



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA

CARLOS EDUARDO PUPIN

**ESTABILIDADE DE SISTEMAS DE POTÊNCIA COM
DISPOSITIVOS FACTS SSSC E STATCOM ADAPTADOS AO FLUXO
DE POTÊNCIA, COM CONTROLADORES ESP E POD AJUSTADOS
PELA TÉCNICA *PARTICLE SWARM OPTIMIZATION***

Ilha Solteira
2018

CARLOS EDUARDO PUPIN

**ESTABILIDADE DE SISTEMAS DE POTÊNCIA COM
DISPOSITIVOS FACTS SSSC E STATCOM ADAPTADOS AO FLUXO
DE POTÊNCIA, COM CONTROLADORES ESP E POD AJUSTADOS
PELA TÉCNICA *PARTICLE SWARM OPTIMIZATION***

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia do Câmpus de Ilha Solteira - UNESP como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.
Área do Conhecimento: Automação.

Prof. Dr. Percival Bueno de Araujo
Orientador

Ilha Solteira
2018

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

P984e Pupin, Carlos Eduardo.
Estabilidade de sistemas de potência com dispositivos Facts Sssc e statcom adaptados ao fluxo de potência, com controladores esp e pod ajustados pela técnica particle swarm optimization / Carlos Eduardo Pupin. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2018
141 f. : il.

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

Orientador: Percival Bueno De Araujo
Inclui bibliografia

1. Estabilidade a pequenas perturbações. 2. Oscilações eletromecânicas.
3. Modelo de sensibilidade de potência. 4. Facts. 5. Sssc. 6. Fluxo de potência.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: Estabilidade de Sistemas de Potência com Dispositivos FACTS SSSC e STATCOM Adaptados ao Fluxo de Potência, com Controladores ESP e POD Ajustados pela Técnica Swarm

AUTOR: CARLOS EDUARDO PUPIN

ORIENTADOR: PERCIVAL BUENO DE ARAUJO

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



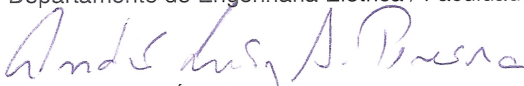
Prof. Dr. PERCIVAL BUENO DE ARAUJO
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira



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



Prof. Dr. SERGIO KUROKAWA
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira



Prof. Dr. ANDRÉ LUIZ SILVA PEREIRA
Departamento de Áreas Acadêmicas / Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás



Prof. Dr. CARLOS ROBERTO MENDONÇA DA ROCHA
Centro de Engenharias e Ciências Exatas / Universidade Estadual do Oeste do Paraná - UNIOESTE

Ilha Solteira, 30 de novembro de 2018

À minha mãe Silvia, a minha irmã Silvelise, a minha amada esposa Daniela, e meus filhos
Guilherme e Lavínia, pelo incentivo, amor e apoio, para concluir este trabalho.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer aos meus familiares, amigos, professores e funcionários da FEIS-UNESP, que contribuíram para a elaboração deste trabalho. Em especial agradeço à:

- Ao meu orientador, professor Percival Bueno de Araujo por compartilhar comigo seus conhecimentos e excelente orientação ao longo dos anos de graduação, mestrado e doutorado, que me são uteis profissionalmente, mas principalmente, me servem de inspiração pessoal;
- Aos meus amigos de departamento, Elenilson, Maxwell, Furini, André, Ednei, dentre outros;
- Aos meus alunos, em especial aos orientados de TCC Darlei, Matheus, José Vitor, Cristiano, Douglas, Adriano, Felipe, Édipo e Gustavo, que me desafiaram a estudar novas áreas do conhecimento de engenharia elétrica, e que dividiram comigo o que aprenderam;
- À minha família, que sempre me apoiou e aconselhou em manter os estudos. Em memória de minha avó Maria do Carmo, e meu avô Sylvio pelos ensinamentos e grande carinho;
- À Silvelise, minha irmã, pelo apoio e incentivo, nessa parceria de vida;
- A minha mãe Silvia, por tudo que já fez por mim, por permitir que eu me torne quem hoje sou;
- Ao meu pai, Carlos Sérgio, em sua memória, ainda viva.
- A minha esposa Daniela, a quem amo demais, que me despertou o desejo de viver, e me deu um motivo pra continuar a estudar.
- Aos meus filhos, Guilherme e Lavínia, por serem o meu maior orgulho, razão para todos meus atos.
- A UNESP pela excelente qualidade no ensino oferecido, em especial ao Departamento de Engenharia Elétrica, e à CAPES pelo apoio financeiro.

RESUMO

Neste trabalho é desenvolvido o modelo matemático de sistemas elétricos de potência multimáquinas para avaliar a estabilidade a pequenas perturbações, com a atuação simultânea de diferentes dispositivos FACTS controlando o fluxo de potência. Os FACTS do tipo SSSC e STATCOM são modelados, considerando suas perdas internas, o modelo resultante é acrescentado à resolução do fluxo de potência, considerando que cada dispositivo FACTS controla uma grandeza do sistema. Utilizando da solução do fluxo, das matrizes Y_{BARRA} e Jacobiana, e também tensões e potências, estes são empregados ao Modelo de Sensibilidade de Potência, por meio de simulações, é verificada a atuação dos elementos de controle na estabilidade a pequenas perturbações de sistemas multimáquinas. Para acréscimo de amortecimento às oscilações eletromecânicas, são aplicados controladores ESP e POD. A partir da representação de espaço de estados do modelo final, os autovalores resultantes são estudados para avaliar a estabilidade do sistema. Ao final é discutida a atuação individual e conjunta dos dispositivos FACTS na estabilidade, quando aplicados ao controle do fluxo de potência.

Palavras-chave: Estabilidade a pequenas perturbações. Oscilações eletromecânicas. Modelo de sensibilidade de potência. FACTS. SSSC. STATCOM. Fluxo de potência.

ABSTRACT

In this work the mathematical model of multi-machine power electric systems is developed to evaluate the stability to small perturbations, with the simultaneous actuation of different FACTS devices controlling the power flow. The FACTS of type SSSC and STATCOM are modeled, considering their internal losses, the resulting model is added to the resolution of the power flow, considering that each FACTS device controls a quantity of the system. By the solution of the power flux, the Y_{BUS} and Jacobian matrices, as well as voltages and powers, these are used to the Power Sensitivity Model, by means of simulations, it is verified the performance of the control elements in the stability to small perturbation of multi-machine systems. For addition of damping to electromechanical oscillations, ESP and POD controllers are applied. From the state space representation of the final model, the resulting eigenvalues are studied to evaluate the stability of the system. At the end, the individual and combined performance of the FACTS devices in the stability, when applied to the control of the power flow, is discussed.

Keywords: Small signal stability. Electromechanical oscillations. Power sensitivity model. FACTS. SSSC. STATCOM. Power flow.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Diagrama unifilar representativo do STATCOM.	29
Figura 2	Operação do SSSC para diferentes defasagens angulares de \tilde{V}_{SC}	30
Figura 3	Representação do dispositivo FACTS SSSC.	30
Figura 4	Circuito equivalente do SSSC instalado na LT i - j	31
Figura 5	Diagrama unifilar de uma LT em formato π	36
Figura 6	Algoritmo representativo do método de Newton-Raphson.	39
Figura 7	Balço de potência na barra com STATCOM.	40
Figura 8	Dinâmica do STATCOM com controlador PI.	42
Figura 9	Sinal do controlador PI alimentando a malha de controle do STATCOM.	42
Figura 10	Balço de potência na barra com o SSSC.	45
Figura 11	Diagrama de blocos do controle de potência ativa a partir do controlador PI.	47
Figura 12	Diagrama de blocos do controle de potência reativa a partir do controlador PI.	51
Figura 13	Sinal do controlador PI alimentando a malha de controle do SSSC.	52
Figura 14	Diagrama unifilar do SEP com as potências geradas e transmitidas.	54
Figura 15	Controlador do sistema de excitação do gerador síncrono.	59
Figura 16	Diagrama de blocos do ESP convencional, aplicado a excitação do gerador k	64
Figura 17	Diagrama de blocos do POD e da malha de controle do FACTS.	65
Figura 18	Desmembramento do diagrama de blocos do POD.	66
Figura 19	Diagrama de blocos representativo da função de transferência do SEP, com realimentação por controlador ESP ou POD.	69
Figura 20	Região desejada para os autovalores no plano complexo.	75

Figura 21	Diagrama unifilar do SEP Stagg com fluxos de potência em seu caso base.	79
Figura 22	Diagrama unifilar do SEP com as potências geradas e transmitidas no caso -8%.	82
Figura 23	Diagrama unifilar do SEP com as potências geradas e transmitidas no caso +8%.	83
Figura 24	Autovalores correspondentes ao modo oscilante no sistema Stagg com STATCOM.	83
Figura 25	Curvas dinâmicas de velocidade e ângulo para o SEP Stagg com STATCOM controlando V_5	84
Figura 26	Autovalores do modo oscilante no sistema Stagg com SSSC controlando a tensão V_5	87
Figura 27	Curvas dinâmicas de velocidade e ângulo para o SEP Stagg com SSSC controlando V_5	87
Figura 28	Diagrama unifilar do SEP com as potências geradas e transmitidas para $P_{50\%} = 0,273pu$	90
Figura 29	Diagrama unifilar do SEP com as potências geradas e transmitidas para $P_{150\%} = 0,820pu$	90
Figura 30	Autovalores do modo oscilante no sistema Stagg com SSSC controlando o fluxo ativo P_{25}	91
Figura 31	Curvas dinâmicas de velocidade e ângulo para o SEP Stagg com SSSC controlando P_{25}	91
Figura 32	Diagrama unifilar do SEP com as potências geradas e transmitidas para $Q_{50\%} = 0,273pu$	94
Figura 33	Diagrama unifilar do SEP com as potências geradas e transmitidas para $Q_{150\%} = 0,820pu$	94
Figura 34	Autovalores do modo oscilante no sistema Stagg com SSSC controlando o fluxo ativo Q_{25}	95
Figura 35	Curvas dinâmicas de velocidade e ângulo para o SEP Stagg com SSSC controlando Q_{25}	95

Figura 36	Diagrama unifilar do SEP simétrico.	96
Figura 37	Fatores de participação de $\Delta\omega$ nos modos oscilantes do SEP simétrico.	103
Figura 38	Dinâmica dos geradores para sistema simétrico com atuação dos controladores ESP e STATCOM-V6.	105
Figura 39	Dinâmica dos geradores para sistema simétrico com atuação dos controladores ESP e STATCOM-V9.	106
Figura 40	Dinâmica dos geradores para sistema simétrico com atuação dos controladores ESP e SSSC-Q67.	107
Figura 41	Dinâmica dos geradores para sistema simétrico com atuação dos controladores ESP e SSSC-Q78.	108
Figura 42	Dinâmica dos geradores para sistema simétrico com atuação dos controladores ESP e SSSC-Q98.	108
Figura 43	Dinâmica dos geradores para sistema simétrico com atuação dos controladores ESP e SSSC-P67.	110
Figura 44	Dinâmica dos geradores para sistema simétrico com atuação dos controladores ESP e SSSC-P78.	110
Figura 45	Dinâmica dos geradores para sistema simétrico com atuação dos controladores ESP e SSSC-P98.	111
Figura 46	Dinâmica dos geradores para sistema simétrico com atuação dos controladores ESP e STATCOM-V6.	113
Figura 47	Dinâmica dos geradores para sistema simétrico com atuação dos controladores ESP e SSSC-P78.	114
Figura 48	Dinâmica dos geradores para sistema simétrico com atuação dos controladores ESP e SSSC-Q78.	114
Figura 49	Fatores de participação de $\Delta\omega$ no sistema New York.	116
Figura 50	Diagrama unifilar do SEP New York reduzido.	118
Figura 51	Dinâmica dos geradores para sistema New York com atuação dos controladores ESP e SSSC/POD ajustado por resíduos.	123
Figura 52	Dinâmica dos geradores para sistema New York com atuação dos controladores ESP e SSSC/POD ajustado por PSOHC.	124

Figura 53	Variações do ângulo interno dos geradores do sistema New York, com atuação dos controladores ESP e SSSC/POD ajustado por PSOHC. . .	126
Figura 54	Variações de velocidade angular dos geradores do sistema New York, com atuação dos controladores ESP e SSSC/POD ajustado por PSOHC.	126
Figura 55	Diagrama unifilar do SEP Stagg.	136
Figura 56	Diagrama unifilar do SEP simétrico.	137
Figura 57	Diagrama unifilar do SEP New York.	139

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Resultado do fluxo de potência do sistema Stagg em (pu) no caso base.	78
Tabela 2	Resultado das tensões do sistema Stagg em (pu) no caso base.	79
Tabela 3	Autovalores do sistema Stagg no caso base.	79
Tabela 4	Modos oscilatórios, frequências e coeficientes de amortecimento do SEP Stagg no caso base.	80
Tabela 5	Fluxos de potência ativa do SEP Stagg para controle de tensão da barra 5 com STATCOM.	80
Tabela 6	Fluxos de potência reativa do SEP Stagg para controle de tensão da barra 5 com STATCOM.	81
Tabela 7	Fasores tensões do SEP Stagg para controle de tensão da barra 5 em (pu) com STATCOM.	81
Tabela 8	Parâmetros do STATCOM obtidos na solução do fluxo de potência. . .	81
Tabela 9	Autovalores do SEP Stagg, com STATCOM sem atuação de controladores suplementares.	81
Tabela 10	Modos oscilatórios, frequências e coeficientes de amortecimento do SEP Stagg, com atuação do STATCOM sem controlador suplementar.	82
Tabela 11	Fluxos de potência ativa do SEP Stagg para controle de tensão da barra 5 com SSSC.	85
Tabela 12	Fluxos de potência reativa do SEP Stagg para controle de tensão da barra 5 com SSSC.	85
Tabela 13	Fasores tensões do SEP Stagg para controle de tensão da barra 5 em (pu) com SSSC.	85
Tabela 14	Parâmetros do SSSC obtidos na solução do fluxo de potência para controle de tensão V_5	85
Tabela 15	Autovalores do SEP Stagg, com SSSC sem atuação de controladores suplementares.	86

Tabela 16	Modos oscilatórios, frequências e coeficientes de amortecimento do SEP Stagg, com atuação do SSSC sem controlador suplementar. . . .	86
Tabela 17	Fluxos de potência ativa do SEP Stagg para controle de fluxo ativo LT_{25} com SSSC.	88
Tabela 18	Fluxos de potência reativa do SEP Stagg para controle de fluxo ativo LT_{25} com SSSC.	88
Tabela 19	Fasores tensões do SEP Stagg para controle de fluxo ativo LT_{25} com SSSC.	88
Tabela 20	Parâmetros do SSSC obtidos na solução do fluxo de potência controlando o fluxo ativo LT_{25}	89
Tabela 21	Autovalores do SEP Stagg, com SSSC sem atuação de controladores suplementares.	89
Tabela 22	Modos oscilatórios, frequências e coeficientes de amortecimento do SEP Stagg, com atuação do SSSC sem controlador suplementar. . . .	89
Tabela 23	Fluxos de potência ativa do SEP Stagg para controle de fluxo reativo LT_{25} com SSSC.	92
Tabela 24	Fluxos de potência reativa do SEP Stagg para controle de fluxo reativo LT_{25} com SSSC.	92
Tabela 25	Fasores tensões do SEP Stagg para controle de fluxo reativo LT_{25} com SSSC.	93
Tabela 26	Parâmetros do SSSC obtidos na solução do fluxo de potência controlando fluxo reativo LT_{25}	93
Tabela 27	Autovalores do SEP Stagg, com SSSC sem atuação de controladores suplementares.	93
Tabela 28	Modos oscilatórios, frequências e coeficientes de amortecimento do SEP Stagg, com atuação do SSSC sem controlador suplementar. . . .	93
Tabela 29	Fasores tensões resultantes no sistema simétrico em (pu) no caso base.	97
Tabela 30	Resultado do fluxo de potência do sistema simétrico em (pu) no caso base.	97

Tabela 31	Modos oscilatórios, frequências e coeficientes de amortecimento do SEP simétrico, no caso base.	97
Tabela 32	Resultados do fluxo de potência e da análise de estabilidade do SEP simétrico com a atuação do STATCOM controlando a tensão de diferentes barras.	99
Tabela 33	Resultados do fluxo de potência e da análise de estabilidade do SEP simétrico com a atuação do SSSC controlando a tensão da barra inicial da LT.	100
Tabela 34	Resultados do fluxo de potência e da análise de estabilidade do SEP simétrico com a atuação do SSSC controlando o fluxo de potência ativa da LT.	101
Tabela 35	Resultados do fluxo de potência e da análise de estabilidade do SEP simétrico com a atuação do SSSC controlando o fluxo de potência reativa da LT.	102
Tabela 36	Parâmetros de ajuste dos controladores ESP e POD obtido a partir dos resíduos.	104
Tabela 37	Modos oscilatórios, frequências e coeficientes de amortecimento do SEP simétrico, com atuação do STATCOM/POD, ESP2 e ESP3.	105
Tabela 38	Parâmetros de ajuste dos controladores ESP e POD obtido a partir dos resíduos.	106
Tabela 39	Modos oscilatórios, frequências e coeficientes de amortecimento do SEP simétrico, com atuação do SSSC-Q/POD, ESP2 e ESP3.	107
Tabela 40	Parâmetros de ajuste dos controladores ESP e POD obtido a partir dos resíduos.	109
Tabela 41	Modos oscilatórios, frequências e coeficientes de amortecimento do SEP simétrico, com atuação do SSSC-P/POD, ESP2 e ESP3.	109
Tabela 42	Parâmetros especificados para o PSOHC, aplicado ao SEP simétrico.	112
Tabela 43	Parâmetros de ajuste dos controladores ESP e POD obtido a partir dos resíduos.	112

