

BRUNO RAFAEL GAMINO

**ANÁLISE DA ESTABILIDADE A PEQUENAS
PERTURBAÇÕES CONSIDERANDO A ATUAÇÃO DOS
CONTROLADORES SUPLEMENTARES DE
AMORTECIMENTO ESP E TCSC-POD AJUSTADOS POR
UM ALGORITMO BVNS**

Ilha Solteira
2018



BRUNO RAFAEL GAMINO

**ANÁLISE DA ESTABILIDADE A PEQUENAS
PERTURBAÇÕES CONSIDERANDO A ATUAÇÃO DOS
CONTROLADORES SUPLEMENTARES DE
AMORTECIMENTO ESP E TCSC-POD AJUSTADOS POR
UM ALGORITMO BVNS**

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia
do Campus de Ilha Solteira – UNESP como
parte dos requisitos para obtenção do título
de Doutor em Engenharia Elétrica.

Área de Conhecimento: Automação.

Prof. Dr. Percival Bueno de Araujo
Orientador

Ilha Solteira

2018

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

G192a Gamino, Bruno Rafael.
Análise da estabilidade a pequenas perturbações considerando a atuação dos controladores suplementares de amortecimento ESP e TCSC-POD ajustados por um algoritmo BVNS / Bruno Rafael Gamino. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2018
153 f. : il.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Automação, 2018

Orientador: Percival Bueno de Araujo
Inclui bibliografia

1. Busca em Vizinhança Variável Básica. 2. Estabilidade a pequenas perturbações. 3. Estabilizadores de sistemas de potência. 4. FACTS. 5. *Power oscillation damping*. 6. TCSC.


Raiane da Silva Santos



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Ilha Solteira

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: Análise da Estabilidade a Pequenas Perturbações Considerando a Atuação dos Controladores Suplementares de Amortecimento ESP e TCSC-POD Ajustados por um Algoritmo BVNS

AUTOR: BRUNO RAFAEL GAMINO

ORIENTADOR: PERCIVAL BUENO DE ARAUJO

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em ENGENHARIA ELÉTRICA, área: AUTOMAÇÃO pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. PERCIVAL BUENO DE ARAUJO
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Profa. Dra. ANNA DIVA PLASENCIA LOTUFO
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Prof. Dr. JULIO BORGES DE SOUZA
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Prof. Dr. DANILO BASSETO DO VALLE
Câmpus de Tupã / Instituto Federal de São Paulo

Prof. Dr. MARCOS AMORIELLES FURINI
Coordenação da Área de Indústria / Instituto Federal de São Paulo - Câmpus de Votuporanga

Ilha Solteira, 24 de setembro de 2018

Dedico aos meus pais, Vera e Divino,
por todo o apoio recebido nas horas mais difíceis
e por serem meus maiores exemplos de força, humildade e caráter.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por sempre iluminar meu caminho e me dar forças para superar todas as dificuldades.

Aos meus pais, Vera e Divino, pelo incondicional apoio, amor e dedicação durante toda minha vida, sem os quais eu não teria alcançado mais uma conquista.

A minha namorada, Mariana, por ter me incentivado desde o início deste projeto, pela compreensão nos momentos de minha ausência e por todo o amor, carinho e companheirismo.

Aos meus familiares, em especial, minha avó Dirce, por sempre trazer uma palavra de conforto e me mostrar o caminho do bem.

Ao meu orientador, Percival Bueno de Araujo, por ter dado a oportunidade de trabalharmos juntos, além dos ensinamentos e da orientação deste trabalho.

Aos membros da comissão examinadora por disponibilizarem seu tempo e pelas contribuições valiosas oferecidas a este trabalho.

Aos meus colegas de departamento, em especial, aos membros do GAEESEE pelas experiências compartilhadas e os trabalhos realizados em conjunto.

Aos professores do Instituto Federal de São Paulo, campus Birigui, pelo incentivo na reta final do doutorado.

A Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira e todos os seus servidores, pela contribuição em minha formação profissional durante a graduação e o doutorado, ao longo destes 9 anos.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pelo suporte financeiro.

E finalmente, a todos que de alguma forma contribuíram diretamente ou indiretamente para a realização deste trabalho.

*”Quem olha para fora, sonha.
Quem olha para dentro, desperta.”*

Carl Jung

RESUMO

Neste trabalho, uma técnica baseada na Busca em Vizinhança Variável Básica é apresentada para realizar o ajuste coordenado dos parâmetros dos controladores suplementares de amortecimento *Thyristor Controlled Series Capacitor - Power Oscillation Damping* e Estabilizadores de Sistemas de Potência, a fim de garantir a estabilidade a pequenas perturbações de sistemas elétricos de potência. A estratégia do método de ajuste proposto consiste em explorar sistematicamente estruturas de vizinhança atrelada a uma etapa de busca local, tornando possível a obtenção de soluções ótimas e a manutenção da capacidade de evitar a estagnação em um ótimo local. Um modelo do TCSC por injeção de corrente é apresentado e seus coeficientes de sensibilidade de corrente são deduzidos para incorporação ao Modelo de Sensibilidade de Corrente, que é utilizado para representar o sistema elétrico de potência. Com a inclusão da modelagem dos controladores de amortecimento, simulações são realizadas em dois sistemas testes, conhecidos como sistema Simétrico de Duas Áreas e sistema *New England*. Os resultados obtidos são analisados para melhor compreensão do comportamento do sistema elétrico de potência quando submetido a uma pequena perturbação e da influência dos controladores de amortecimento neste cenário. Os parâmetros dos controladores são ajustados pelo algoritmo *Particle Swarm Optimization*, por um Algoritmo Genético e, também, pelo método proposto neste trabalho. Os desempenhos individuais dos métodos de ajuste são comparados a fim de concluir sobre a técnica melhor adaptada para este tipo de problema, incluindo a análise de um cenário realístico e de maior complexidade, onde são consideradas variações de carga no sistema. Os resultados mostram que o BVNS tem desempenho superior em relação aos outros métodos aplicados, qualificando o método proposto como uma ferramenta em potencial no ajuste coordenado dos controladores de amortecimento.

Palavras-chave: Busca em Vizinhança Variável Básica. Estabilidade a pequenas perturbações. Estabilizadores de sistemas de potência. FACTS. *Power oscillation damping*. TCSC.

ABSTRACT

In this work, a technique based on Basic Variable Neighborhood Search is presented to perform the coordinated tuning of the parameters of the supplementary damping controllers Thyristor Controlled Series Capacitor - Power Oscillation Damping and Power System Stabilizers in order to guarantee the small-signal stability of the electric power systems. The strategy of the proposed tuning method consists in systematically exploring neighborhood structures followed by a local search stage, making it possible to obtain optimal solutions and to maintain the ability to avoid stagnation in a local optimum. A current injection model for the TCSC is presented and its current sensitivity coefficients are deduced for incorporation into the Current Sensitivity Model, which is used to represent the electric power system. With the inclusion of the damping controllers modeling, simulations are performed on two test systems, known as the Two-Area Symmetric system and New England system. The results obtained are analyzed to better understand the behavior of the electric power system when subjected to a small disturbance and the influence of the damping controllers in this scenario. The controllers parameters are tuned by the Particle Swarm Optimization algorithm, by a Genetic Algorithm and also by the method proposed in this work. The individual performances of the tuning methods are compared in order to conclude on the technique best suited for this type of problem, including the analysis of a realistic and more complex scenario, where load variations are considered in the system. The results show that the BVNS performs better than the other applied methods, qualifying the proposed method as a potential tool in the coordinated tuning of the damping controllers.

Keywords: Basic Variable Neighborhood Search. Small-signal stability. Power System Stabilizers. FACTS. Power Oscillation Damping. TCSC.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Barras genéricas do sistema elétrico de potência.	48
Figura 2	Diagrama de blocos: regulador automático de tensão.	56
Figura 3	Barras genéricas do SEP com TCSC instalado.	62
Figura 4	Barras genéricas do SEP com TCSC representado por reatância equivalente.	62
Figura 5	Barras genéricas do SEP com TCSC representado por fonte de corrente.	63
Figura 6	Barras genéricas do SEP com TCSC representado por injeção de corrente.	63
Figura 7	Balanco de correntes nas barras comuns à instalação do TCSC.	67
Figura 8	Diagrama de blocos - estrutura do controlador ESP.	74
Figura 9	Diagrama de blocos - estrutura do conjunto TCSC-POD.	80
Figura 10	Diagrama de blocos - divisão por partes da estrutura do controlador POD.	80
Figura 11	Deslocamento desejado para os autovalores de interesse.	95
Figura 12	Proposta de solução utilizada pelos métodos de otimização.	96
Figura 13	Pseudocódigo de um Algoritmo Genético.	97
Figura 14	Seleção por torneio.	98
Figura 15	<i>Crossover</i> multipontos.	98
Figura 16	Pseudocódigo do algoritmo <i>Particle Swarm Optimization</i> .	102
Figura 17	Pseudocódigo do algoritmo Busca em Vizinhança Variável Básica.	103
Figura 18	Fluxograma do algoritmo Busca em Vizinhança Variável Básica.	104
Figura 19	Estrutura de vizinhança: troca entre duas (a) e três (b) posições.	106
Figura 20	Pseudocódigo da Busca Local.	107
Figura 21	Varição de um parâmetro do vetor solução.	107
Figura 22	Sistema teste Simétrico de Duas Áreas.	110
Figura 23	Fatores de participação do sistema Simétrico de Duas Áreas.	111

Figura 24	Deslocamento dos autovalores do modo interárea com a variação da reatância do TCSC.	114
Figura 25	Deslocamento dos autovalores dominantes do sistema Simétrico de Duas Áreas.	120
Figura 26	Variação da velocidade angular do gerador G2 do sistema Simétrico de Duas Áreas.	121
Figura 27	Coefficientes de amortecimento dos modos oscilatórios considerando variações de carga no sistema Simétrico de Duas Áreas.	122
Figura 28	Sistema teste <i>New England</i> .	123
Figura 29	Fatores de participação do sistema <i>New England</i> .	124
Figura 30	Deslocamento dos autovalores dominantes do sistema <i>New England</i> .	131
Figura 31	Autovalores do sistema <i>New England</i> com variações de carga: $F_1 - \xi_i^{des} \geq 15\%$.	132
Figura 32	Autovalores do sistema <i>New England</i> com variações de carga: $F_2 - \xi_{i,j}^{des} \geq 15\%$.	132
Figura 33	Variação da velocidade angular do gerador G9 do sistema <i>New England</i> .	133
Figura 34	Coefficientes de amortecimento dos modos oscilatórios considerando variações de carga no sistema <i>New England</i> .	134

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Autovalores dominantes do sistema Simétrico de Duas Áreas.	110
Tabela 2	Autovalores dominantes do sistema Simétrico de Duas Áreas com TCSC ajustado em 10%.	112
Tabela 3	Autovalores dominantes do sistema Simétrico de Duas Áreas com TCSC ajustado em 40%.	113
Tabela 4	Autovalores dominantes do sistema Simétrico de Duas Áreas com TCSC ajustado em 70%.	113
Tabela 5	Autovalores dominantes do sistema Simétrico de Duas Áreas com TCSC ajustado em 95%.	114
Tabela 6	Limites dos parâmetros dos controladores ESPs e TCSC-POD: Simétrico de Duas Áreas.	116
Tabela 7	Desempenho dos métodos de otimização no sistema Simétrico de Duas Áreas.	118
Tabela 8	Parâmetros dos controladores ESPs e TCSC-POD no sistema Simétrico de Duas Áreas.	119
Tabela 9	Autovalores do sistema Simétrico de Duas Áreas com atuação dos ESPs e TCSC-POD.	120
Tabela 10	Autovalores dominantes do sistema <i>New England</i> .	123
Tabela 11	Limites dos parâmetros dos controladores ESPs e TCSC-POD: <i>New England</i> .	126
Tabela 12	Desempenho dos métodos de otimização no sistema <i>New England</i> .	128
Tabela 13	Parâmetros dos controladores ESPs e TCSC-POD no sistema <i>New England</i> .	129
Tabela 14	Autovalores do sistema <i>New England</i> com atuação dos ESPs e TCSC-POD.	130
Tabela 15	Dados dos geradores síncronos do sistema Simétrico de Duas Áreas.	145
Tabela 16	Dados dos reguladores automáticos de tensão do sistema Simétrico de Duas Áreas.	145
Tabela 17	Dados das linhas de transmissão do sistema Simétrico de Duas Áreas.	145

Tabela 18	Dados de geração e carregamento do sistema Simétrico de Duas Áreas.	146
Tabela 19	Dados dos geradores síncronos do sistema <i>New England</i> .	146
Tabela 20	Dados dos reguladores automáticos de tensão do sistema <i>New England</i> .	146
Tabela 21	Dados das linhas de transmissão do sistema <i>New England</i> .	147
Tabela 22	Dados de geração e carregamento do sistema <i>New England</i> .	148

LISTA DE SIGLAS

ABC	Artificial Bee Colony
AG	Algoritmo Genético
AGCB	Algoritmo Genético de Chu-Beasley
BA	Bat Algorithm
BFO	Bacterial Foraging Optimization
BVNS	Basic Variable Neighborhood Search
CS	Cuckoo Search
DMC	Decentralized Modal Control
ESPs	Estabilizadores de Sistemas de Potência
FACTS	Flexible AC Transmission Systems
MBI	Máquina Barra Infinita
MHP	Modelo de Heffron-Phillips
MSC	Modelo de Sensibilidade de Corrente
MSP	Modelo de Sensibilidade de Potência
NBA	Novel Bat Algorithm
POD	Power Oscillation Damping
PSO	Particle Swarm Optimization
PSS	Power System Stabilizer
RATs	Reguladores Automáticos de Tensão
SA	Simulated Annealing
SEPs	Sistemas Elétricos de Potência
TCSC	Thyristor Controlled Series Capacitor
VNS	Variable Neighborhood Search

LISTA DE SÍMBOLOS

k	Barra genérica k
m	Barra genérica m
G_k	Gerador síncrono k
\bar{E}'_k	Tensão interna do gerador síncrono na barra k
x'_{dk}	Reatância transitória de eixo direto do gerador síncrono na barra k
\bar{Z}_{km}	Impedância da linha de transmissão que interliga as barras k e m
\bar{I}_{km}	Corrente que flui na linha de transmissão da barra k para a barra m
\bar{I}_{c_k}	Corrente drenada pela carga na barra k
\bar{I}_{g_k}	Corrente terminal do gerador na barra k
\bar{V}_k	Tensão na barra k
\bar{V}_m	Tensão na barra m
r_{km}	Resistência da linha de transmissão que interliga as barras k e m
x_{km}	Reatância da linha de transmissão que interliga as barras k e m
θ_k	Ângulo da tensão na barra k
θ_m	Ângulo da tensão na barra m
j	Unidade imaginária associada a um número complexo
I_{km_r}	Componente de eixo real da corrente que flui na linha de transmissão da barra k para a barra m
I_{km_m}	Componente de eixo imaginário da corrente que flui na linha de transmissão da barra k para a barra m
S_{c_k}	Potência complexa da carga na barra k
P_{c_k}	Potência ativa da carga na barra k
Q_{c_k}	Potência reativa da carga na barra k
\bar{I}_{c_k}	Corrente drenada pela carga na barra k
$I_{c_r_k}$	Componente de eixo real da corrente drenada pela carga na barra k

I_{cm_k}	Componente de eixo imaginário da corrente drenada pela carga na barra k
E'_{r_k}	Componente de eixo real da tensão interna do gerador síncrono na barra k
V_{r_k}	Componente de eixo real da tensão na barra k
E'_{m_k}	Componente de eixo imaginário da tensão interna do gerador síncrono na barra k
V_{m_k}	Componente de eixo imaginário da tensão na barra k
\bar{I}_{g_k}	Corrente terminal do gerador síncrono na barra k
T_k	Matriz de transformação de (r,m) para (d,q)
δ_k	Ângulo interno do k -ésimo gerador síncrono
V_{d_k}	Componente de eixo direto da tensão na barra k
V_{q_k}	Componente de eixo em quadratura da tensão na barra k
E'_{d_k}	Componente de eixo direto da tensão interna do gerador na barra k
E'_{q_k}	Componente de eixo em quadratura da tensão interna do gerador na barra k
I_{gd_k}	Componente de eixo direto da corrente terminal do gerador na barra k
I_{gq_k}	Componente de eixo em quadratura da corrente terminal do gerador na barra k
\bar{E}_{d_k}	Tensão em fase com o eixo em quadratura do gerador síncrono na barra k
x_{q_k}	Reatância síncrona de eixo em quadratura do gerador síncrono na barra k
I_{gr_k}	Componente de eixo real da corrente terminal do gerador na barra k
I_{gm_k}	Componente de eixo imaginário da corrente terminal do gerador na barra k
Δ	Representação de pequenas variações em torno do ponto de equilíbrio
$R1_{km}$	Coeficiente de sensibilidade de corrente da componente de eixo real da corrente que flui na linha de transmissão da barra k para a barra m
$R2_{km}$	Coeficiente de sensibilidade de corrente da componente de eixo real da corrente que flui na linha de transmissão da barra k para a barra m
$R3_{km}$	Coeficiente de sensibilidade de corrente da componente de eixo real da corrente que flui na linha de transmissão da barra k para a barra m
$R4_{km}$	Coeficiente de sensibilidade de corrente da componente de eixo real da corrente que flui na linha de transmissão da barra k para a barra m
$M1_{km}$	Coeficiente de sensibilidade de corrente da componente de eixo imaginário da

	corrente que flui na linha de transmissão da barra k para a barra m
$M2_{km}$	Coeficiente de sensibilidade de corrente da componente de eixo imaginário da corrente que flui na linha de transmissão da barra k para a barra m
$M3_{km}$	Coeficiente de sensibilidade de corrente da componente de eixo imaginário da corrente que flui na linha de transmissão da barra k para a barra m
$M4_{km}$	Coeficiente de sensibilidade de corrente da componente de eixo imaginário da corrente que flui na linha de transmissão da barra k para a barra m
$R1_{c_k}$	Coeficiente de sensibilidade de corrente da componente de eixo real da corrente drenada pela carga na barra k
$R2_{c_k}$	Coeficiente de sensibilidade de corrente da componente de eixo real da corrente drenada pela carga na barra k
$R3_{c_k}$	Coeficiente de sensibilidade de corrente da componente de eixo real da corrente drenada pela carga na barra k
$R4_{c_k}$	Coeficiente de sensibilidade de corrente da componente de eixo real da corrente drenada pela carga na barra k
$M1_{c_k}$	Coeficiente de sensibilidade de corrente da componente de eixo imaginário da corrente drenada pela carga na barra k
$M2_{c_k}$	Coeficiente de sensibilidade de corrente da componente de eixo imaginário da corrente drenada pela carga na barra k
$M3_{c_k}$	Coeficiente de sensibilidade de corrente da componente de eixo imaginário da corrente drenada pela carga na barra k
$M4_{c_k}$	Coeficiente de sensibilidade de corrente da componente de eixo imaginário da corrente drenada pela carga na barra k
$R1_{g_k}$	Coeficiente de sensibilidade de corrente da componente de eixo real da corrente terminal do gerador síncrono na barra k
$R2_{g_k}$	Coeficiente de sensibilidade de corrente da componente de eixo real da corrente terminal do gerador síncrono na barra k
$R3_{g_k}$	Coeficiente de sensibilidade de corrente da componente de eixo real da corrente terminal do gerador síncrono na barra k
$R4_{g_k}$	Coeficiente de sensibilidade de corrente da componente de eixo real da corrente terminal do gerador síncrono na barra k

$M1_{gk}$	Coeficiente de sensibilidade de corrente da componente de eixo imaginário da corrente terminal do gerador síncrono na barra k
$M2_{gk}$	Coeficiente de sensibilidade de corrente da componente de eixo imaginário da corrente terminal do gerador síncrono na barra k
$M3_{gk}$	Coeficiente de sensibilidade de corrente da componente de eixo imaginário da corrente terminal do gerador síncrono na barra k
$M4_{gk}$	Coeficiente de sensibilidade de corrente da componente de eixo imaginário da corrente terminal do gerador síncrono na barra k
Ω_k	Conjunto de todas as barras interligadas diretamente à barra k através de uma linha de transmissão
E_{fdk}	Tensão de excitação do gerador síncrono na barra k
V_{refk}	Tensão de referência na barra k
K_{rk}	Ganho do regulador automático de tensão do gerador síncrono na barra k
T_{rk}	Constante de tempo do regulador automático de tensão do gerador síncrono na barra k
s	Variável complexa de Laplace
M_k	Constante de inércia do gerador síncrono na barra k
P_{mk}	Potência mecânica de entrada do gerador síncrono na barra k
D_k	Coeficiente de amortecimento inerente do sistema elétrico de potência
ω_k	Velocidade angular do rotor do gerador síncrono na barra k
ω_{0k}	Velocidade angular síncrona
P_{gk}	Potência elétrica gerada pelo gerador síncrono na barra k
$K1_k$	Coeficiente relacionado à variação da potência elétrica do gerador síncrono k
$K2_k$	Coeficiente relacionado à variação da potência elétrica do gerador síncrono k
$K3_k$	Coeficiente relacionado à variação da potência elétrica do gerador síncrono k
$K4_k$	Coeficiente relacionado à variação da potência elétrica do gerador síncrono k
T'_{d0k}	Constante de tempo transitória de eixo direto em circuito aberto do gerador k
x_{dk}	Reatância síncrona de eixo direto do gerador síncrono k

$K5_k$	Coeficiente relacionado à variação da tensão interna do gerador síncrono k
$K6_k$	Coeficiente relacionado à variação da tensão interna do gerador síncrono k
$K7_k$	Coeficiente relacionado à variação da tensão interna do gerador síncrono k
$K8_k$	Coeficiente relacionado à variação da tensão interna do gerador síncrono k
Δx	Vetor das variáveis de estado do sistema
Δz	Vetor das variáveis algébricas do sistema
Δu	Vetor das variáveis de entrada do sistema
ng	Número de geradores síncronos do sistema elétrico de potência
nb	Número de barras do sistema elétrico de potência
J_1	Matriz que relaciona as equações diferenciais com as variáveis de estado do modelo de sensibilidade de corrente
J_2	Matriz que relaciona as equações diferenciais com as variáveis algébricas do modelo de sensibilidade de corrente
J_3	Matriz que relaciona as equações algébricas com as variáveis de estado do modelo de sensibilidade de corrente
J_4	Matriz que relaciona as equações algébricas com as variáveis algébricas do modelo de sensibilidade de corrente
B_1	Matriz que relaciona as equações diferenciais com as variáveis de entrada do modelo de sensibilidade de corrente
B_2	Matriz que relaciona as equações algébricas com as variáveis de entrada do modelo de sensibilidade de corrente
C	Capacitância associada ao <i>Thyristor Controlled Series Capacitor</i>
L	Indutância associada ao <i>Thyristor Controlled Series Capacitor</i>
x_{tcsc}	Reatância capacitiva do <i>Thyristor Controlled Series Capacitor</i>
\bar{V}_{tcsc}	Fonte de tensão relacionada ao <i>Thyristor Controlled Series Capacitor</i>
\bar{I}_{tcsc}	Fonte de corrente relacionada ao <i>Thyristor Controlled Series Capacitor</i>
\bar{I}_{tcsc_k}	Corrente injetada na barra k pelo <i>Thyristor Controlled Series Capacitor</i>
\bar{I}_{tcsc_m}	Corrente injetada na barra m pelo <i>Thyristor Controlled Series Capacitor</i>

I_{tcsc_r}	Componente de eixo real da corrente relacionada ao <i>Thyristor Controlled Series Capacitor</i>
I_{tcsc_m}	Componente de eixo imaginário da corrente relacionada ao <i>Thyristor Controlled Series Capacitor</i>
$I_{tcsc_{r_k}}$	Componente de eixo real da corrente injetada na barra k pelo <i>Thyristor Controlled Series Capacitor</i>
$R1_{tcsc_k}$	Coefficiente de sensibilidade de corrente da componente de eixo real da corrente injetada na barra k pelo <i>Thyristor Controlled Series Capacitor</i>
$R2_{tcsc_k}$	Coefficiente de sensibilidade de corrente da componente de eixo real da corrente injetada na barra k pelo <i>Thyristor Controlled Series Capacitor</i>
$R3_{tcsc_k}$	Coefficiente de sensibilidade de corrente da componente de eixo real da corrente injetada na barra k pelo <i>Thyristor Controlled Series Capacitor</i>
$R4_{tcsc_k}$	Coefficiente de sensibilidade de corrente da componente de eixo real da corrente injetada na barra k pelo <i>Thyristor Controlled Series Capacitor</i>
$R5_{tcsc_k}$	Coefficiente de sensibilidade de corrente da componente de eixo real da corrente injetada na barra k pelo <i>Thyristor Controlled Series Capacitor</i>
$I_{tcsc_{m_k}}$	Componente de eixo imaginário da corrente injetada na barra k pelo <i>Thyristor Controlled Series Capacitor</i>
$M1_{tcsc_k}$	Coefficiente de sensibilidade de corrente da componente de eixo imaginário da corrente injetada na barra k pelo <i>Thyristor Controlled Series Capacitor</i>
$M2_{tcsc_k}$	Coefficiente de sensibilidade de corrente da componente de eixo imaginário da corrente injetada na barra k pelo <i>Thyristor Controlled Series Capacitor</i>
$M3_{tcsc_k}$	Coefficiente de sensibilidade de corrente da componente de eixo imaginário da corrente injetada na barra k pelo <i>Thyristor Controlled Series Capacitor</i>
$M4_{tcsc_k}$	Coefficiente de sensibilidade de corrente da componente de eixo imaginário da corrente injetada na barra k pelo <i>Thyristor Controlled Series Capacitor</i>
$M5_{tcsc_k}$	Coefficiente de sensibilidade de corrente da componente de eixo imaginário da corrente injetada na barra k pelo <i>Thyristor Controlled Series Capacitor</i>
$J_{4_{tcsc}}$	Matriz que relaciona as equações algébricas com as variáveis algébricas do modelo de sensibilidade de corrente com a inclusão do <i>Thyristor Controlled Series</i>

Capacitor

$B_{1_{tcsc}}$	Matriz que relaciona as equações diferenciais com as variáveis de entrada do modelo de sensibilidade de corrente com a inclusão do <i>Thyristor Controlled Series Capacitor</i>
$B_{2_{tcsc}}$	Matriz que relaciona as equações algébricas com as variáveis de entrada do modelo de sensibilidade de corrente com a inclusão do <i>Thyristor Controlled Series Capacitor</i>
n_{tcsc}	Número de dispositivos <i>Thyristor Controlled Series Capacitor</i> instalados no sistema elétrico de potência
K_{esp_k}	Ganho do Estabilizador de Sistema de Potência instalado no gerador síncrono k
T_{wk}	Constante de tempo do filtro <i>washout</i> do Estabilizador de Sistema de Potência instalado no gerador síncrono k
T_{1_k}	Constante de tempo do Estabilizador de Sistema de Potência instalado no gerador síncrono k
T_{2_k}	Constante de tempo do Estabilizador de Sistema de Potência instalado no gerador síncrono k
T_{3_k}	Constante de tempo do Estabilizador de Sistema de Potência instalado no gerador síncrono k
T_{4_k}	Constante de tempo do Estabilizador de Sistema de Potência instalado no gerador síncrono k
$\Delta\dot{V}_{1_k}$	Variável de estado relativa ao Estabilizador de Sistema de Potência instalado no gerador síncrono k
$\Delta\dot{V}_{2_k}$	Variável de estado relativa ao Estabilizador de Sistema de Potência instalado no gerador síncrono k
$\Delta\dot{V}_{esp_k}$	Variável de estado relativa ao Estabilizador de Sistema de Potência instalado no gerador síncrono k
D_{11_k}	Coefficiente relativo ao Estabilizador de Sistema de Potência instalado no gerador k
D_{12_k}	Coefficiente relativo ao Estabilizador de Sistema de Potência instalado no gerador k
D_{13_k}	Coefficiente relativo ao Estabilizador de Sistema de Potência instalado no gerador k
D_{14_k}	Coefficiente relativo ao Estabilizador de Sistema de Potência instalado no gerador k
D_{15_k}	Coefficiente relativo ao Estabilizador de Sistema de Potência instalado no gerador k

D_{16_k}	Coeficiente relativo ao Estabilizador de Sistema de Potência instalado no gerador k
D_{17_k}	Coeficiente relativo ao Estabilizador de Sistema de Potência instalado no gerador k
D_{21_k}	Coeficiente relativo ao Estabilizador de Sistema de Potência instalado no gerador k
D_{22_k}	Coeficiente relativo ao Estabilizador de Sistema de Potência instalado no gerador k
D_{23_k}	Coeficiente relativo ao Estabilizador de Sistema de Potência instalado no gerador k
D_{24_k}	Coeficiente relativo ao Estabilizador de Sistema de Potência instalado no gerador k
D_{25_k}	Coeficiente relativo ao Estabilizador de Sistema de Potência instalado no gerador k
D_{26_k}	Coeficiente relativo ao Estabilizador de Sistema de Potência instalado no gerador k
D_{27_k}	Coeficiente relativo ao Estabilizador de Sistema de Potência instalado no gerador k
D_{28_k}	Coeficiente relativo ao Estabilizador de Sistema de Potência instalado no gerador k
D_{31_k}	Coeficiente relativo ao Estabilizador de Sistema de Potência instalado no gerador k
D_{32_k}	Coeficiente relativo ao Estabilizador de Sistema de Potência instalado no gerador k
D_{33_k}	Coeficiente relativo ao Estabilizador de Sistema de Potência instalado no gerador k
D_{34_k}	Coeficiente relativo ao Estabilizador de Sistema de Potência instalado no gerador k
D_{35_k}	Coeficiente relativo ao Estabilizador de Sistema de Potência instalado no gerador k
D_{36_k}	Coeficiente relativo ao Estabilizador de Sistema de Potência instalado no gerador k
D_{37_k}	Coeficiente relativo ao Estabilizador de Sistema de Potência instalado no gerador k
D_{38_k}	Coeficiente relativo ao Estabilizador de Sistema de Potência instalado no gerador k
D_{39_k}	Coeficiente relativo ao Estabilizador de Sistema de Potência instalado no gerador k
D_{41_k}	Coeficiente relativo ao Estabilizador de Sistema de Potência instalado no gerador k
D_{42_k}	Coeficiente relativo ao Estabilizador de Sistema de Potência instalado no gerador k
D_{43_k}	Coeficiente relativo ao Estabilizador de Sistema de Potência instalado no gerador k
D_{44_k}	Coeficiente relativo ao Estabilizador de Sistema de Potência instalado no gerador k
n_{esp}	Número de Estabilizadores de Sistemas de Potência instalados no sistema elétrico de potência
$J_{1_{esp}}$	Matriz que relaciona as equações diferenciais com as variáveis de estado do modelo de sensibilidade de corrente com a inclusão do Estabilizador de Sistema de Potência

$J_{2_{esp}}$	Matriz que relaciona as equações diferenciais com as variáveis algébricas do modelo de sensibilidade de corrente com a inclusão do Estabilizador de Sistema de Potência
$J_{3_{esp}}$	Matriz que relaciona as equações algébricas com as variáveis de estado do modelo de sensibilidade de corrente com a inclusão do Estabilizador de Sistema de Potência
$B_{1_{esp}}$	Matriz que relaciona as equações diferenciais com as variáveis de entrada do modelo de sensibilidade de corrente com a inclusão do Estabilizador de Sistema de Potência
ΔP_{km}	Varição do fluxo de potência ativa na linha de transmissão que interliga as barras k e m
ΔX_{pod}	Sinal de saída do controlador <i>Power Oscillation Damping</i>
K_{pod}	Ganho do controlador <i>Power Oscillation Damping</i>
T_{1_p}	Constante de tempo do controlador <i>Power Oscillation Damping</i>
T_{2_p}	Constante de tempo do controlador <i>Power Oscillation Damping</i>
T_{3_p}	Constante de tempo do controlador <i>Power Oscillation Damping</i>
T_{4_p}	Constante de tempo do controlador <i>Power Oscillation Damping</i>
T_{w_p}	Constante de tempo do filtro <i>washout</i> do controlador <i>Power Oscillation Damping</i>
$\Delta \dot{X}_1$	Variável de estado relativa ao controlador <i>Power Oscillation Damping</i>
$\Delta \dot{X}_2$	Variável de estado relativa ao controlador <i>Power Oscillation Damping</i>
$\Delta \dot{X}_3$	Variável de estado relativa ao controlador <i>Power Oscillation Damping</i>
$\Delta X'_1$	Sinal de saída do filtro <i>washout</i> do controlador <i>Power Oscillation Damping</i>
$\Delta X'_2$	Sinal de saída do primeiro bloco compensador de fase do controlador <i>Power Oscillation Damping</i>
C_{11}	Coefficiente relativo ao controlador <i>Power Oscillation Damping</i>
C_{12}	Coefficiente relativo ao controlador <i>Power Oscillation Damping</i>
C_{13}	Coefficiente relativo ao controlador <i>Power Oscillation Damping</i>
C_{14}	Coefficiente relativo ao controlador <i>Power Oscillation Damping</i>
C_{15}	Coefficiente relativo ao controlador <i>Power Oscillation Damping</i>

C_{16}	Coeficiente relativo ao controlador <i>Power Oscillation Damping</i>
C_{21}	Coeficiente relativo ao controlador <i>Power Oscillation Damping</i>
C_{22}	Coeficiente relativo ao controlador <i>Power Oscillation Damping</i>
C_{23}	Coeficiente relativo ao controlador <i>Power Oscillation Damping</i>
C_{24}	Coeficiente relativo ao controlador <i>Power Oscillation Damping</i>
C_{25}	Coeficiente relativo ao controlador <i>Power Oscillation Damping</i>
C_{26}	Coeficiente relativo ao controlador <i>Power Oscillation Damping</i>
C_{27}	Coeficiente relativo ao controlador <i>Power Oscillation Damping</i>
C_{31}	Coeficiente relativo ao controlador <i>Power Oscillation Damping</i>
C_{32}	Coeficiente relativo ao controlador <i>Power Oscillation Damping</i>
C_{33}	Coeficiente relativo ao controlador <i>Power Oscillation Damping</i>
C_{34}	Coeficiente relativo ao controlador <i>Power Oscillation Damping</i>
C_{35}	Coeficiente relativo ao controlador <i>Power Oscillation Damping</i>
C_{36}	Coeficiente relativo ao controlador <i>Power Oscillation Damping</i>
C_{37}	Coeficiente relativo ao controlador <i>Power Oscillation Damping</i>
C_{38}	Coeficiente relativo ao controlador <i>Power Oscillation Damping</i>
C_{41}	Coeficiente relativo ao controlador <i>Power Oscillation Damping</i>
C_{42}	Coeficiente relativo ao controlador <i>Power Oscillation Damping</i>
C_{43}	Coeficiente relativo ao controlador <i>Power Oscillation Damping</i>
C_{44}	Coeficiente relativo ao controlador <i>Power Oscillation Damping</i>
C_{45}	Coeficiente relativo ao controlador <i>Power Oscillation Damping</i>
C_{46}	Coeficiente relativo ao controlador <i>Power Oscillation Damping</i>
C_{47}	Coeficiente relativo ao controlador <i>Power Oscillation Damping</i>
C_{48}	Coeficiente relativo ao controlador <i>Power Oscillation Damping</i>
C_{49}	Coeficiente relativo ao controlador <i>Power Oscillation Damping</i>
n_{pod}	Número de controladores <i>Power Oscillation Damping</i> instalados no sistema elétrico de potência

$J_{1_{pod}}$	Matriz que relaciona as equações diferenciais com as variáveis de estado do modelo de sensibilidade de corrente com a inclusão do controlador <i>Thyristor Controlled Series Capacitor - Power Oscillation Damping</i>
$J_{2_{pod}}$	Matriz que relaciona as equações diferenciais com as variáveis algébricas do modelo de sensibilidade de corrente com a inclusão do controlador <i>Thyristor Controlled Series Capacitor - Power Oscillation Damping</i>
$J_{3_{pod}}$	Matriz que relaciona as equações algébricas com as variáveis de estado do modelo de sensibilidade de corrente com a inclusão do controlador <i>Thyristor Controlled Series Capacitor - Power Oscillation Damping</i>
$B_{1_{pod}}$	Matriz que relaciona as equações diferenciais com as variáveis de entrada do modelo de sensibilidade de corrente com a inclusão do controlador <i>Thyristor Controlled Series Capacitor - Power Oscillation Damping</i>
$B_{2_{pod}}$	Matriz que relaciona as equações algébricas com as variáveis de entrada do modelo de sensibilidade de corrente com a inclusão do controlador <i>Thyristor Controlled Series Capacitor - Power Oscillation Damping</i>
J_{1_c}	Matriz que relaciona as equações diferenciais com as variáveis de estado do modelo de sensibilidade de corrente com a inclusão dos controladores <i>Thyristor Controlled Series Capacitor - Power Oscillation Damping</i> e Estabilizador de Sistema de Potência
J_{2_c}	Matriz que relaciona as equações diferenciais com as variáveis algébricas do modelo de sensibilidade de corrente com a inclusão dos controladores <i>Thyristor Controlled Series Capacitor - Power Oscillation Damping</i> e Estabilizador de Sistema de Potência
J_{3_c}	Matriz que relaciona as equações algébricas com as variáveis de estado do modelo de sensibilidade de corrente com a inclusão dos controladores <i>Thyristor Controlled Series Capacitor - Power Oscillation Damping</i> e Estabilizador de Sistema de Potência
B_{1_c}	Matriz que relaciona as equações diferenciais com as variáveis de entrada do modelo de sensibilidade de corrente com a inclusão dos controladores <i>Thyristor Controlled Series Capacitor - Power Oscillation Damping</i> e Estabilizador de Sistema de Potência
A	Matriz de estados do sistema representado na forma de espaço de estados

B	Matriz de entradas do sistema representado na forma de espaço de estados
λ_i	Modo oscilatório i associado a um par complexo conjugado de autovalores da matriz de estados
σ_i	Parte real do modo oscilatório i associado a um par complexo conjugado de autovalores da matriz de estados
ω_{d_i}	Frequência natural amortecida do modo oscilatório i associado a um par complexo conjugado de autovalores da matriz de estados
ω_{n_i}	Frequência natural não amortecida do modo oscilatório i associado a um par complexo conjugado de autovalores da matriz de estados
ξ_i	Coefficiente de amortecimento do modo oscilatório i associado a um par complexo conjugado de autovalores da matriz de estados
ξ_i^{des}	Coefficiente de amortecimento desejado para o modo oscilatório i
ξ_i^{calc}	Coefficiente de amortecimento calculado para o modo oscilatório i
$\xi_{i,j}^{calc}$	Coefficiente de amortecimento calculado para o modo oscilatório i presente no cenário de carregamento j
β	Taxa de perturbação aplicada ao gene escolhido na etapa de mutação do Algoritmo Genético
$v_i(t)$	Velocidade de deslocamento da partícula i na transição t do algoritmo <i>Particle Swarm Optimization</i>
W	Fator de inércia do algoritmo <i>Particle Swarm Optimization</i>
c_1	Variável de ponderação sobre as experiências individuais no algoritmo <i>Particle Swarm Optimization</i>
c_2	Variável de ponderação sobre as experiências do grupo no algoritmo <i>Particle Swarm Optimization</i>
$co_i(t)$	Fator cognitivo da partícula i na transição t do algoritmo <i>Particle Swarm Optimization</i>
$so_i(t)$	Fator social da partícula i na transição t do algoritmo <i>Particle Swarm Optimization</i>
r_1	Número gerado aleatoriamente entre 0 e 1 pelo algoritmo <i>Particle Swarm Optimization</i>

r_2	Número gerado aleatoriamente entre 0 e 1 pelo algoritmo <i>Particle Swarm Optimization</i>
$Pbest_i$	Melhor posição ocupada pela partícula i do algoritmo <i>Particle Swarm Optimization</i>
$Gbest$	Melhor posição ocupada entre todas as partículas do algoritmo <i>Particle Swarm Optimization</i>
t	Número da transição atual do algoritmo <i>Particle Swarm Optimization</i>
W_{max}	Valor inicial do fator de inércia do algoritmo <i>Particle Swarm Optimization</i>
W_{min}	Valor final do fator de inércia do algoritmo <i>Particle Swarm Optimization</i>
t_{max}	Número máximo de transições do algoritmo <i>Particle Swarm Optimization</i>
x_{min}	Limite mínimo da variável de uma partícula no algoritmo <i>Particle Swarm Optimization</i>
x_{max}	Limite máximo da variável de uma partícula no algoritmo <i>Particle Swarm Optimization</i>
v_{max}	Velocidade máxima de transição de uma partícula no algoritmo <i>Particle Swarm Optimization</i>
γ	Fator de ponderação para definição da velocidade máxima de transição de uma partícula no algoritmo <i>Particle Swarm Optimization</i>
μ^n	Fator de escala referente à diferença entre os limites máximo e mínimo da variável n no algoritmo <i>Basic Variable Neighborhood Search</i>
x_{max}^n	Limite máximo da variável n no algoritmo <i>Basic Variable Neighborhood Search</i>
x_{min}^n	Limite mínimo da variável n no algoritmo <i>Basic Variable Neighborhood Search</i>
α_i	Variável contínua compreendida entre 0 e 1 que ocupa a posição i do vetor solução utilizado internamente pelo algoritmo <i>Basic Variable Neighborhood Search</i>
x_i^n	Valor assumido pela variável n na posição i do vetor solução ao retornar para a dimensão original no algoritmo <i>Basic Variable Neighborhood Search</i>
N_k	Conjunto de estruturas de vizinhança exploradas pelo algoritmo <i>Basic Variable Neighborhood Search</i>
n_v	Limite máximo de variações para um mesmo parâmetro durante a etapa de busca local no algoritmo <i>Basic Variable Neighborhood Search</i>

n_s	Número de parâmetros de busca durante a etapa de busca local no algoritmo <i>Basic Variable Neighborhood Search</i>
$x'(i)$	Valor do parâmetro i do vetor solução x' utilizado na etapa de busca local do algoritmo <i>Basic Variable Neighborhood Search</i>
$\Delta x'$	Valor da variação a ser aplicada nos parâmetros do vetor solução na etapa de busca local do algoritmo <i>Basic Variable Neighborhood Search</i>
$z(i)$	Valor do parâmetro i do vetor solução z utilizado na etapa de busca local do algoritmo <i>Basic Variable Neighborhood Search</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	39
1.1	CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO	44
1.2	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	45
2	MODELO DE SENSIBILIDADE DE CORRENTE	47
2.1	MODELO DE SENSIBILIDADE DE CORRENTE NO SISTEMA MULTIMÁQUINAS	47
2.1.1	Corrente da Linha de Transmissão	47
2.1.2	Corrente Drenada pela Carga	49
2.1.3	Corrente Terminal do Gerador	49
2.2	COEFICIENTES DE SENSIBILIDADE DE CORRENTE	52
2.2.1	Coefficientes da Corrente da Linha de Transmissão	52
2.2.2	Coefficientes da Corrente Drenada pela Carga	53
2.2.3	Coefficientes da Corrente do Gerador Síncrono	54
2.3	BALANÇO NODAL DE CORRENTES	55
2.4	EQUAÇÕES DIFERENCIAIS DO MODELO DE SENSIBILIDADE DE CORRENTE	55
2.4.1	Tensão de Campo da Máquina Síncrona	55
2.4.2	Equações Eletromecânicas das Máquinas Síncronas	56
2.4.3	Tensão Interna da Máquina Síncrona	57
2.5	REPRESENTAÇÃO DO MSC NO DOMÍNIO DO TEMPO	58
2.6	CONCLUSÕES DO CAPÍTULO	60

3	INCLUSÃO DO FACTS TCSC NO MODELO DE SENSIBILIDADE DE CORRENTE	61
3.1	MODELO DE SENSIBILIDADE DE CORRENTE - FACTS TCSC	61
3.1.1	Representação do TCSC por Injeção de Corrente	61
3.1.2	Coefficientes de Sensibilidade de Corrente do TCSC	64
3.2	BALANÇO NODAL DE CORRENTES	66
3.2.1	Balanço Nodal de Correntes na Barra k	67
3.2.2	Balanço Nodal de Correntes na Barra m	68
3.3	REPRESENTAÇÃO DO MSC COM INCLUSÃO DO TCSC	69
3.4	CONCLUSÕES DO CAPÍTULO	71
4	INCLUSÃO DOS CONTROLADORES DE AMORTECIMENTO ESP E POD NO MSC	73
4.1	ESTABILIZADORES DE SISTEMAS DE POTÊNCIA (ESPs)	73
4.1.1	Equações Diferenciais do ESP	74
4.1.2	Representação do MSC com inclusão do ESP	77
4.2	POWER OSCILLATION DAMPING (POD)	79
4.2.1	Equações Diferenciais do POD	80
4.2.2	Representação do MSC com inclusão do TCSC-POD	84
4.3	REPRESENTAÇÃO DO MSC COM ATUAÇÃO DO ESP E TCSC-POD	87
4.4	CONCLUSÕES DO CAPÍTULO	89
5	MÉTODOS DE AJUSTE DOS PARÂMETROS DOS CONTROLADORES	91
5.1	DEFINIÇÃO DO PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO	91
5.1.1	Função Objetivo	93
5.1.2	Codificação	95
5.2	ALGORITMOS GENÉTICOS	96

5.2.1	Etapa de Seleção	97
5.2.2	Etapa de Recombinação ou Crossover	98
5.2.3	Etapa de Mutação	99
5.3	ALGORITMO PARTICLE SWARM OPTIMIZATION	99
5.4	BUSCA EM VIZINHANÇA VARIÁVEL BÁSICA	102
5.4.1	Codificação Contínua	103
5.4.2	Estruturas de Vizinhança	105
5.4.3	Busca Local	106
5.5	CONCLUSÕES DO CAPÍTULO	107
6	SIMULAÇÕES E RESULTADOS	109
6.1	SISTEMA SIMÉTRICO DE DUAS ÁREAS	110
6.1.1	Inclusão do TCSC	112
<i>6.1.1.1</i>	<i>Compensação ajustada em 10%</i>	<i>112</i>
<i>6.1.1.2</i>	<i>Compensação ajustada em 40%</i>	<i>113</i>
<i>6.1.1.3</i>	<i>Compensação ajustada em 70%</i>	<i>113</i>
<i>6.1.1.4</i>	<i>Compensação ajustada em 95%</i>	<i>114</i>
6.1.2	Inclusão dos ESPs e TCSC-POD	115
<i>6.1.2.1</i>	<i>Desempenho dos métodos de otimização</i>	<i>118</i>
<i>6.1.2.2</i>	<i>Análise da estabilidade a pequenas perturbações</i>	<i>119</i>
6.2	SISTEMA NEW ENGLAND	122
6.2.1	Inclusão dos ESPs e TCSC-POD	125
<i>6.2.1.1</i>	<i>Desempenho dos métodos de otimização</i>	<i>127</i>
<i>6.2.1.2</i>	<i>Análise da estabilidade a pequenas perturbações</i>	<i>129</i>
6.3	CONCLUSÕES DO CAPÍTULO	134

7	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	135
	REFERÊNCIAS	137
	ANEXO A - DADOS DOS SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA	145
	APÊNDICE A - ARTIGOS PUBLICADOS	149
	APÊNDICE B - LINEARIZAÇÃO DO FLUXO DE POTÊNCIA ATIVA ENTRE AS BARRAS <i>K</i> E <i>M</i>	153

1 INTRODUÇÃO

A energia elétrica é indispensável no cotidiano da vida moderna, seja para o funcionamento adequado de hospitais, indústrias, sistemas de comunicação ou para o uso doméstico. O emprego da energia elétrica está relacionado à facilitação das atividades humanas, promovendo conforto e atendendo às necessidades básicas da população. Para compreender melhor sua importância, basta que ocorra por algumas horas uma interrupção no fornecimento de energia elétrica, situação que acarreta transtornos e prejuízos diretos às unidades consumidoras.

