	0.2784	0.2552	85.2774
Modal 2	31	3.4625	33	1.6800	13	49	35	40	56	35	0.2715	0.3496	83.8952
Modal 3	31	-13.5888	33	55.6739	13	49	21.5787	40	56	33.3201	-	-	-

No sistema IEEE 118 barras, tanto a análise modal quanto o AEA apresentaram boas soluções. A Tabela 26 mostra que para o *L-index* a diferença foi menor que 1% entre os resultados e que para todos os indicadores a análise Modal 1 foi melhor. Avaliando os outros resultados obtidos pela análise Modal 2 e 3, é possível inferir que a principal diferença está nos ajustes das variáveis de decisão do sistema, pois comparando Modal 1 com 2 e Modal 2 com 3 percebe-se maior variação dos indicadores de desempenho em relação aos ajustes do sistema.

Tabela 26 – IEEE 118 barras: comparação com análise modal

Algoritmo	SVC1		SVC2		TCSC1			TCSC2			<i>L-index</i>	Desvio de tensão	Perda de MVAR
	Bar.	MVAR	Bar.	MVAR	Ini.	Fim	%	Ini.	Fim	%			
FOPA	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0634	0.3145	473.2
AEA	57	-2.2110	13	3.0964	42	49	3.7402	21	22	13.7610	0.0595	0.2631	410.8
Modal 1	21	-11.5095	22	-22.0712	92	100	35	49	54	35	0.0589	0.2412	334.4827
Modal 2	21	-11.5095	22	-22.0712	92	100	35	49	54	35	0.0595	0.2803	418.0286
Modal 3	21	-2.2110	22	3.0964	92	100	3.7402	49	54	13.7610	0.0595	0.2634	412.2725

Os estudos de contingências dos sistemas de energia elétrica procuram avaliar situações críticas de operação que podem levar a desligamentos indesejados e danos aos equipamentos. Os sistemas IEEE 14, 57 e 118 barras foram avaliados segundo os indicadores de estabilidade de tensão diante de cenários de sobrecarga e perda de equipamentos (linhas de transmissão, transformadores, geradores, dentre outros).

A sobrecarga é calculada aumentando a demanda de potência ativa e reativa das barras de carga mantendo-se o fator de potência conforme

$$P'_j = (1 + \alpha) P_j \quad (82)$$

e

$$Q'_j = (1 + \alpha) Q_j \quad (83)$$

para todos os barramentos de carga.

Não foi utilizado um critério de severidade de contingência das linhas de transmissão. Os sistemas foram submetidos a sobrecargas de 50% e 100%, e saída de duas linhas de transmissão. Foi estipulado que para valores acima de 0.2 no *L-index* seriam feitos novos ajustes nas variáveis da rede, mantendo-se a localização dos dispositivos FACTS. O estado inicial considerado foi aquele gerado pelo fluxo ótimo de potência Ativa, FOPA, sem ajuste das variáveis de decisão e sem instalação de dispositivos FACTS com o sistema intacto. Os sistemas foram otimizados considerando o método Modal 1 e o proposto neste trabalho.

A Tabela 27 apresenta os resultados obtidos pela avaliação do sistema IEEE 14 barras. Em nenhum cenário de contingência o *L-index* ficou acima de 0.2; assim, foram mantidos os ajustes resultantes da análise multiobjetivo das seções anteriores. Para os cenários de sobrecarga, o AEA apresentou melhores resultados do que a análise modal; já para perda de linha de transmissão, o AEA foi pior em torno de 10% para o indicador *L-index* e melhor nos outros indicadores.

Tabela 27 – IEEE 14 barras: estudos de contingências

Caso	FOPA			Modal 1			AEA		
	<i>L-index</i>	Desvio de tensão	Perda de MVAR	<i>L-index</i>	Desvio de tensão	Perda de MVAR	<i>L-index</i>	Desvio de tensão	Perda de MVAR
Original	0.0785	0.1112	27.5	0.0759	0.1000	38.6	0.0728	0.0678	11.9
SC 50%	0.1239	0.0685	75.9	0.1197	0.0700	93.2	0.1139	0.0392	31.0
SC 100%	0.1827	0.0708	128.3	0.1761	0.0903	144.1	0.1621	0.0630	115.6
LT 6-11	0.1139	0.0909	28.0	0.1055	0.0794	38.2	0.1159	0.0600	14.4
LT 6-13	0.1244	0.0842	28.9	0.1211	0.0865	39.1743	0.1244	0.0965	8.7