Tabela 44	Modos oscilatórios, frequências e coeficientes de amortecimento do SEP simétrico, com atuação do SSSC/POD, STATCOM/POD, ESP2 e ESP3.	113
Tabela 45	Modos oscilatórios, frequências e coeficientes de amortecimento do SEP New York na condição original.	115
Tabela 46	Parâmetros de ajuste dos controladores ESP obtido a partir dos resíduos, para atuação nos modos locais do SEP New York.	116
Tabela 47	Modos oscilatórios, frequências e coeficientes de amortecimento do SEP simétrico, com atuação dos controladores ESP.	117
Tabela 48	Resíduos associados ao modos oscilatórios interárea do SEP New York na condição original.	119
Tabela 50	Parâmetros de ajuste dos controladores ESP e POD obtido a partir dos resíduos, para amortecimento do SEP New York.	120
Tabela 49	Parâmetros do POD, autovalores e amortecimento dos interárea, para o SEP New York.	121
Tabela 51	Modos oscilatórios, frequências e coeficientes de amortecimento do SEP New York com SSSC/POD e ESP ajustados por resíduos.	122
Tabela 52	Parâmetros especificados para o PSOHC, aplicado ao SEP New York.	122
Tabela 53	Parâmetros de ajuste dos controladores ESP e POD obtido a partir do PSOHC, para amortecimento do SEP New York.	123
Tabela 54	Modos oscilatórios, frequências e coeficientes de amortecimento do SEP New York com SSSC/POD e ESP ajustados pela técnica PSOHC.	124
Tabela 55	Parâmetros especificados para o PSOHC, aplicado ao SEP New York.	125
Tabela 56	Parâmetros de ajuste dos controladores ESP e POD obtido a partir do PSOHC, para amortecimento do SEP New York.	125
Tabela 57	Modos oscilatórios, frequências e coeficientes de amortecimento do SEP New York com SSSC/POD e ESP ajustados pela técnica PSOHC.	127
Tabela 58	Dados das barras do SEP Stagg no caso original.	136
Tabela 59	Dados das linhas de transmissão do SEP Stagg.	136

Tabela 60	Dados dos geradores e dos reguladores automáticos de tensão do SEP Stagg.	136
Tabela 61	Dados das barras do SEP Stagg no caso original.	137
Tabela 62	Dados das linhas de transmissão do SEP simétrico.	138
Tabela 63	Dados dos geradores e dos reguladores automáticos de tensão do SEP simétrico.	138
Tabela 64	Dados das barras do SEP New York no caso original.	139
Tabela 65	Dados das linhas de transmissão do SEP New York.	141
Tabela 66	Dados dos geradores e dos reguladores automáticos de tensão do SEP New York.	142

LISTA DE ABREVIACOES E SIGLAS

AC	Corrente alternada
CC	Corrente contínua
ESP	Estabilizador de sistema de potência (PSS - <i>Power System Stabilizer</i>)
FACTS	<i>Flexible Alternating Current Transmission Systems</i>
GTO	<i>Gate Turn-Off Thyristor</i>
GUPFC	<i>Generalized Unified Power Flow Controller</i>
IPFC	<i>Interline Power Flow Controller</i>
LT	Linha de transmissão
MSP	Modelo de sensibilidade de potência
PAC	Programa de acelerao do crescimento
POD	<i>Power Oscillation Damping</i>
PSO	<i>Particle Swarm Optimization</i>
PSOHC	<i>Particle Swarm Optimization with High Convergence</i>
PS	<i>Phase Shifter</i> (Transformador defasador)
RAT	Regulador automtico de tensão
REF	Referência angular adotada para o sistema elétrico
SEP	Sistema elétrico de potência
SSSC	<i>Static Synchronous Series Compensator</i>
STATCOM	<i>Static Synchronous Compensator</i>
SVC	<i>Static Var Compensator</i>
SVS	<i>Synchronous Voltage Source</i>
VSC	<i>Voltage Source Converter</i>
TCSC	<i>Thyristor Controlled Series Capacitor</i>
UPFC	<i>Unified Power Flow Controller</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

$A1_{Gk}, \dots, A4_{Gk}$	Coeficientes de sensibilidade da potência ativa do gerador k
$A1_{km}, \dots, A6_{km}$	Coeficientes de sensibilidade da potência ativa da LT $k-m$
$A1_{ij}, \dots, A6_{ij}$	Coef. de sensibilidade da potência ativa da LT $i-j$ com FACTS
b_{km}	Susceptância da linha de transmissão entre as barras k e m
D_{Gk}	Coeficiente de amortecimento inerente do gerador k
E_{ak}	Tensão de armadura do gerador k
E_{fdk}	Tensão no enrolamento de campo do gerador k
E'_{dk}	Tensão interna em eixo direto do gerador k
E'_{qk}	Tensão interna em quadratura do gerador k
g_{km}	Condutância da linha de transmissão entre as barras k e m
I_k	Corrente elétrica do gerador k
I_{ij}	Corrente elétrica que flui pela linha de transmissão $i-j$ com FACTS
\dot{x} ou $\dot{\square}$	Derivada primeira da variável x ($\dot{x} = \frac{dx}{dt}$)
$J1, J2, J3, Jac$	Matrizes dinâmicas do MSP
$B1, B2$	Matrizes de entrada do MSP
J_{PSS}	Matriz que relaciona os parâmetros do ESP com ângulos e tensões do sistema
K_{Ak}, K_{Vk}	Coeficientes da reação de armadura do gerador k no MSP
K_{rk}	Ganho do RAT
$M_{Gk} = 2H_{Gk}$	Constante de inércia do gerador k
P_{Gk}	Potência ativa gerada pelo gerador k
P_{km}	Fluxo de potência ativa entre as barras k e m
P_{Lk}	Carga ativa da barra k
P_{Meck}	Potencia mecânica de entrada do gerador k
Q_{Gk}	Potência reativa gerada pelo gerador k
Q_{km}	Fluxo de potência reativa entre as barras k e m
Q_{Lk}	Carga reativa da barra k
$R1_{Gk}, \dots, R4_{Gk}$	Coeficientes de potência reativa do gerador k
$R1_{km}, \dots, R6_{km}$	Coeficientes de potência reativa da linha de transmissão $k-m$
$R1_{ij}, \dots, R6_{ij}$	Coef. de sensibilidade da potência reativa da LT $i-j$ com FACTS
r_{km}	Resistência da linha de transmissão entre as barras k e m
S_{km}	Potência complexa que sai da barra k em direção a barra m
\tilde{S}_{ST}	Potência complexa que sai do STATCOM em direção à barra k - Potência inserida pelo STATCOM ao sistema

\tilde{S}_{SC}	Potência complexa injetada pelo SSSC a linha de transmissão k - m
s	Operador de Laplace
T'_{d0k}	Constante de tempo transitória de eixo direto do gerador k
T_{rk}	Constante de tempo do RAT
T_{SSSC}	Constante de tempo do SSSC
$T_{STATCOM}$	Constante de tempo do STATCOM
V_{dk}	Componente de eixo direto da tensão da barra k
V_{qk}	Componente de eixo quadratura da tensão da barra k
V_k	Magnitude da tensão da barra k
V_{refk}	Tensão de referência para o RAT
\tilde{V}_{SC}	Fasor tensão série inserida pelo SSSC
\tilde{V}_{ST}	Fasor tensão inserida pelo STATCOM
\tilde{x} ou $\tilde{\square}$	Fasor da variável x
x_C	Reatância indutiva do transformador de acoplamento do FACTS
x_{dk}	Reatância síncrona de eixo direto do gerador k
x'_{dk}	Reatância transitória de eixo direto do gerador k
x_{km}	Reatância da linha de transmissão entre as barras k e m
x_{qk}	Reatância síncrona de eixo em quadratura do gerador k
z_{km}	Impedância da linha de transmissão entre as barras k e m
x_T	Reatância total da linha de transmissão entre as barras k e m considerando a reatância indutiva do transformador de acoplamento do SSSC
α	Ângulo da tensão do STATCOM
β	Ângulo da tensão do SSSC
δ_k	Ângulo interno do gerador k
θ_k	Ângulo da tensão da barra k
θ_{km}	Diferença entre os ângulos das tensões da barra k e m ($\theta_{km} = \theta_k - \theta_m$)
Ω_k	Conjunto de barras vizinhas à barra k
ω_k	Velocidade Angular do gerador k
ω_0	Velocidade síncrona (377 rad/s)
λ	Autovalor da matriz de estados
ξ	Amortecimento relacionado a uma oscilação
φ	Ângulo da corrente em relação a referência do sistema elétrico
Δ	Representa pequenas variações em torno do ponto de equilíbrio
ε	Tolerância admitida para solução do fluxo de potência

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	22
1.1	OBJETIVO GERAL	24
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	24
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	25
2	MODELAGEM DOS FACTS	26
2.1	DISPOSITIVOS FACTS	26
2.2	<i>STATIC SYNCHRONOUS COMPENSATOR (STATCOM)</i>	27
2.2.1	Modelagem do STATCOM	28
2.3	<i>STATIC SYNCHRONOUS SERIES COMPENSATOR (SSSC)</i>	30
2.3.1	Modelagem do SSSC	31
3	FLUXO DE POTÊNCIA COM DISPOSITIVOS FACTS	35
3.1	FORMULAÇÃO BÁSICA DO FLUXO DE POTÊNCIA	35
3.2	FLUXO DE POTÊNCIA COM O FACTS STATCOM	39
3.2.1	Controle de tensão com o STATCOM	41
3.3	FLUXO DE POTÊNCIA COM O FACTS SSSC	44
3.3.1	Controle do fluxo de potência ativa com o SSSC	46
3.3.2	Controle do fluxo de potência reativa com o SSSC	51
3.3.3	Controle de tensão com o SSSC	52
4	MODELO DE SENSIBILIDADE DE POTÊNCIA MULTIMÁQUINAS	54
4.1	POTÊNCIA EM SISTEMAS MULTIMÁQUINAS	54
4.2	BALANÇO NODAL DE POTÊNCIA EM SISTEMAS MULTIMÁQUINAS	57
4.3	EQUAÇÕES DE BALANÇO DO GERADOR SÍNCRONO	57
4.4	TENSÃO INTERNA DO GERADOR SÍNCRONO	58

4.5	TENSÃO DE CAMPO DO GERADOR SÍNCRONO	59
4.6	REPRESENTAÇÃO DO SISTEMA MULTIMÁQUINAS PELO MSP	59
5	CONTROLADORES DE SISTEMAS DE POTÊNCIA E SEUS AJUSTES	63
5.1	ESTABILIZADOR DO SISTEMA DE POTÊNCIA - ESP	63
5.2	POWER OSCILLATION DAMPING - POD	65
5.3	FATORES DE PARTICIPAÇÃO	69
5.4	MÉTODO DOS RESÍDUOS	69
5.5	PARTICLE SWARM OPTIMIZATION - PSO	71
5.6	PSO WITH HIGH CONVERGENCE - PSOHC	75
6	SIMULAÇÕES E RESULTADOS	78
6.1	SISTEMA STAGG	78
6.1.1	Operação do STATCOM no Sistema Stagg	80
6.1.2	Operação do SSSC no Sistema Stagg	84
<i>6.1.2.1</i>	<i>Operação do SSSC controlando tensão</i>	<i>84</i>
<i>6.1.2.2</i>	<i>Operação do SSSC controlando fluxo potência ativa</i>	<i>88</i>
<i>6.1.2.3</i>	<i>Operação do SSSC controlando fluxo potência reativa</i>	<i>92</i>
6.2	SISTEMA SIMÉTRICO	96
6.2.1	Sistema simétrico com atuação do dispositivo STATCOM	98
6.2.2	Sistema simétrico com atuação do dispositivo SSSC	99
<i>6.2.2.1</i>	<i>Controle de tensão com SSSC</i>	<i>100</i>
<i>6.2.2.2</i>	<i>Controle de fluxo ativo com SSSC</i>	<i>101</i>
<i>6.2.2.3</i>	<i>Controle de fluxo reativo com SSSC</i>	<i>102</i>
6.2.3	Análise da estabilidade para o sistema simétrico	103
<i>6.2.3.1</i>	<i>ESP2, ESP3 e STATCOM no SEP simétrico</i>	<i>104</i>
<i>6.2.3.2</i>	<i>ESP2, ESP3 e SSSC-Q no SEP simétrico</i>	<i>106</i>

6.2.3.3	<i>ESP2, ESP3 e SSSC-P no SEP simétrico</i>	109
6.2.4	Sistema Simétrico com PSOHC	111
6.3	SISTEMA NEW YORK	115
6.3.1	Análise da estabilidade para o sistema New York	115
7	CONCLUSÕES	128
7.1	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	130
8	ARTIGOS SUBMETIDOS E PUBLICADOS	131
	REFERÊNCIAS	132
	APÊNDICE A - SISTEMA STAGG	136
	APÊNDICE B - SISTEMA SIMÉTRICO	137
	APÊNDICE C - SISTEMA NEW YORK	139

1 INTRODUÇÃO

O grande crescimento econômico e industrial de países chamados “em desenvolvimento” como Brasil, Índia, México, China entre outros, deve vir acompanhado de um proporcional crescimento na disponibilidade de energia elétrica. Diversos fatores dificultam a construção de grandes usinas geradoras e a expansão do sistema de transmissão, assim medidas alternativas devem ser tomadas para garantir o crescimento estruturado da nação, sejam paliativas ou definitivas.

No caso da China, cresce muito a aplicação da geração fotovoltaica, mas mantendo os investimentos na geração hidráulica. Já no Brasil a energia elétrica é predominantemente oriunda de fontes hidrelétricas, sendo que os grandes rios já foram em quase toda sua disponibilidade explorada, e as construções de novas unidades esbarram em problemas financeiros e socioambientais, dificuldades semelhantes envolvem a construção de novas linhas de transmissão (LT).

Algumas medidas estão sendo aplicadas para desafogar o atual sistema energético, mas somente com a elevada eficiência no sistema de geração, transmissão e consumo, associado ao uso racional, planejamento e prospecção de “novos” métodos de geração de energia elétrica, possibilitariam o crescimento industrial do país de forma substancial. A solução não está próxima, se é que ela existe, e o sistema elétrico de potência (SEP) continuará a operar próximo a seus limites térmicos e de estabilidade.

O Brasil possui um SEP de satisfatória qualidade mas, devido à grande extensão territorial, as perdas em todo o sistema de transmissão são elevadas e qualquer recurso que aumente sua eficiência reduzirá significativamente as perdas, elevando a oferta de potência aos consumidores ou reduzindo a geração.

Dentre as técnicas que podem melhorar a eficácia do sistema elétrico de potência, cita-se o Smart Grid. Consiste na geração distribuída com uso de sensoriamento e medições inteligentes. Se a potência for gerada próxima às cargas, desafogará o sistema de transmissão (BAKKEN, 2014). Outra alternativa é a transmissão em corrente contínua (CC). Com os avanços da eletrônica de potência, é relativamente fácil converter, retificar e seccionar milhares de volts em CC. Os custos já justificam a construções de linhas e conversores CC para linhas extensas (maiores de 600 km). Outra vantagem da transmissão em CC é que não se tem o efeito reativo das linhas de transmissão, nem oscilações eletromecânicas entre os geradores interligados.

Uma alternativa, que é abordada neste trabalho, é a utilização de dispositivos *Flexible AC Transmission System* (FACTS) propostos por Hingorani (HINGORANI, 1988; HINGORANI;

GYUGYI, 2000). São dispositivos instalados no sistema de transmissão, que elevam a capacidade de transmissão das linhas a partir da compensação de reativos, e ainda agregam amortecimento as oscilações eletromecânicas de baixa frequência, se devidamente controlado.

A proposta de Hingorani é utilizar de dispositivos da eletrônica de potência para o controle do fluxo de potência em sistemas de corrente alternada, através da atuação de chaves eletrônicas (com pequeno tempo de atuação), proporcionando flexibilidade operativa ao SEP (WATANABE *et al.*, 1998; SONG; JOHNS, 1999; MATHUR; VARMA, 2002).

Através do controle dos fasores de tensão, corrente e potência, os dispositivos FACTS podem atuar na capacidade de transmissão da LT (HINGORANI; GYUGYI, 2000; SONG; JOHNS, 1999).

Além disso, os FACTS são reconhecidos como uma alternativa eficiente para prover amortecimento às oscilações eletromecânicas de baixa frequência, principalmente quando junto à malha de controle do FACTS é instalado o dispositivo POD (*Power Oscillation Damping*) para controlar a magnitude e fase do sinal de saída do FACTS (CAI; ERLICH, 2003; WANG; SWIFT; LI, 1998).

As oscilações eletromecânicas de baixa frequência são originadas das interações entre as oscilações rotacionais dos geradores que constituem o sistema elétrico de potência e operam em sincronismo, enquanto que as subfrequências oscilatórias (muito baixa, inferiores a 0,1Hz) são as típicas atuações dos reguladores de velocidade, durante a alteração do carregamento do SEP.

Qualquer gerador do SEP que sofra algum tipo de perturbação, passará a fornecer sua potência ao sistema com a presença de componentes oscilatórios, o que desenvolverá nas demais unidades geradoras oscilações semelhantes, devido às interligações elétricas e o sincronismo de todo o sistema.

As unidades geradoras afetadas sofrerão oscilações em suas reações de armadura, propagando essa perturbação ao rotor, e dependendo das condições operacionais, essas oscilações aumentam em amplitude, podendo até instabilizar parte do SEP. Diversos dispositivos são capazes de amortecer essas oscilações eletromecânicas, garantindo a segura operação do SEP, citando os Estabilizadores de Sistemas de Potência (ESP) (LARSEN; SWANN, 1981), ou dispositivos instalados externamente ao gerador, como os FACTS com controlador POD (KUNDUR, 1994).

O ESP é instalado no mesmo conjunto de manobra do sistema de excitação (regulador de tensão e de velocidade) da unidade geradora. Por atuar junto à unidade geradora, o ESP tem forte atuação nos modos locais de oscilação (frequências de 0,7 à 2,0 Hz) (ANDERSON; FOUAD, 2003; KUNDUR, 1994; KUNDUR *et al.*, 2004).

Neste trabalho o foco é analisar as oscilações eletromecânicas de baixa frequência após a instalação de dispositivos FACTS no sistema de potência. Dos modelos disponíveis, se optou

pelo Modelo de Sensibilidade de Potência (MSP) sugerido por Deckmann e Costa (1994), pois facilita a expansão do SEP com a inserção de novos dispositivos. Dos dispositivos FACTS, os abordados aqui são o STATCOM e o SSSC, de segunda geração, operam a partir da fonte VSC (*Voltage Source Converter*), permitindo manipular o módulo da tensão e fase (HINGORANI; GYUGYI, 2000; SONG; JOHNS, 1999; MATHUR; VARMA, 2002).

Todos estes dispositivos modificam a matriz Y_{BARRA} , e conseqüentemente a matriz Jacobiana, fundamental na solução do fluxo de potência (MONTICELLI, 1983). Como esses dispositivos realizam controles de grandezas do sistema de potência, alteram as características transitórias do SEP (VALLE, 2014).