Diante do exposto, torna-se necessário que os sistemas elétricos de potência (SEPs) operem de forma estável, garantindo que grandezas elétricas como tensão e frequência atendam a determinados padrões e interrupções no fornecimento de energia elétrica sejam evitadas. A estabilidade pode ser definida como a habilidade do SEP, operando inicialmente em equilíbrio sob condições normais, de recuperar um estado de equilíbrio operacional após sofrer uma perturbação (KUNDUR et al., 2004).

Neste contexto, o estudo da estabilidade em ângulo analisa a capacidade das máquinas síncronas geradoras que compõem o SEP de permanecerem em sincronismo (mesma velocidade) após a ocorrência de eventuais perturbações, as quais podem ser classificadas como grandes ou pequenas perturbações (ANDERSON; FOUAD, 2003; KUNDUR et al., 2004).

Uma falta em uma linha de transmissão ou ainda, a variação brusca na potência gerada e/ou consumida no SEP se caracterizam como grandes perturbações e são tratadas nos estudos de estabilidade transitória que envolve a análise de equações diferenciais não lineares (ANDERSON; FOUAD, 2003; KUNDUR et al., 2004).

O estudo da estabilidade a pequenas perturbações (estabilidade dinâmica), onde este trabalho se insere, considera pequenas variações de carga no SEP e engloba o estudo dos modos oscilatórios de baixa frequência que surgem devido ao alto carregamento e à existência de longas linhas de transmissão com altas indutâncias que acarretam em interligações eletricamente fracas. A atuação de reguladores automáticos de tensão (RATs) com altos ganhos e baixas constantes de tempo também contribuem para o surgimento dos modos oscilatórios (DEMELLO; CONCORDIA, 1969; LARSEN; SWANN, 1981; ANDERSON; FOUAD, 2003).

As oscilações eletromecânicas de baixa frequência podem ser classificadas de acordo com sua frequência natural não amortecida. O modo oscilatório local (frequências típicas entre 0,7 Hz e 2,0 Hz) está relacionado com oscilações entre geradores síncronos próximos, fisicamente ou eletricamente. O modo oscilatório interárea (frequências típicas entre 0,1 Hz e 0,8 Hz)

está relacionado com oscilações de grupos de geradores de uma área com grupos de geradores de outra área (LARSEN; SWANN, 1981; KLEIN; ROGERS; KUNDUR, 1991). Entretanto, verifica-se que as fronteiras se sobrepõem para alguns valores, portanto, o modo oscilatório deve ser analisado para determinação de seu tipo. Para este fim, os fatores de participação podem ser utilizados, pois através deles torna-se possível analisar quais geradores estão associados a cada modo oscilatório eletromecânico (KUNDUR, 1994).

Na análise da estabilidade em ângulo, a instabilidade é caracterizada quando, após uma perturbação, ocorrerem oscilações de amplitude crescente na velocidade angular do rotor dos geradores síncronos, que são causadas pela ausência de torque de amortecimento, ou ainda, pelo aumento no ângulo interno do rotor dos geradores síncronos pela falta de torque sincronizante, sendo que a ausência de torque de amortecimento é o principal problema encontrado na análise da estabilidade a pequenas perturbações dos SEPs (KUNDUR, 1994).

No intuito de fornecer amortecimento às oscilações eletromecânicas de baixa frequência foi apresentado o conceito dos Estabilizadores de Sistemas de Potência (ESPs) (DEMELLO; CONCORDIA, 1969; LARSEN; SWANN, 1981). Este controlador é adicionado à malha de controle dos RATs e atua no controle da tensão terminal de saída das máquinas síncronas. Quando seus parâmetros (constantes de tempo e ganhos) são ajustados de maneira conveniente, o controlador é capaz de introduzir, principalmente, amortecimento adicional às oscilações de modo local. Entretanto, em alguns casos, sua influência sobre o amortecimento dos modos do tipo interárea pode ser insuficiente (CAI; ERLICH, 2005).

As restrições econômicas e ambientais também são questões relevantes que devem ser consideradas no planejamento do SEP. Em um cenário de crescimento constante na demanda por energia elétrica, faz-se necessário o aumento da geração de energia e na capacidade de transmissão do sistema. Entretanto, a construção de unidades geradoras e linhas de transmissão possuem um alto custo de implementação. Além disso, a pressão da sociedade para a minimização dos impactos ambientais tem promovido o atraso e a inviabilização de obras no setor de energia.

Neste cenário adverso, os dispositivos *Flexible AC Transmission Systems* (FACTS) surgem como uma boa alternativa, pois eles possibilitam o aumento da capacidade de transmissão de energia elétrica em linhas de transmissão já existentes, adiando a necessidade de construção de novas linhas. Este fato é decorrente da capacidade dos FACTS em controlar e direcionar o fluxo de potência (WATANABE et al., 1998; HINGORANI; GYUGYI, 1999; SONG; JOHNS, 1999; PASERBA, 2003).

Na literatura encontram-se estudos que apontam a potencialidade dos FACTS no

amortecimento das oscilações eletromecânicas dos SEPs. Desde que controladores *Power Oscillation Damping* (POD) estejam acoplados às suas malhas de controle, este conjunto FACTS-POD é capaz de inserir, de maneira eficaz, amortecimento às oscilações eletromecânicas de baixa frequência do tipo interárea (CAI; ERLICH, 2005; SIMOES et al., 2009; VALLE; ARAUJO, 2015).

Neste trabalho é analisada a atuação do dispositivo FACTS *Thyristor Controlled Series Capacitor* (TCSC) quanto ao amortecimento das oscilações eletromecânicas. Dessa forma, um controlador POD é acoplado à malha do dispositivo FACTS, originando o conjunto TCSC-POD, com o objetivo de inserir amortecimento adicional aos modos oscilatórios do tipo interárea.

O TCSC é um compensador série composto por uma capacitância fixa em paralelo com um reator controlado a tiristores associados em antiparalelo, cujo princípio de operação se baseia na compensação da reatância da linha de transmissão em que se encontra instalado, aumentando assim a capacidade de transferência de potência (HINGORANI; GYUGYI, 1999; SONG; JOHNS, 1999; DEL ROSSO; CANIZARES; DONA, 2003; FURINI; ARAUJO, 2008).

A escolha do TCSC é justificada pela extensa base de dados presente na literatura, além de ser utilizado em SEPs de diferentes países, com o objetivo de inserir amortecimento às oscilações eletromecânicas do tipo interárea. Para este fim, o TCSC já foi instalado em SEPs com dimensões continentais, como no Brasil (GAMA, 1999; GAMA et al., 2000) e na China (YUE; BAILU, 2005).

Para que os controladores ESPs e TCSC-POD insiram amortecimento adicional aos modos oscilatórios de interesse, seus parâmetros devem ser ajustados de maneira conveniente. Na literatura são encontradas técnicas clássicas que são capazes de fornecer ajustes de boa qualidade, entretanto algumas destas técnicas apresentam certas desvantagens como o Método dos Resíduos (YANG; LIU; MCCALLEY, 1998; VALLE, 2014; VALLE; ARAUJO, 2015) que não realiza o ajuste de maneira coordenada, prejudicando sua aplicação em sistemas de maior complexidade e o *Decentralized Modal Control* (DMC) (CHEN; HSU, 1987; ARAUJO; ZANETA, 2001; FURINI; PEREIRA; ARAUJO, 2011; VALLE, 2014), que durante seu desenvolvimento gera um conjunto de equações altamente não lineares, fazendo com que o DMC necessite de um método auxiliar que forneça um ponto de partida de qualidade para que seja possível alcançar a convergência durante o processo iterativo. Técnicas baseadas em inteligência artificial como lógica *fuzzy* (HAMEED; DAS; PANT, 2008; HASSAN et al., 2012) e redes neurais artificiais (HE; MALIK, 1997; MISHRA et al., 2002; CHEN et al., 2009) também já foram utilizadas com sucesso no ajuste de controladores de amortecimento.

No decorrer dos anos, métodos estocásticos, como as meta-heurísticas, ganharam destaque

no ajuste coordenado dos parâmetros dos controladores de amortecimento, pois são capazes de encontrar soluções factíveis sem conhecimento prévio do problema e independente do número de controladores ou complexidade do sistema, fazendo-se uso de tempos computacionais razoáveis. Dentre os métodos utilizados é possível citar o Algoritmo Genético (AG) (HASSAN et al., 2014; GAMINO et al., 2016a), sua variação Algoritmo Genético de Chu-Beasley (AGCB) (FORTES; ARAUJO; MACEDO, 2016), *Artificial Bee Colony* (ABC) (ESLAMI; SHAREEF; KHAJEHZADEH, 2013; SHAHGHOLIAN et al., 2016), *Bacterial Foraging Optimization* (BFO) (ALI; ABD-ELAZIM, 2012), *Bat Algorithm* (BA) (PERES et al., 2015), sua variação *Novel Bat Algorithm* (NBA) (MIOTTO et al., 2018), *Cuckoo Search* (CS) (ABD-ELAZIM; ALI, 2016; CHITARA et al., 2018), *Simulated Annealing* (SA) (ABIDO, 2000) e o algoritmo *Particle Swarm Optimization* (PSO) (SHAYEGHI; SAFARI; SHAYANFAR, 2010; ESLAMI et al., 2012; HASANVAND et al., 2016; MENEZES; ARAUJO; VALLE, 2016). Em Gamino et al. (2016b) é realizada uma comparação entre o PSO e o Método dos Resíduos, que evidencia as vantagens da meta-heurística frente ao método clássico no ajuste coordenado dos controladores.

Neste trabalho é proposto a utilização de um algoritmo baseado na meta-heurística *Basic Variable Neighborhood Search* (BVNS) no ajuste dos parâmetros dos controladores suplementares de amortecimento. Algoritmos do tipo busca em vizinhança variável (VNS) são, geralmente, técnicas simples que exploram de maneira eficiente a região de busca através de trocas sistemáticas nas estruturas de vizinhança atreladas a uma etapa de busca local (MLADENOVIĆ; HANSEN, 1997).

Algoritmos de busca em vizinhança variável têm recebido inúmeras aplicações e apresentado resultados de ótima qualidade em diversos problemas operacionais, como por exemplo, roteamento de veículos, agendamento e sequenciamento de tarefas, mercado financeiro, além do problema do caixeiro viajante e aplicações que podem ser modeladas desta forma, entre outras (SILVA; URRUTIA, 2010; SCHNEIDER; STENGER; HOF, 2015; LEBBAH; LEBBAH, 2015; CADI et al., 2015).

Entretanto, o algoritmo BVNS ainda é pouco utilizado na otimização de sistemas elétricos de potência, sendo que na análise da estabilidade a pequenas perturbações e no ajuste de controladores suplementares de amortecimento não se encontravam aplicações até o momento em que teve início a pesquisa desenvolvida neste trabalho, motivando assim, sua realização.

Para efetuar os estudos propostos, é necessário um modelo para o SEP. Além disso, deseja-se que este modelo seja o mais próximo possível da realidade. No caso da estabilidade a pequenas perturbações, se consideradas apenas perturbações suficientemente pequenas em torno de um ponto de equilíbrio, o modelo utilizado pode ser linear.

O Modelo de Heffron-Phillips (MHP) (HEFFRON; PHILLIPS, 1952) é amplamente difundido na literatura no que diz respeito à análise da estabilidade a pequenas perturbações para sistemas do tipo Máquina Barra Infinita (MBI), que considera um gerador síncrono conectado a uma barra infinita através de uma impedância que representa a linha de transmissão. O barramento infinito é composto por uma máquina de inércia infinita com capacidade de gerar potência ilimitadamente, mantendo a frequência e a tensão constantes (HEFFRON; PHILLIPS, 1952; DEMELLO; CONCORDIA, 1969; KUNDUR, 1994; ANDERSON; FOUAD, 2003).

Diante da necessidade de tornar o modelo mais próximo dos SEPs reais, o MHP recebeu uma expansão para sistemas multimáquinas (MOUSSA; YU, 1974). Entretanto, o modelo apresenta desvantagens como a necessidade da representação do barramento infinito e a eliminação do sistema externo de transmissão, dificultando a consideração de dispositivos FACTS na modelagem, que geralmente são instalados no sistema de transmissão (MOUSSA; YU, 1974; WATANABE et al., 1998; SONG; JOHNS, 1999).

O Modelo de Sensibilidade de Potência (MSP) (DECKMANN; DA COSTA, 1994) é baseado no balanço nodal de potências que, por sua vez, compõem as equações algébricas do modelo, possibilitando a preservação da integridade do sistema de transmissão do SEP (valor absoluto das tensões nas barras e ângulo das tensões nas barras). Este modelo linear favorece a análise da estabilidade a pequenas perturbações considerando a inclusão de controladores adicionais e demais dispositivos modelados por injeção de potência (DECKMANN; DA COSTA, 1994; VALLE, 2014; MENEZES, 2014).

O Modelo de Sensibilidade de Corrente (MSC) é outra alternativa dentre os modelos lineares para estudo da estabilidade a pequenas perturbações em sistemas multimáquinas que preservam a integridade do sistema de transmissão. O MSC é baseado na lei das correntes nos nós de Kirchhoff. Dessa forma, as equações do balanço nodal de correntes em todas as barras do SEP representam as equações algébricas do modelo. A princípio, o conceito central do modelo foi apresentado em Sauer e Pai (1998), posteriormente, considerando pequenas alterações, o modelo foi desenvolvido e apresentado em Pádua Júnior et al. (2013) e Takahashi et al. (2013).

A vantagem de se utilizar o MSC é que diversos dispositivos do SEP já são modelados por injeção de corrente, como por exemplo, os dispositivos FACTS (FREITAS; MORELATO, 2001; SON; LASSETER, 2004). Além disso, é possível encontrar na literatura modelos baseados em corrente que apresentam maior velocidade na convergência do fluxo de potência em comparação com outros modelos (VINKOVIC; MIHALIC, 2008; VINKOVIC; MIHALIC, 2009).

O objetivo principal deste trabalho é ajustar os parâmetros dos controladores de amortecimento ESP e TCSC-POD com uma técnica adequada, a fim de garantir a estabilidade

a pequenas perturbações e níveis confiáveis de amortecimento ao SEP. Para tal, é realizada a dedução dos coeficientes de sensibilidade de corrente do TCSC, a partir de seu modelo por injeção de corrente, para incorporação do dispositivo ao MSC. Neste trabalho é proposto um algoritmo BVNS que trabalha com variáveis contínuas representando as constantes de tempo e ganhos dos controladores, além de estruturas de vizinhança baseadas em trocas de posições dos valores armazenados no vetor solução e uma etapa de busca local utilizando o conceito de sensibilidade. Os resultados apresentados pelo BVNS são comparados com os resultados obtidos por um AG e um PSO, por se tratarem de meta-heurísticas amplamente difundidas e que possuem desempenho destacado no ajuste de controladores de amortecimento.

Para a análise da estabilidade a pequenas perturbações, dois sistemas testes são simulados. O primeiro sistema é conhecido como Simétrico de Duas Áreas (SAUER; PAI, 1998), trata-se de um sistema de pequeno porte, que possui dois modos oscilatórios locais estáveis e um modo interárea instável. O segundo sistema recebe o nome de *New England* (ARAUJO; ZANETA, 2001), trata-se de um sistema de maior complexidade, que apresenta modos oscilatórios instáveis do tipo local e interárea, além de modos locais adicionais fracamente amortecidos.

A modelagem dos controladores ESPs e TCSC-POD e sua representação pelo MSC, assim como as técnicas de otimização aplicadas neste trabalho foram implementadas computacionalmente utilizando-se o software MATLAB[®] a partir de um computador com processador Intel Core i5-3300 que dispõe de 8 GB de memória RAM.

1.1 CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO

As principais contribuições do trabalho são:

- Deduzir os coeficientes de sensibilidade de corrente do TCSC, a partir de seu modelo por injeção de corrente, para incorporação do dispositivo ao MSC, possibilitando a análise da estabilidade a pequenas perturbações considerando a influência do controlador;
- Propor a utilização de um algoritmo BVNS no ajuste coordenado dos parâmetros dos controladores suplementares de amortecimento, adaptando o método para o tipo de problema proposto;
- Implementar computacionalmente e analisar a eficiência dos métodos de otimização BVNS, AG e PSO, comparando seus desempenhos no ajuste dos controladores de amortecimento ESP e TCSC-POD.

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Quanto à apresentação do texto, o trabalho está dividido na sequência:

No Capítulo 2, a dedução do Modelo de Sensibilidade de Corrente é apresentada, sendo demonstrados os coeficientes de sensibilidade de corrente real e imaginária. Na continuação, são apresentadas as equações algébricas e diferenciais do modelo, assim como a sua representação no domínio do tempo na forma matricial.

No Capítulo 3, os coeficientes de sensibilidade de corrente real e corrente imaginária referentes ao FACTS TCSC são deduzidos, a partir do modelo de injeção de corrente do dispositivo. Ainda neste Capítulo, realiza-se o balanço de correntes nas barras de interesse considerando-se a atuação do controlador FACTS. O modelo dinâmico do TCSC é então incorporado ao MSC a partir de modificações na representação no domínio do tempo.

No Capítulo 4, os controladores ESP e conjunto TCSC-POD são apresentados e modelados para incorporação ao MSC. No primeiro momento, modela-se o ESP obtendo-se as variáveis de estado que representam seu comportamento dinâmico, a seguir é apresentada sua representação no domínio do tempo levando-se em consideração sua atuação de forma isolada. Na sequência, o mesmo procedimento é repetido para o conjunto TCSC-POD. Por fim, realiza-se a representação no domínio do tempo levando-se em consideração a atuação simultânea do ESP e do TCSC-POD.

No Capítulo 5, o problema de otimização, referente ao ajuste dos controladores suplementares de amortecimento, é formalmente definido. Na sequência, o algoritmo BVNS proposto é apresentado, assim como o AG e o algoritmo PSO utilizados para comparação. A codificação da proposta de solução, a função objetivo a ser minimizada e as restrições das variáveis também são discutidas.

No Capítulo 6, simulações são efetuadas, nas quais a análise da estabilidade a pequenas perturbações é realizada para os dois sistemas testes. Inicialmente, os sistemas são avaliados sem a atuação de qualquer controlador. Na sequência, os controladores suplementares de amortecimento são inseridos aos sistemas com o objetivo de garantir sua estabilidade, além de níveis desejados de amortecimento. Os desempenhos das técnicas de ajuste são analisados a fim de concluir sobre o método que melhor se adapta ao tipo de problema proposto.

No Capítulo 7, encontram-se as principais conclusões deste trabalho e as sugestões para trabalhos futuros. Para complementar o trabalho, seguem o Anexo e os Apêndices.

2 MODELO DE SENSIBILIDADE DE CORRENTE

Neste Capítulo é apresentada a dedução do MSC para sistemas multimáquinas (PÁDUA JÚNIOR et al., 2013; TAKAHASHI et al., 2013; TAKAHASHI, 2013; PÁDUA JÚNIOR, 2014). Para tal, são deduzidas as equações da corrente terminal do gerador conectado a uma barra k qualquer, da corrente em uma linha de transmissão que interliga duas barras genéricas k e m , além da corrente drenada por uma carga genérica na barra k .

Para cada análise, as correntes são decompostas em componentes real e imaginária, depois são linearizadas através da expansão da série de Taylor (desprezando-se os termos de ordem superior ou igual a dois), obtendo os coeficientes de sensibilidade de corrente de eixo real e imaginário. Ainda neste Capítulo são apresentadas as equações diferenciais do MSC, assim como a representação do modelo no domínio do tempo, que se faz necessária para a realização da análise da estabilidade a pequenas perturbações posteriormente.

2.1 MODELO DE SENSIBILIDADE DE CORRENTE NO SISTEMA MULTIMÁQUINAS

Na dedução do MSC são consideradas condições de operação simétricas e equilibradas, além disso, o gerador síncrono é representado por três enrolamentos no estator (fases a , b e c) e um enrolamento de campo (fd, do inglês "*field*") no rotor.

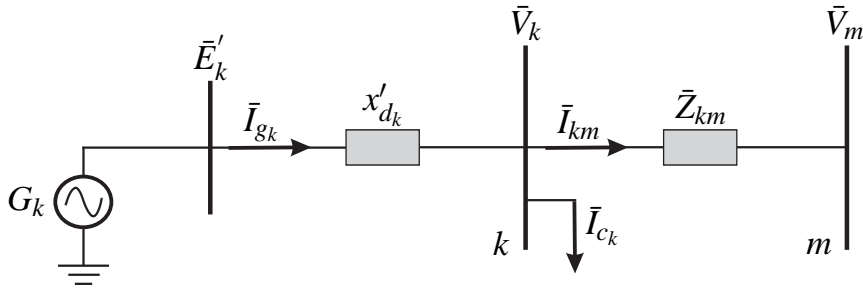
Por conveniência são definidos dois sistemas de coordenadas, o primeiro é utilizado para representar as grandezas do estator (coordenadas estáticas) sendo conhecido como sistema de coordenadas real e imaginário (r,m), o segundo sistema representa as grandezas do rotor (coordenadas rotativas) sendo conhecido como eixo direto e eixo em quadratura (d,q).

O diagrama unifilar mostrado na Figura 1 é utilizado na dedução do MSC, onde são apresentadas duas barras genéricas do SEP, sendo que na barra k encontram-se conectados um gerador síncrono (G_k) representado por sua tensão interna (\vec{E}'_k) em série com a reatância transitória de eixo direto (x'_{dk}) e uma linha de transmissão que interliga as barras k e m com impedância de linha \vec{Z}_{km} . As correntes presentes no diagrama representam: a corrente que flui através da linha de transmissão (\vec{I}_{km}), a corrente drenada pela carga conectada à barra k (\vec{I}_{Ck}) e a corrente terminal do gerador síncrono (\vec{I}_{gk}). Por fim, \vec{V}_k e \vec{V}_m são as tensões nas barras k e m .

2.1.1 Corrente da Linha de Transmissão

A impedância da linha de transmissão e as tensões nas barras k e m , anteriormente descritas, são definidas nas equações (1)-(3), onde r_{km} e x_{km} representam a resistência e a reatância da

Figura 1 - Barras genéricas do sistema elétrico de potência.



Fonte: Adaptado de Takahashi (2013).

linha de transmissão que interliga as barras k e m , enquanto θ_k e θ_m representam o ângulo das tensões nas barras k e m , por fim, j é a unidade imaginária associada aos números complexos.

$$\bar{Z}_{km} = r_{km} + jx_{km} \quad (1)$$

$$\bar{V}_k = V_k (\cos \theta_k + j \sen \theta_k) \quad (2)$$

$$\bar{V}_m = V_m (\cos \theta_m + j \sen \theta_m) \quad (3)$$

De acordo com o diagrama unifilar mostrado na Figura 1, a corrente na linha de transmissão pode ser dada pela equação (4).

$$\bar{I}_{km} = \frac{\bar{V}_k - \bar{V}_m}{\bar{Z}_{km}} \quad (4)$$

Substituindo as equações (1)-(3) na equação (4), obtém-se a equação (5).

$$\bar{I}_{km} = \frac{V_k (\cos \theta_k + j \sen \theta_k) - V_m (\cos \theta_m + j \sen \theta_m)}{r_{km} + jx_{km}} \quad (5)$$

A partir da equação (5) são obtidas as componentes de eixo real (I_{km_r}) e imaginário (I_{km_m}) da corrente que flui através da linha de transmissão, conforme mostrado nas equações (6) e (7).

$$I_{km_r} = \frac{r_{km} (V_k \cos \theta_k - V_m \cos \theta_m) + x_{km} (V_k \sen \theta_k - V_m \sen \theta_m)}{|Z_{km}|^2} \quad (6)$$

$$I_{km_m} = \frac{r_{km} (V_k \sen \theta_k - V_m \sen \theta_m) - x_{km} (V_k \cos \theta_k - V_m \cos \theta_m)}{|Z_{km}|^2} \quad (7)$$

Nas equações (6) e (7), $|Z_{km}|$ é o módulo do número complexo associado à impedância da linha de transmissão, sendo válida a expressão apresentada na equação (8).

$$|Z_{km}|^2 = r_{km}^2 + x_{km}^2 \quad (8)$$

2.1.2 Corrente Drenada pela Carga

A potência complexa (S_{c_k}) de uma eventual carga conectada à barra k é definida pela equação (9), onde P_{c_k} e Q_{c_k} são as potências ativa e reativa da carga, respectivamente. A corrente drenada pela carga (\bar{I}_{c_k}) pode ser expressa pela equação (10).

$$S_{c_k} = P_{c_k} + jQ_{c_k} \quad (9)$$

$$\bar{I}_{c_k} = \left(\frac{S_{c_k}}{\bar{V}_k} \right)^* \quad (10)$$

Substituindo as equações (2) e (9) em (10), torna-se possível obter as componentes real ($I_{c_{r_k}}$) e imaginária ($I_{c_{m_k}}$) da corrente drenada pela carga, conforme equações (11) e (12).

$$I_{c_{r_k}} = \frac{(P_{c_k} \cos \theta_k + Q_{c_k} \sin \theta_k)}{V_k} \quad (11)$$

$$I_{c_{m_k}} = \frac{(P_{c_k} \sin \theta_k - Q_{c_k} \cos \theta_k)}{V_k} \quad (12)$$

2.1.3 Corrente Terminal do Gerador

A tensão interna do gerador e a tensão na barra k podem ser expressas em suas componentes de eixo real (E'_{r_k} e V_{r_k}) e imaginário (E'_{m_k} e V_{m_k}) conforme apresentado nas equações (13) e (14).

$$\bar{E}'_k = E'_{r_k} + jE'_{m_k} \quad (13)$$

$$\bar{V}_k = V_{r_k} + jV_{m_k} \quad (14)$$

Por inspeção do diagrama unifilar da Figura 1, a corrente terminal do gerador síncrono (\bar{I}_{g_k}) pode ser expressa conforme equação (15).

$$\bar{I}_{g_k} = \frac{\bar{E}'_k - \bar{V}_k}{jX'_{d_k}} = I_{g_{r_k}} + jI_{g_{m_k}} \quad (15)$$

A equação (16) pode ser expressa após a decomposição, nas componentes de eixo real e imaginário, da equação resultante da substituição das equações (13) e (14) em (15).

$$\begin{bmatrix} V_{r_k} \\ V_{m_k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E'_{r_k} \\ E'_{m_k} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & x'_{d_k} \\ -x'_{d_k} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{g_{r_k}} \\ I_{g_{m_k}} \end{bmatrix} \quad (16)$$

A transformação do sistema de coordenadas (r,m) para (d,q) pode ser realizada a partir da matriz de transformação T_k apresentada na equação (17), sua matriz inversa é mostrada na equação (18), sendo útil para retornar ao sistema de coordenadas (r,m) (ANDERSON; FOUAD, 2003). Nas equações (17) e (18), δ_k é o ângulo interno do k -ésimo gerador síncrono.

$$T_k = \begin{bmatrix} \text{sen } \delta_k & -\text{cos } \delta_k \\ \text{cos } \delta_k & \text{sen } \delta_k \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$T_k^{-1} = \begin{bmatrix} \text{sen } \delta_k & \text{cos } \delta_k \\ -\text{cos } \delta_k & \text{sen } \delta_k \end{bmatrix} \quad (18)$$

Multiplicando os termos da equação (16) pela matriz de transformação apresentada na equação (17) e realizando as devidas substituições, torna-se possível obter a relação matricial apresentada na equação (19), onde V_{d_k} e V_{q_k} representam as componentes de eixo direto e em quadratura da tensão na barra k , enquanto E'_{d_k} e E'_{q_k} representam as componentes de eixo direto e em quadratura da tensão interna do gerador na barra k , por fim, $I_{g_{d_k}}$ e $I_{g_{q_k}}$ representam as componentes de eixo direto e em quadratura da corrente terminal do gerador na barra k .

$$\begin{bmatrix} V_{d_k} \\ V_{q_k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E'_{d_k} \\ E'_{q_k} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & x'_{d_k} \\ -x'_{d_k} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{g_{d_k}} \\ I_{g_{q_k}} \end{bmatrix} \quad (19)$$

Define-se então, uma tensão em fase com o eixo em quadratura da máquina síncrona (\bar{E}_{a_k}), que se encontra expressa na equação (20), onde x_{q_k} é a reatância síncrona de eixo em quadratura do gerador (ANDERSON; FOUAD, 2003; KUNDUR, 1994).

$$\bar{E}_{a_k} = \bar{V}_k + j\bar{I}_{g_k}x_{q_k} = E_{a_k}(\text{cos } \delta_k + j \text{sen } \delta_k) \quad (20)$$

Reescrevendo a equação (20) na forma matricial e aplicando a matriz de transformação da equação (17), obtém-se a relação da equação (21).

$$\begin{bmatrix} V_{d_k} \\ V_{q_k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ E_{a_k} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & x_{q_k} \\ -x_{q_k} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{g_{d_k}} \\ I_{g_{q_k}} \end{bmatrix} \quad (21)$$

As equações (22) e (23) são obtidas a partir das relações matriciais apresentadas nas equações (21) e (19), respectivamente.

$$V_{d_k} = x_{q_k}I_{g_{q_k}} \quad (22)$$

$$V_{qk} = E'_{qk} - x'_{dk} I_{gd_k} \quad (23)$$

Rearranjando as equações (22) e (23), são obtidas as componentes de eixo direto e em quadratura da corrente terminal do gerador que estão expressas nas equações (24) e (25).

$$I_{gd_k} = \frac{E'_{qk} - V_{qk}}{x'_{dk}} \quad (24)$$

$$I_{gq_k} = \frac{V_{dk}}{x_{qk}} \quad (25)$$

Aplicando-se a matriz de transformação inversa da equação (18) na representação matricial das equações (24) e (25), conforme apresentado na equação (26), torna-se possível obter estas equações em suas componentes real e imaginária, expressas em (27) e (28), respectivamente.

$$\begin{bmatrix} I_{gr_k} \\ I_{gm_k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \delta_k & \cos \delta_k \\ -\cos \delta_k & \sin \delta_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{E'_{qk} - V_{qk}}{x'_{dk}} \\ \frac{V_{dk}}{x_{qk}} \end{bmatrix} \quad (26)$$

$$I_{gr_k} = \frac{1}{x'_{dk}} E'_{qk} \sin \delta_k - \frac{1}{x'_{dk}} V_{qk} \sin \delta_k + \frac{1}{x_{qk}} V_{dk} \cos \delta_k \quad (27)$$

$$I_{gm_k} = -\frac{1}{x'_{dk}} E'_{qk} \cos \delta_k + \frac{1}{x'_{dk}} V_{qk} \cos \delta_k + \frac{1}{x_{qk}} V_{dk} \sin \delta_k \quad (28)$$

Igualando as equações (2) e (14) e, na sequência, aplicando a matriz de transformação da equação (17), torna-se possível obter as relações expressas nas equações (29) e (30).

$$V_{dk} = V_k \sin (\delta_k - \theta_k) \quad (29)$$

$$V_{qk} = V_k \cos (\delta_k - \theta_k) \quad (30)$$

Substituindo as equações (29) e (30) nas equações (27) e (28), obtêm-se finalmente as equações (31) e (32) das componentes de eixo real (I_{gr_k}) e imaginário (I_{gm_k}) da corrente terminal do gerador nas variáveis desejadas para a dedução dos coeficientes de sensibilidade de corrente.

$$I_{gr_k} = \frac{1}{x'_{dk}} E'_{qk} \sin \delta_k - \frac{1}{x'_{dk}} V_k \cos (\delta_k - \theta_k) \sin \delta_k + \frac{1}{x_{qk}} V_k \sin (\delta_k - \theta_k) \cos \delta_k \quad (31)$$

$$I_{gm_k} = -\frac{1}{x'_{dk}} E'_{qk} \cos \delta_k + \frac{1}{x'_{dk}} V_k \cos (\delta_k - \theta_k) \cos \delta_k + \frac{1}{x_{qk}} V_k \sin (\delta_k - \theta_k) \sin \delta_k \quad (32)$$

2.2 COEFICIENTES DE SENSIBILIDADE DE CORRENTE

Os coeficientes de sensibilidade de corrente que compõem o MSC são obtidos a partir da linearização das expressões das correntes, nas componentes de eixo real e imaginário, apresentadas anteriormente nas equações (6), (7), (11), (12), (31) e (32). A linearização é realizada através da expansão da série de Taylor, desprezando-se os termos de ordem superior ou igual a dois e considerando pequenas variações em torno de um ponto de equilíbrio (Δ).

2.2.1 Coeficientes da Corrente da Linha de Transmissão

Os coeficientes de sensibilidade de corrente da linha de transmissão são obtidos através da linearização das equações (6) e (7), sendo expressos nos conjuntos de equações (33) e (34).

$$\Delta I_{km_r} = R1_{km}\Delta V_k + R2_{km}\Delta\theta_k + R3_{km}\Delta V_m + R4_{km}\Delta\theta_m \quad (33a)$$

$$R1_{km} = \frac{\partial I_{km_r}}{\partial V_k} = \frac{1}{|Z_{km}|^2} (r_{km} \cos \theta_k + x_{km} \sen \theta_k) \quad (33b)$$

$$R2_{km} = \frac{\partial I_{km_r}}{\partial \theta_k} = - \left(\frac{V_k}{|Z_{km}|^2} \right) (r_{km} \sen \theta_k - x_{km} \cos \theta_k) \quad (33c)$$

$$R3_{km} = \frac{\partial I_{km_r}}{\partial V_m} = - \frac{1}{|Z_{km}|^2} (r_{km} \cos \theta_m + x_{km} \sen \theta_m) \quad (33d)$$

$$R4_{km} = \frac{\partial I_{km_r}}{\partial \theta_m} = \left(\frac{V_m}{|Z_{km}|^2} \right) (r_{km} \sen \theta_m - x_{km} \cos \theta_m) \quad (33e)$$

$$\Delta I_{km_m} = M1_{km}\Delta V_k + M2_{km}\Delta\theta_k + M3_{km}\Delta V_m + M4_{km}\Delta\theta_m \quad (34a)$$

$$M1_{km} = \frac{\partial I_{km_m}}{\partial V_k} = \frac{1}{|Z_{km}|^2} (r_{km} \sen \theta_k - x_{km} \cos \theta_k) \quad (34b)$$

$$M2_{km} = \frac{\partial I_{km_m}}{\partial \theta_k} = \left(\frac{V_k}{|Z_{km}|^2} \right) (r_{km} \cos \theta_k + x_{km} \sen \theta_k) \quad (34c)$$

$$M3_{km} = \frac{\partial I_{km_m}}{\partial V_m} = - \frac{1}{|Z_{km}|^2} (r_{km} \sen \theta_m - x_{km} \cos \theta_m) \quad (34d)$$

$$M4_{km} = \frac{\partial I_{km_m}}{\partial \theta_m} = - \left(\frac{V_m}{|Z_{km}|^2} \right) (r_{km} \cos \theta_m + x_{km} \sen \theta_m) \quad (34e)$$

Nas equações (33) e (34), os coeficientes de sensibilidade de corrente da componente real da corrente que flui na linha de transmissão são $R1_{km}$, $R2_{km}$, $R3_{km}$ e $R4_{km}$, enquanto os coeficientes de sensibilidade de corrente da componente imaginária são $M1_{km}$, $M2_{km}$, $M3_{km}$ e $M4_{km}$.

2.2.2 Coeficientes da Corrente Drenada pela Carga

Os coeficientes de sensibilidade de corrente com relação à carga conectada na barra k são obtidos através da linearização das equações (11) e (12), sendo expressos nos conjuntos de equações (35) e (36). $R1_{c_k}$, $R2_{c_k}$, $R3_{c_k}$ e $R4_{c_k}$ são os coeficientes de sensibilidade de corrente da componente real da corrente drenada pela carga, enquanto os coeficientes de sensibilidade de corrente da componente imaginária são representados por $M1_{c_k}$, $M2_{c_k}$, $M3_{c_k}$ e $M4_{c_k}$.

$$\Delta I_{c_{rk}} = R1_{c_k} \Delta V_k + R2_{c_k} \Delta \theta_k + R3_{c_k} \Delta P_{c_k} + R4_{c_k} \Delta Q_{c_k} \quad (35a)$$

$$R1_{c_k} = \frac{\partial I_{c_{rk}}}{\partial V_k} = - \left(\frac{1}{V_k^2} \right) (P_{c_k} \cos \theta_k + Q_{c_k} \sin \theta_k) \quad (35b)$$

$$R2_{c_k} = \frac{\partial I_{c_{rk}}}{\partial \theta_k} = - \left(\frac{1}{V_k} \right) (P_{c_k} \sin \theta_k - Q_{c_k} \cos \theta_k) \quad (35c)$$

$$R3_{c_k} = \frac{\partial I_{c_{rk}}}{\partial P_{c_k}} = \frac{1}{V_k} \cos \theta_k \quad (35d)$$

$$R4_{c_k} = \frac{\partial I_{c_{rk}}}{\partial Q_{c_k}} = \frac{1}{V_k} \sin \theta_k \quad (35e)$$

$$\Delta I_{c_{mk}} = M1_{c_k} \Delta V_k + M2_{c_k} \Delta \theta_k + M3_{c_k} \Delta P_{c_k} + M4_{c_k} \Delta Q_{c_k} \quad (36a)$$

$$M1_{c_k} = \frac{\partial I_{c_{mk}}}{\partial V_k} = - \left(\frac{1}{V_k^2} \right) (P_{c_k} \sin \theta_k - Q_{c_k} \cos \theta_k) \quad (36b)$$

$$M2_{c_k} = \frac{\partial I_{c_{mk}}}{\partial \theta_k} = \frac{1}{V_k} (P_{c_k} \cos \theta_k + Q_{c_k} \sin \theta_k) \quad (36c)$$

$$M3_{c_k} = \frac{\partial I_{c_{mk}}}{\partial P_{c_k}} = \frac{1}{V_k} \sin \theta_k \quad (36d)$$

$$M4_{c_k} = \frac{\partial I_{c_{mk}}}{\partial Q_{c_k}} = - \frac{1}{V_k} \cos \theta_k \quad (36e)$$

2.2.3 Coeficientes da Corrente do Gerador Síncrono

Os coeficientes de sensibilidade de corrente do gerador síncrono são obtidos através da linearização das equações (31) e (32), sendo expressos nos conjuntos de equações (37) e (38).

$$\Delta I_{gr_k} = R1_{gk} \Delta E'_{qk} + R2_{gk} \Delta \delta_k + R3_{gk} \Delta V_k + R4_{gk} \Delta \theta_k \quad (37a)$$

$$R1_{gk} = \frac{\partial I_{gr_k}}{\partial E'_{qk}} = \frac{1}{x'_{dk}} \text{sen } \delta_k \quad (37b)$$

$$R2_{gk} = \frac{\partial I_{gr_k}}{\partial \delta_k} = \frac{1}{x'_{dk}} E'_{qk} \cos \delta_k + \left(\frac{1}{x_{qk}} - \frac{1}{x'_{dk}} \right) V_k \cos (2\delta_k - \theta_k) \quad (37c)$$

$$R3_{gk} = \frac{\partial I_{gr_k}}{\partial V_k} = -\frac{1}{x'_{dk}} \cos (\delta_k - \theta_k) \text{sen } \delta_k + \frac{1}{x_{qk}} \text{sen } (\delta_k - \theta_k) \cos \delta_k \quad (37d)$$

$$R4_{gk} = \frac{\partial I_{gr_k}}{\partial \theta_k} = -\frac{1}{x'_{dk}} V_k \text{sen } (\delta_k - \theta_k) \text{sen } \delta_k - \frac{1}{x_{qk}} V_k \cos (\delta_k - \theta_k) \cos \delta_k \quad (37e)$$

$$\Delta I_{gm_k} = M1_{gk} \Delta E'_{qk} + M2_{gk} \Delta \delta_k + M3_{gk} \Delta V_k + M4_{gk} \Delta \theta_k \quad (38a)$$

$$M1_{gk} = \frac{\partial I_{gm_k}}{\partial E'_{qk}} = -\frac{1}{x'_{dk}} \cos \delta_k \quad (38b)$$

$$M2_{gk} = \frac{\partial I_{gm_k}}{\partial \delta_k} = \frac{1}{x'_{dk}} E'_{qk} \text{sen } \delta_k + \left(\frac{1}{x_{qk}} - \frac{1}{x'_{dk}} \right) V_k \text{sen } (2\delta_k - \theta_k) \quad (38c)$$

$$M3_{gk} = \frac{\partial I_{gm_k}}{\partial V_k} = \frac{1}{x'_{dk}} \cos (\delta_k - \theta_k) \cos \delta_k + \frac{1}{x_{qk}} \text{sen } (\delta_k - \theta_k) \text{sen } \delta_k \quad (38d)$$

$$M4_{gk} = \frac{\partial I_{gm_k}}{\partial \theta_k} = \frac{1}{x'_{dk}} V_k \text{sen } (\delta_k - \theta_k) \cos \delta_k - \frac{1}{x_{qk}} V_k \cos (\delta_k - \theta_k) \text{sen } \delta_k \quad (38e)$$

Nas equações (37) e (38), os coeficientes de sensibilidade de corrente da componente real da corrente terminal do gerador síncrono são representados por $R1_{gk}$, $R2_{gk}$, $R3_{gk}$ e $R4_{gk}$, enquanto os coeficientes de sensibilidade de corrente da componente imaginária são representados por $M1_{gk}$, $M2_{gk}$, $M3_{gk}$ e $M4_{gk}$.

2.3 BALANÇO NODAL DE CORRENTES

As equações do balanço nodal de correntes são obtidas a partir da aplicação da Lei de Kirchoff para as correntes em todas as barras do SEP. Estas equações são incorporadas ao MSC, tornando-se as equações algébricas do modelo. Por inspeção no diagrama unifilar apresentado na Figura 1, o balanço nodal de correntes na barra k é dado pela equação (39).

$$\bar{I}_{g_k} - \bar{I}_{km} - \bar{I}_{c_k} = 0 \quad (39)$$

Separando a equação (39) em termos de suas componentes real e imaginária, torna-se possível obter as equações (40) e (41).

$$I_{g_{r_k}} - I_{km_r} - I_{c_{r_k}} = 0 \quad (40)$$

$$I_{g_{m_k}} - I_{km_m} - I_{c_{m_k}} = 0 \quad (41)$$

Por fim, considerando pequenas variações em torno do ponto de operação e um conjunto Ω_k que engloba todas as barras interligadas diretamente à barra k por meio de uma linha de transmissão, as equações (40) e (41) assumem a forma de (42) e (43), respectivamente.

$$\Delta I_{g_{r_k}} - \sum_{m \in \Omega_k} \Delta I_{km_r} - \Delta I_{c_{r_k}} = 0 \quad (42)$$

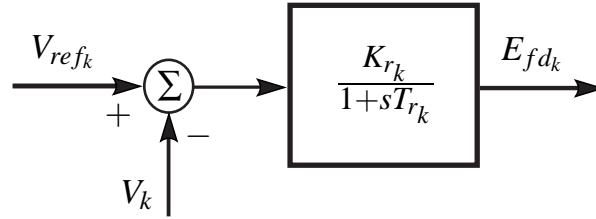
$$\Delta I_{g_{m_k}} - \sum_{m \in \Omega_k} \Delta I_{km_m} - \Delta I_{c_{m_k}} = 0 \quad (43)$$

2.4 EQUAÇÕES DIFERENCIAIS DO MODELO DE SENSIBILIDADE DE CORRENTE

2.4.1 Tensão de Campo da Máquina Síncrona

Considera-se que os geradores síncronos estejam equipados com reguladores automáticos de tensão (RATs) de primeira ordem, os quais possuem a função de regular a tensão de excitação da máquina síncrona (E_{fd_k}), de acordo com as variações da tensão terminal (V_k) em relação a uma tensão de referência (V_{ref_k}) (ANDERSON; FOUAD, 2003; FURINI, 2008), conforme apresentado no diagrama de blocos da Figura 2, onde K_{r_k} e T_{r_k} representam o ganho e a constante de tempo do controlador, enquanto s é a variável complexa de Laplace.