O sistema IEEE 57 barras foi fortemente carregado; assim, para esse sistema, em cada caso, o AEA foi aplicado de forma a obter os melhores ajuste das variáveis de decisão e dos dispositivos FACTS. A maior sobrecarga dada ao sistema foi de 75%, pois com 100% o algoritmo do fluxo de potência não convergiu. A Tabela 28 mostra os resultados obtidos pelas simulações e de uma maneira geral o AEA apresentou os melhores resultados.

Tabela 28 – IEEE 57 barras: estudos de contingências

Caso	FOPA			Modal 1			AEA		
	<i>L-index</i>	Desvio de tensão	Perda de MVAR	<i>L-index</i>	Desvio de tensão	Perda de MVAR	<i>L-index</i>	Desvio de tensão	Perda de MVAR
Original	0.3010	0.1956	92.0	0.2784	0.2552	85.3	0.2788	0.1715	53.2
SC 50%	0.4928	0.3505	332.1	0.4447	0.3060	256.0	0.4409	0.3041	202.0
SC 75%	0.4597	0.9369	964.2	0.4387	0.8656	734.5	0.4376	0.8185	580.6
LT 25-30	0.6976	0.5811	347.4	0.5230	0.4097	118.0	0.4838	0.3706	65.4
LT 34-32	0.6460	0.4889	335.9	0.4991	0.3564	221.6	0.5008	0.3590	154.8

Para o sistema IEEE 118 barras, em nenhum dos cenários de contingência o *L-index* ficou acima de 0.2, como mostra a Tabela 29. Assim, foram mantidos os mesmos ajustes apresentados pela análise multiobjetivo das seções anteriores. Em todos os cenários analisados o AEA apresentou melhor resultado do que o método modal. Quando submetido a sobrecarga os dois métodos apresentaram o mesmo *L-index* e o AEA apresentou menores desvio de tensão e perda de potência reativa. Apesar dos dois métodos apresentarem melhora no perfil de tensão e reduzir

a perda de potência reativa, para esses métodos o *L-index* piorou em relação ao FOPA.

Tabela 29 – IEEE 118 barras: estudos de contingências

Caso	FOPA			Modal 1			AEA		
	<i>L-index</i>	Desvio de tensão	Perda de MVAR	<i>L-index</i>	Desvio de tensão	Perda de MVAR	<i>L-index</i>	Desvio de tensão	Perda de MVAR
Original	0.0634	0.3145	473.2	0.0589	0.2412	334.5	0.0589	0.2249	311.9
SC 50%	0.0996	0.2689	827.1	0.0918	0.2518	791.7	0.0918	0.2322	758.7
SC 100%	0.1426	0.2161	1339.2	0.1282	0.2901	2498.7	0.1282	0.2682	2469.7
LT 19-20	0.1388	0.3085	466.2	0.1760	0.3148	296.5	0.1531	0.2433	300.9
LT 53-54	0.1346	0.3147	477.3	0.1478	0.2588	330.7	0.1479	0.2437	310.2

6 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou um método para análise e melhoria da estabilidade estática de tensão de sistemas elétricos de potência utilizando algoritmo evolucionário. O método proposto utilizou um algoritmo evolucionário adaptativo, que controla a diversidade da população, para ajuste das variáveis de decisão e alocação automática de dispositivos FACTS. Como critério de desempenho foram utilizados os indicadores *L-index*, para avaliar a margem de colapso de tensão, o perfil de tensão dos barramentos de carga e perda de potência reativa em abordagens mono e multiobjetivo. Foram utilizados os equipamentos SVC e TCSC. O método proposto foi validado em experimentos utilizando os sistemas IEEE 14, 57 e 118 barras em comparações de desempenho com outros métodos probabilísticos e heurísticos de otimização e melhoria da estabilidade de tensão. Foram analisados cenários do caso base, de sobrecarga e contingência para avaliar a qualidade da solução apresentada pelo método proposto.