Graças ao modelo desenvolvido, é possível avaliar a influência do controle no fluxo de potência devido a atuação destes dispositivos nos transitórios do SEP, quando da ocorrência de pequenas perturbações, pela análise dos autovalores e curvas oscilatórias no tempo.

Para atingir este objetivo os dispositivos STATCOM e SSSC são modelados, seus modelos acrescidos no fluxo de potência, sendo cada dispositivo responsável por controlar uma grandeza. O fluxo resultante será a condição inicial para avaliar, por representação de espaço de estados, as oscilações do SEP, destacando o amortecimento dos modos oscilantes.

Finalizando, é estudada a estabilidade com a inserção de sinais suplementares de amortecimento, a partir da aplicação de controladores POD e ESP, ajustados a partir do método dos resíduos e *Particle Swarm Optimization*.

1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo deste trabalho é desenvolver o modelo representativo dos FACTS SSSC e STATCOM, atuando no controle do fluxo de potência, e avaliar a influência do dispositivo, conforme o tipo de controle aplicado, na estabilidade a pequenas perturbações em sistemas elétricos multimáquinas.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Foram estabelecidos como objetivos específicos:

- Revisar a literatura relevante ao estudo;
- Modelar o dispositivo FACTS SSSC e STATCOM, considerando as perdas internas;
- Desenvolver um *script* que resolva o fluxo de potência com a atuação dos FACTS;
- Interpretar os resultados do fluxo de potência para diferentes formas de controle pelos FACTS;
- Usando da matriz Jacobiana resultante do fluxo, avaliar a estabilidade do SEP;

- Aplicar controladores suplementares para acréscimo do amortecimento das oscilações eletromecânicas de baixa frequência;
- Aplicar o método dos resíduos e a técnica PSO para ajuste dos controladores.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Para facilidade de leitura e compreensão dos estudos desenvolvidos, este trabalho é dividido em capítulos sendo que no Capítulo 2 os dispositivos FACTS STATCOM e SSSC são conceituados e modelados.

No Capítulo 3 é realizada breve apresentação da solução do fluxo de potência pelo método de Newton-Raphson. Durante o processo iterativo de Newton, são encontrados os fasores de tensão dos dispositivos STATCOM e SSSC, considerando a atuação simultânea destes “*nf*” dispositivos (*nf* - número de FACTS ativos).

Com o resultado do fluxo de potência, em especial a definição da matriz Jacobiana e Y_{BARRA} , o SEP é representado conforme o Modelo de Sensibilidade de Potência no Capítulo 4. Todo o equacionamento é aplicado a implementação de um *script* computacional desenvolvido em ambiente MATLAB.

Os controladores suplementares de amortecimento às oscilações eletromecânicas são apresentados no Capítulo 5, junto ao método dos resíduos e ao PSO e PSOHC, que consistem em técnicas meta-heurísticas que auxiliam no ajuste dos controladores.

O Capítulo 6 é dedicado à apresentação dos resultados obtidos das simulações computacionais em sistemas de potência multimáquinas, com todo o modelo desenvolvido simulado, e assim discutidos os resultados encontrados.

Dos resultados obtidos é realizado o estudo da estabilidade à pequenas perturbações. Esta análise é efetuada no domínio do tempo (através de curvas de respostas a distúrbios), e da frequência (através dos autovalores da matriz de estado).

Seguem as principais conclusões (Capítulo 7), as referências bibliográficas e anexos que complementam a teoria desenvolvida, e auxiliam a compreensão do trabalho.

2 MODELAGEM DOS FACTS

Neste Capítulo são apresentados os típicos dispositivos FACTS (*Flexible Alternating Current Transmission Systems*), aplicados em sistemas de energia elétrica. Na sequência, os dispositivos STATCOM (*Static Synchronous Compensator*), e SSSC (*Static Synchronous Series Compensator*), são modelados matematicamente. No próximo capítulo, o equacionamento destes dispositivos é incrementado na solução do fluxo de potência, e por último, os modelos são inseridos no MSP multimáquinas para avaliar o comportamento transitório de todo o sistema de potência.

2.1 DISPOSITIVOS FACTS

Os FACTS são oriundos dos avanços tecnológicos da eletrônica de potência, que possibilitaram o desenvolvimento de chaves estáticas de silício que permitem chavear tensões e correntes nos níveis de transmissão, recriando o sinal alternado controlado em magnitude, fase e frequência.

Inicialmente os dispositivos FACTS foram desenvolvidos com o objetivo de aumentar a capacidade de transmissão e controlar o fluxo de potência em uma rede, aumentando assim os limites operacionais e de estabilidade. Sua operação é baseada no chaveamento de associações de bancos de capacitores e/ou indutores, alterando a reatância indutiva equivalente da linha de transmissão que está instalado alterando a cota de potência transmitida (HINGORANI; GYUGYI, 2000; SONG; JOHNS, 1999; WATANABE *et al.*, 1998).

A ação complementar dos FACTS é a inserção de amortecimento às oscilações eletromecânicas, para isso deve ser acoplado um controlador com ajuste de ganho e fase, para que o sinal de saída atue especificamente nos modos oscilatórios, inserindo amortecimento as oscilações eletromecânicas, garantindo sua atenuação com o tempo (CAI; ERLICH, 2003; WANG; SWIFT; LI, 1998).

Os FACTS podem ser inseridos na linha de transmissão em série, derivação (*shunt*) e combinações destes. Dependendo da maneira como é instalado, a atuação será nos fluxos de potências ativa ou reativa.

Considerando os FACTS ligados em derivação (*shunt*) com a LT, os mais conhecidos são o *Static VAR Compensator* (SVC) e o *Static Synchronous Compensator* (STATCOM). A atuação do SVC consiste na injeção ou absorção de potência reativa à barra a qual está conectado. Bancos de capacitores e indutores são controlados pelo disparo de tiristores e geralmente são

usados para o controle da tensão desta barra. Por outro lado, o STATCOM não utiliza de banco de capacitores ou indutores para a troca de potência reativa com o sistema, mas sim de uma fonte de tensão CC que por meio de chaves GTO (*Gate Turn-Off*) faz a conversão em tensão AC com a mesma frequência fundamental da linha de transmissão (HINGORANI; GYUGYI, 2000; SONG; JOHNS, 1999; MATHUR; VARMA, 2002).

Os dispositivos FACTS série são utilizados com intuito de manipular a reatância série efetiva da LT, e assim controlar o fluxo de potência. O TCSC (*Thyristor Controlled Series Capacitor*) atua chaveando indutores por meio de tiristores, esses indutores são ligados em paralelo com bancos de capacitores. Já o SSSC (*Static Synchronous Series Compensator*) insere tensão série em sincronismo com a corrente da linha, a magnitude e ângulo desta tensão série influencia diretamente a reatância série efetiva da linha de transmissão (HINGORANI; GYUGYI, 2000; SONG; JOHNS, 1999; MATHUR; VARMA, 2002).

O IPFC (*Interline Power Flow Controller*) é um exemplo da combinação série - série e consiste de dois ou mais FACTS do tipo SSSC interligados entre si pelo barramento CC, cada um deles instalados em diferentes linhas de transmissão com controladores independentes. Pode ainda ser instalado junto um STATCOM para fornecer ou absorver os reativos necessários para a operação do IPFC. Esta configuração conhecida como GUPFC (*Generalized Unified Power Flow Controller*) permite a troca de potência ativa e reativa entre as linhas compensadas (VALLE, 2010, 2014).

Já o UPFC (*Unified Power Flow Controller*) representa a combinação série - *shunt*. Consiste de um dispositivo que agrupa a ação de vários controladores existentes, podendo controlar a tensão e o fluxo de potência da linha de transmissão. Simplificando, o UPFC é a junção do STATCOM (*shunt*) com o SSSC (série) acoplados pelo barramento CC. O UPFC pode absorver ou injetar potências ativa e reativa ao ponto de conexão ao sistema de energia (HINGORANI; GYUGYI, 2000; FURINI, 2011; MOURA, 2012).

Neste trabalho o STATCOM e o SSSC serão detalhados, modelados e inseridos na solução do fluxo de potência.

2.2 *STATIC SYNCHRONOUS COMPENSATOR (STATCOM)*

Os dispositivos FACTS de segunda geração, dentre eles o STATCOM e o SSSC são baseados em um conversor fonte de tensão síncrona VSC (do inglês - *Voltage Source Converter*) que utiliza de semicondutores controlados, sendo que os mais utilizados são IGBT, IGCT ou GTO (respectivamente, *Insulated Gate Bipolar Transistor*, *Integrated Gate Commutated Thyristor*, *Gate Turn-Off Thyristor*). Ao recorrer a esses tipos de componentes é possível obter elevadas velocidades de comutação, permite gerar tensões e correntes com menor distorção harmônica e controle em frequências relativamente elevadas (HINGORANI; GYUGYI, 2000;

SONG; JOHNS, 1999; MATHUR; VARMA, 2002).

A tensão do STATCOM fornecida a barra de instalação permite controlar o nível da tensão na barra de instalação com o fornecimento/consumo de potência reativa. Se \tilde{V}_{ST} é de maior magnitude que \tilde{V}_i o STATCOM fornece ativos a barra i , ao contrário, consome ativos da barra. Se o ângulo de \tilde{V}_{ST} está adiantado de \tilde{V}_i , o STATCOM fornece reativos a barra (característica capacitiva), e atrasado consome reativos (característica indutiva). A capacidade de fornecimento de ativos pelos FACTS depende da energia previamente armazenada no barramento CC, tipicamente constituído por bancos de capacitores (HINGORANI; GYUGYI, 2000; PEREIRA, 2009; PETEAN-PINA; ARAUJO, 2010).

Como o STATCOM opera conectado diretamente a barra, melhora a qualidade de energia naquele ponto de acesso, pois regula a magnitude da tensão e pode minimizar as oscilações sofridas pela barra. Tal fato foi decisivo na aplicação do STATCOM-BR.

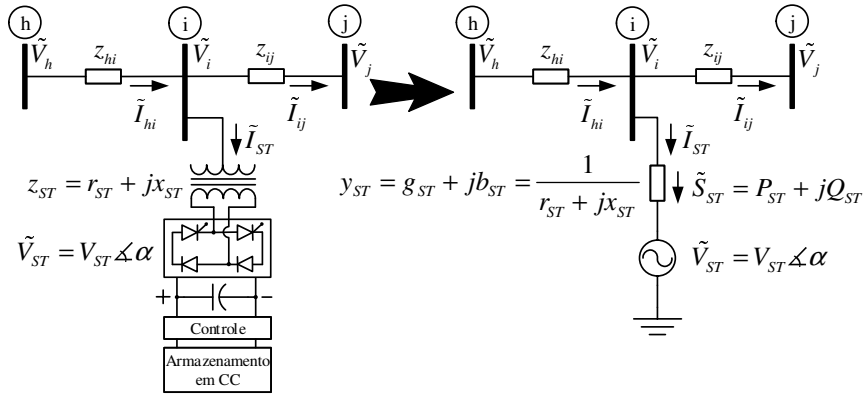
O STATCOM-BR é uma aplicação desenvolvida através do Projeto de P&D da parceria entre a Petrobras, UFRJ (Laboratório LEMT, vinculado a COPPE e à POLI) e Adelco. Foi instalado em 2013 na usina eólica experimental da PETROBRAS que fica em Macau, Rio Grande do Norte - Brasil. A usina eólica está em funcionamento desde 2004 e possui, 3 turbinas de 13,8 kV conectadas em paralelo, totalizando a potência instalada de 1,8 MW. Os aero geradores estão conectados a uma rede interna da Petrobras que é suprida pelo sistema da COSERN (AREDES, 2012; ORTIZ *et al.*, 2008).

O principal motivo para a execução do projeto, é a redução da flutuação de tensão no ponto de conexão da usina eólica a rede, devido a variação da potência dos aero geradores. E até o que foi apresentado pelos autores e executores, não opera com controlador de amortecimento das oscilações eletromecânicas.

2.2.1 Modelagem do STATCOM

Tipicamente o STATCOM é modelado como uma fonte de corrente inserindo potência à barra em que está instalado (PEREIRA, 2009; PETEAN-PINA; ARAUJO, 2010). A modelagem proposta neste trabalho considera o STATCOM como uma fonte de tensão ideal controlada em magnitude e fase (VSC) conectada a uma barra do sistema por meio de uma impedância, que representa as perdas ativas e reativas do STATCOM e do transformador responsável pelo acoplamento do VSC à barra genérica i , como representado no diagrama da Figura 1 (RADMAN; RAJE, 2007).

Figura 1 - Diagrama unifilar representativo do STATCOM.



Fonte: Hingorani e Gyugyi (2000), adaptado pelo autor.

Se inicia a modelagem, determinando a corrente consumida/fornecida pelo STATCOM, conforme orientações convencionadas na Figura 1, e na equação (1) a corrente trocada entre o STATCOM e a barra i , em que y_{ST} é a admitância equivalente do STATCOM, \tilde{V}_i o fasor tensão da barra i e \tilde{V}_{ST} a tensão interna do STATCOM (VSC).

$$\tilde{I}_{ST} = y_{ST} (\tilde{V}_i - \tilde{V}_{ST}) \quad (1)$$

Na equação (2) a corrente do STATCOM a partir dos valores absolutos de tensão e ângulo.

$$\begin{aligned} \tilde{I}_{ST} = g_{ST} (V_i \cos \theta_i - V_{ST} \cos \alpha) - b_{ST} (V_i \sin \theta_i - V_{ST} \sin \alpha) \\ + j [g_{ST} (V_i \sin \theta_i - V_{ST} \sin \alpha) + b_{ST} (V_i \cos \theta_i - V_{ST} \cos \alpha)] \quad (2) \end{aligned}$$

Assim a potência complexa consumida/fornecida pelo STATCOM é calculada por (3), substituindo o conjugado da corrente, resultando na equação (4), sendo $\theta_{i\alpha} = \theta_i - \theta_\alpha$.

$$\tilde{S}_{ST} = P_{ST} + jQ_{ST} = \tilde{V}_i \cdot \tilde{I}_{ST}^* \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \tilde{S}_{ST} = g_{ST} V_i^2 - g_{ST} V_i V_{ST} \cos \theta_{i\alpha} - b_{ST} V_i V_{ST} \sin \theta_{i\alpha} \\ - j (b_{ST} V_i^2 + g_{ST} V_i V_{ST} \sin \theta_{i\alpha} - b_{ST} V_i V_{ST} \cos \theta_{i\alpha}) \quad (4) \end{aligned}$$

Da equação (4), a parcela real corresponde a potência ativa fornecida/consumida pelo STATCOM, enquanto que a imaginária a potência reativa.

$$P_{ST} = g_{ST} V_i^2 - g_{ST} V_i V_{ST} \cos \theta_{i\alpha} - b_{ST} V_i V_{ST} \sin \theta_{i\alpha} \quad (5)$$

$$Q_{ST} = -b_{ST} V_i^2 - g_{ST} V_i V_{ST} \sin \theta_{i\alpha} + b_{ST} V_i V_{ST} \cos \theta_{i\alpha} \quad (6)$$

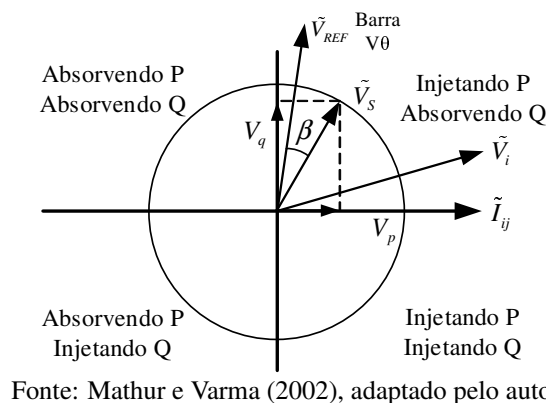
As equações (5) e (6) modelam o STATCOM de forma mais realista, apesar de ainda considerar ideal a atuação da parte eletrônica. As expressões posteriormente serão incorporadas

as expressões do fluxo de potência e no modelo de sensibilidade de potência (MSP), para isso devem ser linearizadas e suas derivadas calculadas.

2.3 STATIC SYNCHRONOUS SERIES COMPENSATOR (SSSC)

O dispositivo FACTS SSSC opera similarmente ao STATCOM, mas neste caso é instalado em série com a linha de transmissão, assim injetará tensão modulada em magnitude e fase, na frequência fundamental da rede.

Figura 2 - Operação do SSSC para diferentes defasagens angulares de \tilde{V}_{SC} .

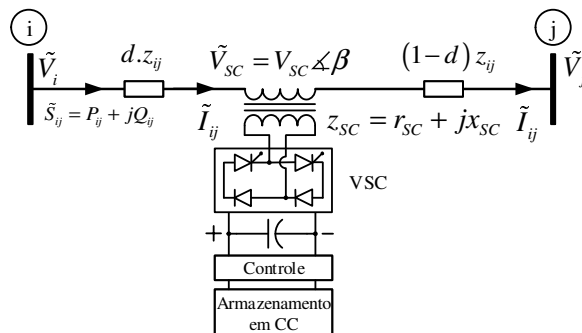


Fonte: Mathur e Varma (2002), adaptado pelo autor.

Se o ângulo de \tilde{V}_{SC} estiver em fase com a corrente da linha ocorre à absorção ou injeção de potência ativa, em contrapartida, se o ângulo estiver em quadratura com a corrente da linha têm-se a injeção ou absorção de potência reativa (HINGORANI; GYUGYI, 2000; SONG; JOHNS, 1999; MATHUR; VARMA, 2002). A Figura 2 exemplifica a operação do SSSC se instalado entre as barras i e j de um sistema de transmissão, ao qual flui a corrente \tilde{I}_{ij} .

Na Figura 3 o diagrama unifilar representativo do SSSC instalado na linha de transmissão $i-j$ por meio de um transformador que acopla a fonte de tensão VSC em série com a linha de transmissão (LT), deste modo é inserida a tensão \tilde{V}_{SC} em sincronismo com a frequência do sistema elétrico, mas ajustada em magnitude e ângulo.

Figura 3 - Representação do dispositivo FACTS SSSC.