Figura 2 - Diagrama de blocos: regulador automático de tensão.



Fonte: Adaptado de Furini (2008).

A expressão da tensão de campo no domínio do tempo, em sua forma linearizada, é dada pela equação (44).

$$\Delta \dot{E}_{fdk} = -\frac{1}{T_{rk}} \Delta E_{fdk} + \frac{K_{rk}}{T_{rk}} \Delta V_{refk} - \frac{K_{rk}}{T_{rk}} \Delta V_k \quad (44)$$

2.4.2 Equações Eletromecânicas das Máquinas Síncronas

A relação entre as grandezas mecânicas e elétricas de uma máquina síncrona pode ser verificada a partir da equação de balanço (*swing*) (KUNDUR, 1994; ANDERSON; FOUAD, 2003), trata-se de uma equação diferencial de grau dois que pode ser decomposta em duas equações diferenciais de grau um, as quais se encontram expressas nas equações (45) e (46).

$$\Delta \dot{\omega}_k = \frac{1}{M_k} (\Delta P_{mk} - \Delta P_{gk} - D_k \Delta \omega_k) \quad (45)$$

$$\Delta \dot{\delta}_k = \omega_{0k} \Delta \omega_k \quad (46)$$

Nas equações (45) e (46), M_k é a constante de inércia do gerador síncrono, ΔP_{mk} é a variação da potência mecânica de entrada, ΔP_{gk} é a variação da potência elétrica gerada, D_k é o coeficiente de amortecimento inerente do SEP, $\Delta \omega_k$ é a variação da velocidade angular do rotor, $\Delta \delta_k$ é a variação do ângulo interno do gerador, e por fim, ω_{0k} é a velocidade angular síncrona de operação. A potência elétrica gerada (P_{gk}) é dada pela equação (47) (FURINI, 2008).

$$P_{gk} = \frac{E'_{qk} V_k \sin(\delta_k - \theta_k)}{x'_{dk}} + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{x_{qk}} - \frac{1}{x'_{dk}} \right) V_k^2 \sin(2(\delta_k - \theta_k)) \quad (47)$$

O conjunto de equações (48), obtido a partir da linearização da equação (47), expressa a variação na potência elétrica gerada pela máquina síncrona, assim como as expressões de $K1_k$, $K2_k$, $K3_k$ e $K4_k$, que são os coeficientes relacionados à variação da potência elétrica do gerador.

$$\Delta P_{gk} = K1_k \Delta \delta_k + K2_k \Delta E'_{qk} + K3_k \Delta V_k + K4_k \Delta \theta_k \quad (48a)$$

$$K1_k = \frac{\partial P_{gk}}{\partial \delta_k} = \frac{1}{x'_{d_k}} E'_{q_k} V_k \cos(\delta_k - \theta_k) + \left(\frac{1}{x_{q_k}} - \frac{1}{x'_{d_k}} \right) V_k^2 \cos(2(\delta_k - \theta_k)) \quad (48b)$$

$$K2_k = \frac{\partial P_{gk}}{\partial E'_{q_k}} = \frac{1}{x'_{d_k}} V_k \sin(\delta_k - \theta_k) \quad (48c)$$

$$K3_k = \frac{\partial P_{gk}}{\partial V_k} = \frac{1}{x'_{d_k}} E'_{q_k} \sin(\delta_k - \theta_k) + \left(\frac{1}{x_{q_k}} - \frac{1}{x'_{d_k}} \right) V_k \sin(2(\delta_k - \theta_k)) \quad (48d)$$

$$K4_k = \frac{\partial P_{gk}}{\partial \theta_k} = -K1_k \quad (48e)$$

Finalmente, substituindo (48a) em (45), torna-se possível obter a equação (49) da variação da velocidade angular da máquina síncrona.

$$\Delta \dot{\omega}_k = \frac{1}{M_k} \left(\Delta P_{m_k} - K1_k \Delta \delta_k - K2_k \Delta E'_{q_k} - K3_k \Delta V_k - K4_k \Delta \theta_k - D_k \Delta \omega_k \right) \quad (49)$$

2.4.3 Tensão Interna da Máquina Síncrona

A variação da tensão interna da máquina síncrona é dada pela equação (50), onde T'_{d0_k} é a constante de tempo transitória de eixo direto em circuito aberto e x_{d_k} é a reatância síncrona de eixo direto do gerador síncrono (KUNDUR, 1994; ANDERSON; FOUAD, 2003).

$$T'_{d0_k} \dot{E}'_{q_k} = E_{fd_k} - E'_{q_k} - (x_{d_k} - x'_{d_k}) I_{gd_k} \quad (50)$$

A partir da substituição das equações (24) e (30) em (50), torna-se possível linearizar a equação resultante e obter o conjunto de equações (51), onde $K5_k$, $K6_k$, $K7_k$ e $K8_k$ são os coeficientes relacionados à variação da tensão interna do gerador.

$$T'_{d0_k} \Delta \dot{E}'_{q_k} = \Delta E_{fd_k} + K5_k \Delta E'_{q_k} + K6_k \Delta \delta_k + K7_k \Delta V_k + K8_k \Delta \theta_k \quad (51a)$$

$$K5_k = T'_{d0_k} \frac{\partial \dot{E}'_{q_k}}{\partial E'_{q_k}} = -\frac{x_{d_k}}{x'_{d_k}} \quad (51b)$$

$$K6_k = T'_{d0_k} \frac{\partial \dot{E}'_{q_k}}{\partial \delta_k} = -(x_{d_k} - x'_{d_k}) \frac{1}{x'_{d_k}} V_k \sin(\delta_k - \theta_k) \quad (51c)$$

$$K7_k = T'_{d0_k} \frac{\partial \dot{E}'_{q_k}}{\partial V_k} = (x_{d_k} - x'_{d_k}) \frac{1}{x'_{d_k}} \cos(\delta_k - \theta_k) \quad (51d)$$

$$K8_k = T'_{d0_k} \frac{\partial \dot{E}'_{q_k}}{\partial \theta_k} = -K6_k \quad (51e)$$

2.5 REPRESENTAÇÃO DO MSC NO DOMÍNIO DO TEMPO

As equações algébricas (42) e (43), além das equações diferenciais (44), (46), (49) e (51a) permitem a representação do MSC no domínio do tempo para o sistema multimáquinas. A representação na forma matricial é expressa em (52), onde Δx é o vetor das variáveis de estado, Δz é o vetor das variáveis algébricas e Δu é o vetor das variáveis de entrada do sistema.

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{x} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u \end{bmatrix} \quad (52)$$

A composição dos vetores das variáveis de estado, algébricas e de entrada é apresentada nas equações (53)-(55). Considera-se que ng representa o número de geradores síncronos e nb corresponde ao número de barras do SEP multimáquinas representado.

$$\Delta x = \left[[\Delta \omega_1 \cdots \Delta \omega_{ng}] [\Delta \delta_1 \cdots \Delta \delta_{ng}] [\Delta E'_{q1} \cdots \Delta E'_{qng}] [\Delta E_{fd1} \cdots \Delta E_{fdng}] \right]^t \quad (53)$$

$$\Delta z = [[\Delta \theta_1 \cdots \Delta \theta_{nb}] [\Delta V_1 \cdots \Delta V_{nb}]]^t \quad (54)$$

$$\Delta u = [[\Delta P_{m1} \cdots \Delta P_{mng}] [\Delta V_{ref1} \cdots \Delta V_{refng}] [\Delta P_{c1} \cdots \Delta P_{c_{nb}}] [\Delta Q_{c1} \cdots \Delta Q_{c_{nb}}]]^t \quad (55)$$

As equações (56)-(65) apresentam a formação das submatrizes J_1 , J_2 , J_3 , J_4 , B_1 e B_2 , de acordo com as equações apresentadas em (42), (43), (44), (46), (49) e (51). As equações (60)-(63) representam os elementos que compõem a submatriz J_4 , onde J_{41kk} , J_{42kk} , J_{43kk} e J_{44kk} são os elementos da diagonal principal de suas respectivas submatrizes.

$$J_1 = \begin{bmatrix} -\frac{D_k}{M_k} & -\frac{K1_k}{M_k} & -\frac{K2_k}{M_k} & 0 \\ \omega_{0k} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{K6_k}{T'_{d0k}} & \frac{K5_k}{T'_{d0k}} & \frac{1}{T'_{d0k}} \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_rk} \end{bmatrix} \quad (56)$$

$$J_2 = \begin{bmatrix} -\frac{K4_k}{M_k} & -\frac{K3_k}{M_k} \\ 0 & 0 \\ \frac{K8_k}{T'_{d0k}} & \frac{K7_k}{T'_{d0k}} \\ 0 & -\frac{Krk}{T_rk} \end{bmatrix} \quad (57)$$

$$J_3 = \begin{bmatrix} 0 & R2_{gk} & R1_{gk} & 0 \\ 0 & M2_{gk} & M1_{gk} & 0 \end{bmatrix} \quad (58)$$

$$J_4 = \begin{bmatrix} J_{41} & J_{42} \\ J_{43} & J_{44} \end{bmatrix} \quad (59)$$

$$J_{41} = \begin{cases} R4_{gk} - R2_{c_k} - \sum_{k \neq m} R2_{km} & \text{se } J_{41_{kk}} \\ -R4_{km} & \text{se } J_{41_{km}} \end{cases} \quad (60)$$

$$J_{42} = \begin{cases} R3_{gk} - R1_{c_k} - \sum_{k \neq m} R1_{km} & \text{se } J_{42_{kk}} \\ -R3_{km} & \text{se } J_{42_{km}} \end{cases} \quad (61)$$

$$J_{43} = \begin{cases} M4_{gk} - M2_{c_k} - \sum_{k \neq m} M2_{km} & \text{se } J_{43_{kk}} \\ -M4_{km} & \text{se } J_{43_{km}} \end{cases} \quad (62)$$

$$J_{44} = \begin{cases} M3_{gk} - M1_{c_k} - \sum_{k \neq m} M1_{km} & \text{se } J_{44_{kk}} \\ -M3_{km} & \text{se } J_{44_{km}} \end{cases} \quad (63)$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} \frac{1}{M_k} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{K_{r_k}}{T_{r_k}} & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (64)$$

$$B_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -R3_{c_k} & -R4_{c_k} \\ 0 & 0 & -M3_{c_k} & -M4_{c_k} \end{bmatrix} \quad (65)$$

Em relação à dimensão das submatrizes apresentadas nas equações (56)-(65), têm-se:

- J_1 : submatriz quadrada de ordem $4 ng$;
- J_2 : submatriz formada por $4 ng$ linhas e $2 nb$ colunas;
- J_3 : submatriz formada por $2 nb$ linhas e $4 ng$ colunas;
- J_4 : submatriz quadrada de ordem $2 nb$;
- B_1 : submatriz formada por $4 ng$ linhas e $2 ng + 2 nb$ colunas;
- B_2 : submatriz formada por $2 nb$ linhas e $2 ng + 2 nb$ colunas;

2.6 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

Neste Capítulo, o Modelo de Sensibilidade de Corrente foi deduzido a partir da demonstração de suas equações algébricas e apresentação das equações diferenciais. A partir destas equações, construiu-se a representação do modelo no domínio do tempo.

Observa-se que no MSC, o sistema externo de transmissão é preservado, facilitando a inclusão de dispositivos como os FACTS. No próximo Capítulo, os coeficientes de sensibilidade de corrente do dispositivo FACTS TCSC são deduzidos, a partir de seu modelo por injeção de corrente, para incorporação ao MSC e posterior análise de sua influência na estabilidade a pequenas perturbações.

3 INCLUSÃO DO FACTS TCSC NO MODELO DE SENSIBILIDADE DE CORRENTE

Os dispositivos FACTS são baseados na eletrônica de potência e foram concebidos para controlar e direcionar o fluxo de potência ao utilizar sua capacidade de alterar os parâmetros que influenciam diretamente o fluxo de potência, como a tensão (módulo e fase) e a impedância da linha de transmissão. Dessa forma, os FACTS podem oferecer maior eficiência aos SEPs, que geralmente atuam próximos aos seus limites operacionais, por exemplo, a partir da melhoria no perfil da tensão nas barras de instalação, ou ainda, o aumento da capacidade de transferência de potência em uma linha de transmissão já existente (WATANABE et al., 1998; HINGORANI; GYUGYI, 1999; SONG; JOHNS, 1999).

Uma das contribuições deste trabalho é realizar a inclusão do TCSC (*Thyristor Controlled Series Capacitor*) no MSC, a partir da dedução dos coeficientes de sensibilidade de corrente do dispositivo, considerando seu modelo por injeção de corrente.

A escolha do TCSC é justificada pela extensa base de dados presente na literatura, além de ser utilizado em SEPs de diferentes países. No Brasil, o TCSC foi instalado na interligação dos sistemas Norte-Sul a fim de inserir amortecimento às oscilações eletromecânicas do tipo interárea (GAMA, 1999; GAMA et al., 2000). O TCSC foi instalado em SEPs na China com o mesmo objetivo (YUE; BAILU, 2005).

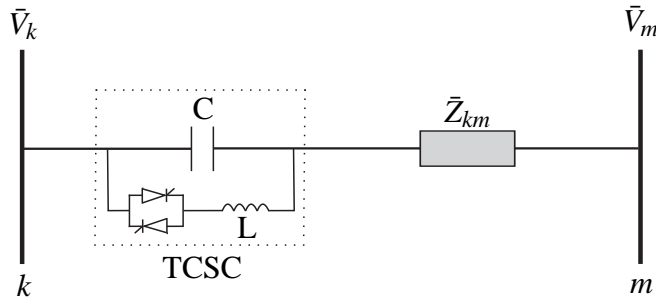
Neste Capítulo é apresentado o modelo do TCSC na sua representação por injeção de corrente, em seguida, são deduzidos seus coeficientes de sensibilidade de corrente de eixo real e imaginário, para incorporação do dispositivo ao MSC. Um novo balanço de correntes é realizado e a representação no domínio do tempo do Capítulo anterior é modificada a fim de se considerar a atuação do FACTS TCSC.

3.1 MODELO DE SENSIBILIDADE DE CORRENTE - FACTS TCSC

3.1.1 Representação do TCSC por Injeção de Corrente

O controlador TCSC é um compensador série composto por uma capacitância (C) fixa em paralelo com reator (L) controlado a tiristores associados em antiparalelo. Com sua instalação, torna-se possível realizar diferentes níveis de compensação da reatância da linha de transmissão a partir do ângulo de disparo dos tiristores, aumentando assim a capacidade de transferência de potência (WATANABE et al., 1998; HINGORANI; GYUGYI, 1999; SONG; JOHNS, 1999). A representação básica do TCSC instalado em uma linha de transmissão é mostrada na Figura 3.

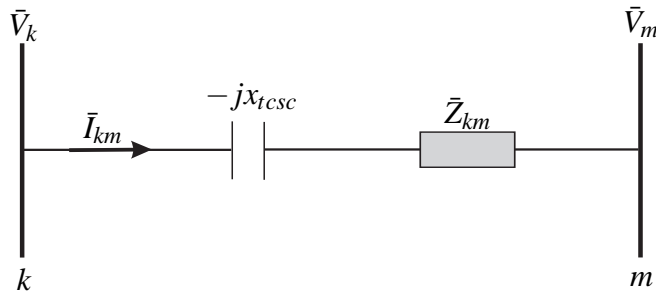
Figura 3 - Barras genéricas do SEP com TCSC instalado.



Fonte: Adaptado de Watanabe et al. (1998).

A modelagem do TCSC por injeção de corrente facilita sua inclusão no MSC, justificando a adoção deste método. O modelo do TCSC por injeção de corrente utilizado neste trabalho, para dedução dos coeficientes de sensibilidade de corrente e incorporação do dispositivo ao MSC, é baseado nos modelos apresentados em Shayeghi, Safari e Shayanfar (2010) e Almada (2012). Para a dedução do modelo, considera-se o diagrama mostrado na Figura 4, onde o TCSC é representado por uma reatância capacitiva x_{tcsc} instalada entre duas barras k e m , as quais se encontram conectadas através de uma linha de transmissão com impedância $\bar{Z}_{km} = r_{km} + jx_{km}$.

Figura 4 - Barras genéricas do SEP com TCSC representado por reatância equivalente.



Fonte: Adaptado de Almada (2012).

Pelo diagrama mostrado na Figura 4, é possível obter a expressão da corrente na linha de transmissão apresentada na equação (66).

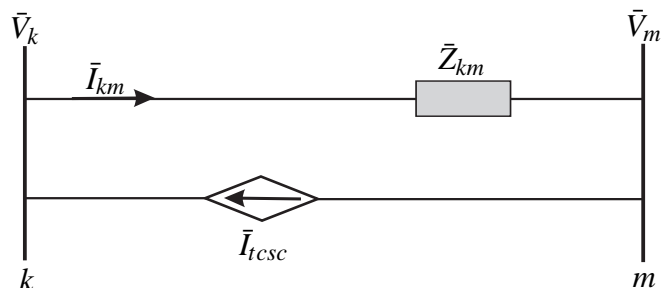
$$\bar{I}_{km} = \frac{\bar{V}_k - \bar{V}_m}{r_{km} + j(x_{km} - x_{tcsc})} \tag{66}$$

A circulação da corrente \bar{I}_{km} pela reatância capacitiva provoca uma queda de tensão que pode ser representada por uma fonte de tensão \bar{V}_{tcsc} , conforme apresentada na equação (67). Com a transformação da fonte de tensão em uma fonte de corrente \bar{I}_{tcsc} , de acordo com a equação (68), torna-se possível obter o diagrama unifilar apresentado na Figura 5.

$$\bar{V}_{tcsc} = -jx_{tcsc}\bar{I}_{km} \tag{67}$$

$$\bar{I}_{tcsc} = \frac{\bar{V}_{tcsc}}{\bar{Z}_{km}} \quad (68)$$

Figura 5 - Barras genéricas do SEP com TCSC representado por fonte de corrente.



Fonte: Adaptado de Almada (2012).

A equação (69), referente à fonte de corrente \bar{I}_{tcsc} , é obtida a partir da substituição das equações (66) e (67) na equação (68).

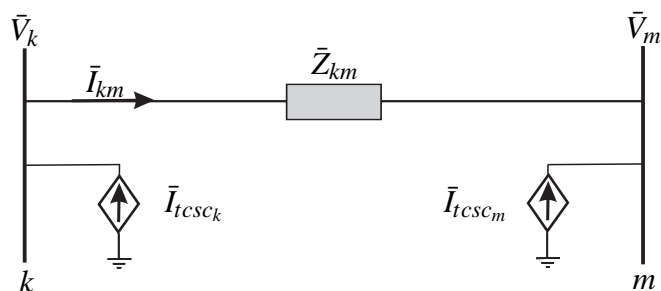
$$\bar{I}_{tcsc} = -j \left(\frac{x_{tcsc}}{r_{km} + jx_{km}} \right) \left(\frac{\bar{V}_k - \bar{V}_m}{r_{km} + j(x_{km} - x_{tcsc})} \right) \quad (69)$$

Analisando o diagrama apresentado na Figura 5, torna-se possível concluir que ao satisfazer as equações (70) e (71), a atuação do TCSC no SEP pode ser representada pela injeção das correntes \bar{I}_{tcsc_k} e \bar{I}_{tcsc_m} nas barras k e m , conforme mostrado no diagrama da Figura 6.

$$\bar{I}_{tcsc_k} = \bar{I}_{tcsc} \quad (70)$$

$$\bar{I}_{tcsc_m} = -\bar{I}_{tcsc} \quad (71)$$

Figura 6 - Barras genéricas do SEP com TCSC representado por injeção de corrente.



Fonte: Adaptado de Almada (2012).

Por fim, ao separar a equação (69) da corrente relativa ao TCSC nas suas componentes de eixo real (I_{tcsc_r}) e eixo imaginário (I_{tcsc_m}), obtêm-se as equações (72) e (73), respectivamente.

$$I_{tcsc_r} = \frac{(V_m \cos \theta_m - V_k \cos \theta_k) [r_{km} x_{tcsc} (x_{km} - x_{tcsc}) + r_{km} x_{km} x_{tcsc}]}{(r_{km}^2 + x_{km}^2) [r_{km}^2 + (x_{km} - x_{tcsc})^2]} +$$

$$+ \frac{(V_m \sin \theta_m - V_k \sin \theta_k) [x_{km} x_{tcsc} (x_{km} - x_{tcsc}) - r_{km}^2 x_{tcsc}]}{(r_{km}^2 + x_{km}^2) [r_{km}^2 + (x_{km} - x_{tcsc})^2]} \quad (72)$$

$$I_{tcsc_m} = \frac{(V_m \cos \theta_m - V_k \cos \theta_k) [-x_{km} x_{tcsc} (x_{km} - x_{tcsc}) + r_{km}^2 x_{tcsc}]}{(r_{km}^2 + x_{km}^2) [r_{km}^2 + (x_{km} - x_{tcsc})^2]} +$$

$$+ \frac{(V_m \sin \theta_m - V_k \sin \theta_k) [r_{km} x_{tcsc} (x_{km} - x_{tcsc}) + r_{km} x_{km} x_{tcsc}]}{(r_{km}^2 + x_{km}^2) [r_{km}^2 + (x_{km} - x_{tcsc})^2]} \quad (73)$$

3.1.2 Coeficientes de Sensibilidade de Corrente do TCSC

A dedução dos coeficientes de sensibilidade de corrente do TCSC, uma das contribuições deste trabalho, ocorre a partir da linearização das equações (72) e (73) em torno de um ponto de equilíbrio, conforme apresentado nos conjuntos de equações (74) e (75).

$$\Delta I_{tcsc_{r_k}} = R1_{tcsc_k} \Delta V_k + R2_{tcsc_k} \Delta \theta_k + R3_{tcsc_k} \Delta V_m + R4_{tcsc_k} \Delta \theta_m + R5_{tcsc_k} \Delta x_{tcsc} \quad (74a)$$

$$R1_{tcsc_k} = \frac{\partial I_{tcsc_{r_k}}}{\partial V_k} = \frac{-\cos \theta_k [r_{km} x_{tcsc} (x_{km} - x_{tcsc}) + r_{km} x_{km} x_{tcsc}]}{(r_{km}^2 + x_{km}^2) [r_{km}^2 + (x_{km} - x_{tcsc})^2]} +$$

$$- \frac{\sin \theta_k [x_{km} x_{tcsc} (x_{km} - x_{tcsc}) - r_{km}^2 x_{tcsc}]}{(r_{km}^2 + x_{km}^2) [r_{km}^2 + (x_{km} - x_{tcsc})^2]} \quad (74b)$$

$$R2_{tcsc_k} = \frac{\partial I_{tcsc_{r_k}}}{\partial \theta_k} = \frac{V_k \sin \theta_k [r_{km} x_{tcsc} (x_{km} - x_{tcsc}) + r_{km} x_{km} x_{tcsc}]}{(r_{km}^2 + x_{km}^2) [r_{km}^2 + (x_{km} - x_{tcsc})^2]} +$$

$$- \frac{V_k \cos \theta_k [x_{km} x_{tcsc} (x_{km} - x_{tcsc}) - r_{km}^2 x_{tcsc}]}{(r_{km}^2 + x_{km}^2) [r_{km}^2 + (x_{km} - x_{tcsc})^2]} \quad (74c)$$

$$R3_{tcsc_k} = \frac{\partial I_{tcsc_{r_k}}}{\partial V_m} = \frac{\cos \theta_m [r_{km} x_{tcsc} (x_{km} - x_{tcsc}) + r_{km} x_{km} x_{tcsc}]}{(r_{km}^2 + x_{km}^2) [r_{km}^2 + (x_{km} - x_{tcsc})^2]} +$$

$$+ \frac{\sin \theta_m [x_{km} x_{tcsc} (x_{km} - x_{tcsc}) - r_{km}^2 x_{tcsc}]}{(r_{km}^2 + x_{km}^2) [r_{km}^2 + (x_{km} - x_{tcsc})^2]} \quad (74d)$$

$$R4_{tcsc_k} = \frac{\partial I_{tcsc_{r_k}}}{\partial \theta_m} = \frac{-V_m \sin \theta_m [r_{km} x_{tcsc} (x_{km} - x_{tcsc}) + r_{km} x_{km} x_{tcsc}]}{(r_{km}^2 + x_{km}^2) [r_{km}^2 + (x_{km} - x_{tcsc})^2]} +$$

$$+ \frac{V_m \cos \theta_m [x_{km} x_{tcsc} (x_{km} - x_{tcsc}) - r_{km}^2 x_{tcsc}]}{(r_{km}^2 + x_{km}^2) [r_{km}^2 + (x_{km} - x_{tcsc})^2]} \quad (74e)$$

$$R5_{tcsc_k} = \frac{\partial I_{tcsc_{r_k}}}{\partial x_{tcsc}} =$$

$$\frac{2r_{km}(x_{km} - x_{tcsc})(V_m \cos \theta_m - V_k \cos \theta_k) + (V_m \sin \theta_m - V_k \sin \theta_k)(x_{km}^2 - 2x_{km}x_{tcsc} - r_{km}^2)}{(r_{km}^2 + x_{km}^2) [r_{km}^2 + (x_{km} - x_{tcsc})^2]} +$$

$$+ \frac{[2(r_{km}^2 + x_{km}^2)(x_{km} - x_{tcsc})] (V_m \sin \theta_m - V_k \sin \theta_k) [x_{km} x_{tcsc} (x_{km} - x_{tcsc}) - r_{km}^2 x_{tcsc}]}{(r_{km}^2 + x_{km}^2)^2 [r_{km}^2 + (x_{km} - x_{tcsc})^2]^2} +$$

$$+ \frac{[2(r_{km}^2 + x_{km}^2)(x_{km} - x_{tcsc})] (V_m \cos \theta_m - V_k \cos \theta_k) [r_{km} x_{tcsc} (2x_{km} - x_{tcsc})]}{(r_{km}^2 + x_{km}^2)^2 [r_{km}^2 + (x_{km} - x_{tcsc})^2]^2} \quad (74f)$$

No conjunto de equações (74), $I_{tcsc_{r_k}}$ representa a componente de eixo real da corrente injetada na barra de interesse k pelo TCSC, enquanto $R1_{tcsc_k}$, $R2_{tcsc_k}$, $R3_{tcsc_k}$, $R4_{tcsc_k}$ e $R5_{tcsc_k}$ são os coeficientes de sensibilidade de corrente da componente de eixo real da corrente injetada na barra k pelo TCSC. No conjunto de equações (75) apresenta-se a linearização da componente de eixo imaginário da corrente injetada na barra k pelo TCSC ($I_{tcsc_{m_k}}$) e seus respectivos coeficientes de sensibilidade de corrente $M1_{tcsc_k}$, $M2_{tcsc_k}$, $M3_{tcsc_k}$, $M4_{tcsc_k}$ e $M5_{tcsc_k}$.

$$\Delta I_{tcsc_{m_k}} = M1_{tcsc_k} \Delta V_k + M2_{tcsc_k} \Delta \theta_k + M3_{tcsc_k} \Delta V_m + M4_{tcsc_k} \Delta \theta_m + M5_{tcsc_k} \Delta x_{tcsc} \quad (75a)$$

$$M1_{tcsc_k} = \frac{\partial I_{tcsc_{m_k}}}{\partial V_k} = \frac{-\cos \theta_k [-x_{km} x_{tcsc} (x_{km} - x_{tcsc}) + r_{km}^2 x_{tcsc}]}{(r_{km}^2 + x_{km}^2) [r_{km}^2 + (x_{km} - x_{tcsc})^2]} +$$

$$- \frac{\sin \theta_k [r_{km} x_{tcsc} (x_{km} - x_{tcsc}) + r_{km} x_{km} x_{tcsc}]}{(r_{km}^2 + x_{km}^2) [r_{km}^2 + (x_{km} - x_{tcsc})^2]} \quad (75b)$$

$$M2_{tcsc_k} = \frac{\partial I_{tcsc_{m_k}}}{\partial \theta_k} = \frac{V_k \sin \theta_k [-x_{km} x_{tcsc} (x_{km} - x_{tcsc}) + r_{km}^2 x_{tcsc}]}{(r_{km}^2 + x_{km}^2) [r_{km}^2 + (x_{km} - x_{tcsc})^2]} +$$

$$- \frac{V_k \cos \theta_k [r_{km} x_{tcsc} (x_{km} - x_{tcsc}) + r_{km} x_{km} x_{tcsc}]}{(r_{km}^2 + x_{km}^2) [r_{km}^2 + (x_{km} - x_{tcsc})^2]} \quad (75c)$$

$$\begin{aligned}
M3_{tcsc_k} &= \frac{\partial I_{tcsc_{m_k}}}{\partial V_m} = \frac{\cos \theta_m [-x_{km}x_{tcsc} (x_{km} - x_{tcsc}) + r_{km}^2 x_{tcsc}]}{(r_{km}^2 + x_{km}^2) [r_{km}^2 + (x_{km} - x_{tcsc})^2]} + \\
&+ \frac{\text{sen } \theta_m [r_{km}x_{tcsc} (x_{km} - x_{tcsc}) + r_{km}x_{km}x_{tcsc}]}{(r_{km}^2 + x_{km}^2) [r_{km}^2 + (x_{km} - x_{tcsc})^2]} \quad (75d)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
M4_{tcsc_k} &= \frac{\partial I_{tcsc_{m_k}}}{\partial \theta_m} = \frac{-V_m \text{sen } \theta_m [-x_{km}x_{tcsc} (x_{km} - x_{tcsc}) + r_{km}^2 x_{tcsc}]}{(r_{km}^2 + x_{km}^2) [r_{km}^2 + (x_{km} - x_{tcsc})^2]} + \\
&+ \frac{V_m \cos \theta_m [r_{km}x_{tcsc} (x_{km} - x_{tcsc}) + r_{km}x_{km}x_{tcsc}]}{(r_{km}^2 + x_{km}^2) [r_{km}^2 + (x_{km} - x_{tcsc})^2]} \quad (75e)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
M5_{tcsc_k} &= \frac{\partial I_{tcsc_{m_k}}}{\partial x_{tcsc}} = \\
&\frac{2r_{km}(x_{km} - x_{tcsc})(V_m \text{sen } \theta_m - V_k \text{sen } \theta_k) + (V_m \cos \theta_m - V_k \cos \theta_k)(2x_{km}x_{tcsc} + r_{km}^2 - x_{km}^2)}{(r_{km}^2 + x_{km}^2) [r_{km}^2 + (x_{km} - x_{tcsc})^2]} + \\
&+ \frac{[2(r_{km}^2 + x_{km}^2)(x_{km} - x_{tcsc})] (V_m \cos \theta_m - V_k \cos \theta_k) [r_{km}^2 x_{tcsc} - x_{km}x_{tcsc} (x_{km} - x_{tcsc})]}{(r_{km}^2 + x_{km}^2)^2 [r_{km}^2 + (x_{km} - x_{tcsc})^2]^2} + \\
&+ \frac{[2(r_{km}^2 + x_{km}^2)(x_{km} - x_{tcsc})] (V_m \text{sen } \theta_m - V_k \text{sen } \theta_k) [r_{km}x_{tcsc} (2x_{km} - x_{tcsc})]}{(r_{km}^2 + x_{km}^2)^2 [r_{km}^2 + (x_{km} - x_{tcsc})^2]^2} \quad (75f)
\end{aligned}$$

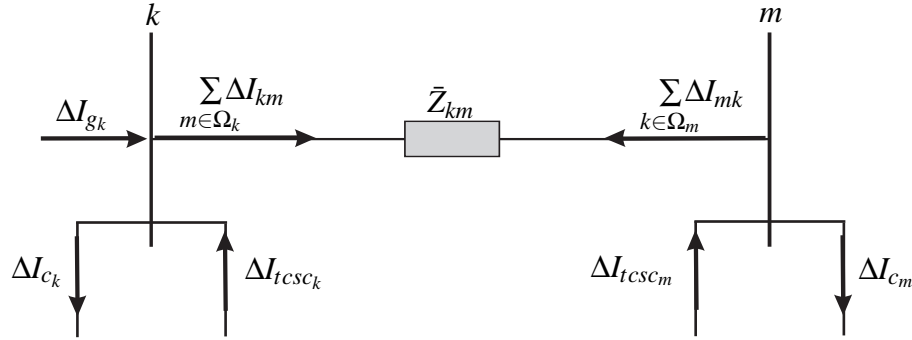
3.2 BALANÇO NODAL DE CORRENTES

Incluir o controlador FACTS TCSC no sistema elétrico de potência modelado através do MSC implica em alterações no balanço nodal de correntes apresentado no Capítulo anterior. Para realizar o balanço de correntes, considera-se duas barras genéricas k e m interligadas por uma linha de transmissão conforme mostrado no diagrama unifilar na Figura 7.

Um gerador síncrono encontra-se conectado à barra k , contribuindo com a corrente terminal do gerador ΔI_{g_k} . As barras k e m possuem cargas de potência constante que drenam as correntes ΔI_{c_k} e ΔI_{c_m} , respectivamente. O conjunto Ω_k engloba todas as barras interligadas diretamente à barra k através de uma linha de transmissão, proporcionando o fluxo de corrente dado por $\sum_{m \in \Omega_k} \Delta I_{km}$. De forma análoga, a barra m possui um conjunto Ω_m com fluxo de corrente $\sum_{k \in \Omega_m} \Delta I_{mk}$.

Por fim, o TCSC injeta a corrente ΔI_{tcsc_k} na barra k e a corrente ΔI_{tcsc_m} na barra m , alterando o balanço nodal de correntes do Capítulo anterior.

Figura 7 - Balanço de correntes nas barras comuns à instalação do TCSC.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

3.2.1 Balanço Nodal de Correntes na Barra k

Com a análise do diagrama unifilar apresentado na Figura 7, torna-se possível obter as equações (76) e (77), que expressam o balanço de correntes para a barra k nas componentes de eixo real e de eixo imaginário, respectivamente.

$$\Delta I_{g_{rk}} + \Delta I_{tcsc_{rk}} - \sum_{m \in \Omega_k} \Delta I_{km_r} - \Delta I_{c_{rk}} = 0 \quad (76)$$

$$\Delta I_{g_{mk}} + \Delta I_{tcsc_{mk}} - \sum_{m \in \Omega_k} \Delta I_{km_m} - \Delta I_{c_{mk}} = 0 \quad (77)$$

Substituindo nas equações (76) e (77) as equações deduzidas em (33), (34), (35), (36), (37), (38), (74) e (75), obtém-se o balanço nodal de correntes nas componentes de eixo real e de eixo imaginário para a barra k , expresso nas equações (78) e (79).

$$\begin{aligned} & \left(R3_{gk} + R1_{tcsc_k} - R1_{c_k} - \sum_{m \in \Omega_k} R1_{km} \right) \Delta V_k + \left(R4_{gk} + R2_{tcsc_k} - R2_{c_k} - \sum_{m \in \Omega_k} R2_{km} \right) \Delta \theta_k + \\ & + \left(R3_{tcsc_k} - \sum_{m \in \Omega_k} R3_{km} \right) \Delta V_m + \left(R4_{tcsc_k} - \sum_{m \in \Omega_k} R4_{km} \right) \Delta \theta_m + R1_{gk} \Delta E'_{qk} + \\ & + R2_{gk} \Delta \delta_k + R5_{tcsc_k} \Delta x_{tcsc} - R3_{c_k} \Delta P_{c_k} - R4_{c_k} \Delta Q_{c_k} = 0 \end{aligned} \quad (78)$$

$$\begin{aligned} & \left(M3_{gk} + M1_{tcsc_k} - M1_{c_k} - \sum_{m \in \Omega_k} M1_{km} \right) \Delta V_k + \left(M4_{gk} + M2_{tcsc_k} - M2_{c_k} - \sum_{m \in \Omega_k} M2_{km} \right) \Delta \theta_k + \\ & + \left(M3_{tcsc_k} - \sum_{m \in \Omega_k} M3_{km} \right) \Delta V_m + \left(M4_{tcsc_k} - \sum_{m \in \Omega_k} M4_{km} \right) \Delta \theta_m + M1_{gk} \Delta E'_{qk} + \\ & + M2_{gk} \Delta \delta_k + M5_{tcsc_k} \Delta x_{tcsc} - M3_{c_k} \Delta P_{c_k} - M4_{c_k} \Delta Q_{c_k} = 0 \end{aligned} \quad (79)$$

3.2.2 Balanço Nodal de Correntes na Barra m

Nas equações (80) e (81), encontra-se expresso o balanço de correntes para a barra m nas componentes de eixo real e de eixo imaginário, respectivamente.

$$\Delta I_{tcsc_{r_m}} - \sum_{k \in \Omega_m} \Delta I_{mk_r} - \Delta I_{c_{r_m}} = 0 \quad (80)$$

$$\Delta I_{tcsc_{m_m}} - \sum_{k \in \Omega_m} \Delta I_{mk_m} - \Delta I_{c_{m_m}} = 0 \quad (81)$$

As relações expressas nas equações (82) e (83) são definidas a partir da análise do diagrama na Figura 6 e das equações (70) e (71), que se referem à corrente injetada pelo TCSC.

$$\Delta I_{tcsc_{r_m}} = -\Delta I_{tcsc_{r_k}} \quad (82)$$

$$\Delta I_{tcsc_{m_m}} = -\Delta I_{tcsc_{m_k}} \quad (83)$$

As equações (33) e (34), referentes ao fluxo de corrente na linha de transmissão, foram deduzidas considerando que a corrente flui da barra para a linha. Mantendo-se a convenção de sentido de corrente e considerando um conjunto Ω_m de barras conectadas à barra m através de uma linha de transmissão, pode-se definir as relações expressas nas equações (84) e (85).

$$\Delta I_{mk_r} = -\Delta I_{km_r} \quad (84)$$

$$\Delta I_{mk_m} = -\Delta I_{km_m} \quad (85)$$

As equações (86) e (87) são obtidas ao reescrever as equações (80) e (81), considerando as relações apresentadas nas equações (82), (83), (84) e (85).

$$-\Delta I_{tcsc_{r_k}} + \sum_{k \in \Omega_m} \Delta I_{km_r} - \Delta I_{c_{r_m}} = 0 \quad (86)$$

$$-\Delta I_{tcsc_{m_k}} + \sum_{k \in \Omega_m} \Delta I_{km_m} - \Delta I_{c_{m_m}} = 0 \quad (87)$$

Por fim, ao substituir nas equações (86) e (87) as equações deduzidas em (33), (34), (35), (36), (74) e (75), obtém-se o balanço nodal de correntes nas componentes de eixo real e de eixo imaginário para a barra m , expresso nas equações (88) e (89).

$$\begin{aligned}
& \left(-R1_{tcsc_k} + \sum_{k \in \Omega_m} R1_{km} \right) \Delta V_k + \left(-R2_{tcsc_k} + \sum_{k \in \Omega_m} R2_{km} \right) \Delta \theta_k + \\
& + \left(-R3_{tcsc_k} - R1_{c_m} + \sum_{k \in \Omega_m} R3_{km} \right) \Delta V_m + \left(-R4_{tcsc_k} - R2_{c_m} + \sum_{k \in \Omega_m} R4_{km} \right) \Delta \theta_m + \\
& - R5_{tcsc_k} \Delta x_{tcsc} - R3_{c_m} \Delta P_{c_m} - R4_{c_m} \Delta Q_{c_m} = 0
\end{aligned} \tag{88}$$

$$\begin{aligned}
& \left(-M1_{tcsc_k} + \sum_{k \in \Omega_m} M1_{km} \right) \Delta V_k + \left(-M2_{tcsc_k} + \sum_{k \in \Omega_m} M2_{km} \right) \Delta \theta_k + \\
& + \left(-M3_{tcsc_k} - M1_{c_m} + \sum_{k \in \Omega_m} M3_{km} \right) \Delta V_m + \left(-M4_{tcsc_k} - M2_{c_m} + \sum_{k \in \Omega_m} M4_{km} \right) \Delta \theta_m + \\
& - M5_{tcsc_k} \Delta x_{tcsc} - M3_{c_m} \Delta P_{c_m} - M4_{c_m} \Delta Q_{c_m} = 0
\end{aligned} \tag{89}$$

3.3 REPRESENTAÇÃO DO MSC COM INCLUSÃO DO TCSC

Ao introduzir o FACTS TCSC no MSC foram adicionados novos coeficientes de sensibilidade de corrente, conseqüentemente o balanço nodal de correntes foi alterado. Outra alteração em relação ao modelo do Capítulo 2 é a adição de uma nova variável de entrada, referente à variação na reatância do TCSC (Δx_{tcsc}). No conjunto de equações (90) encontra-se expressa a representação do MSC no domínio do tempo com a inclusão do TCSC.

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{x} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_{4_{tcsc}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{1_{tcsc}} \\ B_{2_{tcsc}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u \end{bmatrix} \tag{90a}$$

$$\Delta x = \left[[\Delta \omega] [\Delta \delta] [\Delta E'_q] [\Delta E_{fd}] \right]^t \tag{90b}$$

$$\Delta z = \left[[\Delta \theta] [\Delta V] \right]^t \tag{90c}$$

$$\Delta u = \left[[\Delta P_m] [\Delta V_{ref}] [\Delta P_c] [\Delta Q_c] [\Delta x_{tcsc}] \right]^t \tag{90d}$$

Em relação à representação do MSC apresentada no Capítulo 2, observa-se que J_1 , J_2 e J_3 não sofrem alterações na sua construção. Por outro lado, J_4 que relaciona as equações algébricas com as variáveis algébricas é alterada a partir da inclusão dos coeficientes de sensibilidade de corrente do TCSC, passando a ser denominada como $J_{4_{tcsc}}$, expressa nas equações (91)-(95).

$$J_{4_{tcsc}} = \begin{bmatrix} J_{41_{tcsc}} & J_{42_{tcsc}} \\ J_{43_{tcsc}} & J_{44_{tcsc}} \end{bmatrix} \quad (91)$$

$$J_{41_{tcsc}} = \begin{cases} R4_{gk} + R2_{tcsc_k} - R2_{c_k} - \sum_{m \in \Omega_k} R2_{km} & \text{se } J_{41_{tcsc}}(k, k) \\ R4_{tcsc_{k,m}} - R4_{km} & \text{se } J_{41_{tcsc}}(k, m) \end{cases} \quad (92)$$

$$J_{42_{tcsc}} = \begin{cases} R3_{gk} + R1_{tcsc_k} - R1_{c_k} - \sum_{m \in \Omega_k} R1_{km} & \text{se } J_{42_{tcsc}}(k, k) \\ R3_{tcsc_{k,m}} - R3_{km} & \text{se } J_{42_{tcsc}}(k, m) \end{cases} \quad (93)$$

$$J_{43_{tcsc}} = \begin{cases} M4_{gk} + M2_{tcsc_k} - M2_{c_k} - \sum_{m \in \Omega_k} M2_{km} & \text{se } J_{43_{tcsc}}(k, k) \\ M4_{tcsc_{k,m}} - M4_{km} & \text{se } J_{43_{tcsc}}(k, m) \end{cases} \quad (94)$$

$$J_{44_{tcsc}} = \begin{cases} M3_{gk} + M1_{tcsc_k} - M1_{c_k} - \sum_{m \in \Omega_k} M1_{km} & \text{se } J_{44_{tcsc}}(k, k) \\ M3_{tcsc_{k,m}} - M3_{km} & \text{se } J_{44_{tcsc}}(k, m) \end{cases} \quad (95)$$

Onde $RY_{tcsc_{k,m}}$ é o coeficiente real de sensibilidade de corrente de número Y da corrente injetada na barra k pelo TCSC ($R1_{tcsc_k}$, $R2_{tcsc_k}$, $R3_{tcsc_k}$, $R4_{tcsc_k}$ ou $R5_{tcsc_k}$) devido à ligação de um TCSC na linha de transmissão entre as barras k e m . De forma análoga, o mesmo conceito é utilizado para os coeficientes de sensibilidade de corrente imaginária.