Todos os métodos testados conseguiram melhorar o desempenho do sistema do ponto de vista dos indicadores sugeridos, sendo que o método proposto se mostrou superior na maioria dos experimentos. O método proposto chegou a ser o único que apresentou uma solução para o problema multiobjetivo no sistema IEEE 118 barras. Avaliando os resultados obtidos pelos algoritmos nos sistemas IEEE 14, 57 e 118 barras, observa-se que a diferença de desempenho das soluções dos métodos testados ficam diferenciadas com o aumento da complexidade do problema do ponto de vista da dimensão, número de variáveis de decisão, sendo que o método proposto, na maioria das vezes, encontra a melhor solução.

Nas duas abordagens multiobjetivo propostas, os resultados obtidos pelo método proposto foram melhores em todas avaliações, encontrando soluções mais harmoniosas, isto é, soluções que não apresentam discrepâncias de resultados entre os objetivos. Não foi utilizado critério de importância para as funções objetivo; assim, na abordagem de agregação, foi observado uma tendência a favor do desvio de tensão ou perda de potência reativa em detrimento do *L-index*. Já na abordagem MinMax, os resultados tenderam a soluções mais harmoniosas.

Nos estudos realizados com o método modal, que apresenta o ponto do sistema mais indicado para instalar um dispositivo FACTS, o método proposto apresentou um local diferente para instalação deste equipamento com qualidade geralmente superior do ponto de vista dos indicadores de desempenho analisados. Com o aumento do sistema de transmissão, os ajustes das variáveis de decisão passaram a ter maior influência nos indicadores do que os dispositivos FACTS, como foi observado no sistema IEEE 118. Assim, aumenta-se a importância da utilização de

um método de otimização para melhoria do desempenho de um sistema elétrico de potência em complementação à análise modal.

Nos estudos de sobrecarga e contingência, os resultados apresentados pelo método proposto, de modo geral, apresentaram-se melhores que o método modal. Para parâmetros fixos, conforme apresentado pelas análises dos sistemas IEEE 14 e 118 barras, tanto o método modal quanto o proposto não apresentaram diferença considerável nos indicadores *L-index* e desvio de tensão. A diferença de resultado mais significativa ficou na perda de potência reativa, com destaque para o método proposto.

6.1 Trabalhos futuros

A partir deste trabalho outros estudos podem ser implementados, como:

- a) análise de outros tipos de dispositivos FACTS;
- b) levantamento de custo operacional de dispositivos FACTS;
- c) coordenação dos sistemas de proteção com a instalação de dispositivos FACTS;
- d) aplicação do método proposto em uma análise dinâmica e de variação de carga; e
- e) utilização do método proposto em sistemas de maior porte.

O método proposto sugere uma nova abordagem de instalação de dispositivos FACTS, alcançando bons resultados e criando perspectivas de estudos na área. Em destaque, a análise de custo de dispositivos FACTS, que insere no problema o indicador econômico, cada vez mais considerado em soluções de problemas. A análise dinâmica, transitória ou ao longo da curva de carga, é outra importante abordagem futura a ser destacada, pois trata-se da principal aplicação do algoritmo evolutivo adaptativo, aumentando as perspectivas de resultados mais promissores.