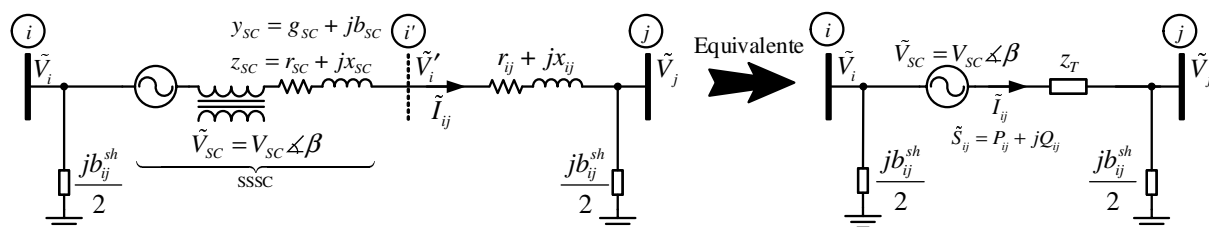
Fonte: Hingorani e Gyugyi (2000), adaptado pelo autor.

No modelo desenvolvido se considera a impedância equivalente do SSSC (z_{SC}), representativa das perdas ativas internas do dispositivo e do transformador que o acopla a LT, elevando a impedância equivalente de toda a LT $i-j$, inclusive, influência na distribuição de potências em todo o sistema. Considerando a linha de transmissão representada pelo modelo equivalente π , e no elemento central a resistência e reatância equivalentes da LT (linha + SSSC) concentradas em um elemento, e nas barras extremas a susceptância *shunt* equivalente.

O SSSC pode ser aplicado a LT com o objetivo de controlar o fluxo de potência, ou com o objetivo de reduzir a reatância equivalente da LT, e assim aumentar a capacidade de transmissão desta linha. É um dispositivo tipicamente aplicado em longas linhas de transmissão, que possuem elevadas reatâncias série e susceptância *shunt*, por este motivo o elemento *shunt* não é desprezado no equacionamento.

Como a representação da LT é por elementos concentrados, a instalação do SSSC no início, meio ou fim da LT (distância d na Figura 3) não modifica a impedância equivalente da LT. Ainda, para facilitar a apresentação das equações, o SSSC é definido exatamente no meio da linha de transmissão, assim a impedância equivalente do SSSC em direção a barra i , é a mesma do SSSC em direção a barra j .

Figura 4 - Circuito equivalente do SSSC instalado na LT $i-j$.



Fonte: elaborada pelo autor.

2.3.1 Modelagem do SSSC

Na modelagem proposta neste trabalho, o SSSC é considerado como uma impedância equivalente z_{SC} , que compreende a impedância equivalente da VSC e do transformador que acopla o SSSC a linha de transmissão $i-j$, conforme a Figura 4, que representa de forma simplificada a instalação do SSSC nesta LT.

A modelagem do SSSC inicia definindo a corrente \tilde{I}_{ij} que flui na LT $i-j$, conforme equação (7), adaptada de (MONTICELLI, 1983) com a inserção da tensão do SSSC em série, em que y_T é a admitância equivalente da LT, já considerando a impedância do SSSC (z_{SC}) em série com a da linha (z_{ij}).

$$\tilde{I}_{ij} = y_T (\tilde{V}_i + \tilde{V}_{SC} - \tilde{V}_j) + jb_{ij}^{sh} \tilde{V}_i \quad (7)$$

Na equação (8), a corrente \tilde{I}_{ij} é reescrita em função das tensões e seus respectivos ângulos.

$$\begin{aligned} \tilde{I}_{ij} = & g_T (V_i \cos \theta_i - V_j \cos \theta_j + V_{SC} \cos \beta) - b_T (V_i \sin \theta_i - V_j \sin \theta_j + V_{SC} \sin \beta) - b_{ij}^{sh} V_i \sin \theta_i \\ & + j \left[g_T (V_i \sin \theta_i - V_j \sin \theta_j + V_{SC} \sin \beta) + b_T (V_i \cos \theta_i - V_j \cos \theta_j + V_{SC} \cos \beta) + j b_{ij}^{sh} V_i \cos \theta_i \right] \end{aligned} \quad (8)$$

A potência que flui na LT com o SSSC então pode ser calculada a partir de (9).

$$\tilde{S}_{ij} = P_{ij} + jQ_{ij} = \tilde{V}_i \cdot \tilde{I}_{ij}^* \quad (9)$$

Em que a parcela real corresponde a potência ativa (10), e a imaginária a potência reativa (11) que flui de i para j , definindo $\theta_{ij} = \theta_i - \theta_j$ e $\theta_{i\beta} = \theta_i - \theta_\beta$ (MONTICELLI, 1983).

$$P_{ij} = P_{ij0} + P_{ijSC} = g_T V_i^2 - V_i V_j (g_T \cos \theta_{ij} - b_T \sin \theta_{ij}) + V_i V_{SC} (g_T \cos \theta_{i\beta} + b_T \sin \theta_{i\beta}) \quad (10)$$

$$\begin{aligned} Q_{ij} = Q_{ij0} + Q_{ijSC} = & - \left(b_T + b_{ij}^{sh} \right) V_i^2 - V_i V_j (g_T \sin \theta_{ij} - b_T \cos \theta_{ij}) \\ & + V_i V_{SC} (g_T \sin \theta_{i\beta} - b_T \cos \theta_{i\beta}) \end{aligned} \quad (11)$$

Das expressões de fluxo de potência com o SSSC, nota-se a permanência dos termos do fluxo de potência de uma linha de transmissão simples, e a inserção do SSSC, acrescenta dois novos termos a cada expressão, que são dependentes da magnitude da tensão do SSSC (V_{SC}), e seu ângulo (β).

No caso do SSSC, diferente ao realizado para o STATCOM, deve-se determinar a participação do SSSC na potência que flui da barra j em direção a barra i , durante as iterações para solução do fluxo de potência, e posteriormente usar essas potência para fechar o balanço de potência em ambas as barras. A corrente \tilde{I}_{ji} é calculada a partir de (12), pois se mantém a orientação adotada na Figura 3.

$$\tilde{I}_{ji} = y_T (\tilde{V}_j - \tilde{V}_{SC} - \tilde{V}_i) + j b_{ij}^{sh} \tilde{V}_j \quad (12)$$

Na equação (13), a corrente \tilde{I}_{ji} em função da magnitude das tensões e ângulos.

$$\begin{aligned} \tilde{I}_{ji} = & g_T (V_j \cos \theta_j - V_i \cos \theta_i - V_{SC} \cos \beta) - b_T (V_j \sin \theta_j - V_i \sin \theta_i - V_{SC} \sin \beta) - b_{ij}^{sh} V_j \sin \theta_j \\ & + j \left[g_T (V_j \sin \theta_j - V_i \sin \theta_i - V_{SC} \sin \beta) + b_T (V_j \cos \theta_j - V_i \cos \theta_i - V_{SC} \cos \beta) + j b_{ij}^{sh} V_j \cos \theta_j \right] \end{aligned} \quad (13)$$

No caso, a potência que flui de j para i na LT com o SSSC então pode ser calculada a partir de (13).

$$\tilde{S}_{ji} = P_{ji} + jQ_{ji} = \tilde{V}_j \cdot \tilde{I}_{ji}^* \quad (14)$$

Análogo ao caso anterior, a potência P_{ji} apresenta o fluxo de potência ativa original de uma LT (P_{ji_0}), acrescido a participação do SSSC, e de modo similar para a potência reativa, considerando $\theta_{ji} = \theta_j - \theta_i$ e $\theta_{j\beta} = \theta_j - \theta_\beta$ (MONTICELLI, 1983).

$$P_{ji} = P_{ji_0} + P_{jisc} = g_T V_j^2 - g_T V_j V_i \cos \theta_{ji} - b_T V_j V_i \sin \theta_{ji} - g_T V_j V_{SC} \cos \theta_{j\beta} - b_T V_j V_{SC} \sin \theta_{j\beta} \quad (15)$$

$$Q_{ji} = Q_{ji_0} + Q_{jisc} = - (b_T + b_{ji}^{sh}) V_j^2 - g_T V_j V_i \sin \theta_{ji} + b_T V_j V_i \cos \theta_{ji} - g_T V_j V_{SC} \sin \theta_{j\beta} + b_T V_j V_{SC} \cos \theta_{j\beta} \quad (16)$$

Reescrevendo (15) e (16) na ordem i - j , obtemos (17) e (18).

$$P_{ji} = P_{ji_0} + P_{jisc} = g_T V_j^2 - g_T V_i V_j \cos \theta_{ij} + b_T V_i V_j \sin \theta_{ij} - g_T V_j V_{SC} \cos \theta_{j\beta} - b_T V_j V_{SC} \sin \theta_{j\beta} \quad (17)$$

$$Q_{ji} = Q_{ji_0} + Q_{jisc} = - (b_T + b_{ij}^{sh}) V_j^2 + g_T V_i V_j \sin \theta_{ij} + b_T V_i V_j \cos \theta_{ij} - g_T V_j V_{SC} \sin \theta_{j\beta} + b_T V_j V_{SC} \cos \theta_{j\beta} \quad (18)$$

Em que as perdas de potência ativa e reativa nesta linha de transmissão são (19) e (20).

$$P_{iLoss} = P_{ij} + P_{ji} = g_T |\tilde{V}_i - \tilde{V}_j|^2 - g_T V_{SC} (V_i \cos \theta_{i\beta} - V_j \cos \theta_{j\beta}) + b_T V_{SC} (V_i \sin \theta_{i\beta} - V_j \sin \theta_{j\beta}) \quad (19)$$

$$Q_{iLoss} = Q_{ij} + Q_{ji} = -b_{ij}^{sh} (V_i^2 + V_j^2) - b_T |\tilde{V}_i - \tilde{V}_j|^2 + g_T V_{SC} (V_i \sin \theta_{i\beta} - V_j \sin \theta_{j\beta}) - b_T V_{SC} (V_i \cos \theta_{i\beta} - V_j \cos \theta_{j\beta}) \quad (20)$$

Em regime permanente o SSSC manterá a magnitude \tilde{V}_{SC} constante, como consequência o dispositivo fornecerá/absorverá potência ao sistema em que está conectado, desse modo se faz necessário determinar a quantidade de potência fornecida pelo SSSC.

Do SSSC em direção à barra i , será trocada a potência $\tilde{S}_{SSSC \rightarrow i}$ dada por (21).

$$\tilde{S}_{SSSC \rightarrow i} = \tilde{V}_{SC} \tilde{I}_{ij}^* = g_T V_{SC}^2 + g_T V_{SC} (V_i \cos \theta_{i\beta} - V_j \cos \theta_{j\beta}) - b_T V_{SC} (V_i \sin \theta_{i\beta} - V_j \sin \theta_{j\beta}) + j [-b_T V_{SC}^2 + g_T V_{SC} (V_i \sin \theta_{i\beta} - V_j \sin \theta_{j\beta}) - b_T V_{SC} (V_i \cos \theta_{i\beta} - V_j \cos \theta_{j\beta})] \quad (21)$$

E na direção do SSSC à barra j , a potência $\tilde{S}_{SSSC \rightarrow j}$ desenvolvida em (22).

$$\tilde{S}_{SSSC \rightarrow j} = \tilde{V}_{SC} \tilde{I}_{ji}^* = -g_T V_{SC}^2 + g_T V_{SC} (V_j \cos \theta_{j\beta} - V_i \cos \theta_{i\beta}) - b_T V_{SC} (V_j \sin \theta_{j\beta} - V_i \sin \theta_{i\beta}) + j [b_T V_{SC}^2 - g_T V_{SC} (V_j \sin \theta_{j\beta} - V_i \sin \theta_{i\beta}) - b_T V_{SC} (V_j \cos \theta_{j\beta} - V_i \cos \theta_{i\beta})] \quad (22)$$

A soma da potência injetada $\tilde{S}_{SSSC \rightarrow j}$, com a $\tilde{S}_{SSSC \rightarrow i}$ é a potência complexa total inserida pelo SSSC na LT em que está instalado ($\tilde{S}_{SC_{EQ}}$). Conforme mencionado anteriormente, essa potência será a necessária para que o SSSC controle o fluxo de potência ativa, reativa ou até mesmo a tensão de uma das barras limitantes, no fluxo de potência em regime permanente, e consiste na potência fornecida pelo dispositivo de forma constante. Há o interesse que a potência ativa injetada pelo SSSC seja nula em regime permanente, que somente seja fornecida durante a ocorrência de transitórios no sistema de potência, assunto que será detalhadamente abordado nos próximos capítulos.

3 FLUXO DE POTÊNCIA COM DISPOSITIVOS FACTS

O fluxo de potência possibilita avaliar a operação dos sistemas de potência, a partir da determinação das tensões e ângulos de cada barra que compõe o sistema, conforme for sua distribuição e interligação. Tais informações permitem aos operadores do sistema definir os reforços necessários, pontos operacionais críticos, análises de contingências e operação em tempo real (online).

A grande contribuição deste trabalho é o desenvolvimento de um modelo para solução do fluxo de potência, a partir do clássico método de Newton-Raphson, com a atuação simultânea de diferentes tipos de dispositivos FACTS (STATCOM e SSSC), capazes de controlar o fluxo de potência.

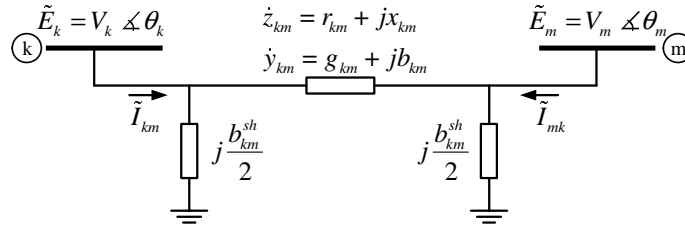
No modelo desenvolvido, cada dispositivo será responsável por controlar uma grandeza previamente especificada, conforme os limites operacionais do dispositivo de realizar esse controle. Ao final da solução do fluxo de potência, além dos fasores tensão de todas as barras, são obtidos o fasor tensão dos FACTS para que o controle desejado seja atingido e a matriz Jacobiana, que comporta informações das ligações do SEP modificada, com a inserção das expressões dinâmicas dos FACTS.

Ao final do trabalho se avalia, como as mudanças realizadas na matriz Jacobiana influenciam na estabilidade à pequenas perturbações do SEP.

Como a adaptação do fluxo de potência com os controladores é baseada na solução clássica de Newton, já muito difundida, se tomará como bibliografia fundamental o livro de Alcir Monticelli (1983), adotando a mesma nomenclatura utilizada pelo autor.

3.1 FORMULAÇÃO BÁSICA DO FLUXO DE POTÊNCIA

Nesta seção, o fluxo de potência é desenvolvido sem adaptações. A partir da Figura 5 é desenvolvida as expressões de fluxo de potência, definindo z_{km} como a impedância série da linha de transmissão (LT), que interliga as barras k e m , \tilde{V}_k e \tilde{V}_m os fasores tensão das barras k e m respectivamente, e b_{km}^{sh} a susceptância *shunt* da LT em modelo π .

Figura 5 - Diagrama unifilar de uma LT em formato π .

Fonte: elaborada pelo autor.

A corrente que flui da barra k para m é obtida por (23).

$$\tilde{I}_{km} = y_{km} (\tilde{V}_k - \tilde{V}_m) + j b_{km}^{sh} \cdot \tilde{V}_k \quad (23)$$

Com as expressões das correntes pela LT (23), determina-se as potências que fluem de $k \rightarrow m$ (25), e também de $m \rightarrow k$ (27).

$$\tilde{S}_{km} = \tilde{V}_k \cdot \tilde{I}_{km}^* = P_{km} + jQ_{km} \quad (24)$$

$$P_{km} = \text{Real} \{ \tilde{S}_{km} \} = g_{km} V_k^2 - V_k V_m (g_{km} \cos \theta_{km} + b_{km} \sin \theta_{km}) \quad (25)$$

$$Q_{km} = \text{Imag} \{ \tilde{S}_{km} \} = - (b_{km} + b_{km}^{sh}) V_k^2 - V_k V_m (g_{km} \sin \theta_{km} - b_{km} \cos \theta_{km})$$

$$\tilde{S}_{mk} = \tilde{V}_m \cdot \tilde{I}_{mk}^* = P_{mk} + jQ_{mk} \quad (26)$$

$$P_{mk} = \text{Real} \{ \tilde{S}_{mk} \} = g_{km} V_m^2 - V_k V_m (g_{km} \cos \theta_{mk} + b_{km} \sin \theta_{mk}) \quad (27)$$

$$Q_{mk} = \text{Imag} \{ \tilde{S}_{mk} \} = - (b_{km} + b_{km}^{sh}) V_m^2 - V_k V_m (g_{km} \sin \theta_{mk} - b_{km} \cos \theta_{mk})$$

Generalizando as expressões de fluxo de potência, conforme apresentado em (28) e (29), que facilitam a implementação computacional, para obtenção das potências injetadas na barra k , no qual G_{km} corresponde a parcela real do elemento na linha k , coluna m da matriz Y_{BARRA} , e B_{km} à parcela imaginária.

$$P_k = V_k \sum_{m \in k} V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}) \quad (28)$$

$$Q_k = V_k \sum_{m \in k} V_m (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}) \quad (29)$$

Para a barra k , o cálculo das potência ativa e reativa (28) e (29) injetadas, é comparado aos valores especificados a essa barra, conforme o tipo de barra, pode-se determinar ΔP_k e ΔQ_k que são os erros entre o valor especificado e calculado para a barra k na iteração v , e que será útil para atualizar os valores de V_k e θ_k na próxima iteração do método de Newton.

$$\Delta P_k^v = P_k^{esp} - P_k(\theta, V)^v = 0 \quad (30)$$

$$\Delta Q_k^v = Q_k^{esp} - Q_k(\theta, V)^v = 0 \quad (31)$$

Em que $\underline{\theta}$ é o vetor com os ângulos das tensões de todas as nb barras que compõem o sistema, enquanto que \underline{V} o vetor com os valores absolutos das tensões das nb barras, sendo nb o número de barras do sistema. Essas variáveis são agrupadas no vetor \underline{x}^v .

$$\underline{x} = \begin{bmatrix} \underline{\theta} \\ \underline{V} \end{bmatrix} \quad (32)$$

Expandindo o modelo para as demais barras, agrupando na forma vetorial as expressões de erro anteriores, na qual $\Delta \underline{P}$ é composto pelos erros de potência ativa, e $\Delta \underline{Q}$ reativas, de dimensões nb barras cada um, como em (33).

$$\left. \begin{array}{l} \Delta \underline{P}^v = \underline{P}^{esp} - \underline{P}^v(\underline{\theta}, \underline{V}) = 0 \\ \Delta \underline{Q}^v = \underline{Q}^{esp} - \underline{Q}^v(\underline{\theta}, \underline{V}) = 0 \end{array} \right\} \underline{g}^v(\underline{x}^v) = \begin{bmatrix} \underline{\theta} \\ \underline{V} \end{bmatrix}^v = 0 \quad (33)$$

Os erros agrupados com as correspondentes expressões de potências injetadas, compõem a matriz $\underline{g}(\underline{x}^v)$ de dimensão $2nb$, de solução por meio do método iterativo de Newton-Raphson.