Outra modificação na representação do SEP a partir do MSC em relação ao Capítulo anterior está em B_1 e B_2 que relacionam as equações diferenciais e algébricas, respectivamente, com as variáveis de entrada. Nestas submatrizes são incluídas colunas referentes à nova variável de entrada (Δx_{tcsc}) e passam a ser denominadas de $B_{1_{tcsc}}$ e $B_{2_{tcsc}}$, com suas novas estruturas expressas nas equações (96)-(99).

$$B_{1_{tcsc}} = \left[\begin{array}{c|c} & \begin{matrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{matrix} \end{array} \right] \quad (96)$$

A submatriz $B_{1_{tcsc}}$ recebe a inclusão de n_{tcsc} colunas formadas por zeros, onde n_{tcsc} representa a quantidade de dispositivos TCSC instalados no SEP. Dessa forma, se torna uma submatriz formada por $4 ng$ linhas e $2 ng + 2 nb + n_{tcsc}$ colunas.

$$B_{2_{tcsc}} = \left[\begin{array}{c|c} B_2 & \begin{matrix} B_{21_{tcsc}} \\ B_{22_{tcsc}} \end{matrix} \end{array} \right] \quad (97)$$

$$B_{21_{tcsc}} = \left[\begin{array}{c} 0 \\ R5_{tcsc_{k,m}} \\ R5_{tcsc_{m,k}} \\ 0 \end{array} \right] \quad (98)$$

$$B_{22_{tcsc}} = \left[\begin{array}{c} 0 \\ M5_{tcsc_{k,m}} \\ M5_{tcsc_{m,k}} \\ 0 \end{array} \right] \quad (99)$$

A submatriz $B_{2_{tcsc}}$ recebe a inclusão de n_{tcsc} colunas formadas por zeros, exceto nas barras que possuem conectadas a si uma linha de transmissão equipada com o TCSC. Assim, a submatriz $B_{2_{tcsc}}$ passa a ter $2 nb$ linhas e $2 ng + 2 nb + n_{tcsc}$ colunas.

3.4 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

Neste Capítulo, o TCSC foi incluído no Modelo de Sensibilidade de Corrente, a partir da dedução dos coeficientes de sensibilidade de corrente do dispositivo, considerando seu modelo por injeção de corrente. Observa-se que a inclusão do TCSC, atuando isoladamente, modifica apenas as equações do balanço de correntes do SEP, não alterando as equações diferenciais.

No próximo Capítulo, os controladores suplementares de amortecimento ESP e POD são modelados, o primeiro tem como principal objetivo atuar sobre os modos de oscilação local, o segundo é acoplado ao TCSC formando um conjunto TCSC-POD e atribuindo ao FACTS maior poder de atuação sobre os modos de oscilação interárea.

4 INCLUSÃO DOS CONTROLADORES DE AMORTECIMENTO ESP E POD NO MSC

A atuação isolada dos dispositivos FACTS, geralmente, não insere amortecimento suficiente às oscilações eletromecânicas de baixa frequência para que se possa garantir a estabilidade a pequenas perturbações do SEP com níveis adequados de amortecimento (SONG; JOHNS, 1999; FURINI, 2008). Tais oscilações surgem devido ao alto carregamento do sistema, interligações fracas, além da atuação de reguladores de tensão de ação contínua, com altos ganhos e baixas constantes de tempo. Portanto, para que seja garantido níveis adequados de amortecimento ao SEP, se faz necessário a inclusão de controladores suplementares de amortecimento à malha de controle dos dispositivos FACTS, os quais têm como objetivo principal estabilizar sistemas naturalmente instáveis ou simplesmente elevar o amortecimento existente para níveis desejados (CAI; ERLICH, 2005; FURINI; PEREIRA; ARAUJO, 2011).

Neste Capítulo, os modelos dos controladores de amortecimento ESP e POD são apresentados. Os modelos deduzidos para o ESP e POD são baseados nos trabalhos de Kundur (1994), Furini (2008), Valle (2010), Takahashi (2013), Menezes (2014) e Fortes (2016).

As estruturas dos controladores são idênticas, diferindo apenas no modo de operação e entre os sinais de entrada e de saída. Os ESPs são acoplados às malhas de controle dos RATs dos geradores síncronos e, ainda que, com limitações, sejam capazes de fornecer amortecimento adicional aos modos interárea do sistema, são destinados principalmente ao amortecimento dos modos locais de oscilação, onde apresentam maior eficiência.

Neste trabalho, o ESP utiliza como sinal de entrada as variações da velocidade angular do rotor ($\Delta\omega$) e, como consequência, insere um sinal (ΔV_{esp}) na malha de controle do sistema de excitação dos geradores.

Por outro lado, o POD é acoplado à malha de controle do dispositivo FACTS e, neste trabalho, utiliza como sinal de entrada a variação da potência ativa (ΔP_{km}) da linha de transmissão na qual o TCSC encontra-se instalado. O conjunto TCSC-POD é responsável por inserir amortecimento às oscilações de modo interárea por meio de um sinal (ΔX_{pod}) que atua na malha de controle do TCSC.

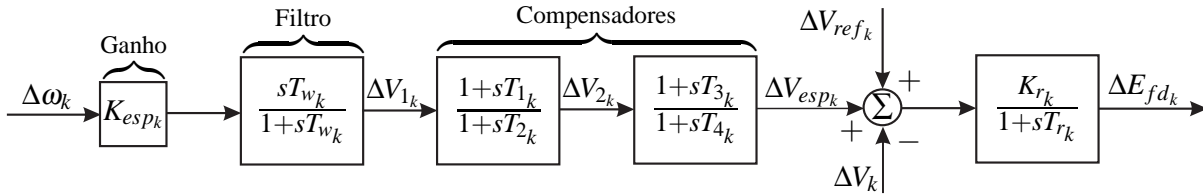
4.1 ESTABILIZADORES DE SISTEMAS DE POTÊNCIA (ESPs)

As oscilações eletromecânicas de baixa frequência surgem, dentre outros fatores, da atuação dos RATs com altos ganhos e baixas constantes de tempo (DEMELLO; CONCORDIA, 1969; LARSEN; SWANN, 1981).

Diante do exposto, torna-se necessário adicionar controladores, denominados *Power System Stabilizers* (PSSs) ou Estabilizadores de Sistemas de Potência (ESPs), à malha de controle dos RATs. Quando ajustados convenientemente, os controladores ESPs são capazes de inserir, de modo eficiente, amortecimento adicional aos modos oscilatórios locais (KUNDUR, 1994).

A estrutura básica do controlador ESP é mostrada na Figura 8, sendo composta por um ganho estático K_{esp_k} , um filtro *washout* representado pela constante de tempo T_{w_k} e dois blocos compensadores de fase (*lead-lag*) compostos pelas constantes de tempo T_{1_k} , T_{2_k} , T_{3_k} e T_{4_k} .

Figura 8 - Diagrama de blocos - estrutura do controlador ESP.



Fonte: Adaptado de Furini (2008), Menezes (2014) e Fortes (2016).

O ganho K_{esp_k} determina a quantidade de amortecimento introduzido ao sistema. A função do filtro *washout* é zerar a resposta do controlador em regime permanente para que atue apenas durante o período transitório. As constantes de tempo T_{1_k} , T_{2_k} , T_{3_k} e T_{4_k} são responsáveis pela compensação de fase desejada, sendo comum na literatura adotar $T_{1_k} = T_{3_k}$ e $T_{2_k} = T_{4_k}$ (KUNDUR, 1994). Por fim, o sinal de saída do controlador (ΔV_{esp_k}) é inserido na malha de controle do RAT de primeira ordem (representação apresentada na subseção 2.4.1) auxiliando no controle da tensão de excitação (ΔE_{fd_k}) do gerador síncrono k .

4.1.1 Equações Diferenciais do ESP

A instalação de um controlador ESP, na modelagem apresentada, insere três novas variáveis de estado ($\Delta \dot{V}_{1_k}$, $\Delta \dot{V}_{2_k}$ e $\Delta \dot{V}_{esp_k}$), além de alterar a variável de estado referente à tensão de campo do gerador ($\Delta \dot{E}_{fd_k}$). As equações diferenciais, que compõem o modelo dos ESPs, são obtidas pela inspeção por partes do diagrama de blocos mostrado na Figura 8 e se encontram expressas nas equações (100)-(103) (FURINI, 2008; MENEZES, 2014; FORTES, 2016).

$$\Delta \dot{V}_{1_k} = K_{esp_k} \Delta \dot{\omega}_k - \frac{1}{T_{w_k}} \Delta V_{1_k} \quad (100)$$

$$\Delta \dot{V}_{2_k} = \frac{T_{1_k}}{T_{2_k}} \Delta \dot{V}_{1_k} + \frac{1}{T_{2_k}} \Delta V_{1_k} - \frac{1}{T_{2_k}} \Delta V_{2_k} \quad (101)$$

$$\Delta \dot{V}_{esp_k} = \frac{T_{3_k}}{T_{4_k}} \Delta \dot{V}_{2_k} + \frac{1}{T_{4_k}} \Delta V_{2_k} - \frac{1}{T_{4_k}} \Delta V_{esp_k} \quad (102)$$

$$\Delta \dot{E}_{fd_k} = \frac{K_{r_k}}{T_{r_k}} \Delta V_{esp_k} + \frac{K_{r_k}}{T_{r_k}} \Delta V_{ref_k} - \frac{K_{r_k}}{T_{r_k}} \Delta V_k - \frac{1}{T_{r_k}} \Delta E_{fd_k} \quad (103)$$

Substituindo em (100) a equação (49) da subseção 2.4.2, que diz respeito à variação da velocidade angular do gerador síncrono ($\Delta\dot{\omega}_k$), e definindo os coeficientes D_{11k} , D_{12k} , D_{13k} , D_{14k} , D_{15k} , D_{16k} e D_{17k} , torna-se possível obter o conjunto de equações (104).

$$\Delta\dot{V}_{1k} = D_{11k} \Delta\omega_k + D_{12k} \Delta\delta_k + D_{13k} \Delta E'_{qk} + D_{14k} \Delta V_{1k} + D_{15k} \Delta\theta_k + D_{16k} \Delta V_k + D_{17k} \Delta P_{m_k} \quad (104a)$$

$$D_{11k} = -\frac{K_{esp_k}}{M_k} D_k \quad (104b)$$

$$D_{12k} = -\frac{K_{esp_k}}{M_k} K1_k \quad (104c)$$

$$D_{13k} = -\frac{K_{esp_k}}{M_k} K2_k \quad (104d)$$

$$D_{14k} = -\frac{1}{T_{wk}} \quad (104e)$$

$$D_{15k} = -\frac{K_{esp_k}}{M_k} K4_k \quad (104f)$$

$$D_{16k} = -\frac{K_{esp_k}}{M_k} K3_k \quad (104g)$$

$$D_{17k} = \frac{K_{esp_k}}{M_k} \quad (104h)$$

Substituindo as equações (49) e (100) na equação (101) e definindo os coeficientes D_{21k} , D_{22k} , D_{23k} , D_{24k} , D_{25k} , D_{26k} , D_{27k} e D_{28k} , torna-se possível obter o conjunto de equações (105).

$$\Delta\dot{V}_{2k} = D_{21k} \Delta\omega_k + D_{22k} \Delta\delta_k + D_{23k} \Delta E'_{qk} + D_{24k} \Delta V_{1k} + D_{25k} \Delta V_{2k} + D_{26k} \Delta\theta_k + D_{27k} \Delta V_k + D_{28k} \Delta P_{m_k} \quad (105a)$$

$$D_{21k} = -\frac{T_{1k}}{T_{2k}} \frac{K_{esp_k}}{M_k} D_k \quad (105b)$$

$$D_{22k} = -\frac{T_{1k}}{T_{2k}} \frac{K_{esp_k}}{M_k} K1_k \quad (105c)$$

$$D_{23k} = -\frac{T_{1k}}{T_{2k}} \frac{K_{esp_k}}{M_k} K2_k \quad (105d)$$

$$D_{24_k} = \frac{1}{T_{2_k}} - \frac{T_{1_k}}{T_{2_k}} \frac{1}{T_{w_k}} \quad (105e)$$

$$D_{25_k} = -\frac{1}{T_{2_k}} \quad (105f)$$

$$D_{26_k} = -\frac{T_{1_k}}{T_{2_k}} \frac{K_{esp_k}}{M_k} K_{4_k} \quad (105g)$$

$$D_{27_k} = -\frac{T_{1_k}}{T_{2_k}} \frac{K_{esp_k}}{M_k} K_{3_k} \quad (105h)$$

$$D_{28_k} = \frac{T_{1_k}}{T_{2_k}} \frac{K_{esp_k}}{M_k} \quad (105i)$$

Substituindo as equações (49), (100) e (101) na equação (102) e definindo os coeficientes D_{31_k} , D_{32_k} , D_{33_k} , D_{34_k} , D_{35_k} , D_{36_k} , D_{37_k} , D_{38_k} e D_{39_k} , torna-se possível obter o conjunto de equações (106).

$$\begin{aligned} \Delta \dot{V}_{esp_k} = & D_{31_k} \Delta \omega_k + D_{32_k} \Delta \delta_k + D_{33_k} \Delta E'_{q_k} + D_{34_k} \Delta V_{1_k} + D_{35_k} \Delta V_{2_k} + D_{36_k} \Delta V_{esp_k} + \\ & + D_{37_k} \Delta \theta_k + D_{38_k} \Delta V_k + D_{39_k} \Delta P_{m_k} \end{aligned} \quad (106a)$$

$$D_{31_k} = -\frac{T_{1_k}}{T_{2_k}} \frac{T_{3_k}}{T_{4_k}} \frac{K_{esp_k}}{M_k} D_k \quad (106b)$$

$$D_{32_k} = -\frac{T_{1_k}}{T_{2_k}} \frac{T_{3_k}}{T_{4_k}} \frac{K_{esp_k}}{M_k} K_{1_k} \quad (106c)$$

$$D_{33_k} = -\frac{T_{1_k}}{T_{2_k}} \frac{T_{3_k}}{T_{4_k}} \frac{K_{esp_k}}{M_k} K_{2_k} \quad (106d)$$

$$D_{34_k} = \frac{T_{3_k}}{T_{2_k} T_{4_k}} \left(1 - \frac{T_{1_k}}{T_{w_k}} \right) \quad (106e)$$

$$D_{35_k} = \frac{1}{T_{4_k}} \left(1 - \frac{T_{3_k}}{T_{2_k}} \right) \quad (106f)$$

$$D_{36_k} = -\frac{1}{T_{4_k}} \quad (106g)$$

$$D_{37_k} = -\frac{T_{1_k}}{T_{2_k}} \frac{T_{3_k}}{T_{4_k}} \frac{K_{esp_k}}{M_k} K_{4_k} \quad (106h)$$

$$D_{38k} = -\frac{T_{1k} T_{3k} K_{esp_k}}{T_{2k} T_{4k} M_k} K_{3k} \quad (106i)$$

$$D_{39k} = \frac{T_{1k} T_{3k} K_{esp_k}}{T_{2k} T_{4k} M_k} \quad (106j)$$

Por fim, reescrevendo a equação (103) e definindo os coeficientes D_{41k} , D_{42k} , D_{43k} e D_{44k} , torna-se possível obter o conjunto de equações (107).

$$\Delta \dot{E}_{fdk} = D_{41k} \Delta V_{esp_k} + D_{42k} \Delta V_{ref_k} + D_{43k} \Delta V_k + D_{44k} \Delta E_{fdk} \quad (107a)$$

$$D_{41k} = \frac{K_{rk}}{T_{rk}} \quad (107b)$$

$$D_{42k} = \frac{K_{rk}}{T_{rk}} \quad (107c)$$

$$D_{43k} = -\frac{K_{rk}}{T_{rk}} \quad (107d)$$

$$D_{44k} = -\frac{1}{T_{rk}} \quad (107e)$$

4.1.2 Representação do MSC com inclusão do ESP

Nesta subseção é apresentada a representação do MSC no domínio do tempo levando-se em conta a inclusão do controlador ESP à representação do Capítulo 2.

A incorporação do controlador ESP ao MSC acontece a partir da inclusão de três novas variáveis de estado, expressas nas equações (100)-(102). Além disso, a equação (44), referente à tensão de campo, deve ser substituída pela equação (103) nos geradores onde os controladores ESPs encontram-se instalados. As equações algébricas não sofrem alterações. A representação no domínio do tempo na forma matricial encontra-se expressa no conjunto de equações (108).

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{x} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{1_{esp}} & J_{2_{esp}} \\ J_{3_{esp}} & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{1_{esp}} \\ B_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u \end{bmatrix} \quad (108a)$$

$$\Delta x = \left[[\Delta \omega] [\Delta \delta] [\Delta E'_q] [\Delta E_{fd}] [\Delta V_1] [\Delta V_2] [\Delta V_{esp}] \right]^t \quad (108b)$$

$$\Delta z = \left[[\Delta \theta] [\Delta V] \right]^t \quad (108c)$$

$$\Delta u = \left[[\Delta P_m] [\Delta V_{ref}] [\Delta P_c] [\Delta Q_c] \right]^t \quad (108d)$$

Em relação à representação do MSC apresentada no Capítulo 2, observa-se que as submatrizes J_4 e B_2 não sofrem alterações. Por outro lado, J_1 que relaciona as equações diferenciais com as variáveis de estado é alterada a partir da inclusão de três novas variáveis de estado, passando a ser denominada como $J_{1_{esp}}$, expressa na relação matricial (109).

$$J_{1_{esp}} = \left[\begin{array}{cccc|ccc} & & & & 0 & 0 & 0 \\ & & & & 0 & 0 & 0 \\ & & & & 0 & 0 & 0 \\ & & & & 0 & 0 & D_{41k} \\ \hline D_{11k} & D_{12k} & D_{13k} & 0 & D_{14k} & 0 & 0 \\ D_{21k} & D_{22k} & D_{23k} & 0 & D_{24k} & D_{25k} & 0 \\ D_{31k} & D_{32k} & D_{33k} & 0 & D_{34k} & D_{35k} & D_{36k} \end{array} \right] \quad (109)$$

A submatriz J_1 é uma matriz quadrada de ordem $4 ng$. Após a inclusão das submatrizes referentes à atuação do controlador ESP, e considerando que n_{esp} é o número de controladores ESPs instalados no sistema, têm-se que a nova submatriz $J_{1_{esp}}$ também é uma matriz quadrada, porém de ordem $4 ng + 3 n_{esp}$.

A submatriz $J_{2_{esp}}$ que relaciona as equações diferenciais com as variáveis algébricas encontra-se expressa na relação matricial apresentada em (110), observa-se que ela recebe a inclusão de $3 n_{esp}$ linhas em relação à J_2 .

$$J_{2_{esp}} = \left[\begin{array}{c|cc} J_2 & & \\ \hline D_{15k} & D_{16k} & \\ D_{26k} & D_{27k} & \\ D_{37k} & D_{38k} & \end{array} \right] \quad (110)$$

As submatrizes referentes ao controlador ESP que compõem $J_{2_{esp}}$ possuem n_{esp} linhas e nb colunas. Estas submatrizes são nulas, exceto nos termos referentes às tensões e ângulos das barras em que geradores equipados com controladores ESPs encontrem-se instalados. Dessa forma, a submatriz $J_{2_{esp}}$ possui $4 ng + 3 n_{esp}$ linhas e $2 nb$ colunas.

Outra modificação na representação do MSC em relação ao Capítulo 2 está em J_3 que relaciona as equações algébricas com as variáveis de estado. Nesta submatriz são incluídas $3 n_{esp}$ colunas formadas apenas por zeros, referentes à atuação do ESP. A nova submatriz gerada $J_{3_{esp}}$ encontra-se representada na equação (111).

$$J_{3_{esp}} = \left[\begin{array}{c|ccc} J_3 & 0 & 0 & 0 \\ \hline & 0 & 0 & 0 \end{array} \right] \quad (111)$$

Levando-se em consideração que as submatrizes incluídas possuem nb linhas e n_{esp} colunas, observa-se que $J_{3_{esp}}$ é uma submatriz formada por $2 nb$ linhas e $4 ng + 3 n_{esp}$ colunas.

Por fim, a última modificação acontece em B_1 que recebe a inclusão de $3 n_{esp}$ linhas formando a submatriz $B_{1_{esp}}$, expressa na equação (112).

$$B_{1_{esp}} = \left[\begin{array}{c|ccc} & B_1 & & \\ \hline D_{17_k} & 0 & 0 & 0 \\ D_{28_k} & 0 & 0 & 0 \\ D_{39_k} & 0 & 0 & 0 \end{array} \right] \quad (112)$$

Sabendo-se que a submatriz B_1 possui $4 ng$ linhas e $2 ng + 2 nb$ colunas, têm-se que a nova matriz $B_{1_{esp}}$ possui $4 ng + 3 n_{esp}$ linhas e $2 ng + 2 nb$ colunas.

4.2 POWER OSCILLATION DAMPING (POD)

Com a interligação dos sistemas elétricos de potência a partir da década de 50, fez-se necessária a construção de longas linhas de transmissão, e com elas surgiram problemas referentes às oscilações eletromecânicas de baixa frequência do tipo interárea (KLEIN; ROGERS; KUNDUR, 1991; LUOR et al., 1999; VALLE, 2014).

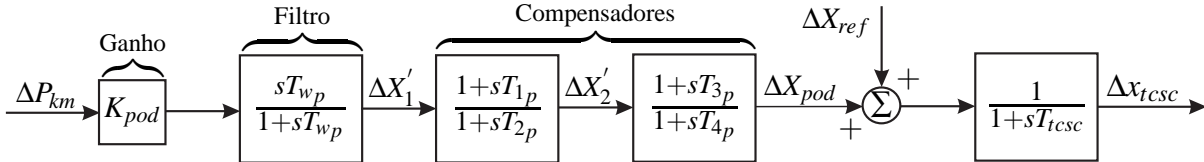
O advento dos dispositivos FACTS possibilitou que um novo controlador denominado POD fosse proposto. Ele possui estrutura básica semelhante ao ESP, sendo projetado para inserir um sinal suplementar à malha de controle do FACTS e, dessa forma, poder atuar sobre as oscilações de modo interárea (YANG; LIU; MCCALLEY, 1998; WANG; SWIFT; LI, 1998; CAI; ERLICH, 2005; FURINI; ARAUJO, 2008).

Neste trabalho, o sinal de entrada utilizado pelo controlador POD é a variação do fluxo de potência ativa (ΔP_{km}) da linha de transmissão em que o TCSC encontra-se instalado. Por se tratar de um sinal local, diminuem-se eventuais custos com tráfego de dados e aumenta-se a confiabilidade da operação, já que se exclui a dependência de um segundo sistema (de comunicação) (YANG; LIU; MCCALLEY, 1998; GAMA, 1999; FURINI; ARAUJO, 2008).

A estrutura do controlador POD é apresentada no diagrama de blocos da Figura 9. Observa-se que o controlador insere um sinal (ΔX_{pod}) na malha de controle do TCSC, formando

um conjunto TCSC-POD. Além disso, nota-se que as diferenças em relação ao ESP se encontram nos sinais de entrada e onde os sinais de saída atuam, já que os parâmetros presentes na estrutura do POD, como o ganho (K_{pod}), as constantes de tempo dos compensadores de fase (T_{1p} , T_{2p} , T_{3p} e T_{4p}) e do filtro *washout* (T_{wp}), possuem o mesmo significado dos parâmetros do controlador ESP.

Figura 9 - Diagrama de blocos - estrutura do conjunto TCSC-POD.



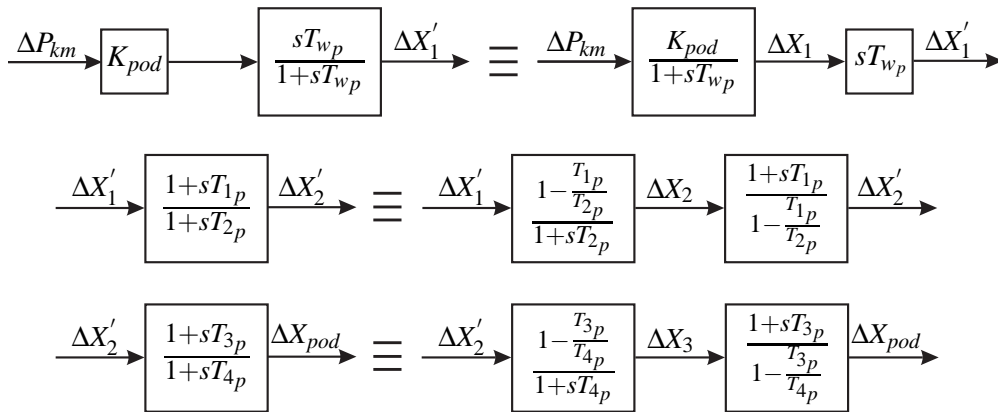
Fonte: Adaptado de Valle (2010), Takahashi (2013) e Fortes (2016).

4.2.1 Equações Diferenciais do POD

O sinal de entrada utilizado pelo controlador POD é o fluxo de potência ativa na linha de transmissão (na sua forma linearizada), apresentado pela equação (166), ver Apêndice B.

Para a dedução das equações que compõem o modelo do controlador POD, considera-se que o diagrama de blocos do controlador apresentado na Figura 9 pode ser dividido por partes, conforme mostrado na Figura 10, tornando possível a obtenção, por inspeção, das equações apresentadas em (113)-(118) (VALLE, 2010; TAKAHASHI, 2013; FORTES, 2016).

Figura 10 - Diagrama de blocos - divisão por partes da estrutura do controlador POD.



Fonte: Adaptado de Valle (2010), Takahashi (2013) e Fortes (2016).

$$\Delta \dot{X}_1 = \frac{1}{T_{wp}} (K_{pod} \Delta P_{km} - \Delta X_1) \tag{113}$$

$$\Delta X'_1 = K_{pod} \Delta P_{km} - \Delta X_1 \tag{114}$$

$$\Delta\dot{X}_2 = \frac{1}{T_{2p}} \left[\left(1 - \frac{T_{1p}}{T_{2p}} \right) (K_{pod} \Delta P_{km} - \Delta X_1) - \Delta X_2 \right] \quad (115)$$

$$\Delta X_2' = \frac{T_{1p}}{T_{2p}} (K_{pod} \Delta P_{km} - \Delta X_1) + \Delta X_2 \quad (116)$$

$$\Delta\dot{X}_3 = \frac{1}{T_{4p}} \left\{ \left(1 - \frac{T_{3p}}{T_{4p}} \right) \left[\Delta X_2 + \frac{T_{1p}}{T_{2p}} (K_{pod} \Delta P_{km} - \Delta X_1) \right] - \Delta X_3 \right\} \quad (117)$$

$$\Delta X_{pod} = \frac{T_{3p}}{T_{4p}} \left[\Delta X_2 + \frac{T_{1p}}{T_{2p}} (K_{pod} \Delta P_{km} - \Delta X_1) \right] + \Delta X_3 \quad (118)$$

Nas equações (113)-(118), têm-se que $\Delta\dot{X}_1$, $\Delta\dot{X}_2$ e $\Delta\dot{X}_3$ são as variáveis de estado do controlador POD, enquanto $\Delta X_1'$, $\Delta X_2'$ e ΔX_{pod} representam o sinal de saída do filtro *washout*, do primeiro bloco compensador de fase e do segundo bloco compensador de fase, respectivamente.

Considerando que o sinal de saída do controlador POD (ΔX_{pod}) é inserido na malha de controle do TCSC, torna-se possível obter a equação (119), referente à variável de estado na saída do conjunto TCSC-POD ($\Delta\dot{x}_{tcsc}$).

$$\Delta\dot{x}_{tcsc} = \frac{1}{T_{tcsc}} \left\{ \Delta X_3 + \frac{T_{3p}}{T_{4p}} \left[\Delta X_2 + \frac{T_{1p}}{T_{2p}} (K_{pod} \Delta P_{km} - \Delta X_1) \right] + \Delta X_{ref} - \Delta x_{tcsc} \right\} \quad (119)$$

A instalação de um controlador TCSC-POD no SEP, na modelagem apresentada, insere quatro novas variáveis de estado, expressas nas equações (113), (115), (117) e (119). Substituindo na equação (113) o sinal de entrada do controlador (ΔP_{km}) e definindo os coeficientes C_{11} , C_{12} , C_{13} , C_{14} , C_{15} e C_{16} , obtém-se o conjunto de equações (120).

$$\Delta\dot{X}_1 = C_{11} \Delta\theta_k + C_{12} \Delta\theta_m + C_{13} \Delta V_k + C_{14} \Delta V_m + C_{15} \Delta x_{tcsc} + C_{16} \Delta X_1 \quad (120a)$$

$$C_{11} = \frac{K_{pod} A1_{km}}{T_{wp}} \quad (120b)$$

$$C_{12} = \frac{K_{pod} A2_{km}}{T_{wp}} \quad (120c)$$

$$C_{13} = \frac{K_{pod} A3_{km}}{T_{wp}} \quad (120d)$$

$$C_{14} = \frac{K_{pod} A4_{km}}{T_{wp}} \quad (120e)$$

$$C_{15} = \frac{K_{pod}A5_{km}}{T_{wp}} \quad (120f)$$

$$C_{16} = -\frac{1}{T_{wp}} \quad (120g)$$

Substituindo na equação (115) o sinal de entrada do controlador e definindo os coeficientes C_{21} , C_{22} , C_{23} , C_{24} , C_{25} , C_{26} e C_{27} , obtém-se o conjunto de equações (121).

$$\Delta\dot{X}_2 = C_{21}\Delta\theta_k + C_{22}\Delta\theta_m + C_{23}\Delta V_k + C_{24}\Delta V_m + C_{25}\Delta x_{tcsc} + C_{26}\Delta X_1 + C_{27}\Delta X_2 \quad (121a)$$

$$C_{21} = \frac{K_{pod}A1_{km}}{T_{2p}} \left(1 - \frac{T_{1p}}{T_{2p}}\right) \quad (121b)$$

$$C_{22} = \frac{K_{pod}A2_{km}}{T_{2p}} \left(1 - \frac{T_{1p}}{T_{2p}}\right) \quad (121c)$$

$$C_{23} = \frac{K_{pod}A3_{km}}{T_{2p}} \left(1 - \frac{T_{1p}}{T_{2p}}\right) \quad (121d)$$

$$C_{24} = \frac{K_{pod}A4_{km}}{T_{2p}} \left(1 - \frac{T_{1p}}{T_{2p}}\right) \quad (121e)$$

$$C_{25} = \frac{K_{pod}A5_{km}}{T_{2p}} \left(1 - \frac{T_{1p}}{T_{2p}}\right) \quad (121f)$$

$$C_{26} = -\frac{1}{T_{2p}} \left(1 - \frac{T_{1p}}{T_{2p}}\right) \quad (121g)$$

$$C_{27} = -\frac{1}{T_{2p}} \quad (121h)$$

Substituindo na equação (117) o sinal de entrada do controlador e definindo os coeficientes C_{31} , C_{32} , C_{33} , C_{34} , C_{35} , C_{36} , C_{37} e C_{38} , obtém-se o conjunto de equações (122).

$$\Delta\dot{X}_3 = C_{31}\Delta\theta_k + C_{32}\Delta\theta_m + C_{33}\Delta V_k + C_{34}\Delta V_m + C_{35}\Delta x_{tcsc} + C_{36}\Delta X_1 + C_{37}\Delta X_2 + \\ + C_{38}\Delta X_3 \quad (122a)$$

$$C_{31} = \frac{T_{1p}K_{pod}A1_{km}}{T_{2p}T_{4p}} \left(1 - \frac{T_{3p}}{T_{4p}}\right) \quad (122b)$$

$$C_{32} = \frac{T_{1p} K_{pod} A_{2km}}{T_{2p} T_{4p}} \left(1 - \frac{T_{3p}}{T_{4p}} \right) \quad (122c)$$

$$C_{33} = \frac{T_{1p} K_{pod} A_{3km}}{T_{2p} T_{4p}} \left(1 - \frac{T_{3p}}{T_{4p}} \right) \quad (122d)$$

$$C_{34} = \frac{T_{1p} K_{pod} A_{4km}}{T_{2p} T_{4p}} \left(1 - \frac{T_{3p}}{T_{4p}} \right) \quad (122e)$$

$$C_{35} = \frac{T_{1p} K_{pod} A_{5km}}{T_{2p} T_{4p}} \left(1 - \frac{T_{3p}}{T_{4p}} \right) \quad (122f)$$

$$C_{36} = -\frac{T_{1p}}{T_{2p} T_{4p}} \left(1 - \frac{T_{3p}}{T_{4p}} \right) \quad (122g)$$

$$C_{37} = \frac{1}{T_{4p}} \left(1 - \frac{T_{3p}}{T_{4p}} \right) \quad (122h)$$

$$C_{38} = -\frac{1}{T_{4p}} \quad (122i)$$

Por fim, reescrevendo a equação (119) e definindo os coeficientes C_{41} , C_{42} , C_{43} , C_{44} , C_{45} , C_{46} , C_{47} , C_{48} e C_{49} , obtém-se o conjunto de equações (123).

$$\Delta \dot{x}_{tcsc} = C_{41} \Delta \theta_k + C_{42} \Delta \theta_m + C_{43} \Delta V_k + C_{44} \Delta V_m + C_{45} \Delta x_{tcsc} + C_{46} \Delta X_1 + C_{47} \Delta X_2 + \\ + C_{48} \Delta X_3 + C_{49} \Delta X_{ref} \quad (123a)$$

$$C_{41} = \frac{T_{1p} T_{3p} K_{pod} A_{1km}}{T_{2p} T_{4p} T_{tcsc}} \quad (123b)$$

$$C_{42} = \frac{T_{1p} T_{3p} K_{pod} A_{2km}}{T_{2p} T_{4p} T_{tcsc}} \quad (123c)$$

$$C_{43} = \frac{T_{1p} T_{3p} K_{pod} A_{3km}}{T_{2p} T_{4p} T_{tcsc}} \quad (123d)$$

$$C_{44} = \frac{T_{1p} T_{3p} K_{pod} A_{4km}}{T_{2p} T_{4p} T_{tcsc}} \quad (123e)$$

$$C_{45} = \frac{1}{T_{tcsc}} \left(\frac{T_{1p} T_{3p} K_{pod} A_{5km}}{T_{2p} T_{4p}} - 1 \right) \quad (123f)$$

$$C_{46} = -\frac{T_{1p} T_{3p}}{T_{2p} T_{4p} T_{tcsc}} \quad (123g)$$

$$C_{47} = \frac{T_{3p}}{T_{4p} T_{tcsc}} \quad (123h)$$

$$C_{48} = \frac{1}{T_{tcsc}} \quad (123i)$$

$$C_{49} = \frac{1}{T_{tcsc}} \quad (123j)$$

4.2.2 Representação do MSC com inclusão do TCSC-POD

A inclusão do conjunto TCSC-POD no MSC acontece a partir da adição de quatro novas variáveis de estado, expressas nas equações (113), (115), (117) e (119), sendo que as três primeiras indicam o comportamento dinâmico do controlador POD e a última está relacionada à reatância do TCSC.

A adição das novas equações diferenciais é realizada considerando a representação apresentada no Capítulo 3, quando havia apenas a atuação do TCSC no SEP. Dessa forma, as equações algébricas não sofrem alterações, pois o efeito do dispositivo sobre elas já se encontra modelado.

A representação no domínio do tempo encontra-se expressa no conjunto de equações (124).

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{x} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{1pod} & J_{2pod} \\ J_{3pod} & J_{4tcsc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{1pod} \\ B_{2pod} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u \end{bmatrix} \quad (124a)$$

$$\Delta x = \left[[\Delta \omega] [\Delta \delta] [\Delta E'_q] [\Delta E_{fd}] [\Delta X_1] [\Delta X_2] [\Delta X_3] [\Delta X_{tcsc}] \right]^t \quad (124b)$$

$$\Delta z = \left[[\Delta \theta] [\Delta V] \right]^t \quad (124c)$$

$$\Delta u = \left[[\Delta P_m] [\Delta V_{ref}] [\Delta P_c] [\Delta Q_c] [\Delta X_{ref}] \right]^t \quad (124d)$$

Em relação à representação do MSC apresentada no Capítulo 3, observa-se que a única submatriz que não sofre alteração é J_{4tcsc} . Por outro lado, J_1 que relaciona as equações diferenciais com as variáveis de estado é alterada a partir da inclusão de quatro novas variáveis de estado, passando a ser denominada J_{1pod} , sua estrutura encontra-se expressa em (125).

$$J_{1_{pod}} = \left[\begin{array}{cccc|cccc} & & & & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline & & & & C_{16} & 0 & 0 & C_{15} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{26} & C_{27} & 0 & C_{25} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{36} & C_{37} & C_{38} & C_{35} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{46} & C_{47} & C_{48} & C_{45} \end{array} \right] \quad (125)$$

Observa-se que não há relação entre as novas variáveis de estado e as já existentes anteriormente, por essa razão, $J_{1_{pod}}$ acrescenta várias submatrizes compostas por zeros.

A submatriz J_1 é uma matriz quadrada de ordem $4 ng$. Após a inclusão das submatrizes referentes à atuação do controlador POD, e considerando que n_{pod} é o número destes controladores instalados no sistema, têm-se que a nova submatriz $J_{1_{pod}}$ também é uma matriz quadrada, porém de ordem $4 ng + 4 n_{pod}$.

A submatriz $J_{2_{pod}}$, expressa em (126), relaciona as equações diferenciais com as variáveis algébricas e, portanto, recebe a inclusão de $4 n_{pod}$ linhas em relação à submatriz J_2 .

$$J_{2_{pod}} = \left[\begin{array}{cccc|cccc} & & & & & & & \\ & & & & & & & \\ & & & & & & & \\ & & & & & & & \\ \hline 0 & C_{11} & C_{12} & 0 & 0 & C_{13} & C_{14} & 0 \\ 0 & C_{21} & C_{22} & 0 & 0 & C_{23} & C_{24} & 0 \\ 0 & C_{31} & C_{32} & 0 & 0 & C_{33} & C_{34} & 0 \\ 0 & C_{41} & C_{42} & 0 & 0 & C_{43} & C_{44} & 0 \end{array} \right] \quad (126)$$

Considerando que as submatrizes adicionadas, referentes ao controlador POD, possuem n_{pod} linhas e nb colunas, têm-se que a submatriz $J_{2_{pod}}$ possui $4 ng + 4 n_{pod}$ linhas e $2 nb$ colunas. Estas submatrizes são nulas, exceto nos termos referentes às tensões e ângulos das barras em que a linha de transmissão que as conectam possua o conjunto TCSC-POD instalado.

Outra modificação na representação do MSC em relação ao Capítulo 3 está em J_3 , que relaciona as equações algébricas com as variáveis de estado. Nesta submatriz são incluídas $4 n_{pod}$ colunas referentes à atuação do POD. A estrutura da submatriz gerada $J_{3_{pod}}$ encontra-se expressa na equação (127).

$$J_{3_{pod}} = \left[\begin{array}{c|cccc} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & 0 & 0 & 0 & R5_{tcsc_{k,m}} \\ & 0 & 0 & 0 & R5_{tcsc_{m,k}} \\ J_3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & 0 & 0 & 0 & M5_{tcsc_{k,m}} \\ & 0 & 0 & 0 & M5_{tcsc_{m,k}} \\ & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right] \quad (127)$$

A relação das equações algébricas com as variáveis de estado do conjunto TCSC-POD é nula, exceto nas barras que possuem conectadas a si uma linha de transmissão equipada com o TCSC-POD. A submatriz $J_{3_{pod}}$ é formada por $2 nb$ linhas e $4 ng + 4 n_{pod}$ colunas.

A submatriz B_1 também é alterada a partir da inclusão de $4 n_{pod}$ linhas e n_{pod} colunas. A nova matriz gerada $B_{1_{pod}}$ possui $4 ng + 4 n_{pod}$ linhas e $2 ng + 2 nb + n_{pod}$ colunas, sua estrutura é apresentada na equação (128).

$$B_{1_{pod}} = \left[\begin{array}{cccc|c} & & & & 0 \\ & & & & 0 \\ & & & & 0 \\ & & & & 0 \\ & & & & 0 \\ B_1 & & & & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{49} \end{array} \right] \quad (128)$$

Por fim, B_2 recebe a inclusão de uma submatriz de $2 nb$ linhas e n_{pod} colunas formada apenas por zeros, gerando uma nova submatriz denominada $B_{2_{pod}}$, que é composta por $2 nb$ linhas e $2 ng + 2 nb + n_{pod}$ colunas. A submatriz $B_{2_{pod}}$ é apresentada na equação (129).

$$B_{2_{pod}} = \left[\begin{array}{c|c} B_2 & 0 \\ \hline & 0 \end{array} \right] \quad (129)$$

4.3 REPRESENTAÇÃO DO MSC COM ATUAÇÃO DO ESP E TCSC-POD

Nesta subsecção é apresentada a representação do MSC no domínio do tempo considerando a atuação simultânea do controlador ESP e do conjunto TCSC-POD. Para isso, são utilizadas as expressões obtidas em (100), (101), (102), (103), (113), (115), (117) e (119). A representação no domínio do tempo na forma matricial encontra-se expressa no conjunto de equações (130).

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{x} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{1c} & J_{2c} \\ J_{3c} & J_{4tcsc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{1c} \\ B_{2pod} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u \end{bmatrix} \quad (130a)$$

$$\Delta x = \left[[\Delta \omega] [\Delta \delta] [\Delta E'_q] [\Delta E'_{fd}] [\Delta X_1] [\Delta X_2] [\Delta X_3] [\Delta x_{tcsc}] [\Delta V_1] [\Delta V_2] [\Delta V_{esp}] \right]^t \quad (130b)$$

$$\Delta z = [[\Delta \theta] [\Delta V]]^t \quad (130c)$$

$$\Delta u = [[\Delta P_m] [\Delta V_{ref}] [\Delta P_c] [\Delta Q_c] [\Delta X_{ref}]]^t \quad (130d)$$

Em relação ao que foi apresentado anteriormente, aproveitam-se as submatrizes J_{4tcsc} e B_{2pod} demonstradas nas equações (91) e (129), respectivamente. Por outro lado, quatro novas submatrizes são geradas a partir da junção das considerações que foram realizadas separadamente para cada controlador nas subsecções anteriores.

As novas submatrizes são denominadas de J_{1c} , J_{2c} , J_{3c} e B_{1c} , suas estruturas estão apresentadas nas equações (131), (132), (133) e (134), respectivamente.

$$J_{1c} = \begin{bmatrix} -\frac{D_k}{M_k} & -\frac{K1_k}{M_k} & -\frac{K2_k}{M_k} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \omega_{0k} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{K6_k}{T'_{d0k}} & \frac{K5_k}{T'_{d0k}} & \frac{1}{T'_{d0k}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_{rk}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & D_{41k} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{16} & 0 & 0 & C_{15} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{26} & C_{27} & 0 & C_{25} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{36} & C_{37} & C_{38} & C_{35} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{46} & C_{47} & C_{48} & C_{45} & 0 & 0 & 0 \\ D_{11k} & D_{12k} & D_{13k} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & D_{14k} & 0 & 0 \\ D_{21k} & D_{22k} & D_{23k} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & D_{24k} & D_{25k} & 0 \\ D_{31k} & D_{32k} & D_{33k} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & D_{34k} & D_{35k} & D_{36k} \end{bmatrix} \quad (131)$$

$$J_{2_c} = \begin{bmatrix} -\frac{K4_k}{M_k} & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{K3_k}{M_k} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{K8_k}{T_{d0_k}} & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{K7_k}{T_{d0_k}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{K_{r_k}}{T_{r_k}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C_{11} & C_{12} & 0 & 0 & 0 & C_{13} & C_{14} & 0 \\ 0 & 0 & C_{21} & C_{22} & 0 & 0 & 0 & C_{23} & C_{24} & 0 \\ 0 & 0 & C_{31} & C_{32} & 0 & 0 & 0 & C_{33} & C_{34} & 0 \\ 0 & 0 & C_{41} & C_{42} & 0 & 0 & 0 & C_{43} & C_{44} & 0 \\ D_{15_k} & 0 & 0 & 0 & 0 & D_{16_k} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ D_{26_k} & 0 & 0 & 0 & 0 & D_{27_k} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ D_{37_k} & 0 & 0 & 0 & 0 & D_{38_k} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (132)$$

$$J_{3_c} = \begin{bmatrix} 0 & R2_{g_k} & R1_{g_k} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R5_{tcsc_{k,m}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R5_{tcsc_{m,k}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M2_{g_k} & M1_{g_k} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & M5_{tcsc_{k,m}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & M5_{tcsc_{m,k}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (133)$$

$$B_{1_c} = \begin{bmatrix} \frac{1}{M_k} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{K_{r_k}}{T_{r_k}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{49} \\ D_{17_k} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ D_{28_k} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ D_{39_k} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (134)$$

Em relação à dimensão das submatrizes apresentadas nas equações (131)-(134), têm-se:

- J_{1_c} : submatriz quadrada de ordem $4 n_g + 4 n_{pod} + 3 n_{esp}$;
- J_{2_c} : submatriz formada por $4 n_g + 4 n_{pod} + 3 n_{esp}$ linhas e $2 n_b$ colunas;
- J_{3_c} : submatriz formada por $2 n_b$ linhas e $4 n_g + 4 n_{pod} + 3 n_{esp}$ colunas;
- B_{1_c} : submatriz formada por $4 n_g + 4 n_{pod} + 3 n_{esp}$ linhas e $2 n_g + 2 n_b + n_{pod}$ colunas;

4.4 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

Neste Capítulo foram apresentados os controladores ESP e POD, além de suas respectivas modelagens e representações no domínio do tempo considerando o MSC. Para cada ESP instalado no SEP são introduzidas três novas variáveis de estado ao modelo, sendo que o controlador atua de maneira eficiente nos modos de oscilação local. Em relação ao conjunto TCSC-POD, quatro novas variáveis de estado são adicionadas e sua influência se dá principalmente nos modos de oscilação interárea.