Referências

- ACHA, E. et al. *FACTS: modelling and simulation in power networks*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2004. 36, 38, 39
- AJJARAPU, V. *Computational techniques for voltage stability assessment and control*. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2007. 21
- AJJARAPU, V.; LEE, B. Bibliography on voltage stability. *IEEE Transactions on Power Systems*, IEEE, v. 13, n. 1, p. 115–125, 1998. 15
- ALTHOWIBI, F.; MUSTAFA, M. Voltage collapse sensitivity in power systems. *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering (IJAREEIE)*, 2013. 21
- BALAMOUGAN, V.; SIDHU, T.; SACHDEV, M. Technique for online prediction of voltage collapse. *IEEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, IET, v. 151, n. 4, p. 453–460, 2004. 26
- CAÑIZARES, C. A. Applications of optimization to voltage collapse analysis. In: *IEEE-PES Summer Meeting, San Diego, USA*. [S.l.: s.n.], 1998. 26
- CANIZARES, C. A.; FAUR, Z. T. Analysis of svc and tcsc controllers in voltage collapse. *IEEE Transactions on power systems*, IEEE, v. 14, n. 1, p. 158–165, 1999. 19
- CUTSEM, T. V.; VOURNAS, C. *Voltage stability of electric power systems*. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 1998. v. 441. 24
- DONG, F. et al. Improving voltage stability by reactive power reserve management. *IEEE transactions on Power Systems*, IEEE, v. 20, n. 1, p. 338–345, 2005. 53
- DREO, J. et al. *Metaheuristics for hard optimization: methods and case studies*. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2006. 51
- EREMIA, M.; SHAHIDEHPOUR, M. *Handbook of electrical power system dynamics: modeling, stability, and control*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2013. v. 92. 15, 24, 25
- ESMAEILI, A.; ESMAEILI, S. A new multiobjective optimal allocation of multitype facts devices for total transfer capability enhancement and improving line congestion using the harmony search algorithm. *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, The Scientific and Technological Research Council of Turkey, v. 21, n. 4, p. 957–979, 2013. 18
- ESMAILI, M.; SHAYANFAR, H. A.; MOSLEMI, R. Locating series facts devices for multi-objective congestion management improving voltage and transient stability. *European Journal of Operational Research*, Elsevier, v. 236, n. 2, p. 763–773, 2014. 19
- FARMER, R. G. *Power system dynamics and stability*. [S.l.: s.n.], 2001. 23, 24

GASPERIC, S.; MIHALIC, R. The impact of serial controllable facts devices on voltage stability. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Elsevier, v. 64, p. 1040–1048, 2015. 18

GEN, M.; CHENG, R. *Genetic algorithms and engineering optimization*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2000. v. 7. 43

GOUVÊA, M. M. J. *Algoritmo evolucionário adaptativo em problemas multimodais dinâmicos*. Tese (Doutorado), 2009. 48

GUPTA, A.; SHARMA, P. Application of ga for optimal location of facts devices for steady state voltage stability enhancement of power system. *International Journal of Intelligent Systems and Applications*, Modern Education and Computer Science Press, v. 6, n. 3, p. 69, 2014. 19

GUPTA, S.; TRIPATHI, R.; SHUKLA, R. D. Voltage stability improvement in power systems using facts controllers: State-of-the-art review. p. 1–8, 2010. 15

HAIMES, Y. Y. et al. *Hierarchical Multiobjective Analysis of Large-Scale Systems*. [S.l.]: Hemisphere Publishing Corp., 1989. 55

HINGORANI, N. G. High power electronics and flexible ac transmission system. v. 50, n. CONF-880403–, 1988. 15, 16, 32

HINGORANI, N. G.; GYUGYI, L. *Understanding FACTS: concepts and technology of flexible AC transmission systems*. [S.l.]: Wiley-IEEE press, 2000. 32, 35

JANKE, A. et al. Svc operation & reliability experiences. In: IEEE. *IEEE PES General Meeting*. [S.l.], 2010. p. 1–8. 32, 33

KAMARPOSHTI, M. A.; LESANI, H. Effects of statcom, tcsc, sssc and upfc on static voltage stability. *Electrical Engineering*, Springer, v. 93, n. 1, p. 33–42, 2011. 18

KARTHIKEYAN, S. P.; RAGLEND, I. J.; KOTHARI, D. P. A review on market power in deregulated electricity market. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Elsevier, v. 48, p. 139–147, 2013. 15

KAZEMI, A.; BADRZADEH, B. Modeling and simulation of svc and tcsc to study their limits on maximum loadability point. *International journal of electrical power & energy systems*, Elsevier, v. 26, n. 5, p. 381–388, 2004. 17

KAZEMI, A.; VAHIDINASAB, V.; MOSALLANEJAD, A. Study of statcom and upfc controllers for voltage stability evaluated by saddle-node bifurcation analysis. In: IEEE. *2006 IEEE International Power and Energy Conference*. [S.l.], 2006. p. 191–195. 19

KESSEL, P.; GLAVITSCH, H. Estimating the voltage stability of a power system. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, v. 1, n. 3, p. 346–354, 1986. 26, 27

KHANI, D.; YAZDANKHAH, A. S.; KOJABADI, H. M. Impacts of distributed generations on power system transient and voltage stability. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Elsevier, v. 43, n. 1, p. 488–500, 2012. 15