Os valores de \underline{x}^v devem ser atualizados ($\Delta \underline{x}^v$ equação (35)) a partir da Jacobiana ($Jac(\underline{x}^v)$), que é resultado da linearização das expressões de potência injetada em série de Taylor conforme a expressão (34)) (MONTICELLI, 1983).

$$\underline{g}(\underline{x}^v + \Delta \underline{x}^v) \cong \underline{g}(\underline{x}^v) + \frac{\partial \underline{g}(\underline{x}^v)}{\partial \underline{x}} \Delta \underline{x}^v = \underline{g}(\underline{x}^v) + Jac(\underline{x}^v) \cdot \Delta \underline{x}^v \quad (34)$$

$$\Delta \underline{x}^v = -[Jac(\underline{x}^v)]^{-1} \cdot \underline{g}(\underline{x}^v) \quad (35)$$

A representação matricial (36) reescreve minuciosamente a equação (35), com os elementos que a constituem.

$$\begin{bmatrix} \Delta \theta_k \\ \vdots \\ \Delta \theta_m \\ \Delta V_k \\ \vdots \\ \Delta V_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_k}{\partial \theta_k} & \cdots & \frac{\partial P_k}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_k}{\partial V_k} & \cdots & \frac{\partial P_k}{\partial V_m} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial P_m}{\partial \theta_k} & \cdots & \frac{\partial P_m}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_m}{\partial V_k} & \cdots & \frac{\partial P_m}{\partial V_m} \\ \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_k} & \cdots & \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_m} & \frac{\partial Q_k}{\partial V_k} & \cdots & \frac{\partial Q_k}{\partial V_m} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_k} & \cdots & \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_m} & \frac{\partial Q_m}{\partial V_k} & \cdots & \frac{\partial Q_m}{\partial V_m} \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} \Delta P_k \\ \vdots \\ \Delta P_m \\ \Delta Q_k \\ \vdots \\ \Delta Q_m \end{bmatrix} \quad (36)$$

A Jacobiana é dividida em quatro submatrizes chamadas de H , M , N e L . Cada submatriz

corresponde a potência injetada dividida por correspondente variável, conforme esquematizado na equação (37).

$$Jac(\underline{x}^v) = \left[\begin{array}{cc|cc} \frac{\partial P_k}{\partial \theta_k} & \cdots & \frac{\partial P_k}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_k}{\partial V_k} & \cdots & \frac{\partial P_k}{\partial V_m} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial P_m}{\partial \theta_k} & \cdots & \frac{\partial P_m}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_m}{\partial V_k} & \cdots & \frac{\partial P_m}{\partial V_m} \\ \hline \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_k} & \cdots & \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_m} & \frac{\partial Q_k}{\partial V_k} & \cdots & \frac{\partial Q_k}{\partial V_m} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_k} & \cdots & \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_m} & \frac{\partial Q_m}{\partial V_k} & \cdots & \frac{\partial Q_m}{\partial V_m} \end{array} \right] \Rightarrow Jac(\underline{x}^v) = \left[\begin{array}{c|c} H & N \\ \hline M & L \end{array} \right] \quad (37)$$

O cálculo dos elementos que compõem a Jacobiana são relacionadas das equações (38) até (41). Conforme a regra de formação da diagonal principal, e fora de cada submatriz.

$$\left\{ \begin{array}{l} H_{kk} = \frac{\partial P_k}{\partial \theta_k} = -B_{kk}V_k^2 - Q_k \\ H_{mm} = \frac{\partial P_m}{\partial \theta_m} = -B_{mm}V_m - Q_m \\ H_{km} = \frac{\partial P_k}{\partial \theta_m} = V_kV_m (G_{km}\text{sen}\theta_{km} - B_{km}\text{cos}\theta_{km}) \\ H_{mk} = \frac{\partial P_m}{\partial \theta_k} = V_kV_m (G_{km}\text{sen}\theta_{mk} - B_{km}\text{cos}\theta_{mk}) \end{array} \right. \quad (38)$$

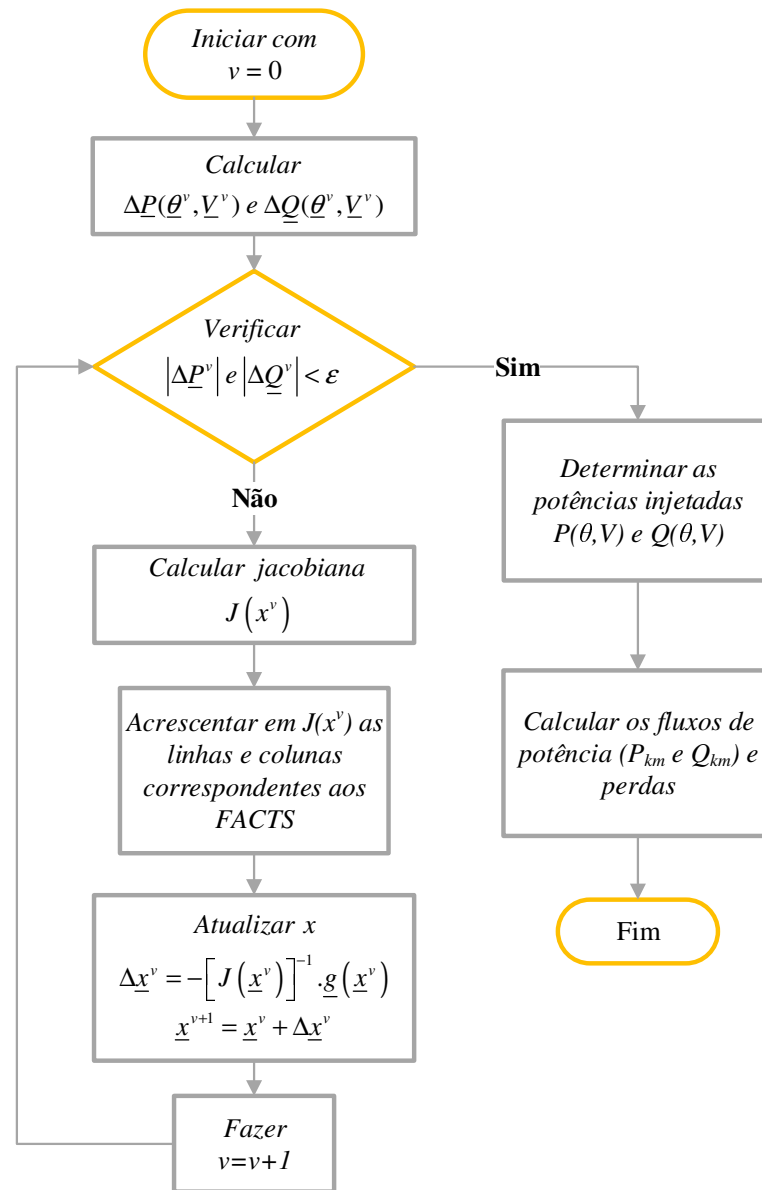
$$\left\{ \begin{array}{l} N_{kk} = \frac{\partial P_k}{\partial V_k} = V_k^{-1} (P_k + G_{kk}V_k^2) \\ N_{mm} = \frac{\partial P_m}{\partial V_m} = V_m^{-1} (P_m + G_{mm}V_m^2) \\ N_{km} = \frac{\partial P_k}{\partial V_m} = -V_k (G_{km}\text{cos}\theta_{km} + B_{km}\text{sen}\theta_{km}) \\ N_{mk} = \frac{\partial P_m}{\partial V_k} = -V_m (G_{km}\text{cos}\theta_{mk} - B_{km}\text{sen}\theta_{mk}) \end{array} \right. \quad (39)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} M_{kk} = \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_k} = P_k - G_{kk}V_k^2 \\ M_{mm} = \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_m} = P_m - G_{mm}V_m^2 \\ M_{km} = \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_m} = -V_kV_m (G_{km}\text{cos}\theta_{km} + B_{km}\text{sen}\theta_{km}) \\ M_{mk} = \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_k} = -V_kV_m (G_{km}\text{cos}\theta_{mk} + B_{km}\text{sen}\theta_{mk}) \end{array} \right. \quad (40)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} L_{kk} = \frac{\partial Q_k}{\partial V_k} = V_k^{-1} (Q_k - B_{kk}V_k^2) \\ L_{mm} = \frac{\partial Q_m}{\partial V_m} = Q_m - B_{mm}V_m^2 \\ L_{km} = \frac{\partial Q_k}{\partial V_m} = V_k (G_{km}\text{sen}\theta_{km} - B_{km}\text{cos}\theta_{km}) \\ L_{mk} = \frac{\partial Q_m}{\partial V_k} = V_m (G_{km}\text{sen}\theta_{mk} - B_{km}\text{cos}\theta_{mk}) \end{array} \right. \quad (41)$$

O algoritmo da Figura 6, é uma representação da rotina de resolução do fluxo pelo método de Newton-Raphson, acrescentado os FACTS, conforme as próximas seções do trabalho.

Figura 6 - Algoritmo representativo do método de Newton-Raphson.



Fonte: elaborado pelo autor.

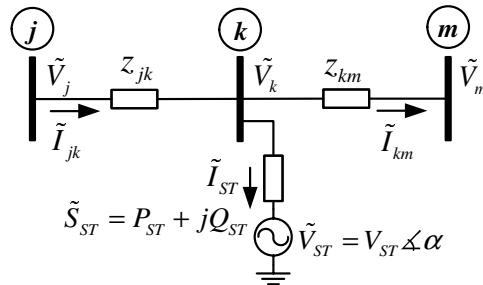
3.2 FLUXO DE POTÊNCIA COM O FACTS STATCOM

Nesta seção o modelo desenvolvido para o dispositivo STATCOM no item 2.2.1, será acrescentado ao equacionamento do fluxo de potência desenvolvido na seção 3.1.

Ao considerar a atuação do STATCOM, surgem duas novas variáveis que devem ser determinadas na solução do fluxo, que são o ângulo e a magnitude da tensão interna do STATCOM, definidas como $\tilde{V}_{ST} = V_{ST} \angle \alpha$. O acréscimo destas duas variáveis aumenta, para cada STATCOM instalado, mais duas colunas na Jacobiana, obrigatoriamente deve-se acrescentar mais duas equações (duas linhas), para manter um sistema possível determinado. Essas expressões são desenvolvidas adiante.

As expressões de potência ativa e reativa do STATCOM são utilizadas para fechar o balanço de potência na barra em que o STATCOM encontra-se instalado.

Figura 7 - Balanço de potência na barra com STATCOM.



Fonte: desenvolvido pelo autor.

Na condição da Figura 7 o balanço de potência da barra k é adaptado conforme (42) e (43) devido a presença do STATCOM nesta barra. Como as expressões de potências injetadas na barra j e m já estavam inclusas no modelo e não sofrem adaptações pela existência do STATCOM, não há mudanças nas correspondentes linhas e colunas da matriz Jacobiana.

$$P_k = P_{jk} - P_{km} - P_{ST} = V_k \sum_{m \in k} V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}) + P_{ST} \quad (42)$$

$$Q_k = Q_{jk} - Q_{km} - Q_{ST} = V_k \sum_{m \in k} V_m (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}) + Q_{ST} \quad (43)$$

Considerando que em regime permanente o STATCOM não deve inserir potência ativa no sistema de potência, pode-se forçar que P_{ST} seja nulo na convergência do fluxo de potência, fornecendo uma expressão, que acrescentará uma linha na Jacobiana.

Essa consideração é completamente plausível, pois para manter constante o fornecimento de potência ativa a barra k , o STATCOM deveria possuir geração interna de ativos no barramento CC do dispositivo, diferente da proposta inicial que seria de previamente armazenar energia em baterias, capacitores ou outro elemento.

A potência ativa trocada entre o STATCOM e o SEP, chamada aqui de PE (do inglês *Power Exchange*), é determinada conforme (44), resultando em (45), em que \tilde{I}_{ST} já foi determinado na equação (2).

$$PE_{ST} = \text{Real} [\tilde{V}_{ST} \cdot \tilde{I}_{ST}^*] = 0 \quad (44)$$

$$PE_{ST} = -g_{ST} V_{ST}^2 + g_{ST} V_k V_{ST} \cos \theta_{k\alpha} - b_{ST} V_k V_{ST} \sin \theta_{k\alpha} \quad (45)$$

A cada iteração do método de Newton, deve-se determinar as injeções de potência ativa e reativa, e o valor de PE_{ST} , que ao final do processo deve atingir o valor especificado (zero). Na equação (46) a expressão para o cálculo de ΔPE_{ST} .

$$\Delta PE_{ST} = PE_{ST}^{Esp} - PE_{ST}^{Calc} = PE_{ST}^{Esp^0} + g_{ST}V_{ST}^2 - g_{ST}V_kV_{ST}\cos\theta_{k\alpha} + b_{ST}V_kV_{ST}\sin\theta_{k\alpha} \quad (46)$$

Linearizando PE_{ST} para complementar a linha acrescentada à Jacobiana, conforme (47).

$$\Delta PE_{ST} = PE_{ST1} \cdot \Delta\theta_k + PE_{ST2} \cdot \Delta V_k + PE_{ST3} \cdot \Delta\theta_m + PE_{ST4} \cdot \Delta V_m + PE_{ST5} \cdot \Delta V_{ST} + PE_{ST6} \cdot \Delta\alpha \quad (47)$$

$$PE_{ST1} = \frac{\partial PE_{ST}}{\partial \theta_k} = -g_{ST}V_kV_{ST}\sin\theta_{k\alpha} - b_{ST}V_kV_{ST}\cos\theta_{k\alpha} \quad (48)$$

$$PE_{ST2} = \frac{\partial PE_{ST}}{\partial V_k} = g_{ST}V_{ST}\cos\theta_{k\alpha} - b_{ST}V_{ST}\sin\theta_{k\alpha} \quad (49)$$

$$PE_{ST3} = \frac{\partial PE_{ST}}{\partial \theta_m} = 0 \quad (50)$$

$$PE_{ST4} = \frac{\partial PE_{ST}}{\partial V_m} = 0 \quad (51)$$

$$PE_{ST5} = \frac{\partial PE_{ST}}{\partial \alpha} = g_{ST}V_kV_{ST}\sin\theta_{k\alpha} + b_{ST}V_kV_{ST}\cos\theta_{k\alpha} \quad (52)$$

$$PE_{ST6} = \frac{\partial PE_{ST}}{\partial V_{ST}} = -2g_{ST}V_{ST} + g_{ST}V_k\cos\theta_{k\alpha} - b_{ST}V_k\sin\theta_{k\alpha} \quad (53)$$

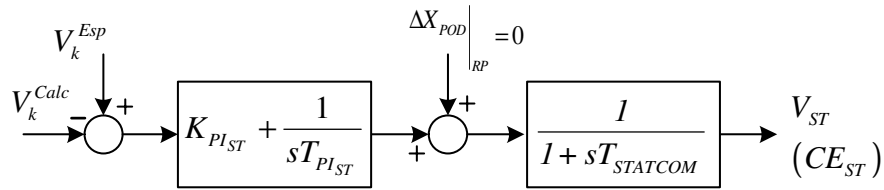
3.2.1 Controle de tensão com o STATCOM

Para finalizar a formação da matriz Jacobiana, cada STATCOM acrescenta uma expressão representativa da grandeza a ser controlada pelo dispositivo. No caso do STATCOM a grandeza de controle é a tensão da barra k de instalação. A magnitude de tensão desejada é pré definida, e o método iterativo de Newton encontrará o fasor tensão do STATCOM \tilde{V}_{ST} para manter a tensão no nível especificado. Neste trabalho, essa expressão é chamado de “controle especificado” (CE), e conforme o dispositivo aplicado, o controle poderá ser a magnitude da tensão, da potência ativa ou reativa, ou reatância equivalente. A equação (54) exemplifica o CE do STATCOM controlando a magnitude de tensão da barra k .

$$CE_{ST} = V_k^{Esp} - V_k^{Calc} \quad (54)$$

Na equação (54) a dinâmica do FACTS é desprezada. Para considerar a não idealidade do dispositivo, se considera um controlador do tipo PI (Proporcional Integral) para ajustar o valor em regime permanente de CE, atuando na malha de controle do FACTS. Na Figura 8, o esquema de controle do STATCOM.

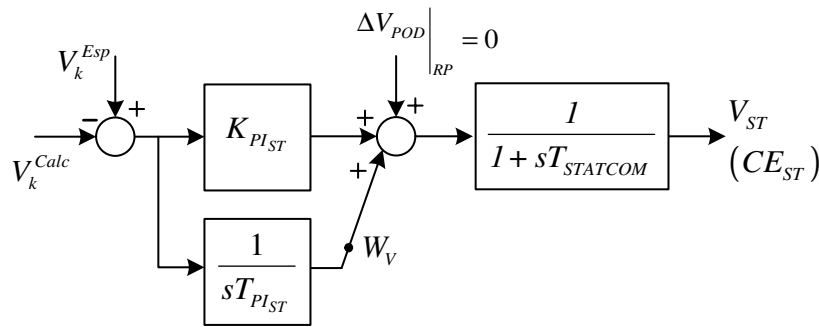
Figura 8 - Dinâmica do STATCOM com controlador PI.



Fonte: (VALLE, 2010), adaptada pelo autor.

Distribuindo no diagrama de blocos anterior, o controlador PI, conforme Figura 9, se obtêm a dinâmica em regime permanente (*RP*) do CE_{ST} . Com a distribuição surge a variável W_V (55) internamente no controlador PI, sem qualquer significado físico. As equações (56) e (57) são as novas expressões de CE_{ST} considerando a dinâmica do dispositivo (VALLE, 2010).

Figura 9 - Sinal do controlador PI alimentando a malha de controle do STATCOM.