No próximo Capítulo são apresentadas as técnicas de ajuste dos parâmetros dos controladores suplementares de amortecimento utilizadas neste trabalho.

5 MÉTODOS DE AJUSTE DOS PARÂMETROS DOS CONTROLADORES

Para que os controladores suplementares ESP e TCSC-POD insiram amortecimento adicional desejável aos modos oscilatórios de interesse, seus parâmetros devem ser ajustados de forma conveniente. Neste Capítulo, três meta-heurísticas são apresentadas para a realização do ajuste dos parâmetros destes controladores.

Inicialmente, o problema de otimização é formalmente definido. Na sequência, um Algoritmo Genético tradicional e o algoritmo *Particle Swarm Optimization* são apresentados, tratam-se de duas técnicas amplamente difundidas em diversos problemas de otimização, inclusive no ajuste dos parâmetros dos controladores de amortecimento do SEP, onde apresentam resultados confiáveis e de boa qualidade (TARANTO; FALCAO, 1998; ABDEL-MAGID et al., 1999; BOMFIM; TARANTO; FALCAO, 2000; AL-AWAMI; ABDEL-MAGID; ABIDO, 2007; SHAYEGHI; SAFARI; SHAYANFAR, 2010; ESLAMI et al., 2012; HASSAN et al., 2014; PERES et al., 2015; HASANVAND et al., 2016; MENEZES; ARAUJO; VALLE, 2016; GAMINO et al., 2016a).

Diante do exposto, o AG e o PSO servem de parâmetro para comparações com o método proposto neste trabalho, uma técnica baseada no algoritmo BVNS, que é apresentada no final deste Capítulo.

O BVNS original é adaptado para trabalhar com variáveis contínuas representando as constantes de tempo e ganhos dos controladores, mudanças nas estruturas de vizinhança baseadas em trocas de posição e uma etapa de busca local utilizando o conceito de sensibilidade com o objetivo de atender as peculiaridades do tipo de problema proposto.

5.1 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO

O objetivo da realização do ajuste dos controladores suplementares de amortecimento é garantir a estabilidade a pequenas perturbações do SEP ao elevar o amortecimento dos modos oscilatórios existentes para níveis adequados.

A análise da estabilidade a pequenas perturbações acontece a partir da representação do sistema no espaço de estados. Para se obter a matriz de estados \mathbf{A} , elimina-se o vetor de variáveis algébricas ($[\Delta z]$) da representação no domínio do tempo do modelo. Este processo pode ser realizado separando a relação matricial, por exemplo, da equação (52) em duas outras equações expressas em (135) e (136).

$$\Delta \dot{x} = J_1 [\Delta x] + J_2 [\Delta z] + B_1 [\Delta u] \quad (135)$$

$$0 = J_3 [\Delta x] + J_4 [\Delta z] + B_2 [\Delta u] \quad (136)$$

A equação (137) é obtida ao isolar o vetor de variáveis algébricas na equação (136).

$$[\Delta z] = -J_4^{-1} J_3 [\Delta x] - J_4^{-1} B_2 [\Delta u] \quad (137)$$

Substituindo (137) em (135), obtém-se (138).

$$\Delta \dot{x} = J_1 [\Delta x] + J_2 (-J_4^{-1} J_3 [\Delta x] - J_4^{-1} B_2 [\Delta u]) + B_1 [\Delta u] \quad (138)$$

A representação no espaço de estados se encontra na equação (139), ela é obtida reescrevendo a equação (138). A matriz de estados \mathbf{A} está expressa na equação (139b), sendo que na equação (139c) encontra-se a matriz de entradas \mathbf{B} .

$$\Delta \dot{x} = \mathbf{A} [\Delta x] + \mathbf{B} [\Delta u] \quad (139a)$$

$$\mathbf{A} = J_1 - J_2 J_4^{-1} J_3 \quad (139b)$$

$$\mathbf{B} = B_1 - J_2 J_4^{-1} B_2 \quad (139c)$$

Por fim, os valores de s que satisfazem a equação (140) (equação característica da matriz \mathbf{A}) são os autovalores da matriz de estados, que podem aparecer na forma de números reais (modo não oscilatório) ou de pares complexos conjugados (modo oscilatório) (KUNDUR, 1994).

$$\det(sI - \mathbf{A}) = 0 \quad (140)$$

Considerando o primeiro método de Lyapunov (KUNDUR, 1994), ao analisar os autovalores da matriz de estados do sistema linearizado, desde que consideradas apenas pequenas variações no ponto de operação e que nenhum dos autovalores possuam parte real nula, é possível concluir sobre a estabilidade do sistema original.

Dessa forma, a estabilidade a pequenas perturbações do SEP estará garantida se todos os autovalores da matriz de estados \mathbf{A} possuírem parte real negativa. Por outro lado, um autovalor real positivo indicará instabilidade monotônica e um par complexo conjugado com parte real positiva indicará instabilidade oscilatória (KUNDUR, 1994).

Um modo oscilatório associado a um par complexo conjugado pode ser expresso de acordo com a equação (141), onde (λ_i) é o modo oscilatório i obtido através do cálculo dos autovalores da matriz de estados da representação no espaço de estados, σ_i e ω_{d_i} representam a parte real e a frequência natural amortecida deste modo oscilatório.

$$\lambda_i = \sigma_i \pm j\omega_{d_i} \quad (141)$$

Partindo da equação (141), torna-se possível definir a frequência natural não amortecida ω_{n_i} (em hertz) e o coeficiente de amortecimento do modo oscilatório ξ_i , de acordo com as equações (142) e (143), respectivamente.

$$\omega_{n_i} = \frac{|\lambda_i|}{2\pi} \quad (142)$$

$$\xi_i = -\frac{\sigma_i}{|\lambda_i|} \quad (143)$$

A frequência natural não amortecida pode ser utilizada para identificar o tipo do modo oscilatório em análise de acordo com sua faixa de ocorrência. Verifica-se ainda que o coeficiente de amortecimento é fortemente ligado à parte real do modo oscilatório, levando em conta que seu denominador sempre será positivo, o amortecimento será positivo quando o modo for estável (parte real negativa) e será negativo quando o modo for instável (parte real positiva), logo o amortecimento pode ser utilizado como um indicador de estabilidade.

5.1.1 Função Objetivo

Neste trabalho, o problema de otimização é formulado conforme mostrado nas equações (144)-(150). A função objetivo $F_1(x)$ da equação (144) busca minimizar a diferença entre o coeficiente de amortecimento desejado (ξ_i^{des}) previamente estabelecido e o coeficiente de amortecimento calculado (ξ_i^{calc}) para todos os m modos oscilatórios de interesse, considerando o conjunto de restrições (145)-(150).

Quando a diferença calculada pela função objetivo da equação (144) tende a zero e as restrições das equações (145)-(150) são simultaneamente respeitadas, significa que todos os modos oscilatórios de interesse estão com níveis de amortecimento superiores (ou iguais) em relação ao mínimo amortecimento previamente estabelecido, ou seja, os parâmetros dos controladores foram ajustados adequadamente e o objetivo foi atingido.

$$\min \quad F_1(x) = \sum_{i=1}^m G_i \quad (144a)$$

$$G_i = \begin{cases} 0, & \text{se } \xi_i^{calc} \geq \xi_i^{des} \\ \xi_i^{des} - \xi_i^{calc}, & \text{se } \xi_i^{calc} < \xi_i^{des} \end{cases} \quad (144b)$$

$$s.a. \quad T_1^{min} \leq T_{1k} \leq T_1^{max} \quad (145)$$

$$T_2^{min} \leq T_{2k} \leq T_2^{max} \quad (146)$$

$$T_{1p}^{min} \leq T_{1p} \leq T_{1p}^{max} \quad (147)$$

$$T_{2p}^{min} \leq T_{2p} \leq T_{2p}^{max} \quad (148)$$

$$K_{esp}^{min} \leq K_{esp_k} \leq K_{esp}^{max} \quad (149)$$

$$K_{pod}^{min} \leq K_{pod} \leq K_{pod}^{max} \quad (150)$$

O cálculo do amortecimento (ξ_i^{calc}) é realizado através da equação (143) e as restrições das equações (145)-(150) estão relacionadas aos limites inferiores e superiores dos parâmetros dos controladores suplementares de amortecimento.

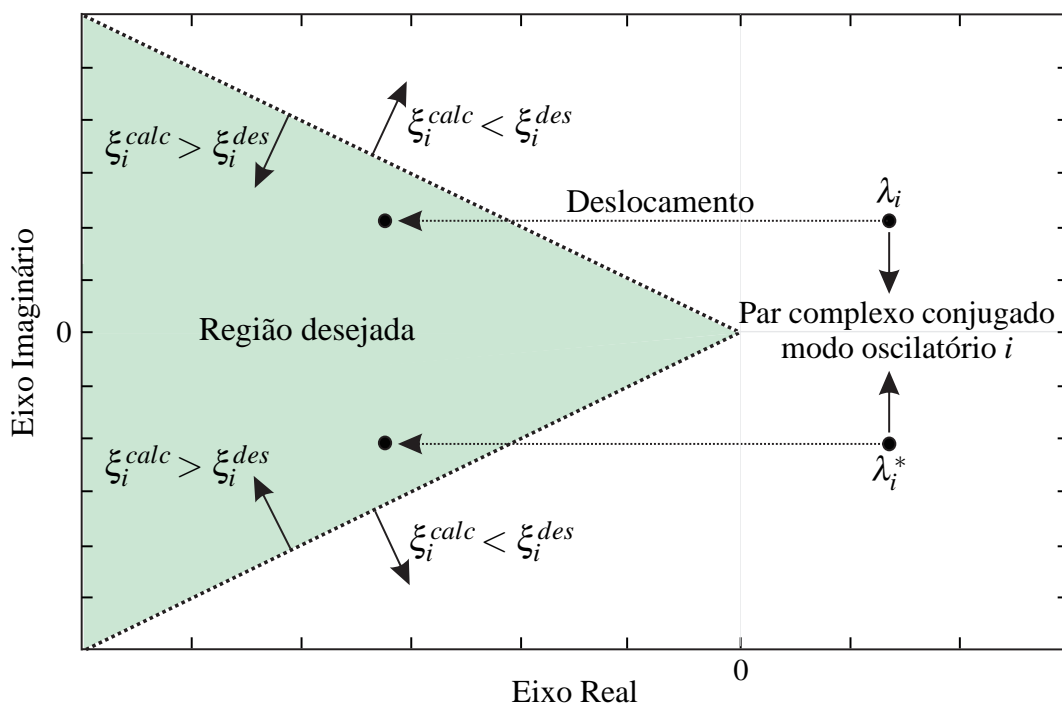
A função objetivo $F_1(x)$ considera apenas um ponto de operação do SEP durante o processo de otimização. Diante do exposto, torna-se interessante definir uma função objetivo $F_2(x)$ que considera n cenários de variações de carga do SEP, garantindo a estabilidade a pequenas perturbações para múltiplos pontos de operação. A função objetivo $F_2(x)$ utilizada encontra-se expressa na equação (151), trata-se de uma versão modificada da função objetivo apresentada em Bomfim, Taranto e Falcao (2000). O cálculo do amortecimento $\xi_{i,j}^{calc}$ também é realizado através da equação (143), a diferença em relação ao cálculo do amortecimento ξ_i^{calc} consiste apenas em considerar um cenário de carregamento (j) diferente do cenário base.

$$\min \quad F_2(x) = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m G_{i,j} \quad (151a)$$

$$G_{i,j} = \begin{cases} 0, & \text{se } \xi_{i,j}^{calc} \geq \xi_{i,j}^{des} \\ \xi_{i,j}^{des} - \xi_{i,j}^{calc}, & \text{se } \xi_{i,j}^{calc} < \xi_{i,j}^{des} \end{cases} \quad (151b)$$

De forma geral, o objetivo do problema formulado pode ser interpretado graficamente conforme mostrado na Figura 11, que apresenta o deslocamento de um modo oscilatório anteriormente instável (parte real positiva) para uma região desejada que garante a estabilidade do modo e níveis adequados de amortecimento. Observa-se que ao obter o valor mínimo da função objetivo $F_1(x)$ ou $F_2(x)$, que na formulação proposta é zero, espera-se que todos os autovalores de interesse tenham se deslocado para uma região pré-definida a partir da escolha do amortecimento desejado.

Figura 11 - Deslocamento desejado para os autovalores de interesse.



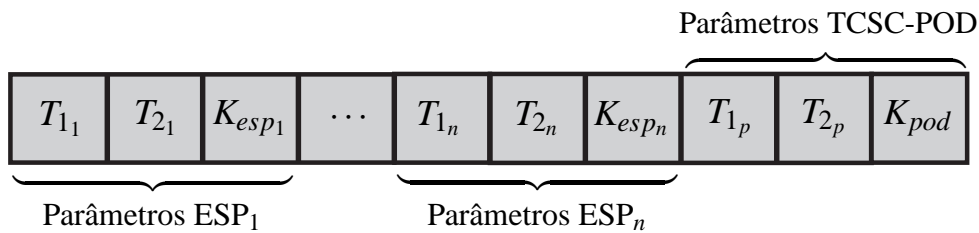
Fonte: Elaboração do próprio autor.

5.1.2 Codificação

Os ganhos e as constantes de tempo dos blocos compensadores de fase dos controladores suplementares de amortecimento ESPs e TCSC-POD são os parâmetros que devem ser ajustados. As constantes de tempo do filtro *washout* T_{wk} e T_{wp} são fixadas e não são ajustadas pelos métodos de otimização.

Na Figura 12 é mostrada a proposta de vetor solução a ser utilizado por todas as técnicas de ajuste neste trabalho, onde cada coluna contém uma variável contínua a ser ajustada. O vetor solução passa a ter três colunas para cada controlador, sendo duas constantes de tempo e o ganho. As primeiras $3n$ posições são ocupadas por n controladores ESPs e as posições restantes pelos parâmetros do controlador TCSC-POD.

Figura 12 - Proposta de solução utilizada pelos métodos de otimização.



Fonte: Adaptado de Gamino et al. (2016a).

5.2 ALGORITMOS GENÉTICOS

Os AGs são métodos de otimização que foram inicialmente propostos por Holland (1992). Baseados no processo da evolução das espécies proposta por Charles Darwin, algoritmos desta classe levam em consideração elementos como a hereditariedade e possuem etapas que simulam a biologia evolutiva como a seleção, a recombinação (*crossover*) e a mutação, promovendo assim, a manutenção dos indivíduos melhor adaptados. Trata-se de um método flexível, com alta capacidade de produção de soluções de ótima qualidade em problemas complexos (MICHALEWICZ, 1996; GENDREAU; POTVIN, 2010).

Pelo fato do método ser baseado na biologia evolutiva e na genética, alguns termos utilizados nestas áreas possuem seu correspondente no método de otimização (CASTRO, 2001):

- **Operadores genéticos:** são as ações que o algoritmo executa sobre os indivíduos simulando as etapas da biologia evolutiva. Exemplo: *crossover* e mutação;
- **Cromossomo:** sequência de caracteres que estão relacionados às variáveis do problema. Cada cromossomo contém a codificação de uma possível solução do problema de otimização (indivíduo);
- **População:** conjunto que engloba todas as possíveis soluções (indivíduos) durante o processamento;
- **Genes:** é a unidade básica do cromossomo. Um cromossomo (indivíduo) é composto por uma sequência de genes, onde cada um dos genes descreve uma determinada variável do problema.

Por se tratar de um algoritmo evolutivo, os AGs possuem a característica de manter uma população de soluções candidatas durante o processo, diferentemente de outros métodos como o próprio BVNS que processa um único ponto no espaço de busca por instante.

Na sua forma tradicional, o AG gera a população inicial de forma aleatória. Na sequência, as soluções são avaliadas e ocorre uma etapa de seleção, na qual os indivíduos melhor adaptados de acordo com a função objetivo recebem o direito de se reproduzir. A reprodução é simulada pelas etapas de recombinação e mutação.

Por fim, a nova população formada pelos descendentes gerados substitui a população corrente. O ciclo geracional é repetido até que uma determinada condição de parada seja satisfeita. Na Figura 13 é apresentado o pseudocódigo do AG básico utilizado neste trabalho, é importante observar que a cada ciclo geracional a população corrente é integralmente substituída pelos descendentes gerados.

Figura 13 - Pseudocódigo de um Algoritmo Genético.

Algoritmo 1: Algoritmo Genético

- 1 **Inicializar:** codificação, tamanho da população, taxas de recombinação e mutação;
 - 2 Gerar população inicial P e avaliar cada um de seus indivíduos;
 - 3 **Repetir;**
 - 4 **Repetir;**
 - 5 Selecionar 2 indivíduos da população para reprodução;
 - 6 Aplicar a etapa de recombinação;
 - 7 Aplicar a etapa de mutação;
 - 8 Inserir um novo indivíduo na nova população P' ;
 - 9 **Até** completar a população P' ;
 - 10 Avaliar cada indivíduo da população P' ;
 - 11 $P \leftarrow P'$;
 - 12 **Até** completar objetivo final ou o número de cálculos da função objetivo;
 - 13 **Fim**
-

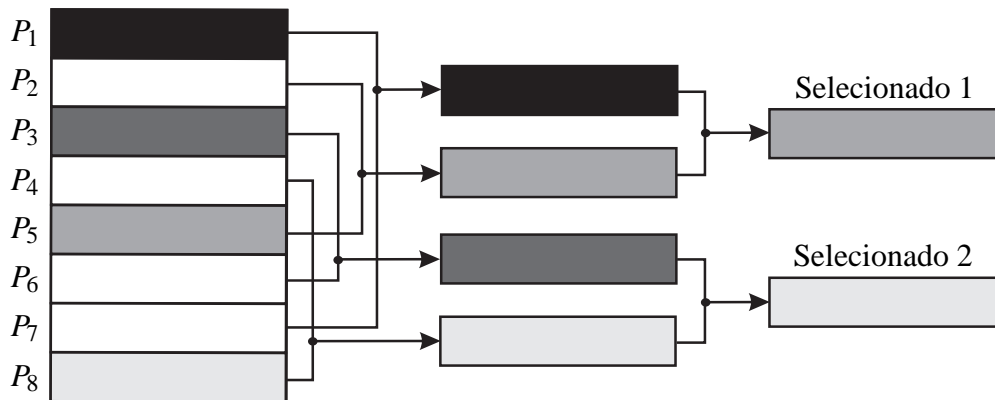
Fonte: Adaptado de Holland (1992).

5.2.1 Etapa de Seleção

A etapa de seleção pode ser realizada de diversas formas, dentre as mais utilizadas estão a seleção por torneio, seleção elitista, rank e o método da roleta (GOLDBERG, 1989; MICHALEWICZ, 1996; GEN; CHENG, 2000).

Neste trabalho, a etapa de seleção é realizada por torneio. As soluções da população corrente são escolhidas de maneira aleatória. Na sequência são realizados jogos sucessivos considerando duas soluções a cada jogo e mantendo-se as vencedoras até que restem apenas duas soluções candidatas à reprodução (selecionado 1 e selecionado 2). As soluções vencedoras a cada jogo são aquelas que apresentam a melhor função objetivo. Na Figura 14 é mostrada a realização de uma etapa de seleção por torneio.

Figura 14 - Seleção por torneio.

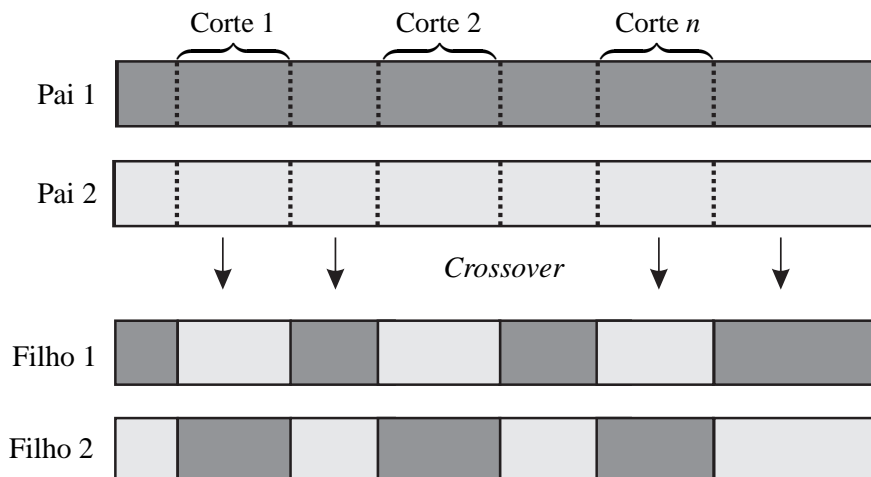


Fonte: Adaptado de Gamino et al. (2016a).

5.2.2 Etapa de Recombinação ou Crossover

O operador de *crossover* ou recombinação simula a troca de material genético (genes) entre os pais para formação de novos descendentes. Por ser um método de otimização amplamente utilizado, diversos operadores de recombinação podem ser encontrados na literatura, dentre os mais utilizados estão o *crossover* de um ponto, dois ou multipontos (GOLDBERG, 1989).

Neste trabalho é utilizado um operador *crossover* multipontos, sendo que o número de pontos de cruzamento é proporcional à dimensão do problema. Desta forma são definidas n regiões de corte para troca de genes. Na Figura 15 é mostrada a recombinação por cruzamento multipontos. Os pontos de corte para transferência de material genético são definidos de forma aleatória, desde que não haja sobreposição em relação à outra região de corte.

Figura 15 - *Crossover* multipontos.

Fonte: Adaptado de Gamino et al. (2016a).

5.2.3 Etapa de Mutação

O processo de reprodução é encerrado com a etapa de mutação, seu objetivo é produzir uma variabilidade extra na população sem que seja destruído o progresso do algoritmo. Dessa forma, genes dos descendentes gerados são escolhidos aleatoriamente para sofrer uma mutação, para tal é considerada uma taxa de mutação sendo que todos os genes possuem a mesma probabilidade de serem escolhidos. Neste trabalho, para cada gene escolhido para mutação, uma pequena perturbação é aplicada a ele conforme equações (152) e (153).

$$x'_k = x_k \pm \Delta x_k^t \quad (152)$$

$$\Delta x_k^t = \beta (x_{max}^t - x_{min}^t) \quad (153)$$

Nas equações (152) e (153), Δx_k^t é a perturbação aplicada ao gene x_k de acordo com o tipo t da variável que ele contém, respeitando seus limites máximos (x_{max}^t) e mínimos (x_{min}^t). β é a taxa de perturbação a ser aplicada ao gene escolhido para mutação. Na obtenção do gene mutacionado x'_k , a perturbação pode ser positiva ou negativa com igual probabilidade de ocorrência. Quando o valor a ser assumido por um gene, após a aplicação de uma perturbação, extrapolar os limites (inferior ou superior) da variável armazenada por ele, o valor assumido por esse gene é corrigido e se torna igual ao próprio limite em questão, ou seja, a etapa de mutação não produz infactibilidades durante o processamento.

5.3 ALGORITMO PARTICLE SWARM OPTIMIZATION

O algoritmo PSO é inspirado no comportamento social de seres vivos atuando de maneira coletiva, como por exemplo, um cardume de peixes, uma colônia de insetos ou ainda um bando de pássaros na busca por alimentos. Apesar da inteligência individual limitada das partículas do grupo, observou-se que elas realizavam alterações específicas na posição e na sua velocidade de deslocamento atendendo a conceitos simples como (RAO, 2009):

- **Coesão:** permanecer juntos;
- **Separação:** não ocupar ou se aproximar muito de posições já ocupadas;
- **Alinhamento:** seguir o fluxo geral do grupo.

Proposto inicialmente por Kennedy e Eberhart (1995), o PSO considera cada uma das partículas (indivíduos) do grupo como uma possível solução para o problema de otimização, as

quais se movimentam no espaço de busca procurando uma solução ótima. A movimentação de cada partícula é orientada por experiências individuais e globais, promovendo assim a interação entre as partículas e o uso da inteligência coletiva (RAO, 2009).

Neste trabalho é utilizado um PSO tradicional, visto que inúmeras variações deste método são encontradas na literatura de acordo com as necessidades específicas de cada problema (SHI; EBERHART, 1998; LEE; EL-SHARKAWI, 2008; MENEZES, 2014).

A movimentação de cada partícula no PSO é determinada por sua velocidade de deslocamento $v_i(t)$, conforme equação (154), que se altera a cada transição levando em consideração um fator de inércia W , as variáveis de ponderação c_1 e c_2 , os fatores cognitivos $co_i(t)$ e sociais $so_i(t)$ expressos nas equações (156) e (157), números gerados aleatoriamente r_1 e r_2 compreendidos entre 0 e 1, além da melhor posição ocupada pela partícula i ($Pbest_i$) e a melhor posição ocupada entre todas as partículas ($Gbest$). Dada a posição de uma partícula em uma transição (t), a posição da partícula na transição ($t + 1$) é definida pela equação (155).

$$v_i(t + 1) = Wv_i(t) + c_1r_1co_i(t) + c_2r_2so_i(t) \quad (154)$$

$$x_i(t + 1) = x_i(t) + v_i(t + 1) \quad (155)$$

$$co_i(t) = Pbest_i - x_i(t) \quad (156)$$

$$so_i(t) = Gbest - x_i(t) \quad (157)$$

As melhores posições ocupadas individualmente ($Pbest_i$) ou pelo grupo ($Gbest$) são aquelas que apresentam a melhor função objetivo nestas respectivas situações. Os valores randômicos r_1 e r_2 fazem parte da influência estocástica do método.

As variáveis de ponderação podem influenciar a velocidade da partícula proporcionando maior peso para experiências individuais (c_1) ou experiências do grupo (c_2), sendo possível projetar estes valores observando as peculiaridades do problema de otimização em questão. De acordo com Bratton e Kennedy (2007), o PSO pode convergir de maneira lenta e sem garantia de convergência ao utilizar $c_1 + c_2 < 4,0$. Entretanto, ao utilizar $c_1 + c_2 \geq 4,0$, a convergência pode ser rápida e garantida, sendo comum encontrar na literatura a aplicação desta relação (SHAYEGHI; SAFARI; SHAYANFAR, 2010; ESLAMI et al., 2012; MENEZES, 2014).

O fator de inércia W pondera sobre a velocidade atual da partícula e, quando projetado de maneira conveniente, pode interferir em uma busca mais global ou local. De acordo com Shi e

Eberhart (1998), quando o fator de inércia W é superior a 1,2, o PSO atua basicamente como um método de busca global e procura sempre explorar novas regiões. Para valores de W entre 0,8 e 1,2, a chance do PSO encontrar um ótimo global é maior, porém também é necessário um número maior de iterações. Quando o fator de inércia W é inferior a 0,8, o PSO atua basicamente como um método de busca local e se houver uma solução ótima global na região de busca inicial, o método encontrará esta solução rapidamente, caso contrário o método não encontrará a solução ótima global, ficando limitado a um ótimo local.

Para equilibrar o processo de busca do PSO, sem que fossem ignoradas soluções ótimas devido a uma busca global excessiva, ou ainda, que o método ficasse preso em um ótimo local ao projetar um fator de inércia de baixo valor, Shi e Eberhart (1998) propuseram a utilização de um fator de inércia que variasse de acordo com o número de transições durante o processamento, iniciando em 1,4 (W_{max}) e decaindo linearmente até 0,5 (W_{min}). De acordo com essa proposta o fator de inércia pode ser calculado conforme mostrado na equação (158).

$$W = W_{max} - \left(\frac{W_{max} - W_{min}}{t_{max}} \right) t \quad (158)$$

Na equação (158), W_{max} e W_{min} são os valores inicial e final do fator de inércia, t_{max} é o número máximo de transições e t é o número da transição atual (RAO, 2009).

Durante o processo de transição das partículas é possível que elas procurem ocupar posições fora da região de busca. Diante dessa questão, limites mínimos (x_{min}) e máximos (x_{max}) para as variáveis que compõem a partícula são definidos. Além disso, define-se também um limite máximo para a velocidade de transição (v_{max}) para evitar que sejam ignoradas regiões promissoras durante a execução do método.

A velocidade máxima v_{max} pode ser definida em função do valor máximo x_{max} da variável associada conforme expresso na equação (159), onde γ é um valor geralmente compreendido entre 0,1 e 1,0 (EBERHART; SIMPSON; DOBBINS, 1996; BERGH; ENGELBRECHT, 2002; VALLE, 2014).

$$v_{max} = x_{max} \gamma \quad (159)$$

Diante do exposto, sempre que ocorra a tentativa de extrapolar os limites estabelecidos para as variáveis e para a velocidade de transição, o valor é automaticamente corrigido para o próprio limite em questão. Na Figura 16 é apresentado o pseudocódigo do PSO utilizado.

Figura 16 - Pseudocódigo do algoritmo *Particle Swarm Optimization*.**Algoritmo 2: Particle Swarm Optimization**

```

1 Inicializar: tamanho da população,  $W$ ,  $c_1$ ,  $c_2$ ,  $v_{max}$ ,  $x_{max}$ ,  $x_{min}$ 
2 Determinar posições e velocidades iniciais aleatoriamente
3 Calcular e avaliar a função objetivo para todas as partículas
4 Se (função objetivo é melhor): Atualize  $Gbest$  e  $Pbest_i$ 
5 Se não: Atualize  $Pbest_i$ 
6 Enquanto (condição de parada não for satisfeita):
7   Para (cada partícula) faça:
8     Calcular fatores cognitivos e sociais
9     Faça:  $t \leftarrow t + 1$ ;
10    Atualizar velocidade
11    Atualizar posição
12    Calcular e avaliar a função objetivo
13    Se (função objetivo é a melhor encontrada pela partícula): Atualize  $Pbest_i$ 
14    Se (função objetivo é a melhor encontrada pelo algoritmo): Atualize  $Gbest$ 
15 Fim

```

Fonte: Adaptado de Kennedy e Eberhart (1995).

5.4 BUSCA EM VIZINHANÇA VARIÁVEL BÁSICA

A principal diferença entre as meta-heurísticas existentes é a estratégia utilizada na realização das transições no espaço de busca. O algoritmo VNS e suas derivações exploram sistematicamente trocas nas estruturas de vizinhança com o objetivo de obter soluções de ótima qualidade sem perder a capacidade de sair destes ótimos locais, continuando a procura no espaço de busca (MLADENOVIC; HANSEN, 1997).

Diferentemente dos métodos apresentados anteriormente, algoritmos de busca em vizinhança variável não trabalham com populações de soluções candidatas, a solução corrente também é a incumbente e não é permitida a degradação da solução corrente durante o processo de busca. A estratégia do VNS está baseada em três importantes observações:

- **Item 1:** um ótimo local de uma determinada estrutura de vizinhança não é necessariamente o ótimo local de outra estrutura de vizinhança;
- **Item 2:** um mínimo global é um ótimo local com relação a todas as estruturas de vizinhança;
- **Item 3:** para diversos problemas, ótimos locais com relação a uma ou várias estruturas de vizinhança estão relativamente próximas umas das outras.

As observações ilustram a necessidade de um equilíbrio entre diversificação e intensificação. Ao encontrar um ótimo local durante a execução do algoritmo, deve-se evitar a estagnação e o comprometimento do processo, haja vista a inexistência da garantia de se tratar

do ótimo global, nem mesmo o ótimo local para outras vizinhanças. Por outro lado, quando o ótimo global é encontrado, trata-se também de um ótimo local para todas as vizinhanças e nenhuma outra melhoria se torna possível. Por fim, a terceira observação, de cunho empírico, sugere que se um ótimo local for encontrado numa região próxima a um ótimo global, um algoritmo de busca em vizinhança variável possui grandes possibilidades de encontrá-lo.

Diante do exposto, o algoritmo BVNS realiza mudanças sistemáticas nas estruturas de vizinhança como estratégia de diversificação e uma etapa de busca local como estratégia de intensificação. Na Figura 17 é apresentado o pseudocódigo do algoritmo BVNS proposto, enquanto na Figura 18 é apresentado seu fluxograma.

Figura 17 - Pseudocódigo do algoritmo Busca em Vizinhança Variável Básica.

Algoritmo 3: Busca em Vizinhança Variável Básica

- 1 **Inicializar:** defina o conjunto de estruturas de vizinhança N_k , $k = 1, \dots, k_{final}$,
encontre uma solução x aleatoriamente, escolha o critério de parada;
 - 2 **Repetir;**
 - 3 $k \leftarrow 1$;
 - 4 **Repetir;**
 - 5 Gere aleatoriamente uma solução x' aplicando a vizinhança N_k em x ($x' \in N_k(x)$);
 - 6 Aplique uma etapa de busca local em x' e chame o ótimo local obtido de x'' ;
 - 7 **Se** (ótimo local x'' melhor que a solução incumbente x):
 - 8 Faça o ótimo local se tornar a solução incumbente ($x \leftarrow x''$);
 - 9 Reinicie a busca a partir da primeira estrutura de vizinhança ($k \leftarrow 1$);
 - 10 **Se não:** continue a busca com a próxima vizinhança ($k \leftarrow k + 1$);
 - 11 **Até** a exploração de todas as estruturas de vizinhança ($k = k_{final}$);
 - 12 **Até** que o critério de parada seja satisfeito;
 - 13 **Fim**
-

Fonte: Adaptado de Mladenović e Hansen (1997).

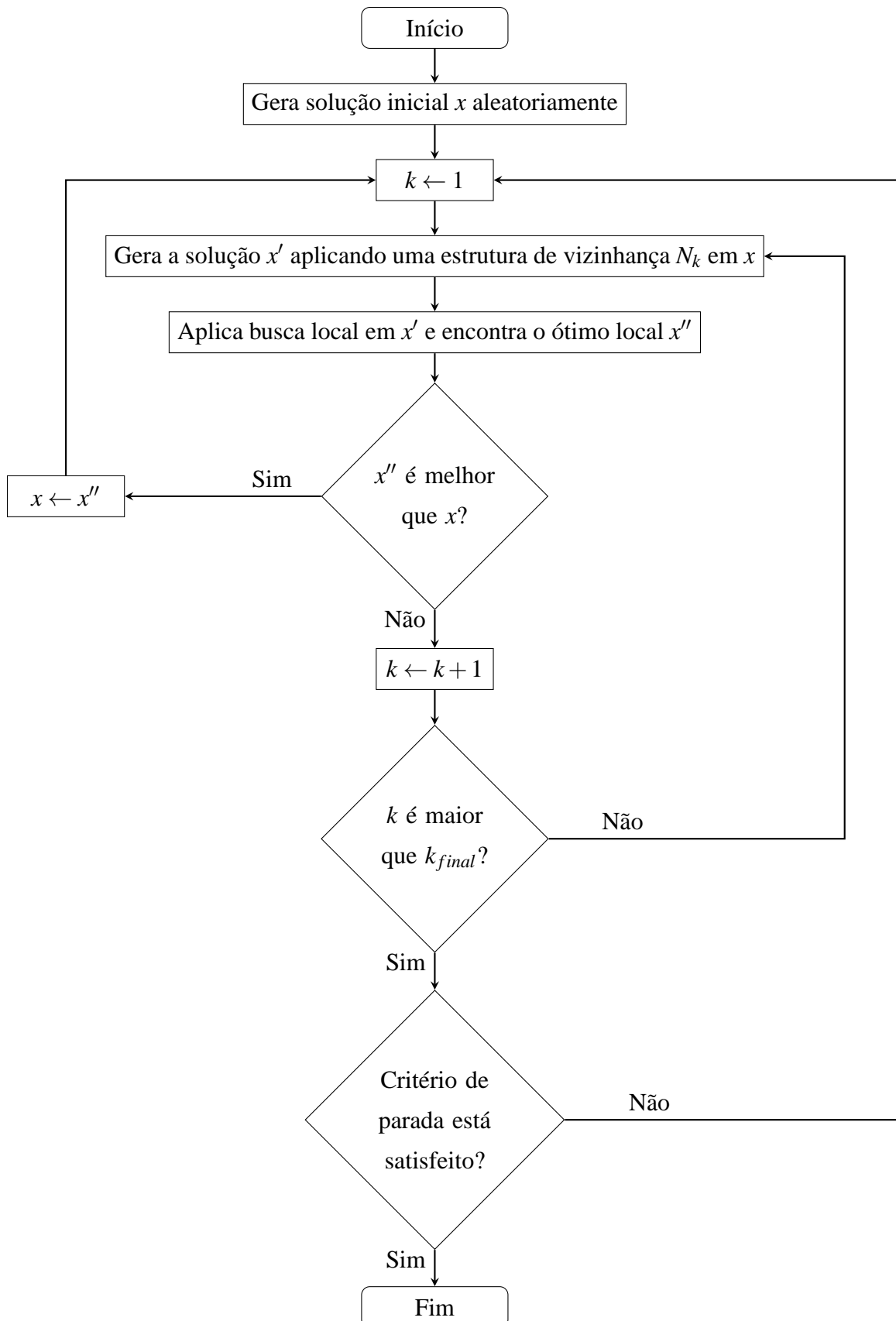
5.4.1 Codificação Contínua

Os parâmetros dos controladores suplementares de amortecimento são compostos por constantes de tempo (em segundos, variáveis contínuas) e ganhos (em pu, variáveis contínuas). Diante disto, torna-se interessante a realização de uma parametrização para que as variáveis envolvidas na codificação possam ser tratadas como adimensionais e se encontrem na mesma faixa de magnitude (entre 0 e 1). Por consequência, um número maior de possibilidades de estruturas de vizinhança podem ser explorados, ampliando a capacidade de busca em diferentes regiões. As equações (160) e (161) mostram a codificação proposta neste trabalho para o BVNS.

$$\mu^n = x_{max}^n - x_{min}^n \quad (160)$$

$$x_i^n = x_{min}^n + \alpha_i \mu^n \quad (161)$$

Figura 18 - Fluxograma do algoritmo Busca em Vizinhança Variável Básica.



Fonte: Adaptado de Mladenović e Hansen (1997).

Nas equações (160) e (161), μ^n é o fator de escala referente à diferença entre os limites máximos (x_{max}^n) e mínimos (x_{min}^n) de uma variável n qualquer dos controladores, α_i é uma variável contínua adimensional compreendida entre 0 e 1 que ocupa a posição i do vetor solução utilizado internamente pelo BVNS. Por fim, x_i^n é o valor assumido pela variável n na posição i do vetor solução ao retornar para sua dimensão original.

Em outras palavras, o BVNS trabalha com uma codificação interna (α_i). Entretanto, quando é necessário o cálculo da função objetivo para tomada de decisões, o algoritmo utiliza a equação (161) para retornar às dimensões originais do problema (segundos e pu).

Dessa forma, além de ampliar o número de estruturas de vizinhança possíveis, outra vantagem da codificação proposta é de que ao garantir que α_i esteja sempre entre 0 e 1, os parâmetros dos controladores estarão sempre dentro de seus limites, assumindo valores intermediários ou seus extremos, eliminando assim a necessidade, por exemplo, da penalização da função objetivo para tratamento de infactibilidades.

5.4.2 Estruturas de Vizinhança

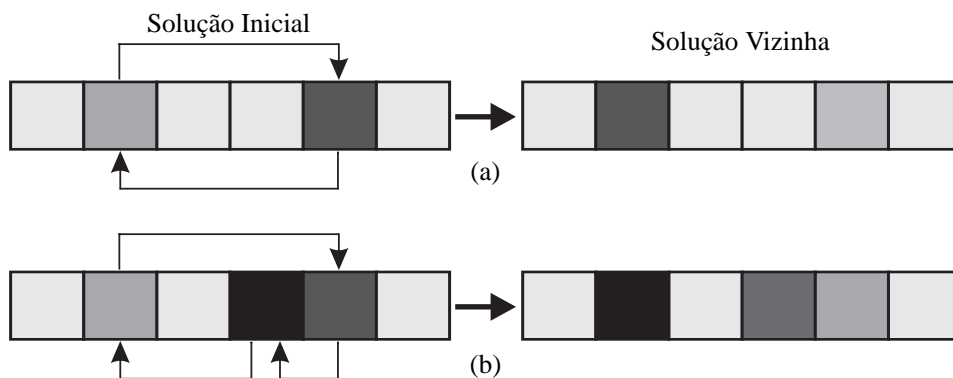
O BVNS explora sistematicamente mudanças nas estruturas de vizinhança como uma de suas estratégias. Em vista disto, uma tarefa relevante em sua programação é a de selecionar o conjunto N_k de estruturas de vizinhança que serão exploradas, sendo $k = 1, 2, \dots, k_{final}$.

Com a codificação proposta, torna-se possível a utilização de estruturas de vizinhança baseadas em trocas de posições. Estas estruturas realizam trocas entre duas ou mais posições (valores armazenados) do vetor solução, sendo que as posições são escolhidas aleatoriamente após a escolha entre dois conjuntos. O primeiro conjunto é formado pelas constantes de tempo dos controladores que devem ser ajustados e o segundo conjunto é formado pelos ganhos. Os dois conjuntos são definidos para que seja possível haver a troca apenas entre variáveis de uma mesma dimensão, mantendo-se assim o significado físico.

Inicialmente, o algoritmo seleciona um dos conjuntos e na sequência define aleatoriamente as posições deste conjunto que terão seus valores trocados. Na Figura 19 são apresentados exemplos de estruturas de vizinhança por trocas entre duas e três posições.

Quanto maior o número de trocas na geração de uma solução vizinha, maior a possibilidade de se sair de um ótimo local e conseguir explorar diferentes regiões no espaço de busca. Portanto, geralmente inicia-se com estruturas de vizinhança consideradas simples e o processo vai evoluindo para estruturas de vizinhança mais complexas de acordo com a necessidade do problema de otimização.

Figura 19 - Estrutura de vizinhança: troca entre duas (a) e três (b) posições.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

5.4.3 Busca Local

Com a geração de uma nova solução pela aplicação de uma estrutura de vizinhança, o próximo passo é a utilização de uma etapa de busca local para explorar soluções no entorno desta nova solução. Neste trabalho, a busca local é baseada no conceito de sensibilidade e é realizada considerando pequenas variações nos valores armazenados no vetor solução.

Inicialmente, um parâmetro do vetor solução é escolhido aleatoriamente para sofrer variações, aplica-se então uma variação positiva e avalia-se a função objetivo. Caso tenha ocorrido uma melhora, uma nova variação positiva é aplicada e o processo continua até que não ocorram melhorias na função objetivo ou que o limite máximo do parâmetro em questão seja atingido. As variações sucessivas também devem cessar caso o limite máximo de variações n_v para um mesmo parâmetro tenha sido alcançado. Este limite é definido com o objetivo de evitar que os parâmetros contidos no vetor solução migrem excessivamente para seus extremos causando a ciclagem durante o processamento.

Quando, ao aplicar uma variação positiva, a função objetivo da solução gerada for pior em relação à original, então a variação a ser aplicada deve ser negativa e o processo funciona de maneira semelhante ao descrito anteriormente. Durante a etapa de busca local, n_s parâmetros do vetor solução recebem variações positivas ou negativas em seus valores. Ao final do processo, a solução que obtiver o melhor valor para a função objetivo é considerada uma solução ótima local. Na Figura 20 é mostrado o pseudocódigo da etapa de busca local.

A variação aplicada a um parâmetro escolhido é expressa pela equação (162), onde $x'(i)$ é o vetor solução original, i é a posição do parâmetro escolhido no vetor solução, $\Delta x'$ é a pequena variação a ser aplicada e $z(i)$ é o vetor solução gerado após a variação.

$$z(i) = x'(i) \pm \Delta x' \quad (162)$$

Figura 20 - Pseudocódigo da Busca Local.

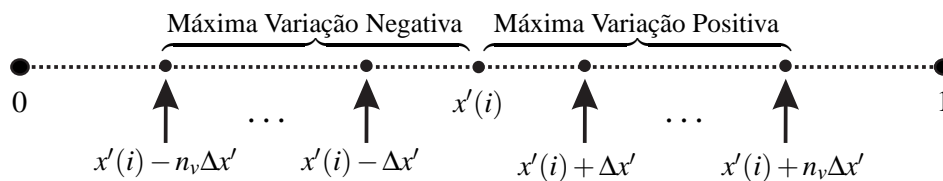
Algoritmo 4: Busca Local

- 1 **Inicializar:** defina x' como solução inicial e avalie sua função objetivo, escolha o número de variações para um mesmo parâmetro n_v , faça $j \leftarrow 1$, escolha o número de parâmetros de busca n_s ;
- 2 **Repetir** (até que critério de parada seja satisfeito ou $j = n_s$);
- 3 $z \leftarrow x'$;
- 4 Escolha aleatoriamente um parâmetro i de z para variar ($z(i)$);
- 5 Aplique uma variação positiva em $z(i)$;
- 6 **Se** (solução gerada z melhor que x'):
- 7 **Repetir** (até o limite de variações n_v ou até o limite superior do parâmetro ou até que não ocorra melhoria na função objetivo):
- 8 $x' \leftarrow z$; aplique uma variação positiva em $z(i)$;
- 9 **Se não:** $z \leftarrow x'$; aplique uma variação negativa em $z(i)$;
- 10 **Se** (solução gerada z melhor que x'):
- 11 **Repetir** (até o limite de variações n_v ou até o limite inferior do parâmetro ou até que não ocorra melhoria na função objetivo):
- 12 $x' \leftarrow z$; aplique uma variação negativa em $z(i)$;
- 13 Reinicie o processo considerando outro parâmetro ($j \leftarrow j + 1$);
- 14 Aponte o ótimo local encontrado ($x'' \leftarrow x'$);
- 15 **Fim**

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Na Figura 21 é apresentada uma interpretação visual da variação positiva ou negativa de um parâmetro na etapa de busca local.