- LASDON, L. S. *Optimization Theory for Large Systems*. [S.l.]: Dover, 2002. 16
- LEE, K. Y.; EL-SHARKAWI, M. A. *Modern heuristic optimization techniques: theory and applications to power systems*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2008. v. 39. 49, 52
- MAGURRAN, A. E. *Measuring biological diversity*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2013. 48
- MATHUR, R. M.; VARMA, R. K. *Thyristor-based FACTS controllers for electrical transmission systems*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2002. 35, 37
- NIREEKSHANA, T.; RAO, G. K.; RAJU, S. S. N. Enhancement of atc with facts devices using real-code genetic algorithm. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Elsevier, v. 43, n. 1, p. 1276–1284, 2012. 17, 33, 34
- PARIZAD, A.; KHAZALI, A.; KALANTAR, M. Application of hsa and ga in optimal placement of facts devices considering voltage stability and losses. In: IEEE. *Electric Power and Energy Conversion Systems, 2009. EPECS'09. International Conference on*. [S.l.], 2009. p. 1–7. 18, 26
- PARSOPOULOS, K. E. *Particle swarm optimization and intelligence: advances and applications: advances and applications*. [S.l.]: IGI Global, 2010. 50
- PEDRYCZ, W.; EKEL, P.; PARREIRAS, R. *Fuzzy multicriteria decision-making: models, methods and applications*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2011. 54
- RANI, K. R.; AMARNATH, J.; KAMAKSHIAH, S. Allocation of facts devices for atc enhancement using genetic algorithm. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, v. 6, n. 2, p. 87–93, 2011. 17
- SAMIMI, A.; NADERI, P. A new method for optimal placement of tcsc based on sensitivity analysis for congestion management. *Smart Grid and Renewable Energy*, Scientific Research Publishing, v. 3, n. 01, p. 10, 2012. 34
- SHAHEEN, H.; RASHED, G.; CHENG, S. Application and comparison of computational intelligence techniques for optimal location and parameter setting of upfc. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Elsevier, v. 23, n. 2, p. 203–216, 2010. 21, 32
- SINGH, B. Applications of facts controllers in power systems for enhance the power system stability: a state-of-the-art. *International Journal of Reviews in Computing*, v. 6, 2011. 23, 24
- SINGH, B.; MUKHERJEE, V.; TIWARI, P. A survey on impact assessment of dg and facts controllers in power systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, v. 42, p. 846–882, 2015. 32
- SINGH, B.; SHARMA, N.; TIWARI, A. Prevention of voltage instability by using facts controllers in power systems: a literature survey. *International Journal of Engineering Science and Technology*, v. 1, n. 2, p. 980–992, 2010. 15

SINGH, B. et al. Introduction to facts controllers: A technological literature survey. *International Journal of Automation and Power Engineering*, Science and Engineering Publishing Company, v. 1, n. 9, p. 193–234, 2012. 16, 32

SODE-YOME, A.; MITHULANANTHAN, N. Comparison of shunt capacitor, svc and statcom in static voltage stability margin enhancement. *International Journal of Electrical Engineering Education*, SAGE Publications, v. 41, n. 2, p. 158–171, 2004. 17, 18

SODE-YOME, A.; MITHULANANTHAN, N.; LEE, K. Y. Static voltage stability margin enhancement using statcom, tcsc and sssc. In: IEEE. *2005 IEEE/PES Transmission & Distribution Conference & Exposition: Asia and Pacific*. [S.l.], 2005. p. 1–6. 18

SONG, Y.-H.; JOHNS, A. *Flexible ac transmission systems (FACTS)*. [S.l.]: IET, 1999. 16, 32, 35, 37

TAHER, S. A.; AMOOSHAHI, M. K. New approach for optimal upfc placement using hybrid immune algorithm in electric power systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Elsevier, v. 43, n. 1, p. 899–909, 2012. 16

WANG, Y. et al. Incorporating generator equivalent model into voltage stability analysis. *IEEE Transactions on Power Systems*, IEEE, v. 28, n. 4, p. 4857–4866, 2013. 26

ZHANG, X.-P.; REHTANZ, C.; PAL, B. *Flexible AC transmission systems: modelling and control*. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2012. 16

ZIMMERMAN, R. D.; MURILLO-SANCHEZ, C. E. *Matpower 5.1-user's manual*. *Power Systems Engineering Research Center (PSERC)*, 2015. 44, 56