Fonte: (VALLE, 2010) adaptada pelo autor.

$$W_V = \frac{V_k^{Esp} - V_k^{Calc}}{s \cdot T_{PI_{ST}}} \Rightarrow \dot{W}_V = \frac{V_k^{Esp} - V_k^{Calc}}{T_{PI_{ST}}} \quad (55)$$

$$V_{ST} = \frac{K_{PI_{ST}} (V_k^{Esp} - V_k^{Calc}) + W_V}{1 + s \cdot T_{STATCOM}} \quad (56)$$

$$\dot{V}_{ST} = \frac{K_{PI_{ST}} (V_k^{Esp} - V_k^{Calc})}{T_{STATCOM}} + \frac{W_V}{T_{STATCOM}} - \frac{V_{ST}}{T_{STATCOM}} \quad (57)$$

Derivando as expressões de \dot{W}_V e \dot{V}_{ST} para a inserção na Jacobiana.

$$\frac{\partial \dot{W}_V}{\partial V_k} = -\frac{1}{T_{PI_{ST}}} \quad (58)$$

$$\frac{\partial \dot{V}_{ST}}{\partial V_k} = -\frac{K_{PI_{ST}}}{T_{STATCOM}} \quad (59)$$

$$\frac{\partial \dot{V}_{ST}}{\partial V_{ST}} = -\frac{1}{T_{STATCOM}} \quad (60)$$

$$\frac{\partial \dot{V}_{ST}}{\partial W_V} = \frac{1}{T_{STATCOM}} \quad (61)$$

Todas as expressões que representam o STATCOM (\dot{V}_{ST} , \dot{W}_V e PE_{ST}) são inseridas na Jacobiana, para solução do fluxo de potência, considerando a dinâmica do dispositivo. O método aplicado neste trabalho é uma junção do proposto por Radman e Raje (2007) e Bhowmick, Das e Kumar (2007), que permite determinar o ângulo e a magnitude da tensão do FACTS, com o proposto por VALLE (2010), que considera a dinâmica do FACTS.

A submatriz PE_{ST} é composta pelos coeficientes de PE já descrito na equação (47). De forma análoga, as submatrizes \dot{V}_{ST} , \dot{W}_V são formadas pelas correspondentes derivadas.

As equações (62) até (65) apresentam as derivadas das injeções de potência do STATCOM considerando sua instalação na barra k , para complementar a Jacobiana, que agora comportam as grandezas do STATCOM.

$$H_{FACTS}(k, nf) = \frac{\partial P_k}{\partial \alpha} = g_{ST} V_k V_{ST} \sin \theta_{k\alpha} - b_{ST} V_k V_{ST} \cos \theta_{k\alpha} \quad (62)$$

$$N_{FACTS}(k, nf) = \frac{\partial P_k}{\partial V_{ST}} = g_{ST} V_k \cos \theta_{k\alpha} + b_{ST} V_k \sin \theta_{k\alpha} \quad (63)$$

$$M_{FACTS}(k, nf) = \frac{\partial Q_k}{\partial \alpha} = g_{ST} V_k V_{ST} \cos \theta_{k\alpha} - b_{ST} V_k V_{ST} \sin \theta_{k\alpha} \quad (64)$$

$$L_{FACTS}(k, nf) = \frac{\partial Q_k}{\partial V_{ST}} = g_{ST} V_k \sin \theta_{k\alpha} - b_{ST} V_k \cos \theta_{k\alpha} \quad (65)$$

Na formação de H_{FACTS} , M_{FACTS} , N_{FACTS} e L_{FACTS} as derivadas das potências injetadas na barra k em relação as expressões do STATCOM, presente na correspondente linha k . Cada FACTS STATCOM ativo no sistema (nf - número de FACTS) acrescentará uma coluna nestas submatrizes. Na equação (66) a representação simplificada da Jacobiana, considerando o STATCOM instalado na barra genérica k .

$$Jac(\underline{x}^v) = \left[\begin{array}{cc|cc} H & N & H_{FACTS} & N_{FACTS} & 0 \\ M & L & M_{FACTS} & L_{FACTS} & 0 \\ \hline & & PE_{ST} & & \\ & & \dot{V}_{ST} & & \\ & & \dot{W}_V & & \end{array} \right] \quad (66)$$

A representação da linearização de Taylor para encontrar a atualização das incógnitas do fluxo, já desenvolvida na equação (37), sofre pequenas adaptações. São acrescentadas três incógnitas (V_{ST} , W_V e α) e três expressões (\dot{V}_{ST} , \dot{W}_V e PE_{ST}) por FACTS. Na equação (67) em detalhes

a adaptação na matriz Jacobiana.

$$Jac(\underline{x}^v) = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_k}{\partial \theta_k} & \dots & \frac{\partial P_k}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_k}{\partial V_k} & \dots & \frac{\partial P_k}{\partial V_m} & \frac{\partial P_k}{\partial \alpha} & \frac{\partial P_k}{\partial V_{ST}} & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial P_m}{\partial \theta_k} & \dots & \frac{\partial P_m}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_m}{\partial V_k} & \dots & \frac{\partial P_m}{\partial V_m} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_k} & \dots & \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_m} & \frac{\partial Q_k}{\partial V_k} & \dots & \frac{\partial Q_k}{\partial V_m} & \frac{\partial Q_k}{\partial \alpha} & \frac{\partial Q_k}{\partial V_{ST}} & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_k} & \dots & \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_m} & \frac{\partial Q_m}{\partial V_k} & \dots & \frac{\partial Q_m}{\partial V_m} & 0 & 0 & 0 \\ \hline \frac{\partial PE_{ST}}{\partial \theta_k} & \dots & 0 & \frac{\partial PE_{ST}}{\partial V_k} & \dots & 0 & \frac{\partial PE_{ST}}{\partial \alpha} & \frac{\partial PE_{ST}}{\partial V_{ST}} & 0 \\ 0 & \dots & 0 & \frac{\partial V_{ST}}{\partial V_k} & \dots & 0 & 0 & \frac{\partial V_{ST}}{\partial V_{ST}} & \frac{\partial V_{ST}}{\partial W_V} \\ 0 & \dots & 0 & \frac{\partial W_V}{\partial V_k} & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (67)$$

A ordem proposta para arranjo das expressões do STATCOM na Jacobiana é somente uma sugestão, se coerentemente distribuídos, a ordem pode ser modificada. Para finalizar as adaptações no modelo do sistema para solução do fluxo de potência, deve-se inserir o ângulo e a tensão do STATCOM no vetor \underline{x} (32) do método de Newton, esses parâmetros devem ser avaliados, comparando o valor especificado com o calculado naquela iteração (determinação do erro e checagem de tolerância), e posteriormente atualizados, como ocorre com os demais ângulos e tensões das barras, até que ocorra a convergência.

3.3 FLUXO DE POTÊNCIA COM O FACTS SSSC

As mudanças necessárias no fluxo de potência clássico para a inserção da participação do SSSC são muito semelhantes as desenvolvidas na secção anterior, para o STATCOM. Mas devido ao fato do SSSC ser instalado em série com o sistema de transmissão aumenta a quantidade de expressões do modelo, também o SSSC pode atuar controlando diferentes grandezas, o que torna sua análise mais complexa.

Cada SSSC considerado ativo no sistema acrescentará duas variáveis ao modelo, correspondente ao ângulo e tensão do dispositivo, uma terceira surgirá devido a grandeza controlada CE (Controle Especificado), que no caso do SSSC pode ser o fluxo de potência ativa ou reativa da LT em que está instalado em série, a tensão da barra inicial ou final da LT, ou até a compensação da reatância equivalente da LT, este último não será desenvolvido neste trabalho.

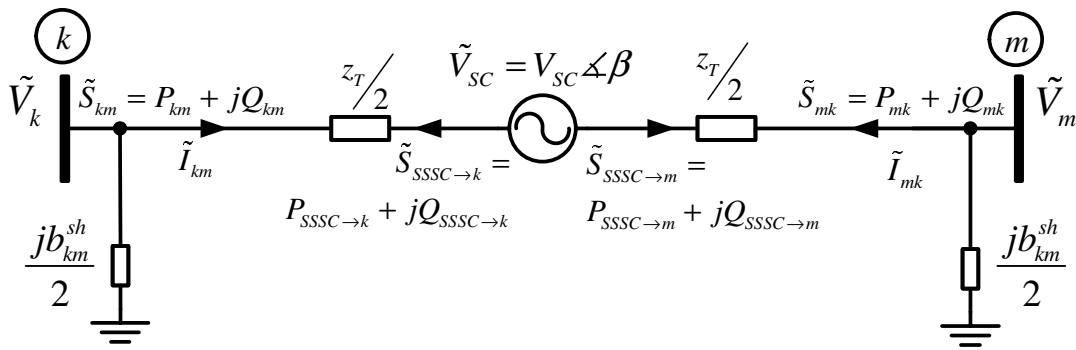
Novamente três equações serão desenvolvidas, a troca de potência ativa com o sistema de potência (PE_{SC}), a variável de controle do SSSC (V_{SC}) e a última expressão corresponde a dinâmica do dispositivo.

As expressões que modelam o SSSC, desenvolvidas na 2.3 serão utilizadas para fechar o

balanço de potência nas barras inicial e final onde o dispositivo está instalado. Para facilitar o desenvolvimento, na Figura 10 o diagrama unifilar do SSSC instalado entre as barras k e m do SEP.

Da figura, da potência barra k , será drenada P_{km} e Q_{km} , enquanto que da barra m , será absorvida a potência P_{mk} e Q_{mk} . Ambas as expressões de potência têm a participação das grandezas do SSSC (equações (10), (11), (15) e (16)), estabelecendo sua capacidade de controlar qualquer uma destas grandezas a um valor preestabelecido.

Figura 10 - Balanço de potência na barra com o SSSC.



Fonte: elaborado pelo autor.

$$P_k = -P_{km} - P_{kmSC} = V_k \sum_{m \in k} V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}) + P_{kmSC} \quad (68)$$

$$Q_k = -Q_{km} - Q_{kmSC} = V_k \sum_{m \in k} V_m (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}) + Q_{kmSC} \quad (69)$$

$$P_m = -P_{mk} - P_{mkSC} = V_m \sum_{k \in m} V_k (G_{km} \cos \theta_{mk} + B_{km} \sin \theta_{mk}) + P_{mkSC} \quad (70)$$

$$Q_m = -Q_{mk} - Q_{mkSC} = V_m \sum_{k \in m} V_k (G_{km} \sin \theta_{mk} - B_{km} \cos \theta_{mk}) + Q_{mkSC} \quad (71)$$

$$PE_{SC} = \text{Real} [\tilde{V}_{SC} \cdot \tilde{I}_{km}^*] = 0 \quad (72)$$

$$PE_{SC} = g_T V_{SC} (V_{SC} + V_k \cos \theta_{k\beta} - V_m \cos \theta_{m\beta}) - b_T V_{SC} (V_k \sin \theta_{k\beta} - V_m \sin \theta_{m\beta}) - b_{km}^{sh} V_k V_{SC} \sin \theta_{k\beta} \quad (73)$$

No *mismatch* de potência do método de Newton (33), deve-se atualizar o valor PE_{SC} até atingir o valor especificado, neste caso, se deseja que seja nula a potência ativa trocada entre o SSSC e o SEP.

$$\Delta PE_{SC} = PE_{SC}^{Esp} - PE_{SC}^{Calc} \quad (74)$$

A inserção da expressão de PE_{SC} na Jacobiana se dá com o cálculo de suas derivadas, conforme as expressões de (75) até (81).

$$\Delta PE_{SC} = PE_{SC1} \cdot \Delta \theta_k + PE_{SC2} \cdot \Delta V_k + PE_{SC3} \cdot \Delta \theta_m + PE_{SC4} \cdot \Delta V_m + PE_{SC5} \cdot \Delta V_{SC} + PE_{SC6} \cdot \Delta \beta \quad (75)$$

$$PE_{SC1} = \frac{\partial PE_{SC}}{\partial \theta_k} = -g_T V_k V_{SC} \text{sen} \theta_{k\beta} - (b_T + b_{km}^{sh}) V_k V_{SC} \text{cos} \theta_{k\beta} \quad (76)$$

$$PE_{SC2} = \frac{\partial PE_{SC}}{\partial V_k} = g_T V_{SC} \text{cos} \theta_{k\beta} - (b_{ST} + b_{km}^{sh}) V_{SC} \text{sen} \theta_{k\beta} \quad (77)$$

$$PE_{SC3} = \frac{\partial PE_{SC}}{\partial \theta_m} = g_T V_m V_{SC} \text{sen} \theta_{m\beta} + b_T V_m V_{SC} \text{cos} \theta_{m\beta} \quad (78)$$

$$PE_{SC4} = \frac{\partial PE_{SC}}{\partial V_m} = -g_T V_{SC} \text{cos} \theta_{m\beta} + b_T V_{SC} \text{sen} \theta_{m\beta} \quad (79)$$

$$PE_{SC5} = \frac{\partial PE_{SC}}{\partial \beta} = g_T V_{SC} (V_k \text{sen} \theta_{k\beta} - V_m \text{sen} \theta_{m\beta}) + (b_T + b_{km}^{sh}) V_k V_{SC} \text{cos} \theta_{k\beta} - b_T V_m V_{SC} \text{cos} \theta_{m\beta} \quad (80)$$

$$PE_{SC6} = \frac{\partial PE_{SC}}{\partial V_{SC}} = 2g_T V_{SC} + g_T (V_k \text{cos} \theta_{k\beta} - V_m \text{cos} \theta_{m\beta}) - (b_T + b_{km}^{sh}) V_k V_{SC} \text{sen} \theta_{k\beta} + b_T V_m V_{SC} \text{sen} \theta_{m\beta} \quad (81)$$

As demais expressões inseridas a Jacobiana dependem do tipo de controle desempenhado pelo SSSC. A malha de controle não sofre mudanças, somente os sinais de entrada é que são alterados.

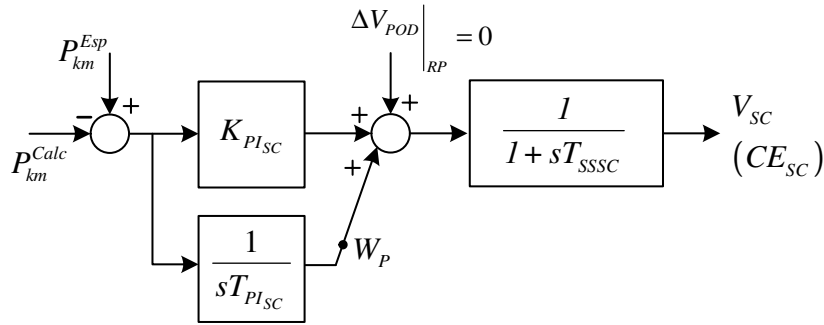
3.3.1 Controle do fluxo de potência ativa com o SSSC

O controle de potência ativa na linha de transmissão com o SSSC, se dá calculando o erro entre o valor especificado de potência ativa com o valor calculado naquela iteração do método de Newton. No vetor $\underline{g}(\underline{x})$ descrito na equação (33), se acrescenta a linha correspondente a expressão de mismatch de potência ativa, chamada de CE (82).

$$CE_{SC} = P_{km}^{Esp} - P_{km}^{Calc} \quad (82)$$

Já a dinâmica do dispositivo em ajustar o fluxo de potência ativa a partir do fasor tensão \tilde{V}_{SC} inserido pelo SSSC, é obtida da análise do diagrama de blocos da malha de controle, conforme representado na Figura 11.

Figura 11 - Diagrama de blocos do controle de potência ativa a partir do controlador PI.



Fonte: (VALLE, 2010), adaptado pelo autor.

$$W_P = \frac{P_{km}^{Esp} - P_{km}^{Calc}}{s \cdot T_{PIsc}} \Rightarrow \dot{W}_P = \frac{P_{km}^{Esp} - P_{km}^{Calc}}{T_{PIsc}} \quad (83)$$

$$V_{SC} = \frac{K_{PIsc} (P_{km}^{Esp} - P_{km}^{Calc}) + W_P}{1 + sT_{SSSC}} \quad (84)$$

$$\dot{V}_{SC} = \frac{K_{PIsc} (P_{km}^{Esp} - P_{km}^{Calc})}{T_{SSSC}} + \frac{W_P}{T_{SSSC}} - \frac{V_{SC}}{T_{SSSC}} \quad (85)$$

Como o sinal de controle é a potência ativa, sua derivada deve ser calculada. Na sequência do trabalho esta mesma derivada é utilizada no Modelo de Sensibilidade de Potência (MSP) no capítulo 4. Os chamados coeficientes de sensibilidade de potência são as linearizações das equações de potência ativa (10), e reativa (11), utilizando da expansão em série de Taylor, obtendo ativa $A1_{km}$, $A2_{km}$, $A3_{km}$, $A4_{km}$, $A5_{km}$ e $A6_{km}$, e de potência reativa $R1_{km}$, $R2_{km}$, $R3_{km}$, $R4_{km}$, $R5_{km}$ e $R6_{km}$, das linhas de transmissão com SSSC conforme as equações (86) até (99).