Figura 21 - Variação de um parâmetro do vetor solução.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

5.5 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

Neste Capítulo foram apresentadas as três técnicas de otimização (AG, PSO e BVNS) utilizadas neste trabalho. Além disso, o problema de otimização foi formalmente definido com a apresentação de uma função objetivo que busca minimizar a diferença entre o amortecimento desejado e o amortecimento calculado para os modos oscilatórios de interesse.

Uma das contribuições deste trabalho, a técnica de ajuste para os controladores suplementares de amortecimento baseada no algoritmo BVNS, foi discutida detalhadamente

neste Capítulo. A técnica proposta conta com uma codificação contínua, mudanças nas estruturas de vizinhança baseadas em trocas de posição do vetor solução e uma etapa de busca local que utiliza o conceito de sensibilidade.

No próximo Capítulo, as técnicas de otimização são aplicadas no ajuste dos controladores de amortecimento através de simulações realizadas em SEPs conhecidos na literatura com o objetivo de garantir a estabilidade a pequenas perturbações e níveis adequados de amortecimento.

6 SIMULAÇÕES E RESULTADOS

Neste Capítulo são apresentadas as simulações realizadas em dois SEPs testes, cujo objetivo é analisar a influência dos dispositivos modelados anteriormente, propondo configurações que sejam capazes de garantir o funcionamento dos sistemas do ponto de vista da estabilidade a pequenas perturbações, além de avaliar o desempenho das técnicas de otimização utilizadas neste trabalho no ajuste dos controladores de amortecimento.

O primeiro sistema teste considerado é conhecido na literatura como Simétrico de Duas Áreas (SAUER; PAI, 1998), trata-se de um sistema de pequeno porte que possui dois modos oscilatórios locais estáveis e um modo interárea instável. O segundo sistema teste simulado recebe o nome de *New England* (ARAUJO; ZANETA, 2001), trata-se de um sistema com maior complexidade e que apresenta modos oscilatórios instáveis do tipo local e interárea, além de modos locais adicionais fracamente amortecidos.

Os dados de geração, das linhas de transmissão e do carregamento do sistema Simétrico de Duas Áreas e do sistema *New England* são apresentados no Anexo A deste trabalho.

Inicialmente, os sistemas são avaliados sem a atuação de qualquer controlador com o objetivo de identificar os modos oscilatórios existentes e definir o local de instalação dos controladores suplementares. Na sequência, os controladores ESPs e o conjunto TCSC-POD são instalados e ajustados pelas técnicas AG, PSO e BVNS.

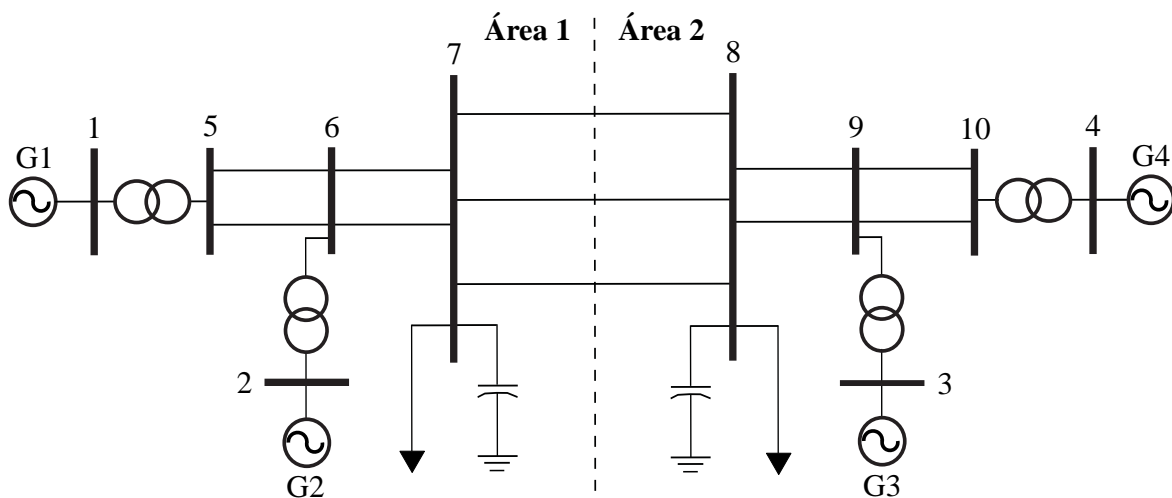
Com os ajustes realizados pelos métodos de otimização, os resultados apresentados, do ponto de vista da estabilidade a pequenas perturbações e do atendimento de níveis mínimos de amortecimento, são comparados para que seja possível concluir sobre a técnica melhor adaptada ao tipo de problema proposto. A técnica com melhor desempenho é utilizada para prosseguir com a análise da estabilidade a pequenas perturbações.

Todas as simulações apresentadas neste Capítulo foram realizadas a partir da utilização do software MATLAB[®]. Sempre que necessário, as condições iniciais foram obtidas com o cálculo do fluxo de potência pelo método de Newton-Raphson através do *toolbox* Matpower (ZIMMERMAN; MURILLO-SANCHEZ; THOMAS, 2011). As simulações foram realizadas em um computador com processador Intel Core i5-3300 que dispõe de 8 GB de memória RAM.

6.1 SISTEMA SIMÉTRICO DE DUAS ÁREAS

O sistema Simétrico de Duas Áreas é um sistema de pequeno porte amplamente utilizado na literatura no estudo da estabilidade a pequenas perturbações. Ele possui 4 geradores e 10 barras, além de duas áreas na sua formação devido à uma extensa linha de transmissão entre as barras 7 e 8, possibilitando o estudo de oscilações de baixa frequência do tipo interárea. O sistema teste encontra-se representado na Figura 22.

Figura 22 - Sistema teste Simétrico de Duas Áreas.



Fonte: Adaptado de Sauer e Pai (1998).

Nesta subseção, o SEP teste é analisado a partir de sua representação no domínio do tempo de acordo com a modelagem apresentada no Capítulo 2.

O processo se inicia com a resolução do fluxo de potência, disponibilizando assim as condições iniciais (tensões e respectivos ângulos das barras do sistema), necessárias para o cálculo dos coeficientes de sensibilidade de corrente. Com os coeficientes de sensibilidade de corrente calculados, torna-se possível obter a matriz de estados \mathbf{A} e seus autovalores.

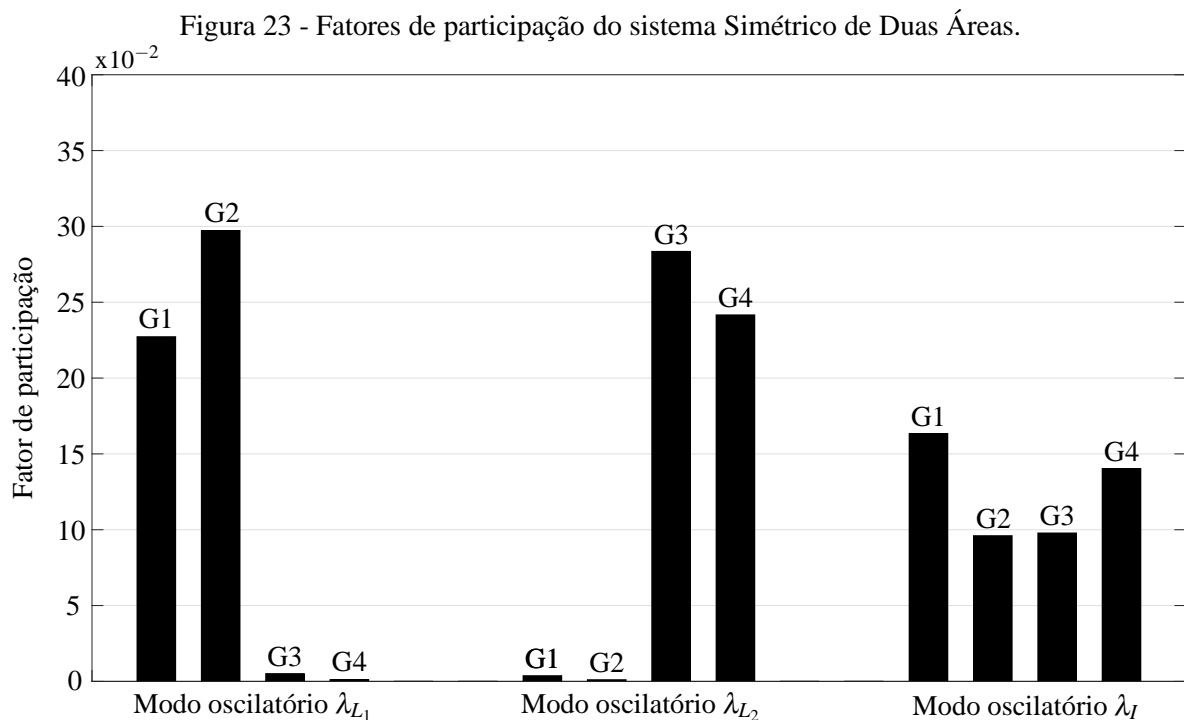
Os autovalores dominantes do sistema Simétrico de Duas Áreas, assim como o coeficiente de amortecimento (ξ_i) e a frequência natural não amortecida (ω_{n_i}) associados encontram-se expressos na Tabela 1.

Tabela 1 - Autovalores dominantes do sistema Simétrico de Duas Áreas.

Modo	Autovalores	ξ_i	ω_{n_i} (Hz)
λ_{L_1}	$-0,3393 \pm j6,2969$	0,0538	1,0036
λ_{L_2}	$-0,3090 \pm j5,8221$	0,0530	0,9279
λ_I	$0,0486 \pm j4,4354$	-0,0110	0,7060

Fonte: Dados da pesquisa do autor.

Observando a Tabela 1, verifica-se a existência de três modos oscilatórios. Pela análise da frequência natural não amortecida, tem-se que os dois modos oscilatórios estáveis (λ_{L_1} e λ_{L_2}) são do tipo local, já o modo instável (λ_I) se encontra na faixa de um modo oscilatório interárea. Estas observações são confirmadas a partir da análise dos fatores de participação dos modos oscilatórios apresentados na Figura 23.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Na Figura 23, o modo oscilatório local λ_{L_1} tem participação dos geradores G1 e G2, no modo local λ_{L_2} participam os geradores G3 e G4, enquanto no modo interárea λ_I todos os geradores possuem relativa participação. Portanto, a análise dos fatores de participação (KUNDUR, 1994) confirma a hipótese da existência de dois modos locais e um modo interárea.

Conforme observado anteriormente, o sistema teste para este ponto de operação (sem compensação e/ou controladores) é instável a pequenas perturbações, tal instabilidade é caracterizada pela existência de um modo oscilatório interárea instável, que tem sua origem na longa linha de transmissão que conecta as duas áreas do sistema.

Diante do exposto, para que seja possível inserir amortecimento adicional ao sistema, levando-o para a estabilidade, além de elevar os níveis de amortecimento de todos os modos oscilatórios, propõe-se a instalação de um conjunto TCSC-POD na linha de transmissão entre as barras 7 e 8 para compensação da reatância da linha que conecta as duas áreas do sistema, assim como a instalação de dois controladores ESPs junto aos geradores G2 e G3, por serem os geradores com os maiores fatores de participação nos modos locais λ_{L_1} e λ_{L_2} .

Entretanto, primeiramente será avaliada a influência do dispositivo FACTS TCSC atuando isoladamente e na sequência a atuação simultânea dos controladores suplementares de amortecimento.

6.1.1 Inclusão do TCSC

Nesta subseção é analisada a influência do TCSC atuando isoladamente sobre os modos oscilatórios de baixa frequência. Para isso, considere a inclusão do dispositivo TCSC na linha de transmissão entre as barras 7 e 8 do sistema Simétrico de Duas Áreas, trata-se de uma longa linha de transmissão e o objetivo é realizar a compensação da reatância de linha. A simulação do sistema considerando a inclusão do TCSC se dá pela alteração da reatância da linha que conecta as barras 7 e 8 no banco de dados, de acordo com o nível de compensação analisado.

6.1.1.1 Compensação ajustada em 10%

A reatância da linha de transmissão que conecta as barras 7 e 8 é ajustada considerando uma compensação da reatância de linha pelo TCSC de 10%. Com a resolução do fluxo de potência, os coeficientes do modelo são calculados e a representação matricial com a inclusão do TCSC no domínio do tempo é construída. A análise da estabilidade a pequenas perturbações é realizada através da análise dos autovalores da matriz de estados \mathbf{A} .

Os autovalores dominantes, os coeficientes de amortecimento e a frequência natural não amortecida encontram-se expressos na Tabela 2.

Tabela 2 - Autovalores dominantes do sistema Simétrico de Duas Áreas com TCSC ajustado em 10%.

Modo	Autovalores	ξ_i	ω_{n_i} (Hz)
λ_{L_1}	$-0,3428 \pm j6,3003$	0,0543	1,0042
λ_{L_2}	$-0,3098 \pm j5,8246$	0,0531	0,9283
λ_I	$0,0485 \pm j4,5150$	-0,0107	0,7186

Fonte: Dados da pesquisa do autor.

Analisando os dados da Tabela 2, verifica-se que os autovalores associados aos três modos oscilatórios não sofreram deslocamentos consideráveis em suas posições no plano complexo, especialmente o modo interárea que continua caracterizando a instabilidade do sistema. Comparativamente ao caso base, houve um aumento muito sutil no coeficiente de amortecimento de todos os modos oscilatórios, ainda muito distante do amortecimento necessário para se garantir a estabilidade a pequenas perturbações do sistema.

6.1.1.2 Compensação ajustada em 40%

A reatância da linha de transmissão que conecta as barras 7 e 8 é ajustada considerando uma compensação da reatância de linha pelo TCSC de 40%. O procedimento que segue é idêntico ao caso anterior. Na Tabela 3 encontram-se expressos os autovalores dominantes, os coeficientes de amortecimento e a frequência natural não amortecida, obtidos a partir da matriz de estados.

Tabela 3 - Autovalores dominantes do sistema Simétrico de Duas Áreas com TCSC ajustado em 40%.

Modo	Autovalores	ξ_i	ω_{n_i} (Hz)
λ_{L_1}	$-0,3559 \pm j6,3144$	0,0563	1,0066
λ_{L_2}	$-0,3115 \pm j5,8346$	0,0533	0,9299
λ_I	$0,0401 \pm j4,7707$	-0,0084	0,7593

Fonte: Dados da pesquisa do autor.

Analisando os dados da Tabela 3, conclui-se que apesar de elevar a compensação da reatância da linha de transmissão que conecta as barras 7 e 8, tornando-a equivalente a 60% de seu valor original, o sistema continua na instabilidade. Verifica-se que o par complexo conjugado de autovalores referente ao modo interárea ainda se encontra distante do semiplano esquerdo do plano complexo, porém, em relação ao caso anterior, a parte real do par complexo conjugado teve seu valor ligeiramente reduzido. Por fim, houve outro pequeno aumento no valor dos coeficientes de amortecimento de todos os modos oscilatórios.

6.1.1.3 Compensação ajustada em 70%

A reatância da linha de transmissão que conecta as barras 7 e 8 é ajustada considerando uma compensação da reatância de linha pelo TCSC de 70%. Na Tabela 4 encontram-se expressos os autovalores dominantes, os coeficientes de amortecimento e a frequência natural não amortecida referentes aos modos oscilatórios do sistema nesta condição.

Tabela 4 - Autovalores dominantes do sistema Simétrico de Duas Áreas com TCSC ajustado em 70%.

Modo	Autovalores	ξ_i	ω_{n_i} (Hz)
λ_{L_1}	$-0,3776 \pm j6,3370$	0,0595	1,0104
λ_{L_2}	$-0,3119 \pm j5,8487$	0,0533	0,9326
λ_I	$-0,0008 \pm j5,0419$	0,0002	0,8024

Fonte: Dados da pesquisa do autor.

Analisando os dados da Tabela 4, verifica-se que o sistema se tornou estável a pequenas perturbações, visto que o par complexo conjugado referente ao modo oscilatório interárea, que até então caracterizava a instabilidade do sistema, agora se encontra no semiplano esquerdo do plano complexo, ou seja, com parte real negativa. Ainda assim, o coeficiente de amortecimento do modo interárea é muito próximo de zero.

6.1.1.4 Compensação ajustada em 95%

Por fim, a reatância da linha que conecta as barras 7 e 8 é ajustada considerando uma compensação do TCSC de 95%. Na Tabela 5 encontram-se expressos os autovalores dominantes, os coeficientes de amortecimento e a frequência natural não amortecida.

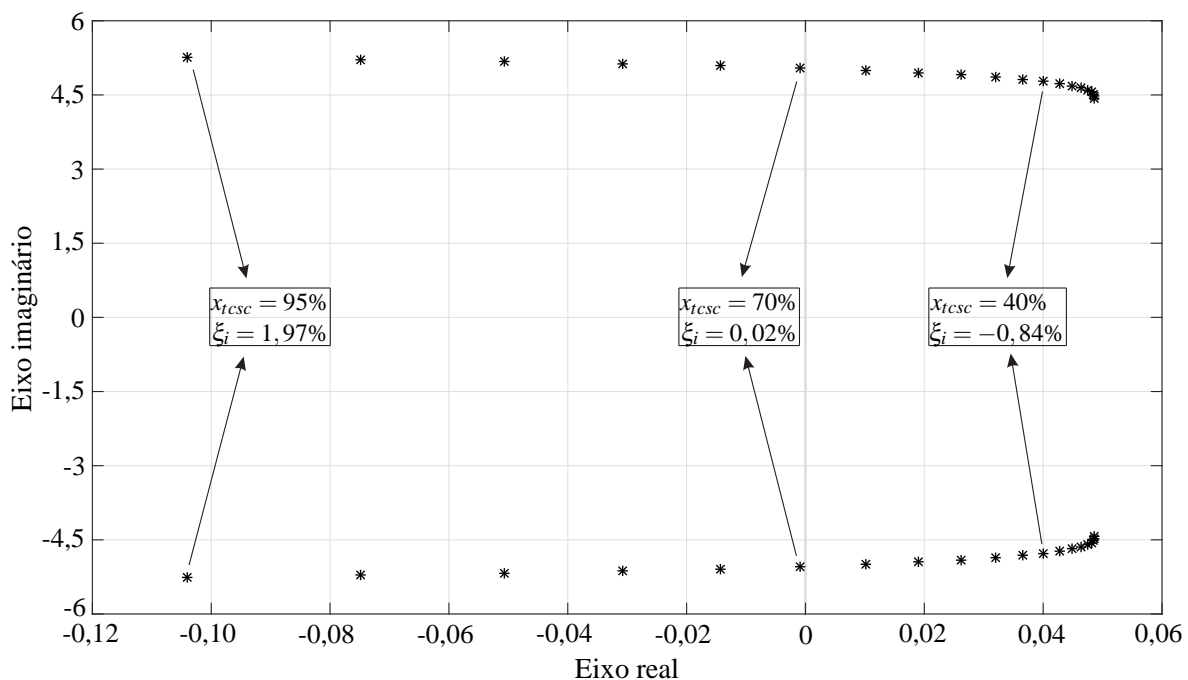
Tabela 5 - Autovalores dominantes do sistema Simétrico de Duas Áreas com TCSC ajustado em 95%.

Modo	Autovalores	ξ_i	ω_{n_i} (Hz)
λ_{L_1}	$-0,4169 \pm j6,3605$	0,0654	1,0145
λ_{L_2}	$-0,3153 \pm j5,8695$	0,0536	0,9355
λ_I	$-0,1040 \pm j5,2553$	0,0197	0,8365

Fonte: Dados da pesquisa do autor.

Analisando os dados da Tabela 5, observa-se que o modo oscilatório interárea permanece fracamente amortecido ($\xi = 1,97\%$) para uma elevada taxa de compensação do TCSC (95%). Na Figura 24 é apresentado o deslocamento do par complexo conjugado associado ao modo interárea, de acordo com diferentes compensações da reatância de linha pelo TCSC. As compensações acontecem com passo de 5%, iniciando no caso base (sem compensação) e terminando com uma compensação de 95%. Observa-se que o deslocamento dos autovalores em relação ao eixo real é muito pequeno para uma compensação inferior a 40%. A partir deste valor o deslocamento no eixo real ocorre de forma perceptível até atingir o semiplano esquerdo do plano complexo ao considerar uma taxa de compensação próxima a 70%.

Figura 24 - Deslocamento dos autovalores do modo interárea com a variação da reatância do TCSC.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Considerando-se que o sistema analisado é de pequeno porte e de baixa complexidade em comparação aos SEPs reais, conclui-se que o TCSC atuando isoladamente é insuficiente para resolver problemas relativos a oscilações eletromecânicas. Ainda que ele seja capaz de levar o sistema para a estabilidade, seriam necessárias altas taxas de compensação da reatância de linha que limitariam a margem de operação do sistema, tornando impraticável seu uso em sistemas reais (HINGORANI; GYUGYI, 1999; SONG; JOHNS, 1999).

Diante do exposto, surge a necessidade da instalação de controladores suplementares que forneçam amortecimento adicional ao sistema. Dessa forma, não seriam necessários altos níveis de compensação da reatância da linha, possibilitando sua aplicação em sistemas reais.

6.1.2 Inclusão dos ESPs e TCSC-POD

Nesta subseção é analisada a influência dos controladores de amortecimento ESPs e do conjunto TCSC-POD, atuando simultaneamente, sobre os modos oscilatórios de baixa frequência presentes no sistema Simétrico de Duas Áreas.

Os controladores ESPs são instalados nos geradores síncronos G2 e G3, o conjunto TCSC-POD é colocado na linha de transmissão entre as barras 7 e 8. A compensação da reatância de linha pelo TCSC é fixada em 10%, as constantes de tempo do filtro *washout* T_{w_k} e T_{w_p} são fixadas em 10 segundos e 1 segundo, respectivamente.

Para que os níveis de amortecimento sejam atendidos, os controladores suplementares de amortecimento são ajustados pelo AG, PSO e o BVNS. Os desempenhos dos métodos de otimização são analisados e comparados levando-se em consideração 200 testes realizados para cada um dos três cenários de amortecimento mínimo simulados:

- $\xi_i^{des} \geq 10\%$ considerando a função objetivo $F_1(x)$ da equação (144);
- $\xi_i^{des} \geq 15\%$ considerando a função objetivo $F_1(x)$ da equação (144);
- $\xi_{i,j}^{des} \geq 15\%$ utilizando a função objetivo $F_2(x)$ da equação (151).

Conforme discutido em detalhes no Capítulo 5, a função objetivo $F_1(x)$ considera apenas o carregamento do Caso Base, de acordo com os dados apresentados no Anexo A deste trabalho. Dessa forma, os ajustes dos parâmetros dos controladores, obtidos pelos métodos de otimização, garantem a estabilidade a pequenas perturbações e o atendimento dos níveis desejados de amortecimento somente para este ponto de operação.

Com relação à função objetivo $F_2(x)$, os ajustes obtidos pelos métodos de otimização garantem a estabilidade a pequenas perturbações e o atendimento de níveis desejados de amortecimento para n pontos de operação. Neste trabalho, a função objetivo $F_2(x)$ considera n casos de variação de carga no entorno do Caso Base, conforme apresentado a seguir:

- Caso Base ($n = 1$): condições de carga de acordo com os dados mostrados no Anexo A (SAUER; PAI, 1998);
- Caso 1 ($n = 2$): aumento de 5% na potência reativa das cargas;
- Caso 2 ($n = 3$): diminuição de 5% na potência reativa das cargas;
- Caso 3 ($n = 4$): diminuição de 5% na potência ativa e reativa das cargas;
- Caso 4 ($n = 5$): diminuição de 5% na potência ativa das cargas;
- Caso 5 ($n = 6$): diminuição de 5% na potência ativa e aumento de 5% na potência reativa das cargas;
- Caso 6 ($n = 7$): aumento de 5% na potência ativa e reativa das cargas;
- Caso 7 ($n = 8$): aumento de 5% na potência ativa das cargas;
- Caso 8 ($n = 9$): aumento de 5% na potência ativa e diminuição de 5% na potência reativa das cargas.

O critério de parada para os métodos de otimização é o limite de cálculos da função objetivo (1000) ou a obtenção do amortecimento mínimo para todos os modos oscilatórios de interesse do cenário em análise, desde que sejam atendidas integralmente as restrições apresentadas nas equações (145)-(150). As restrições relativas aos limites das constantes de tempo (em segundos) e ganhos (em pu) dos controladores suplementares são mostradas na Tabela 6.

Tabela 6 - Limites dos parâmetros dos controladores ESPs e TCSC-POD: Simétrico de Duas Áreas.

Limite	T_{1k}	T_{2k}	T_{1p}	T_{2p}	K_{esp_k}	K_{pod}
Inferior	0,10	0,01	0,05	0,10	1,00	0,05
Superior	1,00	0,50	0,10	1,00	3,00	0,50

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Os parâmetros dos métodos de ajuste foram definidos a partir da análise de uma série de testes preliminares, considerando o sistema Simétrico de Duas Áreas com 9 parâmetros a serem ajustados (TCSC-POD e 2 ESPs), com o objetivo de extrair o melhor desempenho individual dos métodos aplicados na resolução do problema proposto.

O AG implementado considera 20 indivíduos em sua população, a cada torneio são realizados 4 jogos na primeira fase e as disputas são sempre entre dois indivíduos, a taxa de recombinação varia entre 25% e 50%, a taxa de mutação é de 11% e a taxa de perturbação β da etapa de mutação é de 10%.

Para o PSO utilizado, o tamanho da população é de 20 partículas, o fator de inércia W inicia em 1,4 (W_{max}) e decai linearmente até 0,5 (W_{min}), as variáveis de ponderação c_1 e c_2 são definidas em 2,05 e o fator γ referente à velocidade máxima de transição (v_{max}) vale 0,15.

Com relação ao BVNS proposto, a partir dos testes preliminares, foi possível observar que o valor de n_s não deve estar próximo ao número de parâmetros do vetor solução, pois neste caso, o BVNS funciona basicamente como uma busca local, o que pode estagnar a evolução do método ao encontrar um ótimo local, principalmente com o aumento do número de parâmetros a serem ajustados. Entretanto, o valor do parâmetro n_s não deve ser muito pequeno, visto que, neste caso, a busca local teria poucas condições de encontrar soluções melhores na região de busca. De acordo com estas observações, o valor adequado para n_s se encontra na faixa compreendida entre 25% e 75% do número de parâmetros do vetor solução.

Quanto aos parâmetros n_v e $\Delta x'$ que compõem o BVNS, observa-se que o produto destes dois parâmetros determina a variação máxima (positiva ou negativa) de um parâmetro na etapa de busca local, portanto, este produto não deve ser muito elevado ($n_v \Delta x' \leq 0,25$) a fim de evitar que os parâmetros do vetor solução migrem excessivamente para seus extremos. Além disso, a variação $\Delta x'$ não deve ser muito elevada ($\Delta x' \leq 0,05$) para que não sejam ignoradas soluções de qualidade que se encontrem entre duas soluções analisadas.

Por fim, o conjunto de estruturas de vizinhança deve iniciar com estruturas simples e evoluir para estruturas mais complexas. Entretanto, para que o método seja eficiente é importante que as estruturas de maior complexidade não reinicializem completamente o processamento, ou seja, o número de posições de troca deve ser consideravelmente menor em relação ao número total de posições do vetor solução.

Diante do exposto, três estruturas de vizinhança são utilizadas pelo BVNS e os outros parâmetros do método são definidos em: $n_s = 4$, $\Delta x' = 0,04$ e $n_v = 5$.

O conjunto de estruturas de vizinhança utilizado no BVNS é composto por:

- $k = 1$: duas posições do vetor solução são trocadas;
- $k = 2$: três posições do vetor solução são trocadas;
- $k = k_{final}$: quatro posições do vetor solução são trocadas.

6.1.2.1 Desempenho dos métodos de otimização

Os desempenhos individuais dos métodos de ajuste são avaliados a partir do tempo médio de processamento, número de cálculos da função objetivo necessários para se encontrar um ajuste, além da taxa de convergência. Nesta subseção, considera-se como convergência a obtenção de uma solução factível que atenda ao objetivo do cenário dentro do limite de 1000 cálculos da função objetivo. Na Tabela 7 são apresentados os desempenhos dos métodos de otimização nos três cenários simulados.

Tabela 7 - Desempenho dos métodos de otimização no sistema Simétrico de Duas Áreas.

Método	Cenário	Taxa de Convergência	Tempo Méd. (s)	No. de Cál. da F. Obj.		
				Mín.	Médio	Máx.
AG	$F_1 - \xi_i^{des} \geq 10\%$	100%	4,11	21	46	101
	$F_1 - \xi_i^{des} \geq 15\%$	100%	7,46	45	88	155
	$F_2 - \xi_{i,j}^{des} \geq 15\%$	91%	52,69	82	143	304
PSO	$F_1 - \xi_i^{des} \geq 10\%$	100%	4,25	21	107	321
	$F_1 - \xi_i^{des} \geq 15\%$	100%	6,98	73	182	507
	$F_2 - \xi_{i,j}^{des} \geq 15\%$	98%	50,36	95	241	942
BVNS	$F_1 - \xi_i^{des} \geq 10\%$	100%	2,62	13	25	69
	$F_1 - \xi_i^{des} \geq 15\%$	100%	5,03	32	54	107
	$F_2 - \xi_{i,j}^{des} \geq 15\%$	100%	40,17	47	96	228

Fonte: Dados da pesquisa do autor.

Analisando os dados da Tabela 7, torna-se possível concluir que o AG e o PSO não foram capazes de alcançar 100% de convergência em todos os cenários simulados, ambos falharam para o cenário de 15% de amortecimento mínimo considerando variações no carregamento (função objetivo $F_2(x)$) do sistema Simétrico de Duas Áreas. Verifica-se ainda que o AG obteve um desempenho inferior em relação ao PSO (91% contra 98%), enquanto o BVNS foi capaz de convergir em 100% dos testes realizados para todos os cenários.

O motivo da não convergência do PSO em 2% dos testes realizados (para o cenário mais complexo) baseia-se no limite de cálculos da função objetivo. Pode-se esperar que o aumento deste limite deve garantir a convergência de 100% dos testes. Com relação ao AG tradicional implementado, o maior problema consiste na perda da diversidade de forma precoce. Verifica-se que nos testes realizados, se o método não foi capaz de convergir até o cálculo da função objetivo de número 304, não foi mais possível atingir a convergência, pois nesta fase os indivíduos da população possuem pouca diversidade e a melhor solução fica presa em um ótimo local.

O desempenho do BVNS é superior no número de cálculos da função objetivo necessários para atingir a convergência. Com relação aos tempos médios de processamento, a eficácia do algoritmo BVNS para o problema proposto se torna ainda mais evidente, pois novamente se

mostra superior em relação aos outros dois métodos, sendo na média pelo menos 20% mais rápido que o AG e o PSO para os cenários avaliados.

Os resultados de boa qualidade apresentados pelo BVNS estão baseados na eficiência da etapa de busca local em encontrar soluções ótimas quando estas se encontram próximas à solução de partida. Além disso, o método é capaz de sair de ótimos locais através das mudanças nas estruturas de vizinhança, evitando assim a estagnação em um ótimo local que não atenda na integralidade o objetivo do cenário em análise.

Diante do exposto e considerando que na média os ajustes encontrados por todos os métodos se encontram na mesma faixa de ganhos e de constantes de tempo, o BVNS é o método escolhido para prosseguir com a análise da estabilidade a pequenas perturbações do sistema Simétrico de Duas Áreas.

6.1.2.2 Análise da estabilidade a pequenas perturbações

Nesta subseção, a análise da estabilidade a pequenas perturbações considera a atuação dos controladores suplementares de amortecimento ajustados pelo algoritmo BVNS.

Na Tabela 8 encontram-se ajustes realizados pelo método proposto para os cenários simulados, os ajustes amostrados foram escolhidos aleatoriamente entre todos os testes realizados. Analisando os dados da Tabela 8, conclui-se que os parâmetros dos controladores de amortecimento estão dentro dos limites definidos previamente. Além disso, os ganhos dos controladores são adequados aos níveis de exigência dos cenários em análise, ou seja, aumentam para os cenários de maior complexidade.

Tabela 8 - Parâmetros dos controladores ESPs e TCSC-POD no sistema Simétrico de Duas Áreas.

Controlador	$F_1 - \xi_i^{des} \geq 10\%$			$F_1 - \xi_i^{des} \geq 15\%$			$F_2 - \xi_{i,j}^{des} \geq 15\%$		
	T_1 (s)	T_2 (s)	K (pu)	T_1 (s)	T_2 (s)	K (pu)	T_1 (s)	T_2 (s)	K (pu)
ESP G2	0,4031	0,1714	1,0697	0,5976	0,1895	1,3364	0,6587	0,1975	1,4647
ESP G3	0,5043	0,2301	1,1574	0,6843	0,2456	1,4123	0,7721	0,2563	1,6723
POD	0,0825	0,3676	0,0797	0,0863	0,3589	0,1157	0,0846	0,3454	0,1397

Fonte: Dados da pesquisa do autor.

Na Tabela 9 são apresentados os autovalores dominantes do sistema Simétrico de Duas Áreas, referentes ao ponto de operação definido pelo Caso Base, considerando a instalação dos controladores suplementares de acordo com os ajustes fornecidos pela Tabela 8. De acordo com a Tabela 9, o sistema é estável, e assim como desejado, os coeficientes de amortecimento dos modos locais e do modo interárea foram elevados para valores superiores ao amortecimento mínimo desejado para cada cenário. Verifica-se ainda que mesmo com uma

taxa de compensação da reatância de linha não elevada, os controladores suplementares de amortecimento são capazes de garantir ao sistema uma operação segura do ponto de vista da estabilidade a pequenas perturbações.

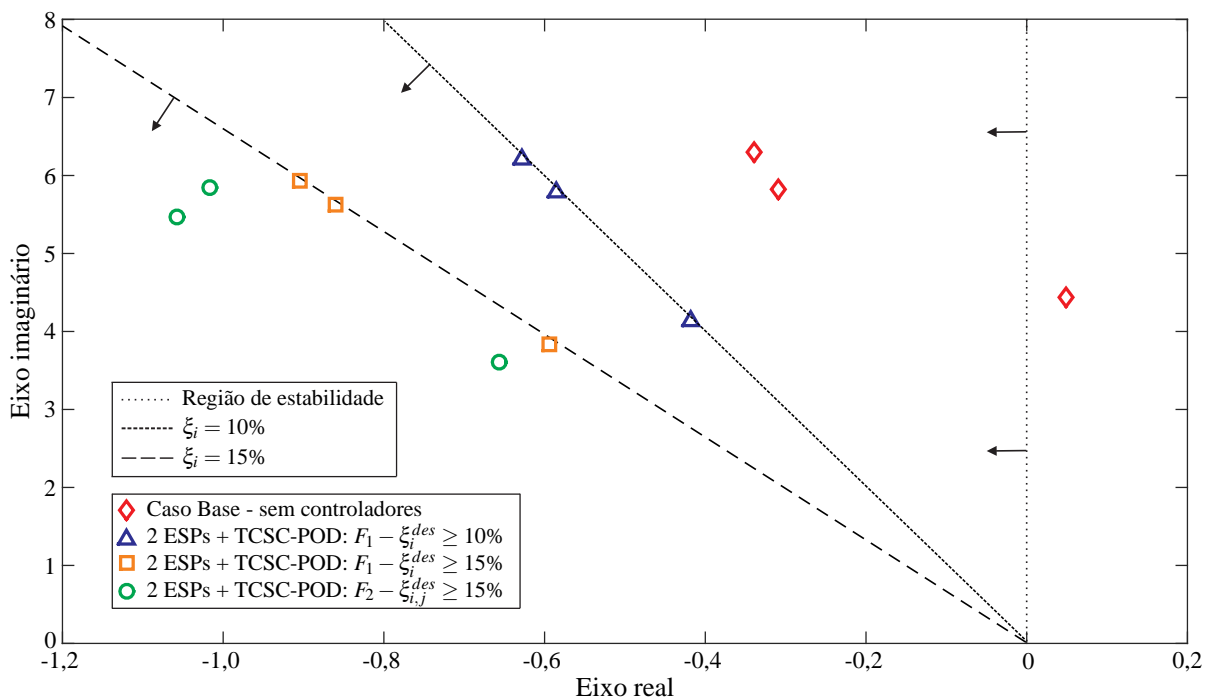
Tabela 9 - Autovalores do sistema Simétrico de Duas Áreas com atuação dos ESPs e TCSC-POD.

Cenário	Modo	Autovalores	ξ_i	ω_{n_i} (Hz)
$F_1 - \xi_i^{des} \geq 10\%$	λ_{L_1}	$-0,6272 \pm j6,2054$	0,1006	0,9927
	λ_{L_2}	$-0,5851 \pm j5,7860$	0,1006	0,9256
	λ_I	$-0,4177 \pm j4,1392$	0,1004	0,6621
$F_1 - \xi_i^{des} \geq 15\%$	λ_{L_1}	$-0,9033 \pm j5,9400$	0,1503	0,9563
	λ_{L_2}	$-0,8591 \pm j5,6370$	0,1507	0,9075
	λ_I	$-0,5946 \pm j3,8443$	0,1529	0,6191
$F_2 - \xi_{i,j}^{des} \geq 15\%$	λ_{L_1}	$-1,0168 \pm j5,8418$	0,1715	0,9437
	λ_{L_2}	$-1,0578 \pm j5,4659$	0,1900	0,8861
	λ_I	$-0,6562 \pm j3,6034$	0,1792	0,5829

Fonte: Dados da pesquisa do autor.

Na Figura 25 é mostrado o deslocamento dos autovalores dominantes no plano complexo a partir da atuação dos controladores ESPs e TCSC-POD no sistema Simétrico de Duas Áreas. Por conveniência, encontram-se ilustradas somente as componentes com parte imaginária positiva dos pares complexos conjugados referentes aos modos oscilatórios. Observa-se que os autovalores foram deslocados para regiões predefinidas de acordo com o amortecimento mínimo desejado para cada cenário, conforme se esperava ao formular o problema de otimização.

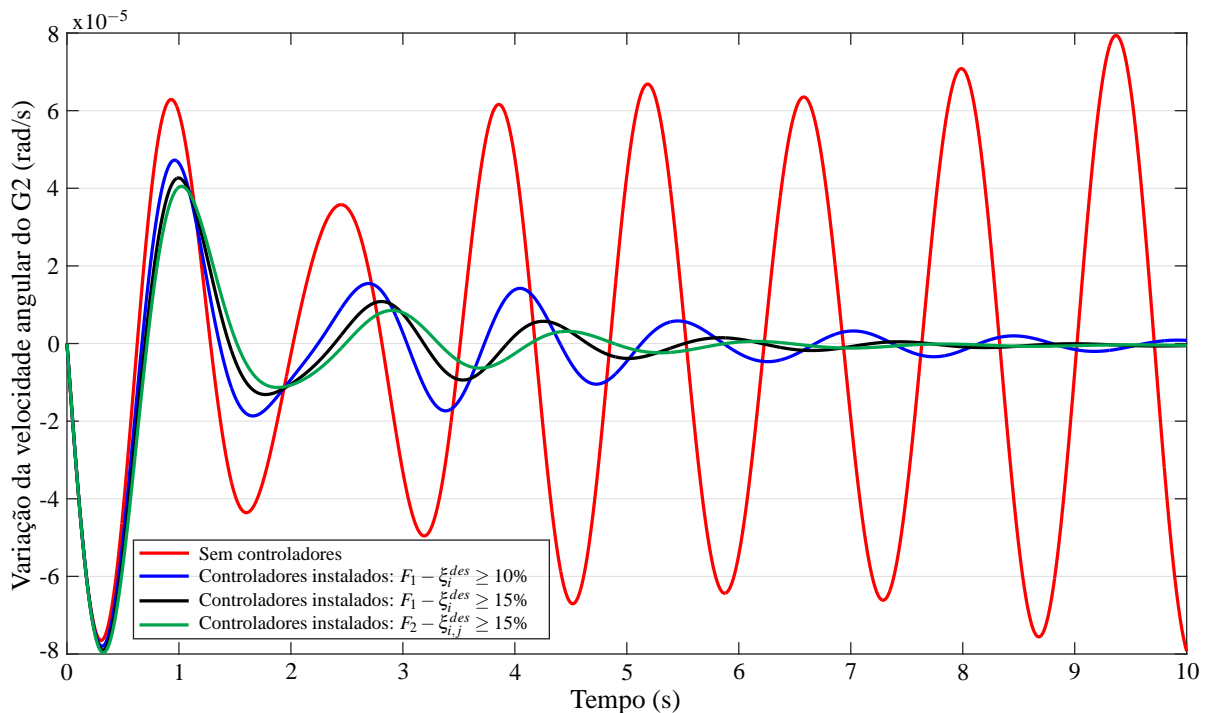
Figura 25 - Deslocamento dos autovalores dominantes do sistema Simétrico de Duas Áreas.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Para a análise da estabilidade a pequenas perturbações no domínio do tempo considera-se uma perturbação de 5% do tipo degrau na potência mecânica do gerador 4 (G4), referência do sistema Simétrico de Duas Áreas. Na Figura 26 encontram-se quatro curvas que mostram as variações da velocidade angular do gerador 2 (G2) para cada um dos cenários simulados.

Figura 26 - Variação da velocidade angular do gerador G2 do sistema Simétrico de Duas Áreas.

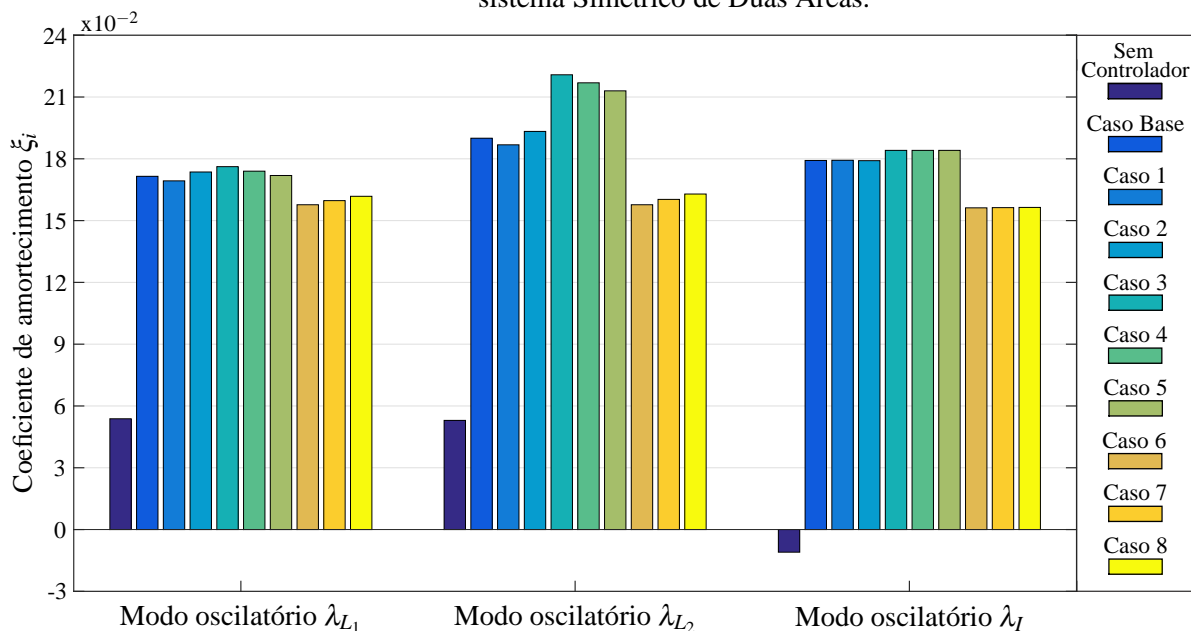


Analisando a Figura 26, observa-se que a curva vermelha referente ao Caso Base sem a atuação de controladores é caracterizada por oscilações de amplitude crescente, portanto, instável. Com relação aos outros cenários, as curvas são caracterizadas por oscilações de amplitude decrescente com valor final tendendo a zero, ou seja, estáveis. Verifica-se ainda que para os cenários de maior amortecimento (curva verde e curva preta), o tempo necessário para entrada em regime permanente após a perturbação é menor em comparação ao cenário de menor amortecimento (curva azul).

Na Figura 27 são apresentados os coeficientes de amortecimento dos modos oscilatórios, presentes no sistema Simétrico de Duas Áreas, para cada um dos 9 casos de variação de carga considerados pelo cenário de maior complexidade. Os coeficientes de amortecimento do Caso Base, sem a atuação dos controladores, também são representados para fins de comparação.

Analisando a Figura 27, torna-se possível concluir que o ajuste dos controladores, para o cenário de maior complexidade apresentado na Tabela 8, garante um amortecimento de no mínimo 15% para os modos oscilatórios de todos os casos de variação de carga considerados.