$$\Delta P_{km} = A1_{km} \cdot \Delta \theta_k + A2_{km} \cdot \Delta V_k + A3_{km} \cdot \Delta \theta_m + A4_{km} \cdot \Delta V_m + A5_{km} \cdot \Delta \beta + A6_{km} \cdot \Delta V_{SC} \quad (86)$$

$$A1_{km} = \frac{\partial P_{km}}{\partial \theta_k} = g_T V_k (V_m \sin \theta_{km} - V_{SC} \sin \theta_{k\beta}) - b_T V_k (V_m \cos \theta_{km} + V_{SC} \cos \theta_{k\beta}) \quad (87)$$

$$A2_{km} = \frac{\partial P_{km}}{\partial V_k} = 2g_T V_k - g_T V_m \cos \theta_{km} + g_T V_{SC} \cos \theta_{k\beta} - b_T V_m \sin \theta_{km} + b_T V_{SC} \sin \theta_{k\beta} \quad (88)$$

$$A3_{km} = \frac{\partial P_{km}}{\partial \theta_m} = -g_T V_k V_m \sin \theta_{km} + b_T V_k V_m \cos \theta_{km} \quad (89)$$

$$A4_{km} = \frac{\partial P_{km}}{\partial V_m} = -g_T V_k \cos \theta_{km} - b_T V_k \sin \theta_{km} \quad (90)$$

$$A5_{km} = \frac{\partial P_{km}}{\partial \beta} = g_T V_k V_{SC} \sin \theta_{k\beta} - b_T V_k V_{SC} \cos \theta_{k\beta} \quad (91)$$

$$A6_{km} = \frac{\partial P_{km}}{\partial V_{SC}} = g_T V_k \cos \theta_{k\beta} + b_T V_k \sin \theta_{k\beta} \quad (92)$$

$$\Delta Q_{km} = R1_{km} \cdot \Delta \theta_k + R2_{km} \cdot \Delta V_k + R3_{km} \cdot \Delta \theta_m + R4_{km} \cdot \Delta V_m + R5_{km} \cdot \Delta \beta + R6_{km} \cdot \Delta V_{SC} \quad (93)$$

$$R1_{km} = \frac{\partial Q_{km}}{\partial \theta_k} = -g_T V_k (V_m \cos \theta_{km} - V_{SC} \cos \theta_{k\beta}) - b_T V_k (V_m \sin \theta_{km} - V_{SC} \sin \theta_{k\beta}) \quad (94)$$

$$R2_{km} = \frac{\partial Q_{km}}{\partial V_k} = -2V_k (b_T + b_{km}^{sh}) - V_m (g_T \sin \theta_{km} - b_T \cos \theta_{km}) + V_{SC} (g_T \sin \theta_{k\beta} - b_T \cos \theta_{k\beta}) \quad (95)$$

$$R3_{km} = \frac{\partial Q_{km}}{\partial \theta_m} = -g_T V_k V_m \cos \theta_{km} + b_T V_k V_m \sin \theta_{km} \quad (96)$$

$$R4_{km} = \frac{\partial Q_{km}}{\partial V_m} = -g_T V_k \sin \theta_{km} + b_T V_k \cos \theta_{km} \quad (97)$$

$$R5_{km} = \frac{\partial Q_{km}}{\partial \beta} = -g_T V_k V_{SC} \cos \theta_{k\beta} - b_T V_k V_{SC} \sin \theta_{k\beta} \quad (98)$$

$$R6_{km} = \frac{\partial Q_{km}}{\partial V_{SC}} = g_T V_k \sin \theta_{k\beta} - b_T V_k \cos \theta_{k\beta} \quad (99)$$

Analogamente, tem-se a linearização da potência ativa e reativa da barra m em direção a barra k .

$$\Delta P_{mk} = A1_{mk} \cdot \Delta \theta_k + A2_{mk} \cdot \Delta V_k + A3_{mk} \cdot \Delta \theta_m + A4_{mk} \cdot \Delta V_m + A5_{mk} \cdot \Delta \beta + A6_{mk} \cdot \Delta V_{SC} \quad (100)$$

$$A1_{mk} = \frac{\partial P_{mk}}{\partial \theta_k} = -g_T V_m V_k \sin \theta_{mk} + b_T V_m V_k \cos \theta_{mk} \quad (101)$$

$$A2_{mk} = \frac{\partial P_{mk}}{\partial V_k} = -g_T V_m \cos \theta_{mk} - b_T V_m \sin \theta_{mk} \quad (102)$$

$$A3_{mk} = \frac{\partial P_{mk}}{\partial \theta_m} = g_T V_m (V_k \sin \theta_{mk} + V_{SC} \sin \theta_{m\beta}) - b_T V_m (V_k \cos \theta_{mk} + V_{SC} \cos \theta_{m\beta}) \quad (103)$$

$$A4_{mk} = \frac{\partial P_{mk}}{\partial V_m} = 2g_T V_m - g_T V_k \cos \theta_{mk} - g_T V_{SC} \cos \theta_{m\beta} - b_T V_k \sin \theta_{mk} - b_T V_{SC} \sin \theta_{k\beta} \quad (104)$$

$$A5_{mk} = \frac{\partial P_{mk}}{\partial \beta} = -g_T V_m V_{SC} \sin \theta_{m\beta} + b_T V_m V_{SC} \cos \theta_{m\beta} \quad (105)$$

$$A6_{mk} = \frac{\partial P_{mk}}{\partial V_{SC}} = -g_T V_m \cos \theta_{m\beta} + b_T V_m \sin \theta_{m\beta} \quad (106)$$

$$\Delta Q_{mk} = R1_{mk} \cdot \Delta \theta_k + R2_{mk} \cdot \Delta V_k + R3_{mk} \cdot \Delta \theta_m + R4_{mk} \cdot \Delta V_m + R5_{mk} \cdot \Delta \beta + R6_{mk} \cdot \Delta V_{SC} \quad (107)$$

$$R1_{mk} = \frac{\partial Q_{mk}}{\partial \theta_k} = -g_T V_k (V_m \cos \theta_{mk} - V_{SC} \cos \theta_{k\beta}) - b_T V_k (V_m \sin \theta_{mk} - V_{SC} \sin \theta_{k\beta}) \quad (108)$$

$$R2_{mk} = \frac{\partial Q_{mk}}{\partial V_k} = -2V_k (b_T + b_{km}^{sh}) - g_T V_m \sin \theta_{mk} + g_T V_{SC} \sin \theta_{k\beta} + b_T V_m \cos \theta_{mk} - b_T V_{SC} \cos \theta_{k\beta} \quad (109)$$

$$R3_{mk} = \frac{\partial Q_{mk}}{\partial \theta_m} = -g_T V_m (V_k \cos \theta_{mk} + V_{SC} \cos \theta_{m\beta}) - b_T V_m (V_k \sin \theta_{mk} + V_{SC} \sin \theta_{m\beta}) \quad (110)$$

$$R4_{mk} = \frac{\partial Q_{mk}}{\partial V_m} = -2V_m (b_T + b_{km}^{sh}) - g_T V_k \sin \theta_{mk} - g_T V_{SC} \sin \theta_{m\beta} + b_T V_k \cos \theta_{mk} + b_T V_{SC} \cos \theta_{m\beta} \quad (111)$$

$$R5_{mk} = \frac{\partial Q_{mk}}{\partial \beta} = g_T V_m V_{SC} \cos \theta_{m\beta} + b_T V_m V_{SC} \sin \theta_{m\beta} \quad (112)$$

$$R6_{mk} = \frac{\partial Q_{mk}}{\partial V_{SC}} = -g_T V_m \sin \theta_{m\beta} + b_T V_m \cos \theta_{m\beta} \quad (113)$$

Dos coeficientes de sensibilidade de potência, são determinadas as derivadas de \dot{W}_P e \dot{V}_{SC} . Essas derivadas, descritas da equação (114) até (126) complementam a formação da Jacobiana.

$$\frac{\partial \dot{W}_P}{\partial \theta_k} = -\frac{A1_{km}}{T_{PI_{SC}}} \quad (114)$$

$$\frac{\partial \dot{W}_P}{\partial V_k} = -\frac{A2_{km}}{T_{PI_{SC}}} \quad (115)$$

$$\frac{\partial \dot{W}_P}{\partial \theta_m} = -\frac{A3_{km}}{T_{PI_{SC}}} \quad (116)$$

$$\frac{\partial \dot{W}_P}{\partial V_m} = -\frac{A4_{km}}{T_{PI_{SC}}} \quad (117)$$

$$\frac{\partial \dot{W}_P}{\partial \beta} = -\frac{A5_{km}}{T_{PI_{SC}}} \quad (118)$$

$$\frac{\partial \dot{W}_P}{\partial V_{SC}} = -\frac{A6_{km}}{T_{PI_{SC}}} \quad (119)$$

$$\frac{\partial \dot{V}_{SC}}{\partial \theta_k} = -\frac{K_{PI_{SC}} A1_{km}}{T_{SSSC}} \quad (120)$$

$$\frac{\partial \dot{V}_{SC}}{\partial V_k} = -\frac{K_{PI_{SC}} A2_{km}}{T_{SSSC}} \quad (121)$$

$$\frac{\partial \dot{V}_{SC}}{\partial \theta_m} = -\frac{K_{PI_{SC}} A3_{km}}{T_{SSSC}} \quad (122)$$

$$\frac{\partial \dot{V}_{SC}}{\partial V_m} = -\frac{K_{PI_{SC}} A4_{km}}{T_{SSSC}} \quad (123)$$

$$\frac{\partial \dot{V}_{SC}}{\partial \beta} = -\frac{K_{PI_{SC}} A5_{km}}{T_{SSSC}} \quad (124)$$

$$\frac{\partial \dot{V}_{SC}}{\partial V_{SC}} = -\frac{K_{PI_{SC}} A6_{km}}{T_{SSSC}} - \frac{1}{T_{SSSC}} \quad (125)$$

$$\frac{\partial \dot{V}_{SC}}{\partial W_P} = \frac{1}{T_{SSSC}} \quad (126)$$

A atuação do SSSC modifica a formação da Jacobiana, deve-se acrescentar as colunas correspondentes as grandezas do FACTS (V_{SC} , W_P e β), e linhas correspondentes as expressões de \dot{V}_{SC} , \dot{W}_P e PE_{SC} (135). Também o SSSC modifica as potências injetadas das barras extremas da LT em que se encontra instalado, anteriormente descritas como H_{FACTS} , M_{FACTS} , N_{FACTS} e L_{FACTS} . No caso do SSSC essas submatrizes não são tão esparsas como no caso do STATCOM, o que pode ser avaliado da representação detalhada da Jacobiana em (136), fator que garante ao dispositivo a possibilidade de controlar o fluxo de potência nesta LT.

$$H_{FACTS}(k, nf) = \frac{\partial P_k}{\partial \beta} = -g_T V_k V_{SC} \text{sen} \theta_{k\beta} + b_T V_k V_{ST} \text{cos} \theta_{k\beta} \quad (127)$$

$$H_{FACTS}(m, nf) = \frac{\partial P_m}{\partial \beta} = g_T V_m V_{SC} \text{sen} \theta_{m\beta} - b_T V_m V_{ST} \text{cos} \theta_{m\beta} \quad (128)$$

$$N_{FACTS}(k, nf) = \frac{\partial P_k}{\partial V_{SC}} = -g_T V_k \text{cos} \theta_{k\beta} - b_T V_k \text{sen} \theta_{k\beta} \quad (129)$$

$$N_{FACTS}(m, nf) = \frac{\partial P_m}{\partial V_{SC}} = g_T V_m \text{cos} \theta_{m\beta} + b_T V_m \text{sen} \theta_{m\beta} \quad (130)$$

$$M_{FACTS}(k, nf) = \frac{\partial Q_k}{\partial \beta} = g_T V_k V_{SC} \text{cos} \theta_{k\beta} + b_T V_k V_{SC} \text{sen} \theta_{k\beta} \quad (131)$$

$$M_{FACTS}(m, nf) = \frac{\partial Q_m}{\partial \beta} = -g_T V_m V_{SC} \text{cos} \theta_{m\beta} - b_T V_m V_{SC} \text{sen} \theta_{m\beta} \quad (132)$$

$$L_{FACTS}(k, nf) = \frac{\partial Q_k}{\partial V_{SC}} = -g_T V_k \text{sen} \theta_{k\beta} + b_T V_k \text{cos} \theta_{k\beta} \quad (133)$$

$$L_{FACTS}(m, nf) = \frac{\partial Q_m}{\partial V_{SC}} = g_T V_m \text{sen} \theta_{m\beta} - b_T V_m \text{cos} \theta_{m\beta} \quad (134)$$

$$Jac(\underline{x}^v) = \begin{bmatrix} H & N & H_{FACTS} & N_{FACTS} & 0 \\ M & L & M_{FACTS} & L_{FACTS} & 0 \\ \hline & & PE_{SC} \\ & & \dot{V}_{SC} \\ & & W_P \end{bmatrix} \quad (135)$$

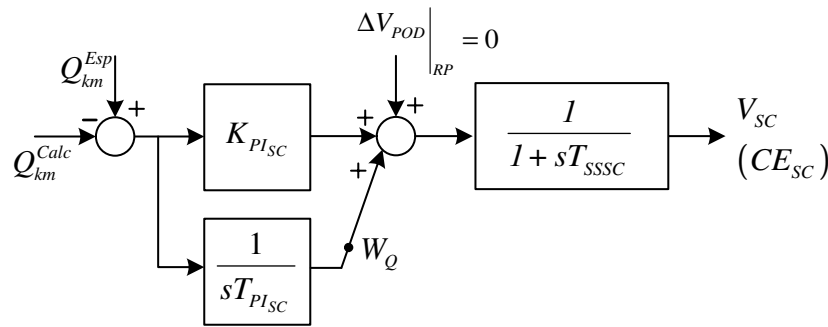
$$Jac(\underline{x}^v) = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_k}{\partial \theta_k} & \dots & \frac{\partial P_k}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_k}{\partial V_k} & \dots & \frac{\partial P_k}{\partial V_m} & \frac{\partial P_k}{\partial \beta} & \frac{\partial P_k}{\partial V_{SC}} & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial P_m}{\partial \theta_k} & \dots & \frac{\partial P_m}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_m}{\partial V_k} & \dots & \frac{\partial P_m}{\partial V_m} & \frac{\partial P_m}{\partial \beta} & \frac{\partial P_m}{\partial V_{SC}} & 0 \\ \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_k} & \dots & \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_m} & \frac{\partial Q_k}{\partial V_k} & \dots & \frac{\partial Q_k}{\partial V_m} & \frac{\partial Q_k}{\partial \beta} & \frac{\partial Q_k}{\partial V_{SC}} & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_k} & \dots & \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_m} & \frac{\partial Q_m}{\partial V_k} & \dots & \frac{\partial Q_m}{\partial V_m} & \frac{\partial Q_m}{\partial \beta} & \frac{\partial Q_m}{\partial V_{SC}} & 0 \\ \hline \frac{\partial PE_{SC}}{\partial \theta_k} & \dots & \frac{\partial PE_{SC}}{\partial \theta_m} & \frac{\partial PE_{SC}}{\partial V_k} & \dots & \frac{\partial PE_{SC}}{\partial V_m} & \frac{\partial PE_{SC}}{\partial \beta} & \frac{\partial PE_{SC}}{\partial V_{SC}} & 0 \\ \frac{\partial V_{SC}}{\partial \theta_k} & \dots & \frac{\partial V_{SC}}{\partial \theta_m} & \frac{\partial V_{SC}}{\partial V_k} & \dots & \frac{\partial V_{SC}}{\partial V_m} & \frac{\partial V_{SC}}{\partial \beta} & \frac{\partial V_{SC}}{\partial V_{SC}} & \frac{\partial V_{SC}}{\partial W_P} \\ \frac{\partial W_P}{\partial \theta_k} & \dots & \frac{\partial W_P}{\partial \theta_m} & \frac{\partial W_P}{\partial V_k} & \dots & \frac{\partial W_P}{\partial V_m} & \frac{\partial W_P}{\partial \beta} & \frac{\partial W_P}{\partial V_{SC}} & 0 \end{bmatrix} \quad (136)$$

No modelo proposto cada FACTS inserido ao SEP acrescenta três linhas e três colunas. A dimensão da matriz Jacobiana aumenta substancialmente, mas preserva todas as informações do sistema, e avalia simultaneamente a atuação de cada dispositivo.

3.3.2 Controle do fluxo de potência reativa com o SSSC

O SSSC pode controlar o fluxo de potência reativa em uma LT, de maneira similar a abordada na seção anterior, modificando as expressões de dinâmica do SSSC e o “controle especificado” CE com o *mismatch* de potência reativa ($CE_{SC} = Q_{km}^{Esp} - Q_{km}^{Calc}$). Na Figura 12 a malha de controle do SSSC considerando o controle de reativos.

Figura 12 - Diagrama de blocos do controle de potência reativa a partir do controlador PI.



Fonte: (VALLE, 2010), adaptado pelo autor.

$$W_Q = \frac{Q_{km}^{Esp} - Q_{km}^{Calc}}{s \cdot T_{PIsc}} \Rightarrow \dot{W}_Q = \frac{Q_{km}^{Esp} - Q_{km}^{Calc}}{T_{PIsc}} \quad (137)$$

$$V_{SC} = \frac{K_{PIsc} (Q_{km}^{Esp} - Q_{km}^{Calc}) + W_Q}{1 + sT_{SSSC}} \quad (138)$$

$$\dot{V}_{SC} = \frac{K_{PIsc} (Q_{km}^{Esp} - Q_{km}^{Calc})}{T_{SSSC}} + \frac{W_Q}{T_{SSSC}} - \frac{V_{SC}}{T_{SSSC}} \quad (139)$$

As derivadas de e são descritas nas equações (140) até (152).

$$\frac{\partial \dot{W}_Q}{\partial \theta_k} = -\frac{R1_{km}}{T_{PIsc}} \quad (140)$$

$$\frac{\partial \dot{W}_Q}{\partial V_k} = -\frac{R2_{km}}{T_{PIsc}} \quad (141)$$

$$\frac{\partial \dot{W}_Q}{\partial \theta_m} = -\frac{R3_{km}}{T_{PIsc}} \quad (142)$$

$$\frac{\partial \dot{W}_Q}{\partial V_m} = -\frac{R4_{km}}{T_{PIsc}} \quad (143)$$

$$\frac{\partial \dot{W}_Q}{\partial \beta} = -\frac{R5_{km}}{T_{PI_{SC}}} \quad (144)$$

$$\frac{\partial \dot{W}_Q}{\partial V_{SC}} = -\frac{R6_{km}}{T_{PI_{SC}}} \quad (145)$$

$$\frac{\partial \dot{V}_{SC}}{\partial \theta_k} = -\frac{K_{PI_{SC}} R1_{km}}{T_{SSSC}} \quad (146)$$

$$\frac{\partial \dot{V}_{SC}}{\partial V_k} = -\frac{K_{PI_{SC}} R2_{km}}{T_{SSSC}} \quad (147)$$

$$\frac{\partial \dot{V}_{SC}}{\partial \theta_m} = -\frac{K_{PI_{SC}} R3_{km}}{T_{SSSC}} \quad (148)$$

$$\frac{\partial \dot{V}_{SC}}{\partial \theta_m} = -\frac{K_{PI_{SC}} R4_{km}}{T_{SSSC}} \quad (149)$$

$$\frac{\partial \dot{V}_{SC}}{\partial \beta} = -\frac{K_{PI_{SC}} R5_{km}}{T_{SSSC}} \quad (150)$$

$$\frac{\partial \dot{V}_{SC}}{\partial V_{SC}} = -\frac{K_{PI_{SC}} R6_{km}}{T_{SSSC}} - \frac{1}{T_{SSSC}} \quad (151)$$

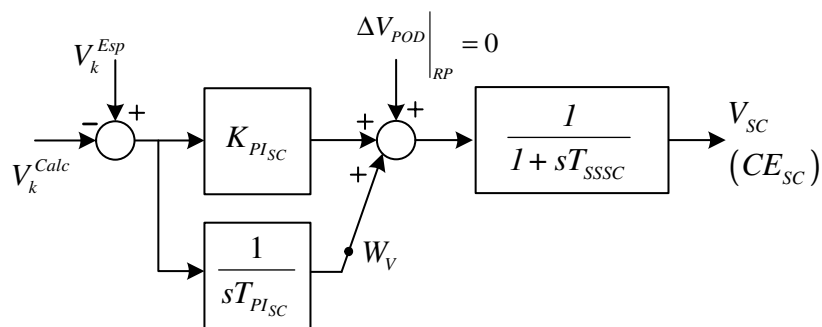
$$\frac{\partial \dot{V}_{SC}}{\partial W_Q} = \frac{1}{T_{SSSC}} \quad (152)$$

A regra de formação e disposição dos elementos segue a mesma regra de potência ativa, apresentada na seção 3.3.1.