Figura 27 - Coeficientes de amortecimento dos modos oscilatórios considerando variações de carga no sistema Simétrico de Duas Áreas.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Verifica-se ainda que de acordo com o ajuste obtido, o modo oscilatório local λ_{L2} é o modo com maior sensibilidade às variações de carga do sistema. De forma geral, o Caso 3 (diminuição de 5% na potência ativa e reativa das cargas) é o que apresenta os maiores coeficientes de amortecimento para os modos oscilatórios locais e interárea. Por fim, o caso de variação de carga mais crítico, ou seja, aquele que apresenta os menores coeficientes de amortecimento, é o Caso 6 (aumento de 5% na potência ativa e reativa das cargas).

6.2 SISTEMA NEW ENGLAND

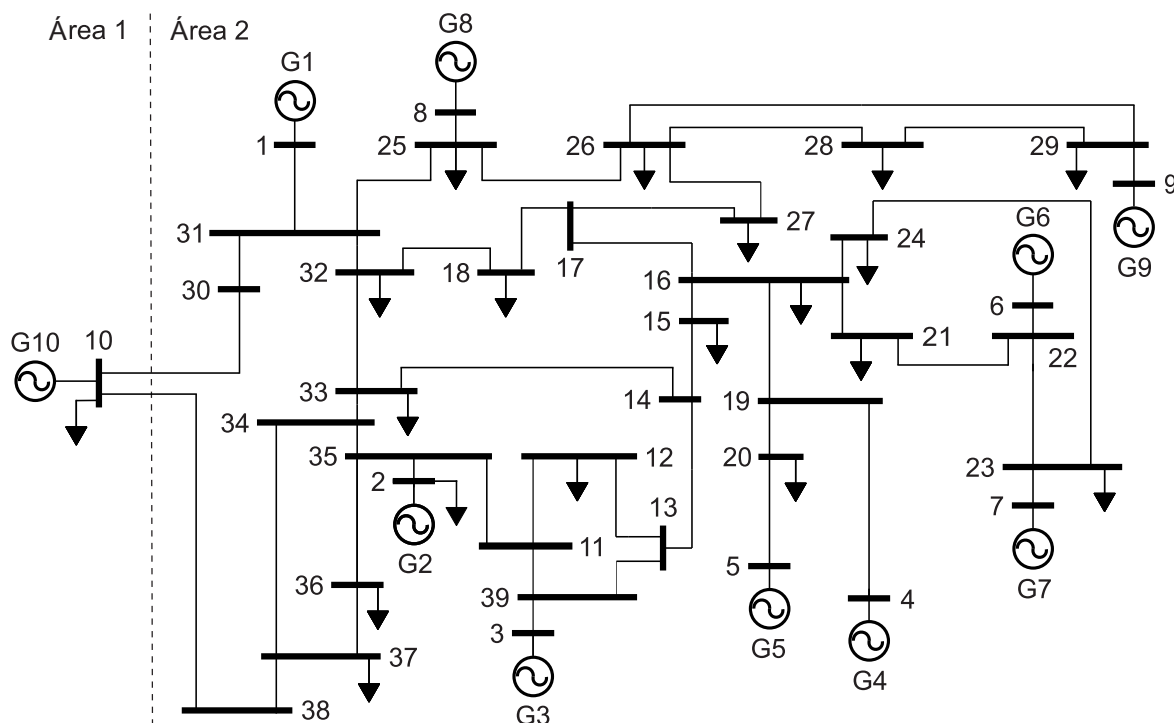
O sistema teste *New England* é amplamente utilizado na literatura no estudo da estabilidade a pequenas perturbações, trata-se de um SEP que possui 10 geradores, 39 barras e 46 linhas de transmissão, além de duas áreas na sua formação.

A área 1 é conhecida como sistema *New York*, sendo representada de forma compacta pelo gerador equivalente G10. A área 2 é composta por todos os outros geradores (G1 a G9), sendo denominada sistema *New England*.

Nesta subseção, o SEP teste é analisado a partir da modelagem apresentada no Capítulo 2, ou seja, sem a atuação de qualquer controlador no sistema. A resolução do fluxo de potência fornece as condições iniciais para o cálculo dos coeficientes de sensibilidade de corrente que compõem o modelo. Por fim, a representação no espaço de estados possibilita a obtenção da matriz de estados **A** e seus autovalores.

Na Figura 28 é apresentado o diagrama unifilar do sistema teste *New England*.

Figura 28 - Sistema teste *New England*.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

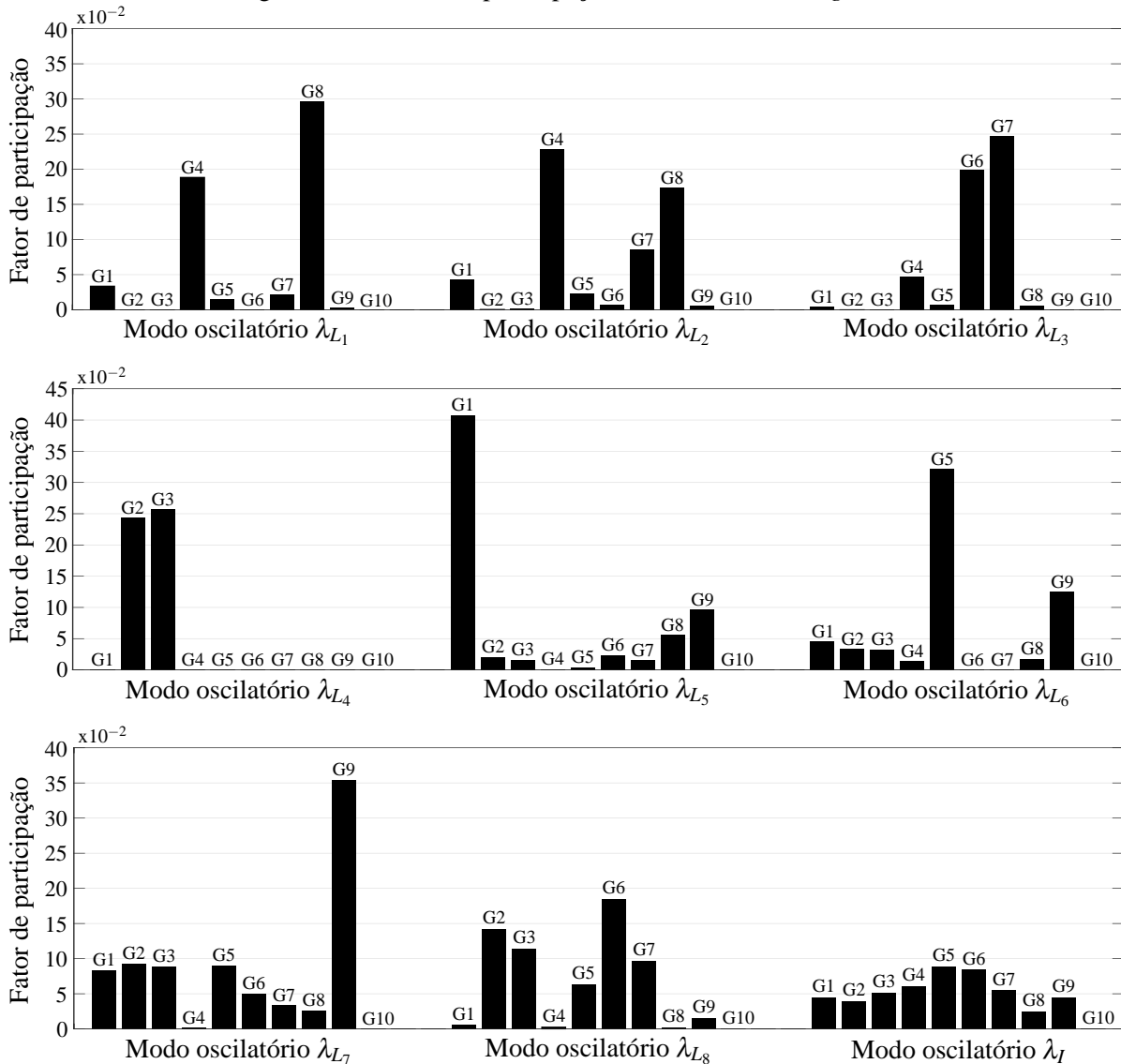
Os autovalores dominantes do sistema *New England*, assim como o coeficiente de amortecimento (ξ_i) e a frequência natural não amortecida (ω_{n_i}) são mostrados na Tabela 10.

Tabela 10 - Autovalores dominantes do sistema *New England*.

Modo	Autovalores	ξ_i	ω_{n_i} (Hz)
λ_{L_1}	$-0,2433 \pm j8,3173$	0,0292	1,3243
λ_{L_2}	$-0,1968 \pm j8,2651$	0,0238	1,3158
λ_{L_3}	$-0,2693 \pm j8,1015$	0,0332	1,2901
λ_{L_4}	$-0,2129 \pm j7,1722$	0,0297	1,1420
λ_{L_5}	$0,0549 \pm j6,8700$	-0,0080	1,0934
λ_{L_6}	$0,1483 \pm j5,9635$	-0,0249	0,9494
λ_{L_7}	$0,1641 \pm j6,3721$	-0,0257	1,0145
λ_{L_8}	$-0,1195 \pm j6,4838$	0,0184	1,0321
λ_I	$0,0216 \pm j3,9392$	-0,0055	0,6270

Fonte: Dados da pesquisa do autor.

De acordo com os dados mostrados na Tabela 10, torna-se possível concluir que o sistema possui nove modos oscilatórios de baixa frequência, sendo oito modos locais e um modo interárea, tal observação é baseada na frequência natural não amortecida dos modos oscilatórios e na análise dos fatores de participação apresentados na Figura 29.

Figura 29 - Fatores de participação do sistema *New England*.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Com relação à análise da estabilidade, verifica-se que o sistema *New England* para este ponto de operação é instável, tendo em vista que três modos locais (λ_{L_5} , λ_{L_6} e λ_{L_7}) e o modo interárea (λ_I) possuem parte real positiva, ou seja, estão situados no semiplano direito do plano complexo, caracterizando a instabilidade do sistema. Por fim, os modos oscilatórios estáveis (λ_{L_1} , λ_{L_2} , λ_{L_3} , λ_{L_4} e λ_{L_8}) são fracamente amortecidos.

Diante do exposto, para que seja possível inserir amortecimento ao sistema *New England*, tornando-o estável, além de elevar os níveis de amortecimento de todos os modos oscilatórios para níveis desejados, propõe-se a instalação de um controlador para cada modo oscilatório, sendo oito ESPs (modos locais) e um TCSC-POD (modo interárea).

A escolha do local de instalação dos controladores ESPs é baseada nos fatores de participação dos geradores na formação dos modos oscilatórios (KUNDUR, 1994). Analisando

a Figura 29, observa-se que os geradores G8, G4, G7, G3, G1, G5, G9 e G6 são aqueles que possuem os maiores fatores de participação na formação dos modos λ_{L_1} , λ_{L_2} , λ_{L_3} , λ_{L_4} , λ_{L_5} , λ_{L_6} , λ_{L_7} e λ_{L_8} , respectivamente. De acordo com esta análise, os geradores citados, com maior participação sobre cada um dos modos oscilatórios, deveriam ser o local de instalação dos ESPs, todavia, testes preliminares apontaram que o gerador G2 é capaz de sensibilizar o modo oscilatório λ_{L_8} de maneira mais eficiente que o gerador G6. Desta forma, os geradores escolhidos para instalação dos controladores ESPs são G1, G2, G3, G4, G5, G7, G8 e G9.

Com relação ao local de instalação do conjunto TCSC-POD para atuação sobre o modo interárea, as linhas de transmissão LT 30-10, LT 30-31, LT 38-10 e LT 38-37 são candidatas a receberem sua instalação, visto que estas linhas de transmissão são as responsáveis por interligar as duas áreas do sistema, conforme apresentado no diagrama unifilar da Figura 28.

Analisando os dados das linhas de transmissão do sistema *New England* mostrados na Tabela 21 (Anexo A), torna-se possível concluir que, dentre as candidatas citadas, a LT 30-31 é a que possui a maior reatância, logo a instalação do TCSC-POD neste local garante maior flexibilidade ao sistema, pois o TCSC tem como princípio de funcionamento a realização da compensação da reatância da linha onde encontra-se instalado, aumentando sua capacidade de transferência de potência.

A escolha da linha de transmissão pode ser confirmada a partir da análise da função de transferência em malha aberta para o controlador, haja vista que a linha de transmissão que interliga as barras 30 e 31 é a que possui a maior distância entre o polo e seu respectivo zero, proporcionando maior sensibilidade ao TCSC-POD na atuação sobre o modo interárea, conforme estudo detalhado em Moura, Furini e Araujo (2012) e Menezes (2014).

6.2.1 Inclusão dos ESPs e TCSC-POD

Nesta subseção é analisada a influência dos controladores ESPs e do conjunto TCSC-POD, atuando simultaneamente, sobre os modos oscilatórios do sistema *New England*.

Conforme justificado anteriormente, os controladores ESPs são instalados junto aos geradores G1, G2, G3, G4, G5, G7, G8 e G9, o conjunto TCSC-POD é colocado na linha de transmissão entre as barras 30 e 31. As constantes de tempo T_{w_k} e T_{w_p} são fixadas em 10 segundos e 1 segundo, respectivamente. A compensação da reatância de linha é fixada em 10%.

Os desempenhos dos métodos de otimização (AG, PSO e BVNS) são comparados levando-se em consideração 200 testes realizados para cada um dos três cenários de amortecimento mínimo considerados:

- $\xi_i^{des} \geq 10\%$ considerando a função objetivo $F_1(x)$ da equação (144);
- $\xi_i^{des} \geq 15\%$ considerando a função objetivo $F_1(x)$ da equação (144);
- $\xi_{i,j}^{des} \geq 15\%$ utilizando a função objetivo $F_2(x)$ da equação (151).

A função objetivo $F_1(x)$ considera apenas o carregamento do Caso Base, de acordo com os dados apresentados no Anexo A deste trabalho. A função objetivo $F_2(x)$ considera n casos de variação de carga no entorno do Caso Base, conforme apresentado a seguir:

- Caso Base ($n = 1$): condições de carga de acordo com os dados mostrados no Anexo A (ARAUJO; ZANETA, 2001);
- Caso 1 ($n = 2$): aumento de 5% na potência reativa das cargas;
- Caso 2 ($n = 3$): diminuição de 5% na potência reativa das cargas;
- Caso 3 ($n = 4$): diminuição de 5% na potência ativa e reativa das cargas;
- Caso 4 ($n = 5$): diminuição de 5% na potência ativa das cargas;
- Caso 5 ($n = 6$): diminuição de 5% na potência ativa e aumento de 5% na potência reativa das cargas;
- Caso 6 ($n = 7$): aumento de 5% na potência ativa e reativa das cargas;
- Caso 7 ($n = 8$): aumento de 5% na potência ativa das cargas;
- Caso 8 ($n = 9$): aumento de 5% na potência ativa e diminuição de 5% na potência reativa das cargas.

O critério de parada dos métodos de otimização é o limite de cálculos da função objetivo (3000 cálculos) ou a obtenção do amortecimento mínimo do cenário em análise, desde que sejam atendidos integralmente os limites das constantes de tempo (em segundos) e dos ganhos (em pu) dos controladores de amortecimento, expressos na Tabela 11.

Tabela 11 - Limites dos parâmetros dos controladores ESPs e TCSC-POD: *New England*.

Limite	T_{1_k}	T_{2_k}	T_{1_p}	T_{2_p}	K_{esp_k}	K_{pod}
Inferior	0,10	0,01	0,05	0,10	1,00	0,05
Superior	1,50	0,10	0,10	1,00	12,00	0,50

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Os parâmetros dos métodos de ajuste foram definidos a partir da análise de uma série de testes preliminares, considerando o sistema *New England* com 27 parâmetros a serem ajustados (TCSC-POD e 8 ESPs), com o objetivo de extrair o melhor desempenho individual dos métodos aplicados na resolução do problema proposto.

O AG implementado considera 30 indivíduos na população. A cada torneio são realizados 8 jogos na primeira fase e as disputas são sempre entre dois indivíduos. A taxa de recombinação varia entre 25% e 50%, a taxa de mutação é de 8% e a taxa de perturbação β é de 10%.

Com relação ao PSO utilizado, o tamanho da população é de 30 partículas, o fator de inércia W inicia em 1,4 (W_{max}) e decai linearmente até 0,5 (W_{min}), as variáveis de ponderação c_1 e c_2 são definidas em 2,05 e o fator γ referente à velocidade máxima de transição (v_{max}) vale 0,1.

Quanto aos parâmetros do método BVNS, as análises realizadas para o sistema Simétrico de Duas Áreas (subseção 6.1.2) permanecem válidas para o sistema *New England*. A diferença é o aumento no número de parâmetros do vetor solução devido ao aumento no número de controladores de amortecimento, que por sua vez interfere no número de parâmetros de busca n_s e no conjunto de estruturas de vizinhança.

Diante do exposto, quatro estruturas de vizinhança são utilizadas, os outros parâmetros do BVNS são definidos em: $n_s = 10$, $\Delta x' = 0,04$ e $n_v = 5$.

O conjunto de estruturas de vizinhança utilizado no BVNS é composto por:

- $k = 1$: duas posições do vetor solução são trocadas;
- $k = 2$: três posições do vetor solução são trocadas;
- $k = 3$: quatro posições do vetor solução são trocadas;
- $k = k_{final}$: oito posições do vetor solução são trocadas.

6.2.1.1 Desempenho dos métodos de otimização

Os desempenhos dos métodos de otimização são avaliados a partir do tempo médio de processamento, número de cálculos da função objetivo necessários para se encontrar um ajuste, além da taxa de convergência. Nesta subseção, considera-se como convergência a obtenção de uma solução factível que atenda ao objetivo do cenário dentro do limite de 3000 cálculos da função objetivo. Na Tabela 12 são apresentados os dados relativos aos desempenhos dos métodos de ajuste nos três cenários simulados.

Tabela 12 - Desempenho dos métodos de otimização no sistema *New England*.

Método	Cenário	Taxa de Convergência	Tempo Méd. (s)	No. de Cál. da F. Obj.		
				Mín.	Médio	Máx.
AG	$F_1 - \xi_i^{des} \geq 10\%$	95,5%	24,83	31	87	369
	$F_1 - \xi_i^{des} \geq 15\%$	31,5%	153,17	105	511	1526
	$F_2 - \xi_{i,j}^{des} \geq 15\%$	7,5%	1462,09	453	1272	1584
PSO	$F_1 - \xi_i^{des} \geq 10\%$	100%	26,57	31	153	541
	$F_1 - \xi_i^{des} \geq 15\%$	89,5%	206,80	139	1085	2972
	$F_2 - \xi_{i,j}^{des} \geq 15\%$	54,5%	1964,02	584	2038	2955
BVNS	$F_1 - \xi_i^{des} \geq 10\%$	100%	20,89	17	65	302
	$F_1 - \xi_i^{des} \geq 15\%$	99%	144,31	83	434	1939
	$F_2 - \xi_{i,j}^{des} \geq 15\%$	90,5%	1436,73	379	1196	2827

Fonte: Dados da pesquisa do autor.

Analisando os dados da Tabela 12, torna-se possível concluir que o PSO e o BVNS foram capazes de alcançar 100% de convergência para o cenário de menor amortecimento, enquanto o AG não foi capaz de alcançar a convergência em 4,5% dos testes realizados. Com relação aos tempos médios de processamento para este cenário, verifica-se que o BVNS obteve os melhores resultados, sendo 21,37% e 15,86% mais rápido que o PSO e o AG, respectivamente.

Observa-se que ao aumentar o amortecimento desejado e considerar variações de carga no sistema *New England*, eleva-se a complexidade do problema de otimização, o que acarreta em uma diminuição na taxa de convergência de todos os métodos de ajuste utilizados. Neste contexto, o AG se tornou pouco eficiente, onde foi capaz de alcançar a convergência em apenas 7,5% dos testes realizados para o cenário de maior complexidade, enquanto o BVNS obteve as maiores taxas de convergência para os dois cenários de maior amortecimento.

Por fim, torna-se possível concluir que, para o tipo de problema proposto, o desempenho do BVNS é superior em comparação aos outros dois métodos de otimização, pois apresenta melhores resultados em relação ao número de cálculos da função objetivo necessários para atingir a convergência e nos tempos médios de processamento.

Os resultados de boa qualidade apresentados pelo BVNS estão baseados na eficiência da etapa de busca local em encontrar soluções ótimas próximas à solução de partida, além da capacidade de sair de ótimos locais a partir de mudanças nas estruturas de vizinhança, evitando a estagnação do processamento em um ótimo local que não atenda ao amortecimento mínimo desejado do cenário em análise.

Diante do exposto, o BVNS é o método escolhido para prosseguir com a análise da estabilidade a pequenas perturbações do sistema *New England*.

6.2.1.2 Análise da estabilidade a pequenas perturbações

Nesta subseção, a análise da estabilidade a pequenas perturbações considera a atuação dos controladores suplementares de amortecimento ajustados pelo algoritmo BVNS.

Na Tabela 13 são apresentados ajustes realizados pelo método proposto para todos os cenários considerados.

Tabela 13 - Parâmetros dos controladores ESPs e TCSC-POD no sistema *New England*.

Controlador	$F_1 - \xi_i^{des} \geq 10\%$			$F_1 - \xi_i^{des} \geq 15\%$			$F_2 - \xi_{i,j}^{des} \geq 15\%$		
	T_1 (s)	T_2 (s)	K (pu)	T_1 (s)	T_2 (s)	K (pu)	T_1 (s)	T_2 (s)	K (pu)
ESP G1	0,9188	0,0556	8,5096	1,1289	0,0517	9,7981	1,2265	0,0510	9,9452
ESP G2	0,4875	0,0755	4,3878	0,6689	0,0636	5,5974	0,6750	0,0624	5,7986
ESP G3	0,5997	0,0527	5,7832	0,6441	0,0556	5,9295	0,6500	0,0546	6,0712
ESP G4	0,5295	0,0674	5,0887	0,6150	0,0676	5,3432	0,6454	0,0680	4,8609
ESP G5	0,4809	0,0469	2,8745	0,4626	0,0444	3,7713	0,4586	0,0430	4,1898
ESP G7	0,3916	0,0610	2,0160	0,3990	0,0711	2,6129	0,4094	0,0717	2,6292
ESP G8	0,5966	0,0368	3,5098	0,7051	0,0358	6,2701	0,7116	0,0386	6,3653
ESP G9	0,2742	0,0951	5,4172	0,3200	0,0918	5,8613	0,3172	0,0909	5,7565
POD	0,0741	0,5623	0,2850	0,0525	0,7208	0,4852	0,0515	0,7322	0,4925

Fonte: Dados da pesquisa do autor.

Analisando os dados da Tabela 13, torna-se possível concluir que os parâmetros dos controladores suplementares de amortecimento estão dentro dos limites definidos previamente. Verifica-se ainda um aumento nos esforços dos controladores (ganhos e constantes de tempo) de acordo com o nível de exigência do cenário em análise.

De acordo com os ajustes fornecidos na Tabela 13, observa-se que ocorre um aumento perceptível nos esforços dos controladores quando o amortecimento mínimo passa de 10% para 15%, entretanto não é verificado um aumento significativo nos esforços dos controladores quando a comparação é realizada entre os dois cenários de maior amortecimento.

A primeira observação é justificada ao considerar que para elevar o amortecimento de todos os modos oscilatórios de 10% para 15%, torna-se necessário inserir amortecimento adicional ao sistema como um todo, exigindo maiores esforços de todos os controladores suplementares de amortecimento.

Com relação aos dois cenários de maior amortecimento, a diferença consiste apenas em considerar um único ponto (Caso Base) ou vários pontos de operação (no entorno do Caso Base), portanto não se faz necessário um aumento significativo nos esforços dos controladores, mas sim a obtenção de um ajuste que otimize estes esforços, garantindo 15% de amortecimento para os modos oscilatórios de todos os casos de variação de carga.

Na Tabela 14 são mostrados os autovalores dominantes do sistema *New England* considerando a atuação dos controladores suplementares de amortecimento, de acordo com os ajustes fornecidos pela Tabela 13. Os autovalores mostrados na Tabela 14 se referem ao ponto de operação definido pelo Caso Base.

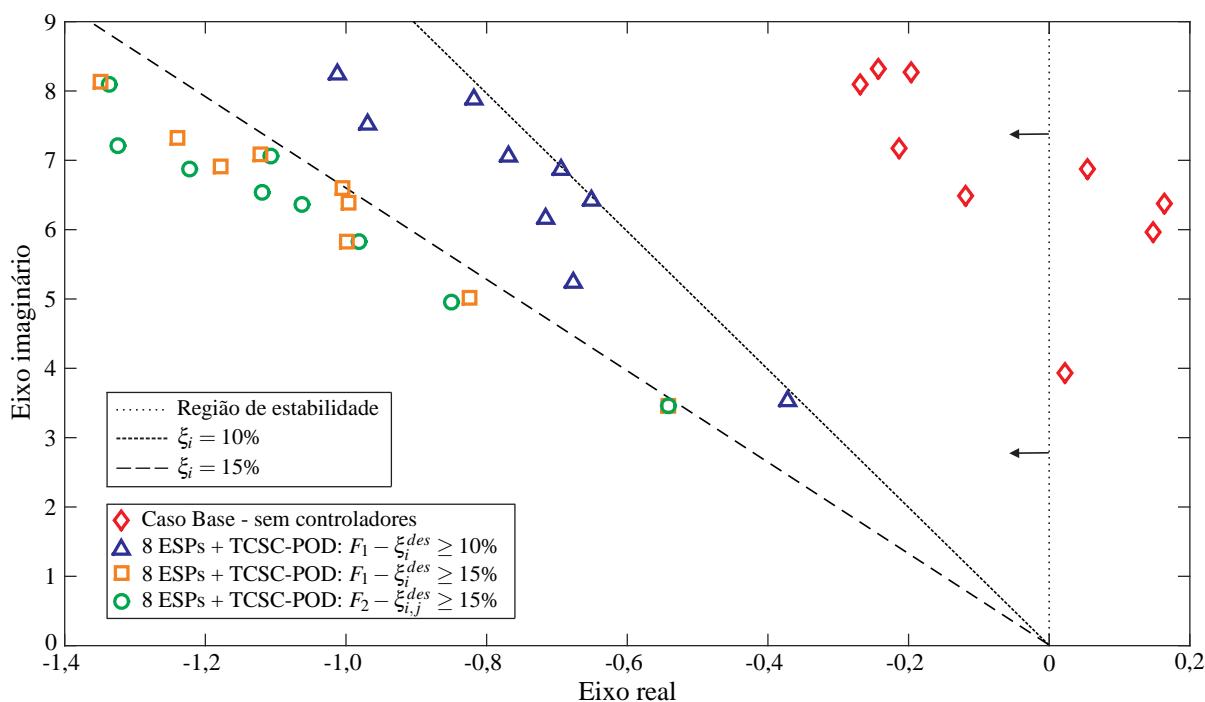
Tabela 14 - Autovalores do sistema *New England* com atuação dos ESPs e TCSC-POD.

Cenário	Modo	Autovalores	ξ_i	ω_{ni} (Hz)
$F_1 - \xi_i^{des} \geq 10\%$	λ_{L1}	$-0,8187 \pm j7,8889$	0,1032	1,2623
	λ_{L2}	$-1,0128 \pm j8,2442$	0,1219	1,3220
	λ_{L3}	$-0,9693 \pm j7,5170$	0,1279	1,2063
	λ_{L4}	$-0,7692 \pm j7,0628$	0,1083	1,1307
	λ_{L5}	$-0,6924 \pm j6,8775$	0,1002	1,1001
	λ_{L6}	$-0,6766 \pm j5,2430$	0,1280	0,8414
	λ_{L7}	$-0,7155 \pm j6,1631$	0,1153	0,9875
	λ_{L8}	$-0,6506 \pm j6,4311$	0,1007	1,0288
	λ_I	$-0,3717 \pm j3,5346$	0,1046	0,5657
$F_1 - \xi_i^{des} \geq 15\%$	λ_{L1}	$-1,1222 \pm j7,0873$	0,1564	1,1420
	λ_{L2}	$-1,3490 \pm j8,1346$	0,1636	1,3123
	λ_{L3}	$-1,2393 \pm j7,3210$	0,1669	1,1817
	λ_{L4}	$-1,1784 \pm j6,9180$	0,1679	1,1169
	λ_{L5}	$-1,0052 \pm j6,5994$	0,1506	1,0624
	λ_{L6}	$-0,8237 \pm j5,0191$	0,1620	0,8095
	λ_{L7}	$-0,9988 \pm j5,8235$	0,1690	0,9404
	λ_{L8}	$-0,9969 \pm j6,3830$	0,1543	1,0282
	λ_I	$-0,5418 \pm j3,4623$	0,1546	0,5577
$F_2 - \xi_{i,j}^{des} \geq 15\%$	λ_{L1}	$-1,1075 \pm j7,0642$	0,1549	1,1380
	λ_{L2}	$-1,3365 \pm j8,0945$	0,1629	1,3057
	λ_{L3}	$-1,3242 \pm j7,2159$	0,1805	1,1676
	λ_{L4}	$-1,2223 \pm j6,8708$	0,1751	1,1107
	λ_{L5}	$-1,1195 \pm j6,5360$	0,1688	1,0554
	λ_{L6}	$-0,8500 \pm j4,9556$	0,1690	0,8002
	λ_{L7}	$-0,9821 \pm j5,8222$	0,1663	0,9397
	λ_{L8}	$-1,0626 \pm j6,3617$	0,1647	1,0265
	λ_I	$-0,5421 \pm j3,4557$	0,1550	0,5567

Fonte: Dados da pesquisa do autor.

De acordo com a Tabela 14, o sistema se tornou estável, tendo em vista que os quatro modos oscilatórios, anteriormente instáveis, foram deslocados para o semiplano esquerdo do plano complexo. Além disso, os coeficientes de amortecimento de todos os modos oscilatórios foram elevados para valores superiores ao amortecimento mínimo desejado para cada cenário.

Na Figura 30 é mostrado o deslocamento dos autovalores dominantes no plano complexo considerando a atuação dos controladores ESPs e conjunto TCSC-POD no sistema *New England*.

Figura 30 - Deslocamento dos autovalores dominantes do sistema *New England*.

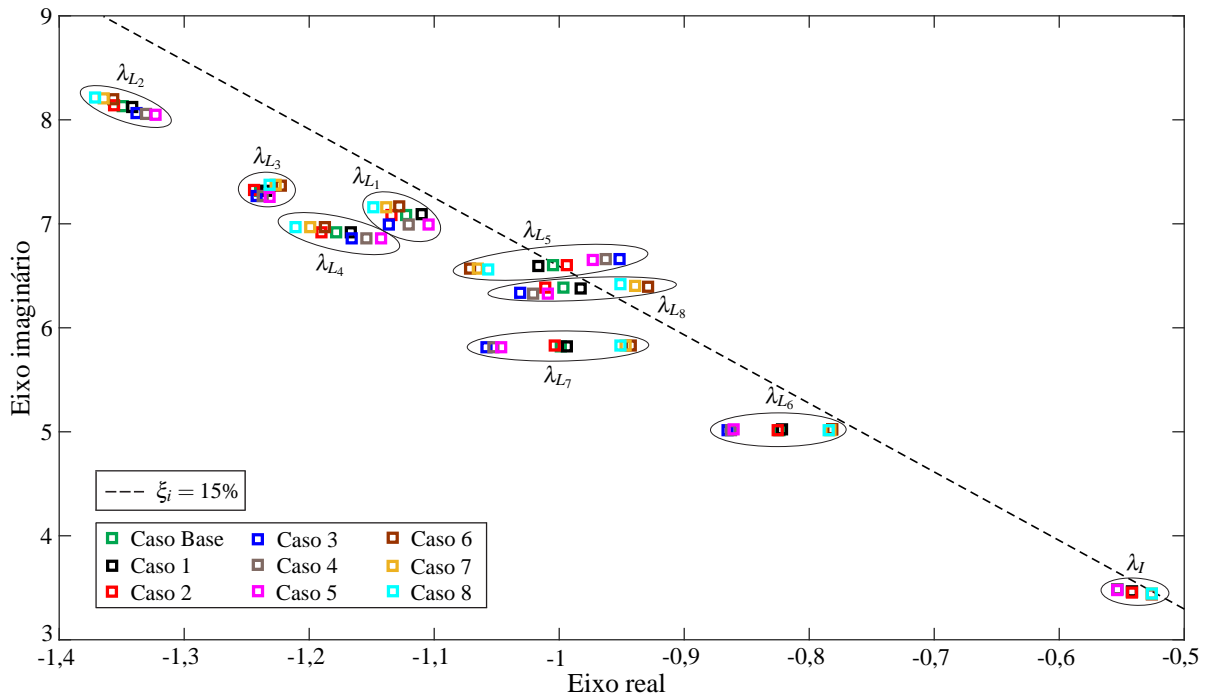
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Analisando os dados apresentados na Figura 30, observa-se que todos os autovalores do Caso Base estão situados nas regiões predefinidas de acordo com o amortecimento mínimo desejado, conforme se esperava ao formular o problema de otimização.

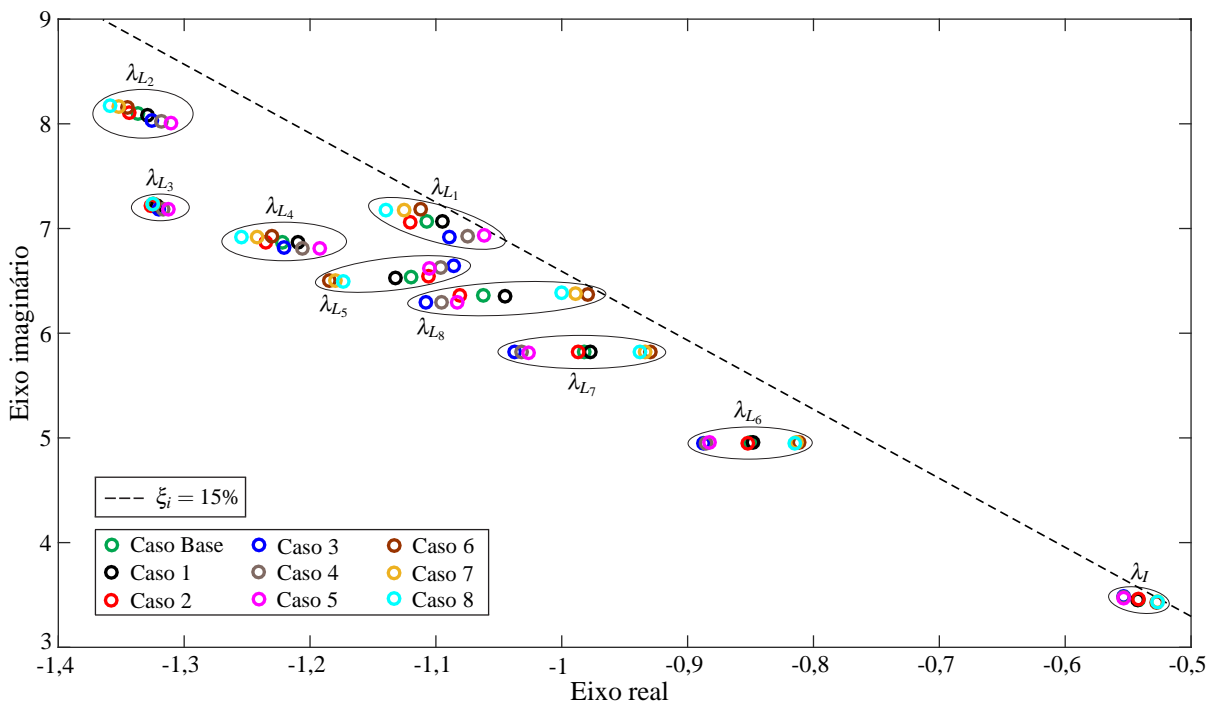
Nas Figuras 31 e 32 são mostrados os autovalores dominantes para o Caso Base e os 8 casos de variação de carga do sistema *New England*, de acordo com os ajustes fornecidos na Tabela 13 para os cenários $F_1 - \xi_i^{des} \geq 15\%$ e $F_2 - \xi_{i,j}^{des} \geq 15\%$, respectivamente.

Verifica-se que os autovalores referentes aos dois cenários de maior amortecimento estão, na média, próximos uns aos outros com relação ao Caso Base, como mostrado na Figura 30. Entretanto, ao analisar as Figuras 31 e 32, onde são consideradas variações de carga, torna-se evidente a diferença entre os dois cenários de amortecimento.

De acordo com os ajustes obtidos, o cenário de amortecimento que considera múltiplos pontos de operação em sua formulação (Figura 32), conforme o esperado, garante 15% de amortecimento para os modos oscilatórios de todos os casos de variação de carga, enquanto o cenário que considera apenas um ponto de operação (Figura 31), ao variar o carregamento do sistema, não garante 15% de amortecimento para os modos oscilatórios λ_{L_5} e λ_{L_8} . Este fato é justificado ao analisar a Figura 31, verifica-se que os modos λ_{L_5} e λ_{L_8} são os que apresentam maior sensibilidade às variações de carga, sabendo-se que este cenário não considera variações de carga na obtenção do ajuste, esperava-se que tais resultados fossem obtidos.

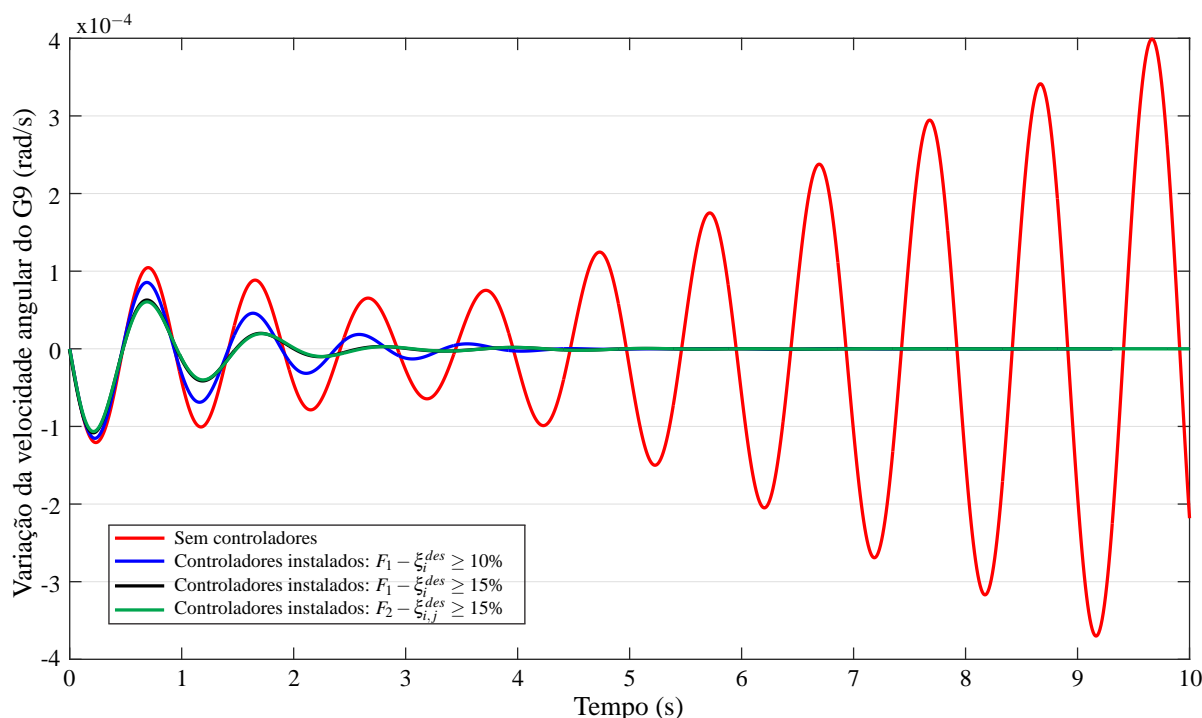
Figura 31 - Autovalores do sistema *New England* com variações de carga: $F_1 - \xi_i^{des} \geq 15\%$.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 32 - Autovalores do sistema *New England* com variações de carga: $F_2 - \xi_{i,j}^{des} \geq 15\%$.

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Para a análise da estabilidade a pequenas perturbações no domínio do tempo considera-se uma perturbação de 5% do tipo degrau na potência mecânica do gerador 2 (G2), referência do sistema *New England*. Na Figura 33 encontram-se quatro curvas que mostram as variações da velocidade angular do gerador 9 (G9) para cada um dos cenários simulados.

Figura 33 - Variação da velocidade angular do gerador G9 do sistema *New England*.

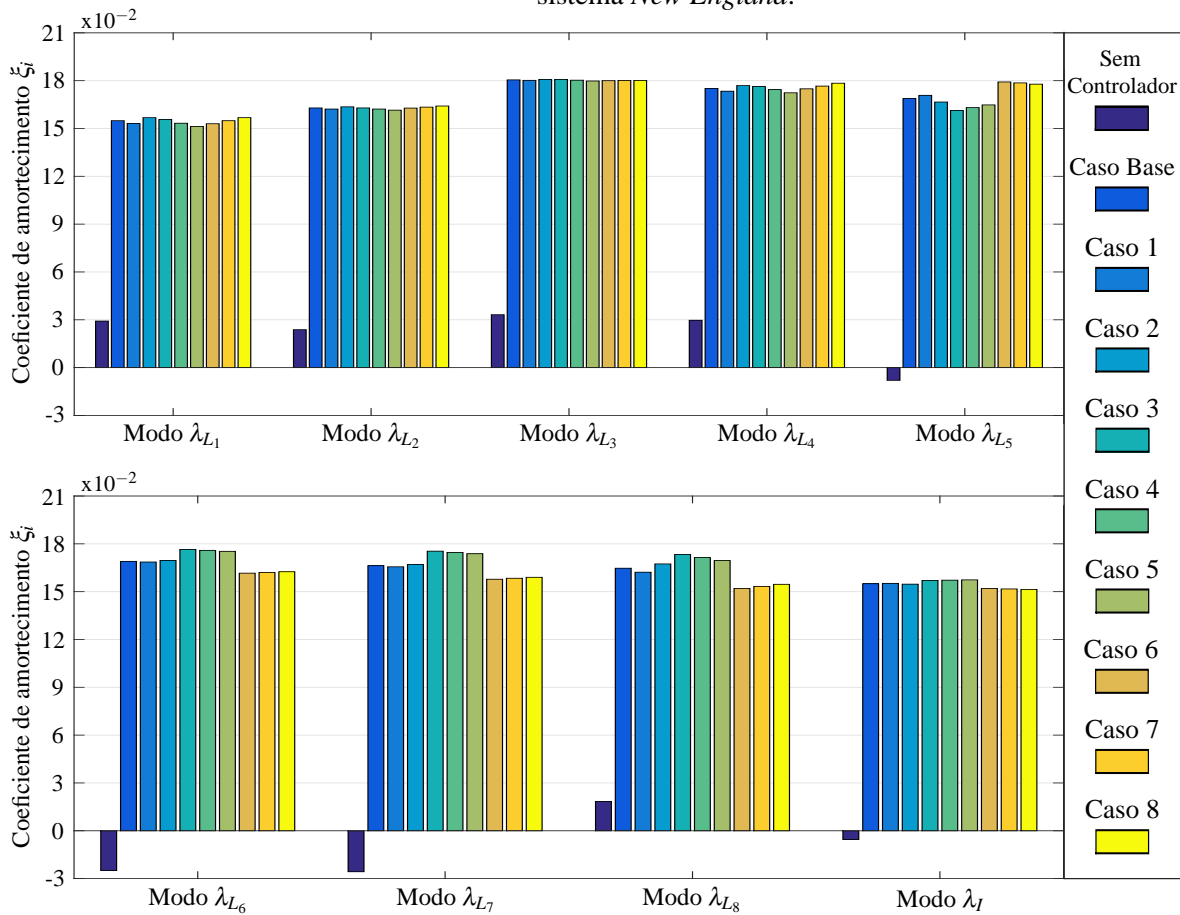
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Analisando a Figura 33, observa-se que a curva vermelha do Caso Base sem a atuação de controladores é característica de um sistema instável devido à presença de oscilações de amplitude crescente. As curvas referentes aos outros cenários são características de sistemas estáveis devido à presença de oscilações de amplitude decrescente com valor final tendendo a zero, sendo que quanto maior o amortecimento, menor é o tempo para entrada em regime permanente. Verifica-se ainda que para os ajustes obtidos, as curvas referentes aos dois cenários de maior amortecimento estão praticamente sobrepostas.

Na Figura 34 são apresentados os coeficientes de amortecimento dos modos oscilatórios, presentes no sistema *New England*, para cada um dos 9 casos de variação de carga considerados pelo cenário de maior complexidade ($F_2 - \xi_{i,j}^{des} \geq 15\%$). Os coeficientes de amortecimento do Caso Base sem a atuação dos controladores também são representados para comparação.

Analisando a Figura 34, torna-se possível reafirmar que o ajuste dos controladores, para o cenário de maior complexidade apresentado na Tabela 13, garante um amortecimento de no mínimo 15% para os modos oscilatórios de todos os casos de variação de carga considerados. Verifica-se ainda que com o ajuste obtido, o modo oscilatório λ_{L_3} é o modo com menor sensibilidade às variações de carga do sistema. Por outro lado, o modo oscilatório λ_{L_8} , conforme discutido anteriormente, é o modo que apresenta a maior sensibilidade frente às variações de carga, cujo coeficiente de amortecimento varia entre 15,20% (Caso 6) e 17,33% (Caso 3).

Figura 34 - Coeficientes de amortecimento dos modos oscilatórios considerando variações de carga no sistema *New England*.



6.3 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

Neste Capítulo, simulações foram realizadas em dois sistemas testes a fim de observar a influência dos controladores ESPs e do conjunto TCSC-POD nos modos oscilatórios de baixa frequência do SEP, assim como o desempenho dos métodos de otimização no ajuste destes controladores de amortecimento.

Após a execução de uma série de análises, conclui-se que dentre as configurações apresentadas, a atuação simultânea dos controladores ESPs e do conjunto TCSC-POD é a mais adequada, atendendo aos requisitos mínimos sem a necessidade de valores impraticáveis de ganhos e de compensação da reatância de linha.

Diante dos resultados apresentados, o desempenho do algoritmo BVNS, proposto neste trabalho, foi superior aos dois outros métodos (AG e PSO) nos quesitos avaliados, apresentando-o como uma técnica em potencial para a realização do ajuste coordenado dos parâmetros dos controladores suplementares de amortecimento.

7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O objetivo principal deste trabalho foi propor uma técnica adequada para a realização do ajuste coordenado dos controladores de amortecimento ESP e TCSC-POD, a fim de garantir a estabilidade a pequenas perturbações e níveis confiáveis de amortecimento ao SEP. Além disso, também foi proposto a inclusão do TCSC no MSC, a partir da dedução dos coeficientes de sensibilidade de corrente do FACTS, considerando seu modelo por injeção de corrente.

Para atender ao objetivo do trabalho, inicialmente foi apresentado o modelo por injeção de corrente do TCSC. Na dedução, o dispositivo foi considerado como uma reatância capacitiva equivalente em série na linha de transmissão. Após as devidas considerações e equacionamentos, tornou-se possível determinar a influência do TCSC nas duas barras interligadas pela linha de transmissão de instalação do FACTS. Por fim, seus coeficientes de sensibilidade de corrente foram deduzidos e o FACTS TCSC foi incorporado ao MSC.

Na sequência, os controladores ESPs e POD foram modelados e, novas variáveis de estado, relativas à atuação destes controladores, foram incluídas à representação do MSC. Cada controlador ESP introduz três novas variáveis de estado à representação. Já o controlador POD, utilizado neste trabalho no conjunto TCSC-POD, introduz quatro novas variáveis de estado.

Técnicas de ajuste dos parâmetros dos controladores de amortecimento foram apresentadas, entre elas, um AG tradicional e o algoritmo PSO, que foram implementados com o objetivo de servirem como parâmetros para comparação com o método proposto neste trabalho, um algoritmo BVNS adaptado para trabalhar com variáveis contínuas, mudanças nas estruturas de vizinhança baseadas em trocas de posição dos valores armazenados no vetor solução, além de contar com uma etapa de busca local eficiente para o tipo de problema proposto.

Com as modelagens e técnicas de ajuste apresentadas, simulações foram realizadas em dois sistemas testes: sistema Simétrico de Duas Áreas e sistema New England. O primeiro sistema teste, na ausência de controladores ou qualquer tipo de compensação, acusou instabilidade a pequenas perturbações devido à presença de um modo oscilatório interárea instável.

Em seguida, com atuação isolada do FACTS TCSC foram testados quatro níveis de compensação da reatância da linha de transmissão que conecta as duas áreas do sistema. O sistema tornou-se estável a pequenas perturbações, ainda que de maneira precária, somente com um nível elevado de compensação, por volta de 70%. Valores elevados de compensação são impraticáveis em sistemas reais, visto que nestas condições, seu uso acarretaria em fortes restrições na margem de operação do SEP. Dessa forma, verifica-se que o TCSC atuando isoladamente é insuficiente para resolver problemas relativos às oscilações eletromecânicas.

Quanto ao sistema *New England*, também foi constatada sua instabilidade a partir da presença de três modos locais e um modo interárea instável, além de modos oscilatórios adicionais fracamente amortecidos. Diante do exposto, três cenários de amortecimento mínimo foram definidos para execução dos métodos de ajuste: 10% e 15% para o ponto de operação do caso base e 15% considerando variações de carga no entorno do caso base.

Com a atuação simultânea dos ESPs e TCSC-POD, ajustados adequadamente pelos métodos de otimização, foi possível levar os sistemas testes para a estabilidade e elevar o amortecimento de todos os modos oscilatórios para níveis aceitáveis. Isso foi possível com uma taxa de compensação da reatância de linha praticável em sistemas reais, de apenas 10%.

Os desempenhos dos métodos de otimização foram comparados levando em consideração o tempo médio de processamento, taxa de convergência e número de cálculos da função objetivo para se alcançar a convergência. Em ambos os sistemas testes, o BVNS obteve um desempenho superior em comparação ao AG e PSO.

Os resultados de boa qualidade apresentados pelo BVNS estão baseados na eficiência da etapa de busca local em encontrar soluções ótimas quando estas se encontram próximas à solução de partida ou na região atual de busca. Entretanto, caso não existam soluções ótimas próximas à solução corrente, o método é capaz de migrar para outras regiões através de mudanças nas estruturas de vizinhança, evitando estagnar em um ótimo local e promovendo um equilíbrio entre exploração e intensificação.

Baseando-se nos resultados, a técnica proposta neste trabalho se qualifica como uma ferramenta em potencial na análise da estabilidade a pequenas perturbações, no que diz respeito ao ajuste coordenado dos controladores suplementares de amortecimento.

Diante do exposto, para trabalhos futuros torna-se interessante:

- Propor e implementar outros métodos de ajuste dos parâmetros dos controladores suplementares de amortecimento, tais como novas metaheurísticas, ou ainda, métodos baseados em inteligência artificial, comparando-os com as técnicas encontradas na literatura, incluindo o método proposto neste trabalho;
- Modelar outros dispositivos FACTS por injeção de corrente e incorporá-los ao Modelo de Sensibilidade de Corrente, tais como o *Static Var Compensator* (SVC) e o *Static Synchronous Series Compensator* (SSSC), possibilitando a análise da influência destes dispositivos na estabilidade a pequenas perturbações.

REFERÊNCIAS

- ABD-ELAZIM, S. M.; ALI, E. S. Optimal power system stabilizers design via cuckoo search algorithm. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, London, v. 75, p. 99–107, 2016.
- ABDEL-MAGID, Y. L.; ABIDO, M. A.; AL-BAIYAT, S.; MANTAWY, A. H. Simultaneous stabilization of multimachine power systems via genetic algorithms. *IEEE Transactions on Power Systems*, Piscataway, v. 14, n. 4, p. 1428–1439, 1999.
- ABIDO, M. A. Simulated annealing based approach to PSS and FACTS based stabilizer tuning. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, London, v. 22, n. 4, p. 247–258, 2000.
- AL-AWAMI, A. T.; ABDEL-MAGID, Y. L.; ABIDO, M. A. A particle-swarm-based approach of power system stability enhancement with unified power flow controller. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, London, v. 29, n. 3, p. 251–259, 2007.
- ALI, E. S.; ABD-ELAZIM, S. M. TCSC damping controller design based on bacteria foraging optimization algorithm for a multimachine power system. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, London, v. 37, n. 1, p. 23–30, 2012.
- ALMADA, L. M. *O modelo de injeção de potência do TCSC e sua aplicação no estudo da estabilidade a pequenas perturbações*. 2012. 74 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2012.
- ANDERSON, P. M.; FOUAD, A. A. *Power system control and stability*. New York: Wiley-IEEE Press, 2003. 672 p.
- ARAUJO, P. B.; ZANETA, L. C. Pole placement method using the system matrix transfer function and sparsity. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, London, v. 23, n. 3, p. 173–178, 2001.
- BERGH, F.; ENGELBRECHT, A. P. A new locally convergent particle swarm optimiser. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON SYSTEMS, MAN AND CYBERNETICS, 15., 2002, Yasmine Hammamet. *Proceedings...* Yasmine Hammamet: IEEE, 2002. v. 3, p. 1–6.
- BOMFIM, A. L. B.; TARANTO, G. N.; FALCAO, D. M. Simultaneous tuning of power system damping controllers using genetic algorithms. *IEEE Transactions on Power Systems*, Piscataway, v. 15, n. 1, p. 163–169, 2000.
- BRATTON, D.; KENNEDY, J. Defining a standard for particle swarm optimization. In: IEEE SWARM INTELLIGENCE SYMPOSIUM, 3., 2007, Honolulu. *Proceedings...* Honolulu: IEEE, 2007. p. 120–127.
- CADI, A. A.; ATITALLAH, R. B.; MLADENOVIC, N.; ARTIBA, A. A variable neighborhood search (VNS) metaheuristic for multiprocessor scheduling problem with communication delays. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRIAL ENGINEERING AND SYSTEMS MANAGEMENT, 6., 2015, Seville. *Proceedings...* Seville: IEEE, 2015. p.

1091–1095.

CAI, L.-J.; ERLICH, I. Simultaneous coordinated tuning of PSS and FACTS damping controllers in large power systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, Piscataway, v. 20, n. 1, p. 294–300, 2005.

CASTRO, R. E. *Otimização de estruturas com multi-objetivos via algoritmos genéticos*. 2001. 206 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) — Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001.

CHEN, C. J.; CHEN, T. C.; HO, H. J.; OU, C. C. PSS design using adaptive recurrent neural network controller. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON NATURAL COMPUTATION, 5., 2009, Tianjin. *Proceedings...* Tianjin: IEEE, 2009. v. 2, p. 277–281.

CHEN, C. L.; HSU, Y. Y. Coordinated synthesis of multimachine power system stabilizer using an efficient decentralized modal control (DMC) algorithm. *IEEE Transactions on Power Systems*, Piscataway, v. 2, n. 3, p. 543–550, 1987.

CHITARA, D.; NIAZI, K. R.; SWARNKAR, A.; GUPTA, N. Cuckoo search optimization algorithm for designing of a multimachine power system stabilizer. *IEEE Transactions on Industry Applications*, Piscataway, v. 54, n. 4, p. 3056–3065, 2018.

DECKMANN, S. M.; DA COSTA, V. F. A power sensitivity model for electromechanical oscillation studies. *IEEE Transactions on Power Systems*, Piscataway, v. 9, n. 2, p. 965–971, 1994.

DEL ROSSO, A. D.; CANIZARES, C. A.; DONA, V. M. A study of TCSC controller design for power system stability improvement. *IEEE Transactions on Power Systems*, Piscataway, v. 18, n. 4, p. 1487–1496, 2003.

DEMELLO, F. P.; CONCORDIA, C. Concepts of synchronous machine stability as affected by excitation control. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Piscataway, PAS-88, n. 4, p. 316–329, 1969.

EBERHART, R.; SIMPSON, P.; DOBBINS, R. *Computational intelligence PC tools*. San Diego: Academic Press Professional, 1996. 464 p.

ESLAMI, M.; SHAREEF, H.; KHAJEHZADEH, M. Optimal design of damping controllers using a new hybrid artificial bee colony algorithm. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, London, v. 52, p. 42–54, 2013.

ESLAMI, M.; SHAREEF, H.; MOHAMED, A.; KHAJEHZADEH, M. An efficient particle swarm optimization technique with chaotic sequence for optimal tuning and placement of PSS in power systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, London, v. 43, n. 1, p. 1467–1478, 2012.

FORTES, E. V. *Aplicação do algoritmo genético de chu-beasley especializado no ajuste dos parâmetros dos controladores suplementares e dispositivo FACTS IPFC*. 2016. 219 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2016.

- FORTES, E. V.; ARAUJO, P. B.; MACEDO, L. H. Coordinated tuning of the parameters of PI, PSS and POD controllers using a specialized Chu-Beasley's genetic algorithm. *Electric Power Systems Research*, Amsterdam, v. 140, p. 708–721, 2016.
- FREITAS, W.; MORELATO, A. A generalised current injection approach for modelling of FACTS in power system dynamic simulation. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON AC-DC POWER TRANSMISSION, 7., 2001, London. *Proceedings...* London: IET, 2001. p. 175–180.
- FURINI, M. A. *Estudo da estabilidade a pequenas perturbações de sistemas elétricos de potência multimáquinas sob a ação dos controladores FACTS TCSC e UPFC*. 2008. 153 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2008.
- FURINI, M. A.; ARAUJO, P. B. Melhora da estabilidade dinâmica de sistemas elétricos de potência multimáquinas usando o dispositivo facts "thyristor-controlled series capacitor - TCSC". *SBA Controle & Automação*, Campinas, v. 19, n. 2, p. 214–225, 2008.
- FURINI, M. A.; PEREIRA, A. L. S.; ARAUJO, P. B. Pole placement by coordinated tuning of power system stabilizers and FACTS-POD stabilizers. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, London, v. 33, n. 3, p. 615–622, 2011.
- GAMA, C. Brazilian north-south interconnection control-application and operating experience with a TCSC. In: IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY SUMMER MEETING, 99., 1999, Edmonton. *Proceedings...* Edmonton: IEEE, 1999. v. 2, p. 1103–1108.
- GAMA, C.; ÄNGQUIST, L.; INGESTRÖM, G.; NOROOZIAN, M. Commissioning and operative experience of TCSC for damping power oscillation in the Brazilian north-south interconnection. In: CIGRÉ SESSION, 38., 2000, Paris. *Proceedings...* Paris: [s.n.], 2000. p. 1–6.
- GAMINO, B. R.; ARAUJO, P. B.; FORTES, E. V.; MARTINS, L. F. B.; MIOTTO, E. L. Coordinated tuning of PSS and TCSC-POD controller using an elite genetic algorithm. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRY APPLICATIONS (INDUSCON), 12., 2016, Curitiba. *Proceedings...* Curitiba: IEEE, 2016. p. 1–8.
- GAMINO, B. R.; FORTES, E. V.; ARAUJO, P. B.; MIOTTO, E. L.; MARTINS, L. F. B. Ajuste dos parâmetros dos controladores ESP e conjunto TCSC-POD utilizando o algoritmo particle swarm optimization. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, 21., 2016, Vitória. *Anais...* Vitória: [s.n.], 2016. p. 2031–2036.
- GEN, M.; CHENG, R. *Genetic algorithms and engineering optimization*. New York: John Wiley & Sons, 2000. 495 p.
- GENDREAU, M.; POTVIN, J.-Y. *Handbook of metaheuristics*. 2. ed. New York: Springer, 2010. 648 p.
- GOLDBERG, D. E. *Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning*. Reading: Addison-Wesley Publishing Company, 1989. 412 p.
- HAMEED, S.; DAS, B.; PANT, V. A self-tuning fuzzy PI controller for TCSC to improve

- power system stability. *Electric Power Systems Research*, Amsterdam, v. 78, n. 10, p. 1726–1735, 2008.
- HASANVAND, H.; ARVAN, M. R.; MOZAFARI, B.; AMRAEE, T. Coordinated design of PSS and TCSC to mitigate interarea oscillations. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, London, v. 78, p. 194–206, 2016.
- HASSAN, L. H.; MOGHAVVEMI, M.; ALMURIB, H. A. F.; MUTTAQI, K. M.; DU, H. Damping of low-frequency oscillations and improving power system stability via auto-tuned PI stabilizer using takagi-sugeno fuzzy logic. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, London, v. 38, n. 1, p. 72–83, 2012.
- HASSAN, L. H.; MOGHAVVEMI, M.; ALMURIB, H. A. F.; MUTTAQI, K. M. A coordinated design of PSSs and UPFC-based stabilizer using genetic algorithm. *IEEE Transactions on Industry Applications*, Piscataway, v. 50, n. 5, p. 2957–2966, 2014.
- HE, J.; MALIK, O. P. An adaptive power system stabilizer based on recurrent neural networks. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Piscataway, v. 12, n. 4, p. 413–418, 1997.
- HEFFRON, W. G.; PHILLIPS, R. A. Effect of a modern amplidyne voltage regulator on underexcited operation of large turbine generators. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems*, New York, v. 71, n. 1, p. 692–697, 1952.
- HINGORANI, N. G.; GYUGYI, L. *Understanding FACTS: concepts and technology of flexible AC transmission systems*. New York: IEEE Press-John Wiley, 1999. 432 p.
- HOLLAND, J. H. *Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*. Cambridge: MIT Press, 1992. 211 p.
- KENNEDY, J.; EBERHART, R. Particle swarm optimization. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON NEURAL NETWORKS, 3., 1995, Perth. *Proceedings...* Perth: IEEE, 1995. v. 4, p. 1942–1948.
- KLEIN, M.; ROGERS, G. J.; KUNDUR, P. A fundamental study of inter-area oscillations in power systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, Piscataway, v. 6, n. 3, p. 914–921, 1991.
- KUNDUR, P. *Power system stability and control*. New York: McGraw-Hill, 1994. 1176 p.
- KUNDUR, P.; PASERBA, J.; AJJARAPU, V.; ANDERSSON, G.; BOSE, A.; CANIZARES, C.; HATZIARGYRIOU, N.; HILL, D.; STANKOVIC, A.; TAYLOR, C.; CUTSEM, T. V.; VITTAL, V. Definition and classification of power system stability IEEE/CIGRE joint task force on stability terms and definitions. *IEEE Transactions on Power Systems*, Piscataway, v. 19, n. 3, p. 1387–1401, 2004.
- LARSEN, E. V.; SWANN, D. A. Applying power system stabilizers Part I: General concepts. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Piscataway, PAS-100, n. 6, p. 3017–3024, 1981.
- LEBBAH, F. Z.; LEBBAH, Y. VNS approach for solving a financial portfolio design problem. *Electronic Notes in Discrete Mathematics*, Amsterdam, v. 47, p. 125–132, 2015.

- LEE, K. Y.; EL-SHARKAWI, M. A. *Modern heuristic optimization techniques: theory and applications to power systems*. Hoboken: John Wiley & Sons, 2008. 586 p.
- LUOR, T.-S.; HSU, Y.-Y.; GUO, T.-Y.; LIN, J.-T.; HUANG, C.-Y. Application of thyristor-controlled series compensators to enhance oscillatory stability and transmission capability of a longitudinal power system. *IEEE Transactions on Power Systems*, Piscataway, v. 14, n. 1, p. 179–185, 1999.
- MENEZES, M. M. *Métodos de otimização aplicados no ajuste de ESPs e controladores de amortecimento inseridos no FACTS TCSC em sistemas elétricos de potência*. 2014. 115 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2014.
- MENEZES, M. M.; ARAUJO, P. B.; VALLE, D. B. Design of PSS and TCSC damping controller using particle swarm optimization. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, Heidelberg, v. 27, n. 5, p. 554–561, 2016.
- MICHALEWICZ, Z. *Genetic algorithms + data structures = evolution programs*. 3. ed. Berlin: Springer-Verlag, 1996. 387 p.
- MIOTTO, E. L.; ARAUJO, P. B.; FORTES, E. V.; GAMINO, B. R.; MARTINS, L. F. B. Coordinated tuning of the parameters of PSS and POD controllers using bioinspired algorithms. *IEEE Transactions on Industry Applications*, Piscataway, v. 54, n. 4, p. 3845–3857, 2018.
- MISHRA, S.; DASH, P. K.; HOTA, P. K.; TRIPATHY, M. Genetically optimized neuro-fuzzy IPFC for damping modal oscillations of power system. *IEEE Transactions on Power Systems*, Piscataway, v. 17, n. 4, p. 1140–1147, 2002.
- MLADENOVIĆ, N.; HANSEN, P. Variable neighborhood search. *Computers & Operations Research*, Great Britain, v. 24, n. 11, p. 1097–1100, 1997.
- MOURA, R. F.; FURINI, M. A.; ARAUJO, P. B. Estudo das limitações impostas ao amortecimento de oscilações eletromecânicas pelos zeros da FTMA de controladores suplementares. *SBA Controle & Automação*, Campinas, v. 23, n. 2, p. 190–201, 2012.
- MOUSSA, H. A. M.; YU, Y.-N. Dynamic interaction of multi-machine power system and excitation control. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Piscataway, PAS-93, n. 4, p. 1150–1158, 1974.
- PÁDUA JÚNIOR, C. R. *Modelos lineares de sistemas elétricos de potência: um estudo comparativo*. 2014. 113 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2014.
- PÁDUA JÚNIOR, C. R.; TAKAHASHI, A. L. M.; FURINI, M. A.; ARAUJO, P. B. Proposta de um modelo para análise de estabilidade a pequenas perturbações baseado na lei de Kirchhoff para correntes. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE AUTOMAÇÃO INTELIGENTE, 11., 2013, Fortaleza. *Anais...* Fortaleza: [s.n.], 2013. p. 1–6.
- PASERBA, J. J. How FACTS controllers benefit AC transmission systems. In: IEEE PES TRANSMISSION AND DISTRIBUTION CONFERENCE AND EXPOSITION, 3., 2003, Dallas. *Proceedings...* Dallas: IEEE, 2003. v. 3, p. 991–998.

- PERES, W.; OLIVEIRA, E. J.; FILHO, J. A. P.; JUNIOR, I. C. S. Coordinated tuning of power system stabilizers using bio-inspired algorithms. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, London, v. 64, p. 419–428, 2015.
- RAO, S. S. *Engineering optimization: theory and practice*. 4. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2009. 813 p.
- SAUER, P. W.; PAI, M. A. *Power system dynamics and stability*. New Jersey: Prentice Hall, 1998. 357 p.
- SCHNEIDER, M.; STENGER, A.; HOF, J. An adaptive VNS algorithm for vehicle routing problems with intermediate stops. *OR Spectrum*, Heidelberg, v. 37, n. 2, p. 353–387, 2015.
- SHAHGHOLIAN, G.; FAZELI-NEJAD, S.; MOAZZAMI, M.; MAHDAVIAN, M.; AZADEH, M.; JANGHORBANI, M.; FARAZPEY, S. Power system oscillations damping by optimal coordinated design between PSS and STATCOM using PSO and ABC algorithms. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICAL ENGINEERING/ELECTRONICS, COMPUTER, TELECOMMUNICATIONS AND INFORMATION TECHNOLOGY, 13., 2016, Chiang Mai. *Proceedings...* Chiang Mai: IEEE, 2016. p. 1–6.
- SHAYEGHI, H.; SAFARI, A.; SHAYANFAR, H. A. PSS and TCSC damping controller coordinated design using PSO in multi-machine power system. *Energy Conversion and Management*, London, v. 51, n. 12, p. 2930–2937, 2010.
- SHI, Y.; EBERHART, R. A modified particle swarm optimizer. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON EVOLUTIONARY COMPUTATION, 5., 1998, Anchorage. *Proceedings...* Anchorage: IEEE, 1998. p. 69–73.
- SILVA, R. F.; URRUTIA, S. A General VNS heuristic for the traveling salesman problem with time windows. *Discrete Optimization*, Amsterdam, v. 7, n. 4, p. 203–211, 2010.
- SIMOES, A. M.; SAVELLI, D. C.; PELLANDA, P. C.; MARTINS, N.; APKARIAN, P. Robust design of a TCSC oscillation damping controller in a weak 500-kv interconnection considering multiple power flow scenarios and external disturbances. *IEEE Transactions on Power Systems*, Piscataway, v. 24, n. 1, p. 226–236, 2009.
- SON, K. M.; LASSETER, R. H. A Newton-type current injection model of UPFC for studying low-frequency oscillations. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Piscataway, v. 19, n. 2, p. 694–701, 2004.
- SONG, Y. H.; JOHNS, A. T. *Flexible AC transmission systems (FACTS)*. London: The Institution of Electrical Engineers, 1999. 592 p.
- TAKAHASHI, A. L. M. *Análise da estabilidade a pequenas perturbações do sistema elétrico de potência considerando a atuação do TCSC e controladores suplementares de amortecimento: representação pelo modelo de sensibilidade de corrente*. 2013. 129 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2013.
- TAKAHASHI, A. L. M.; PÁDUA JÚNIOR, C. R.; FURINI, M. A.; ARAUJO, P. B. Estudo dos efeitos da inclusão do FACTS TCSC sobre a estabilidade dinâmica de sistemas elétricos

- de potência multimáquinas modelados através do modelo de sensibilidade de correntes. In: LATIN-AMERICAN CONGRESS ON ELECTRICITY GENERATION, TRANSMISSION AND DISTRIBUTION, 10., 2013, Viña del Mar. *Proceedings...* Viña del Mar: [s.n.], 2013. p. 1–9.
- TARANTO, G. M.; FALCAO, D. M. Robust decentralised control design using genetic algorithms in power system damping control. *IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution*, Stevenage, v. 145, n. 1, p. 1–6, 1998.
- VALLE, D. B. *A influência do IPFC na estabilidade de pequenas perturbações de sistemas elétricos de potência*. 2010. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010.
- VALLE, D. B. *A influência do controlador GUPFC no sistema elétrico de potência visando a estabilidade a pequenas perturbações*. 2014. 182 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2014.
- VALLE, D. B.; ARAUJO, P. B. The influence of GUPFC FACTS device on small signal stability of the electrical power systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, London, v. 65, p. 299–306, 2015.
- VINKOVIC, A.; MIHALIC, R. A current-based model of the static synchronous series compensator (SSSC) for Newton-Raphson power flow. *Electric Power Systems Research*, Amsterdam, v. 78, n. 10, p. 1806–1813, 2008.
- VINKOVIC, A.; MIHALIC, R. A current-based model of an IPFC for Newton-Raphson power flow. *Electric Power Systems Research*, Amsterdam, v. 79, n. 8, p. 1247–1254, 2009.
- WANG, H. F.; SWIFT, F. J.; LI, M. A unified model for the analysis of FACTS devices in damping power system oscillations. II. multi-machine power systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Piscataway, v. 13, n. 4, p. 1355–1362, 1998.
- WATANABE, E. H.; BARBOSA, P. G.; ALMEIDA, K. C.; TARANTO, G. N. Tecnologia FACTS - tutorial. *SBA Controle & Automação*, Campinas, v. 9, n. 1, p. 39–55, 1998.
- YANG, N.; LIU, Q.; MCCALLEY, J. D. TCSC controller design for damping interarea oscillations. *IEEE Transactions on Power Systems*, Piscataway, v. 13, n. 4, p. 1304–1310, 1998.
- YUE, F.; BAILU, Q. Electrical design aspects of pingguo TCSC project. In: IEEE/PES TRANSMISSION DISTRIBUTION CONFERENCE AND EXHIBITION: ASIA AND PACIFIC, 2., 2005, Dalian. *Proceedings...* Dalian: IEEE, 2005. p. 1–6.
- ZIMMERMAN, R. D.; MURILLO-SANCHEZ, C. E.; THOMAS, R. J. Matpower: Steady-state operations, planning, and analysis tools for power systems research and education. *IEEE Transactions on Power Systems*, Piscataway, v. 26, n. 1, p. 12–19, 2011.

ANEXO A - DADOS DOS SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

Neste anexo são apresentados os dados referentes aos sistemas elétricos de potência testes simulados neste trabalho. Os dados do sistema Simétrico de Duas Áreas são mostrados nas Tabelas 15 a 18 (SAUER; PAI, 1998).

Tabela 15 - Dados dos geradores síncronos do sistema Simétrico de Duas Áreas.

Gerador	x'_d (pu)	x_q (pu)	x_d (pu)	T'_{d0} (s)	H (s)	D (pu)
G1	0,033	0,19	0,2	8	54	0,1
G2	0,033	0,19	0,2	8	54	0,1
G3	0,033	0,19	0,2	8	63	0,1
G4	0,033	0,19	0,2	8	63	0,1

Fonte: Adaptado de Sauer e Pai (1998).

Tabela 16 - Dados dos reguladores automáticos de tensão do sistema Simétrico de Duas Áreas.

Gerador	K_r (pu)	T_r (s)
G1	200	0,001
G2	200	0,001
G3	200	0,001
G4	200	0,001

Fonte: Adaptado de Sauer e Pai (1998).

Tabela 17 - Dados das linhas de transmissão do sistema Simétrico de Duas Áreas.

Barra inicial	Barra final	r (pu)	x (pu)	b (pu)
1	5	0,001	0,012	0,000
2	6	0,001	0,012	0,000
7	8	0,022	0,220	0,330
7	8	0,022	0,220	0,330
7	8	0,022	0,220	0,330
6	7	0,002	0,020	0,030
6	7	0,002	0,020	0,030
4	10	0,001	0,012	0,000
3	9	0,001	0,012	0,000
9	8	0,002	0,020	0,030
9	8	0,002	0,020	0,030
5	6	0,005	0,050	0,075
5	6	0,005	0,050	0,075
10	9	0,005	0,050	0,075
10	9	0,005	0,050	0,075

Fonte: Adaptado de Sauer e Pai (1998).

Tabela 18 - Dados de geração e carregamento do sistema Simétrico de Duas Áreas.

Barra	V (pu)	Fase (°)	P_g (MW)	Q_g (MVar)	P_c (MW)	Q_c (MVar)	B_{sh} (pu)
1	1,030	8,892	700,00	185,86	0,00	0,00	0,00
2	1,010	-1,003	700,00	314,48	0,00	0,00	0,00
3	1,010	-10,394	700,00	258,93	0,00	0,00	0,00
4	1,030	0,000	726,25	171,62	0,00	0,00	0,00
5	1,005	4,339	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6	0,969	-5,742	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7	0,938	-14,287	0,00	0,00	1159,00	212,00	1,00
8	0,953	-23,695	0,00	0,00	1575,00	288,00	3,50
9	0,976	-15,133	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10	1,006	-4,728	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Fonte: Adaptado de Sauer e Pai (1998).

Nas Tabelas 19 a 22 são mostrados os dados referentes aos geradores, reguladores automáticos de tensão, linhas de transmissão e carregamento do sistema *New England* (ARAUJO; ZANETA, 2001).

Tabela 19 - Dados dos geradores síncronos do sistema *New England*.

Gerador	x'_d (pu)	x_q (pu)	x_d (pu)	T'_{d0} (s)	H (s)	D (pu)
G1	0,0310	0,0609	0,1000	10,20	42,0	4,00
G2	0,0697	0,2820	0,2950	6,56	30,3	9,75
G3	0,0531	0,2370	0,2495	5,70	35,8	10,00
G4	0,0436	0,2580	0,2620	6,56	28,6	10,00
G5	0,1320	0,6200	0,6700	5,40	26,0	3,00
G6	0,0500	0,2410	0,2540	7,30	34,8	10,00
G7	0,0490	0,2920	0,2950	5,66	26,4	8,00
G8	0,0570	0,2800	0,2900	6,70	24,3	9,00
G9	0,0570	0,2050	0,2106	4,79	34,5	14,00
G10	0,0001	1e-10	1e-10	7,00	1e+9	10,00

Fonte: Adaptado de Araujo e Zaneta (2001).

Tabela 20 - Dados dos reguladores automáticos de tensão do sistema *New England*.

Gerador	K_r (pu)	T_r (s)
G1	5,0	0,06
G2	6,2	0,05
G3	5,0	0,06
G4	5,0	0,06
G5	40,0	0,02
G6	5,0	0,02
G7	40,0	0,02
G8	5,0	0,02
G9	40,0	0,02
G10	0,001	9999

Fonte: Adaptado de Araujo e Zaneta (2001).

Tabela 21 - Dados das linhas de transmissão do sistema *New England*.

Barra inicial	Barra final	r (pu)	x (pu)	b (pu)
30	31	0,0035	0,0411	0,6987
30	10	0,0010	0,0250	0,7500
31	32	0,0013	0,0151	0,2572
31	25	0,0070	0,0086	0,1406
32	33	0,0013	0,0213	0,2214
32	18	0,0011	0,0133	0,2138
34	33	0,0008	0,0128	0,1342
33	14	0,0008	0,0129	0,1382
34	35	0,0002	0,0026	0,0434
34	37	0,0008	0,0112	0,1476
35	36	0,0006	0,0092	0,1130
35	11	0,0007	0,0082	0,1389
36	37	0,0004	0,0046	0,0780
37	38	0,0023	0,0363	0,3804
38	10	0,0010	0,0250	1,2000
39	11	0,0004	0,0043	0,0729
39	13	0,0004	0,0043	0,0729
13	14	0,0009	0,0101	0,1723
14	15	0,0018	0,0217	0,3660
15	16	0,0009	0,0094	0,1710
16	17	0,0007	0,0089	0,1342
16	19	0,0016	0,0195	0,3040
16	21	0,0008	0,0135	0,2548
16	24	0,0003	0,0059	0,0680
17	18	0,0007	0,0082	0,1319
17	27	0,0013	0,0173	0,3216
21	22	0,0008	0,0140	0,2565
22	23	0,0006	0,0096	0,1846
23	24	0,0022	0,0350	0,3610
25	26	0,0032	0,0323	0,5130
26	27	0,0014	0,0147	0,2396
26	28	0,0043	0,0474	0,7802
26	29	0,0057	0,0625	1,0290
28	29	0,0014	0,0151	0,2490
12	11	0,0016	0,0435	0,0000
12	13	0,0016	0,0435	0,0000
35	2	0,0000	0,0250	0,0000
39	3	0,0000	0,0200	0,0000
19	4	0,0007	0,0142	0,0000
20	5	0,0009	0,0180	0,0000
22	6	0,0000	0,0143	0,0000
23	7	0,0005	0,0272	0,0000
25	8	0,0006	0,0232	0,0000
31	1	0,0000	0,0181	0,0000
29	9	0,0008	0,0156	0,0000
19	20	0,0007	0,0138	0,0000

Fonte: Adaptado de Araujo e Zaneta (2001).

Tabela 22 - Dados de geração e carregamento do sistema *New England*.

Barra	V (pu)	Fase (°)	P_g (MW)	Q_g (MVar)	P_c (MW)	Q_c (MVar)
1	1,000	-3,420	250,00	85,09	0,00	0,00
2	1,000	0,000	552,63	231,78	9,00	5,00
3	1,000	2,294	650,00	234,14	0,00	0,00
4	1,000	4,469	632,00	140,84	0,00	0,00
5	1,000	3,573	508,00	132,59	0,00	0,00
6	1,000	6,465	650,00	193,35	0,00	0,00
7	1,000	9,649	560,00	132,32	0,00	0,00
8	1,000	2,654	540,00	35,96	0,00	0,00
9	1,000	8,611	830,00	65,88	0,00	0,00
10	1,000	-10,637	1000,00	193,59	1104,00	250,00
11	0,958	-6,401	0,00	0,00	0,00	0,00
12	0,937	-6,390	0,00	0,00	8,00	88,00
13	0,958	-6,247	0,00	0,00	0,00	0,00
14	0,951	-8,065	0,00	0,00	0,00	0,00
15	0,947	-8,365	0,00	0,00	320,00	153,00
16	0,962	-6,674	0,00	0,00	329,00	32,00
17	0,965	-7,898	0,00	0,00	0,00	0,00
18	0,964	-8,906	0,00	0,00	158,00	30,00
19	0,980	-0,729	0,00	0,00	0,00	0,00
20	0,976	-1,734	0,00	0,00	628,00	103,00
21	0,959	-4,016	0,00	0,00	274,00	115,00
22	0,977	1,005	0,00	0,00	0,00	0,00
23	0,973	0,683	0,00	0,00	275,00	85,00
24	0,967	-6,583	0,00	0,00	309,00	-92,00
25	0,996	-4,557	0,00	0,00	224,00	48,00
26	0,987	-5,885	0,00	0,00	139,00	17,00
27	0,971	-8,122	0,00	0,00	281,00	76,00
28	0,989	-1,947	0,00	0,00	206,00	28,00
29	0,991	1,138	0,00	0,00	284,00	27,00
30	1,003	-8,858	0,00	0,00	0,00	0,00
31	0,986	-6,052	0,00	0,00	0,00	0,00
32	0,966	-9,254	0,00	0,00	322,00	2,00
33	0,944	-10,229	0,00	0,00	500,00	184,00
34	0,950	-8,966	0,00	0,00	0,00	0,00
35	0,953	-8,198	0,00	0,00	0,00	0,00
36	0,943	-10,641	0,00	0,00	233,00	84,00
37	0,942	-11,199	0,00	0,00	522,00	176,00
38	0,988	-10,911	0,00	0,00	0,00	0,00
39	0,962	-5,473	0,00	0,00	0,00	0,00

Fonte: Adaptado de Araujo e Zaneta (2001).

APÊNDICE A - ARTIGOS PUBLICADOS

1. GAMINO, B. R.; ARAUJO, P. B. Application of a Basic Variable Neighborhood Search algorithm in the coordinated tuning of PSS and POD controllers. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, Heidelberg, v. 28, n. 4, p. 470–481, 2017.

2. MIOTTO, E. L.; ARAUJO, P. B.; FORTES, E. V.; GAMINO, B. R.; MARTINS, L. F. B. Coordinated tuning of the parameters of PSS and POD controllers using bioinspired algorithms. *IEEE Transactions on Industry Applications*, Piscataway, v. 54, n. 4, p. 3845–3857, 2018.

3. GAMINO, B. R.; ARAUJO, P. B.; MIOTTO, E. L.; MARTINS, L. F. B. Análise da estabilidade dinâmica em sistemas multimáquinas considerando a atuação dos controladores de amortecimento ESP e TCSC-POD ajustados pelo algoritmo Simulated Annealing. In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA – CBQEE, 12., 2017, Curitiba. *Anais...* Curitiba: [s.n.], 2017. p. 1–6.

4. GAMINO, B. R.; ARAUJO, P. B.; FORTES, E. V.; MARTINS, L. F. B.; MIOTTO, E. L. Coordinated tuning of PSS and TCSC-POD controller using an Elite Genetic Algorithm. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRY APPLICATIONS – INDUSCON, 12., 2016, Curitiba. *Proceedings...* Curitiba: IEEE, 2016. p. 1–8.

5. GAMINO, B. R.; FORTES, E. V.; ARAUJO, P. B.; MIOTTO, E. L.; MARTINS, L. F. B. Ajuste dos parâmetros dos controladores ESP e conjunto TCSC-POD utilizando o algoritmo Particle Swarm Optimization. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA – CBA, 21., 2016, Vitória. *Anais...* Vitória: [s.n.], 2016. p. 2031–2036.

6. GAMINO, B. R.; ARAUJO, P. B.; FORTES, E. V.; MARTINS, L. F. B. Meta-heurísticas bio-inspiradas aplicadas ao problema de fluxo de potência ótimo reativo. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL – SBPO, 48., 2016, Vitória. *Anais...* Vitória: [s.n.], 2016. p. 923–934.

7. MARTINS, L. F. B.; GAMINO, B. R.; ARAUJO, P. B.; FORTES, E. V.; MIOTTO, E. L. Comparison between Artificial Bee Colony and Particle Swarm Optimization algorithms in the tuning of PSS and UPFC-POD controllers. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRY APPLICATIONS – INDUSCON, 12., 2016, Curitiba. *Proceedings...* Curitiba: IEEE, 2016. p. 1–8.

8. MIOTTO, E. L.; GAMINO, B. R.; FORTES, E. V.; ARAUJO, P. B.; MARTINS, L. F. B. Análise estática e dinâmica da influência do generalized unified power flow controller no sistema elétrico de potência. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA – CBA, 21., 2016, Vitória. *Anais...* Vitória: [s.n.], 2016. p. 1928–1934.
9. MIOTTO, E. L.; ARAUJO, P. B.; GAMINO, B. R.; FORTES, E. V.; MARTINS, L. F. B. Coordinated tuning of the parameters of supplementary controllers damping using bio-inspired algorithms. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRY APPLICATIONS – INDUSCON, 12., 2016, Curitiba. *Proceedings...* Curitiba: IEEE, 2016. p. 1–8.
10. MARTINS, L. F. B.; FORTES, E. V.; ARAUJO, P. B.; GAMINO, B. R. Atuação do FACTS SSSC modelado por injeções de corrente no sistema elétrico de potência. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS ELÉTRICOS – SBSE. 6., 2016, Natal. *Anais...* Natal: [s.n.], 2016. p. 1–6.
11. FORTES, E. V.; ARAUJO, P. B.; MACEDO, L. H.; GAMINO, B. R.; MIOTTO, E. L. Ajuste coordenado dos parâmetros dos controladores estabilizadores de sistema de potência via Algoritmo Genético de Chu-Beasley especializado. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL – SBPO, 48., 2016, Vitória. *Anais...* Vitória: [s.n.], 2016. p. 798–809.
12. FORTES, E. V.; ARAUJO, P. B.; MACEDO, L. H.; GAMINO, B. R.; MARTINS, L. F. B. Ajuste coordenado dos parâmetros dos controladores ESP e IPFC-POD usando um algoritmo Multi-Start. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA – CBA, 21., 2016, Vitória. *Anais...* Vitória: [s.n.], 2016. p. 677–682.
13. FORTES, E. V.; ARAUJO, P. B.; MACEDO, L. H.; GAMINO, B. R.; MARTINS, L. F. B. Analysis of the influence of PSS and IPFC-POD controllers in small-signal stability using a Simulated Annealing algorithm. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRY APPLICATIONS – INDUSCON, 12., 2016, Curitiba. *Proceedings...* Curitiba: IEEE, 2016. p. 1–8.
14. MARTINS, L. F. B.; ARAUJO, P. B.; FORTES, E. V.; GAMINO, B. R.; MIOTTO, E. L. Projeto de ajuste coordenado dos parâmetros dos controladores ESP e PI-UPFC inspirado em um algoritmo Colônia de Abelhas Artificiais. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE AUTOMAÇÃO INTELIGENTE – SBAI, 13., 2017, Porto Alegre. *Anais...* Porto Alegre: [s.n.], 2017. p. 757–764.

-
15. MARTINS, L. F. B.; ARAUJO, P. B.; FORTES, E. V.; MIOTTO, E. L.; GAMINO, B. R. Design of the PSSs, PI-UPFC and PI-UPFC-POD controllers using the Firefly Algorithm. In: LATIN-AMERICAN CONGRESS ON ELECTRICITY GENERATION AND TRANSMISSION – CLAGTEE, 12., 2017, Mar del Plata. *Proceedings...* Mar del Plata: [s.n.], 2017. p. 1–7.
 16. MIOTTO, E. L.; ARAUJO, P. B.; FORTES, E. V.; MARTINS, L. F. B.; GAMINO, B. R. Coordinated tuning of the parameters of PSS and POD controllers using the Bat Algorithm. In: LATIN-AMERICAN CONGRESS ON ELECTRICITY GENERATION AND TRANSMISSION – CLAGTEE, 12., 2017, Mar del Plata. *Proceedings...* Mar del Plata: [s.n.], 2017. p. 1–10.

**APÊNDICE B - LINEARIZAÇÃO DO FLUXO DE POTÊNCIA ATIVA ENTRE
AS BARRAS k E m**

Ao introduzir o TCSC em uma linha de transmissão, a impedância desta linha passa a ser:

$$\bar{Z}'_{km} = r_{km} + jx_{km_{ef}} \quad (163)$$

Sendo:

$$x_{km_{ef}} = x_{km} - x_{tcsc} \quad (164)$$

O fluxo de potência ativa na linha de transmissão entre as barras k e m considerando a instalação de um dispositivo TCSC é dada por:

$$P_{km} = \frac{V_k r_{km}}{|\bar{Z}'_{km}|^2} (V_k - V_m \cos \theta_{km}) + \frac{V_k V_m x_{km_{ef}}}{|\bar{Z}'_{km}|^2} \text{sen } \theta_{km} \quad (165)$$

Linearizando:

$$\Delta P_{km} = A1_{km} \Delta \theta_k + A2_{km} \Delta \theta_m + A3_{km} \Delta V_k + A4_{km} \Delta V_m + A5_{km} \Delta x_{tcsc} \quad (166a)$$

$$A1_{km} = \frac{\partial P_{km}}{\partial \theta_k} = \frac{V_k V_m}{|\bar{Z}'_{km}|^2} \left(r_{km} \text{sen } \theta_{km} + x_{km_{ef}} \cos \theta_{km} \right) \quad (166b)$$

$$A2_{km} = \frac{\partial P_{km}}{\partial \theta_m} = -\frac{V_k V_m}{|\bar{Z}'_{km}|^2} \left(r_{km} \text{sen } \theta_{km} + x_{km_{ef}} \cos \theta_{km} \right) \quad (166c)$$

$$A3_{km} = \frac{\partial P_{km}}{\partial V_k} = \frac{2}{|\bar{Z}'_{km}|^2} V_k r_{km} - \frac{V_m}{|\bar{Z}'_{km}|^2} \left(r_{km} \cos \theta_{km} - x_{km_{ef}} \text{sen } \theta_{km} \right) \quad (166d)$$

$$A4_{km} = \frac{\partial P_{km}}{\partial V_m} = -\frac{V_k}{|\bar{Z}'_{km}|^2} \left(r_{km} \cos \theta_{km} - x_{km_{ef}} \text{sen } \theta_{km} \right) \quad (166e)$$

$$A5_{km} = \frac{\partial P_{km}}{\partial x_{tcsc}} = \frac{2r_{km}x_{km_{ef}}}{|\bar{Z}'_{km}|^4} (V_k V_m \cos \theta_{km} - V_k^2) + \frac{V_k V_m \text{sen } \theta_{km}}{|\bar{Z}'_{km}|^4} (r_{km}^2 - x_{km_{ef}}^2) \quad (166f)$$