3.3.3 Controle de tensão com o SSSC

O SSSC também é capaz de realizar o controle de tensão na barra inicial ou final de sua instalação, mas esse tipo de controle é melhor desempenhado por dispositivos ligados em derivação com a barra a ser controlada, como o STATCOM. A malha de controle do SSSC é semelhante a já desenvolvida na Figura 9, adaptada na Figura 13 a seguir para o SSSC.

Figura 13 - Sinal do controlador PI alimentando a malha de controle do SSSC.



Fonte: (VALLE, 2010), adaptada pelo autor.

As expressões da dinâmica do SSSC controlando tensão, e de “controle especificado” (CE) são as apresentadas em (153) e (155).

$$W_V = \frac{V_k^{Esp} - V_k^{Calc}}{s \cdot T_{PI_{SC}}} \Rightarrow \dot{W}_V = \frac{V_k^{Esp} - V_k^{Calc}}{T_{PI_{SC}}} \quad (153)$$

$$V_{SC} = \frac{K_{PI_{SC}} (V_k^{Esp} - V_k^{Calc}) + W_V}{1 + sT_{SSSC}} \quad (154)$$

$$\dot{V}_{SC} = \frac{K_{PI_{SC}} (V_k^{Esp} - V_k^{Calc})}{T_{SSSC}} + \frac{W_V}{T_{SSSC}} - \frac{V_{SC}}{T_{SSSC}} \quad (155)$$

Derivando as expressões de \dot{W}_V e \dot{V}_{SC} para a inserção na Jacobiana.

$$\frac{\partial \dot{W}_V}{\partial V_k} = -\frac{1}{T_{PI_{SC}}} \quad (156)$$

$$\frac{\partial \dot{V}_{SC}}{\partial V_k} = -\frac{K_{PI_{SC}}}{T_{SSSC}} \quad (157)$$

$$\frac{\partial \dot{V}_{SC}}{\partial V_{SC}} = -\frac{1}{T_{SSSC}} \quad (158)$$

$$\frac{\partial \dot{V}_{SC}}{\partial W_V} = \frac{1}{T_{SSSC}} \quad (159)$$

Comparando a quantidade de termos de sensibilidade obtidos para o controle de tensão, com os obtidos para potência, é clara a dificuldade do SSSC em controlar tensão, apesar de ter essa capacidade.

4 MODELO DE SENSIBILIDADE DE POTÊNCIA MULTIMÁQUINAS

Neste capítulo é desenvolvido o Modelo de Sensibilidade de Potência (MSP), para realizar as simulações dos transitórios do sistema elétrico de potência, frente à ocorrência de pequenas perturbações. A representação do SEP desenvolvida até aqui será utilizada, considerando o controle do fluxo de potência pelos FACTS STATCOM e SSSC.

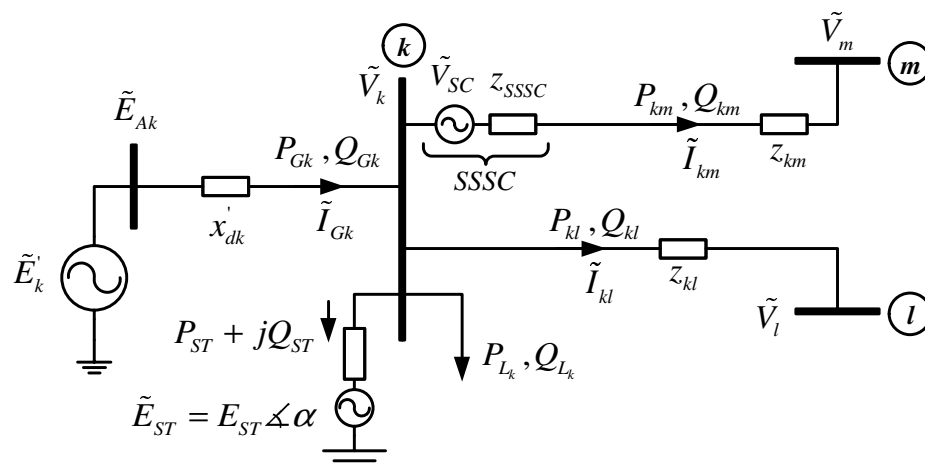
O MSP consiste no balanço de potência ativa e reativa em cada barra do sistema de potência, sendo satisfeito durante os transitórios e regime permanente. O resultado é um modelo linear representativo da dinâmica das máquinas geradoras. As perturbações adotadas serão de pequena intensidade, provocando pequenas variações em torno do ponto inicial de operação do sistema, obtidos a partir do resultado do fluxo de potência (DECKMANN; COSTA, 1994).

4.1 POTÊNCIA EM SISTEMAS MULTIMÁQUINAS

Para a realização do balanço de potência é necessário o cálculo das potências geradas pelas máquinas elétricas, modeladas aqui por geradores síncronos trifásicos de polos salientes, e do fluxo de potência nos elementos que compõem o sistema de transmissão.

Considerando um gerador síncrono conectado a uma barra genérica k do SEP, conforme diagrama unifilar da Figura 14, na qual \tilde{E}'_k é o fasor da tensão interna, x'_{dk} sua reatância transitória de eixo direto, \tilde{V}_k o fasor tensão terminal do gerador k representado pela barra k e \tilde{I}_{Gk} é a injeção de corrente do gerador à barra k .

Figura 14 - Diagrama unifilar do SEP com as potências geradas e transmitidas.



Fonte: (FURINI, 2011), adaptada pelo autor.

As potências ativa e reativa fornecidas pelo gerador k são obtidas através do cálculo da potência complexa conforme a equação (160).

$$\tilde{S}_{Gk} = \tilde{V}_k I_{Gk}^* = P_{Gk} + jQ_{Gk} \quad (160)$$

Manipulando os termos da equação (160), se obtêm as expressões de potências ativa e reativa geradas (equações (161) e (162))

$$P_{Gk} = \frac{E'_{qk} V_k \text{sen}(\delta_k - \theta_k)}{x'_{dk}} + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{x_{qk}} - \frac{1}{x'_{dk}} \right) V_k^2 \text{sen}2(\delta_k - \theta_k) \quad (161)$$

$$Q_{Gk} = \frac{E'_{qk} V_k \text{cos}(\delta_k - \theta_k)}{x'_{dk}} - \frac{V_k^2}{x'_{dk}} - \frac{V_k^2}{2} \left(\frac{1}{x_{qk}} - \frac{1}{x'_{dk}} \right) [1 - \text{cos}2(\delta_k - \theta_k)] \quad (162)$$

Admitindo-se pequenas variações em torno de um ponto de equilíbrio, as equações (161) e (162) são linearizadas, resultando nos coeficientes de sensibilidade de potência ativa para o gerador k ($A1_{Gk}$, $A2_{Gk}$, $A3_{Gk}$ e $A4_{Gk}$ - equações (163) até (167)) e os coeficientes reativos ($R1_{Gk}$, $R2_{Gk}$, $R3_{Gk}$ e $R4_{Gk}$ - equações (168) até (172)).

$$\Delta P_{Gk} = A1_{Gk} \Delta \delta_k + A2_{Gk} \Delta E'_{qk} + A3_{Gk} \Delta \theta_k + A4_{Gk} \Delta V_k \quad (163)$$

$$A1_{Gk} = \frac{\partial P_{Gk}}{\partial \delta_k} = \frac{E'_{qk} V_k \text{cos}(\delta_k - \theta_k)}{x'_{dk}} + V_k^2 \left(\frac{1}{x_{qk}} - \frac{1}{x'_{dk}} \right) \text{cos}2(\delta_k - \theta_k) \quad (164)$$

$$A2_{Gk} = \frac{\partial P_{Gk}}{\partial E'_{qk}} = \frac{V_k \text{sen}(\delta_k - \theta_k)}{x'_{dk}} \quad (165)$$

$$A3_{Gk} = \frac{\partial P_{Gk}}{\partial \theta_k} = -A1_{Gk} \quad (166)$$

$$A4_{Gk} = \frac{\partial P_{Gk}}{\partial V_k} = \frac{E'_{qk} \text{sen}(\delta_k - \theta_k)}{x'_{dk}} + V_k \left(\frac{1}{x_{qk}} - \frac{1}{x'_{dk}} \right) \text{sen}2(\delta_k - \theta_k) \quad (167)$$

$$\Delta Q_{Gk} = R1_{Gk} \Delta \delta_k + R2_{Gk} \Delta E'_{qk} + R3_{Gk} \Delta \theta_k + R4_{Gk} \Delta V_k \quad (168)$$

$$R1_{Gk} = \frac{\partial Q_{Gk}}{\partial \delta_k} = -\frac{E'_{qk} V_k \text{sen}(\delta_k - \theta_k)}{x'_{dk}} - V_k^2 \left(\frac{1}{x_{qk}} - \frac{1}{x'_{dk}} \right) \text{sen}2(\delta_k - \theta_k) \quad (169)$$

$$R2_{Gk} = \frac{\partial Q_{Gk}}{\partial E'_{qk}} = \frac{V_k \text{cos}(\delta_k - \theta_k)}{x'_{dk}} \quad (170)$$

$$R3_{Gk} = \frac{\partial Q_{Gk}}{\partial \theta_k} = -R1_{Gk} \quad (171)$$

$$R4_{Gk} = \frac{\partial Q_{Gk}}{\partial V_k} = \frac{E'_{qk} \text{cos}(\delta_k - \theta_k)}{x'_{dk}} - \frac{2V_k}{x'_{dk}} - V_k \left(\frac{1}{x_{qk}} - \frac{1}{x'_{dk}} \right) [1 - \text{cos}2(\delta_k - \theta_k)] \quad (172)$$

Na Figura 14, P_{kl} e Q_{kl} são as potências ativa e reativa transmitidas da barra k para a barra l , e P_{km} e Q_{km} as transmitidas de k para a barra m , neste último caso, com um dispositivo FACTS do tipo SSSC.

As expressões de fluxo já foram anteriormente definidas nas seções 3.1 e 2.3.1, para LT e para LT com SSSC, respectivamente.

Para obtenção dos coeficientes de sensibilidade do sistema de transmissão, as equações de fluxo de potência são linearizadas, analogamente ao realizado para as potências geradas. Se entre as barras houver uma LT comum, são linearizadas as expressões (25) e (27), se no caso, houver um SSSC, lineariza-se as expressões (10), (11), (15) e (16). De maneira geral:

$$\Delta P_{km} = A1_{km} \cdot \Delta \theta_k + A2_{km} \cdot \Delta V_k + A3_{km} \cdot \Delta \theta_m + A4_{km} \cdot \Delta V_m + A5_{km} \cdot \Delta \beta + A6_{km} \cdot \Delta V_{SC} \quad (173)$$

$$A1_{km} = \frac{\partial P_{km}}{\partial \theta_k} = g_{km} V_k V_m \text{sen} \theta_{km} - b_{km} V_k V_m \text{cos} \theta_{km} \quad (174)$$

$$A2_{km} = \frac{\partial P_{km}}{\partial V_k} = 2g_{km} V_k - g_{km} V_m \text{cos} \theta_{km} - b_{km} V_m \text{sen} \theta_{km} \quad (175)$$

$$A3_{km} = \frac{\partial P_{km}}{\partial \theta_m} = -g_{km} V_k V_m \text{sen} \theta_{km} + b_{km} V_k V_m \text{cos} \theta_{km} \quad (176)$$

$$A4_{km} = \frac{\partial P_{km}}{\partial V_m} = -g_{km} V_k \text{cos} \theta_{km} - b_{km} V_k \text{sen} \theta_{km} \quad (177)$$

$$A5_{km} = \frac{\partial P_{km}}{\partial \beta} = g_T V_k V_{SC} \text{sen} \theta_{k\beta} - b_T V_k V_{SC} \text{cos} \theta_{k\beta} \quad (178)$$

$$A6_{km} = \frac{\partial P_{km}}{\partial V_{SC}} = g_T V_k \text{cos} \theta_{k\beta} + b_T V_k \text{sen} \theta_{k\beta} \quad (179)$$

$$\Delta Q_{km} = R1_{km} \cdot \Delta \theta_k + R2_{km} \cdot \Delta V_k + R3_{km} \cdot \Delta \theta_m + R4_{km} \cdot \Delta V_m + R5_{km} \cdot \Delta \beta + R6_{km} \cdot \Delta V_{SC} \quad (180)$$

$$R1_{km} = \frac{\partial Q_{km}}{\partial \theta_k} = -g_{km} V_k V_m \text{cos} \theta_{km} - b_{km} V_k V_m \text{sen} \theta_{km} \quad (181)$$

$$R2_{km} = \frac{\partial Q_{km}}{\partial V_k} = -2V_k (b_{km} + b_{km}^{sh}) - g_{km} V_m \text{sen} \theta_{km} + b_{km} V_m \text{cos} \theta_{km} \quad (182)$$

$$R3_{km} = \frac{\partial Q_{km}}{\partial \theta_m} = g_{km} V_k V_m \text{cos} \theta_{km} + b_{km} V_k V_m \text{sen} \theta_{km} \quad (183)$$

$$R4_{km} = \frac{\partial Q_{km}}{\partial V_m} = -g_{km} V_k \text{sen} \theta_{km} + b_{km} V_k \text{cos} \theta_{km} \quad (184)$$

$$R5_{km} = \frac{\partial Q_{km}}{\partial \beta} = -g_T V_k V_{SC} \text{cos} \theta_{k\beta} - b_T V_k V_{SC} \text{sen} \theta_{k\beta} \quad (185)$$

$$R6_{km} = \frac{\partial Q_{km}}{\partial V_{SC}} = g_T V_k \text{sen} \theta_{k\beta} - b_T V_k \text{cos} \theta_{k\beta} \quad (186)$$

Nas últimas expressões $A5_{km}$, $A6_{km}$, $R5_{km}$ e $R6_{km}$ são não nulos se existir o SSSC, e nulos

caso seja uma LT típica. No caso do STATCOM, não são necessárias adaptações, já que o dispositivo não altera o fluxo de potência nas linhas conectadas à sua barra de instalação.

4.2 BALANÇO NODAL DE POTÊNCIA EM SISTEMAS MULTIMÁQUINAS

O conceito fundamental do MSP é o balanço de potência e todas as barras do sistema de potência. Considerando uma barra genérica k , conectada a outras duas barras l e m , conforme Figura 14, as variações das potências ativa e reativa geradas na barra k (P_{Gk} e Q_{Gk}) em torno do ponto de equilíbrio, devem ser iguais à somatória das variações dos fluxos ativo e reativo (P_{km} e Q_{km}) e (P_{kl} e Q_{kl}) nas linhas de transmissão $k - m$ e $k - l$. Generalizando este conceito pode-se escrever as expressões (187) e (188), em que Ω_k representa o conjunto de todas as barras conectadas à barra k (MONTICELLI, 1983; DECKMANN; COSTA, 1994).

$$\Delta P_{Gk} - \Delta P_{Lk} - \sum_{m \in \Omega_k} \Delta P_{km} = 0 \quad (187)$$

$$\Delta Q_{Gk} - \Delta Q_{Lk} - \sum_{m \in \Omega_k} \Delta Q_{km} = 0 \quad (188)$$

Se a barra possuir algum FACTS conectado, a expressão de balanço de potência será conforme (189) e (190), nas quais P_{FACTS} e Q_{FACTS} representam a parcela de potência trabalhada pelo FACTS aplicado.

$$\Delta P_{Gk} - \Delta P_{Lk} - \sum_{m \in \Omega_k} \Delta P_{km} - P_{FACTS} = 0 \quad (189)$$

$$\Delta Q_{Gk} - \Delta Q_{Lk} - \sum_{m \in \Omega_k} \Delta Q_{km} - Q_{FACTS} = 0 \quad (190)$$

4.3 EQUAÇÕES DE BALANÇO DO GERADOR SÍNCRONO

O comportamento eletromecânico de uma máquina síncrona é obtido a partir da equação de oscilação (*swing*), representada em (191) (KUNDUR, 1994; ANDERSON; FOUAD, 2003; SAUER; PAI, 1998). Esta equação permite determinar o deslocamento do ângulo interno do gerador, na aceleração ou desaceleração do rotor, frente às variações na potência ou torque mecânico (P_{Meck}) ou elétrico (P_{Gk}), e vice-versa.

$$M_{Gk} \frac{\partial^2 \delta_k}{\partial t^2} = P_{Meck} - P_{Gk} - D_{Gk} \frac{\partial \delta_k}{\partial t} \quad (191)$$

A equação de oscilação do gerador síncrono é uma equação diferencial de grau dois, que é decomposta em duas equações diferenciais de grau um, resultando em (192) e (193), que são as variações do ângulo interno (δ_k) e as variações da velocidade angular do rotor (ω_k), linearizadas

por expansão em série de Taylor.

$$\Delta\dot{\omega}_k = \frac{1}{M_{Gk}} (\Delta P_{Meck} - \Delta P_{Gk} - D_{Gk} \Delta\omega_k) \quad (192)$$

$$\Delta\dot{\delta}_k = \omega_0 \Delta\omega_k \quad (193)$$

Nas equações (192) e (193), ω_0 é a velocidade síncrona (377 rad/s), M_{Gk} ($= 2H_k$) é a inércia do bloco girante da máquina síncrona e D_{Gk} é o coeficiente de amortecimento inerente do sistema (KUNDUR, 1994; ANDERSON; FOUAD, 2003; SAUER; PAI, 1998).

4.4 TENSÃO INTERNA DO GERADOR SÍNCRONO

A variação da tensão interna do gerador síncrono é dada pela equação (194), sendo x_{dk} a reatância síncrona de eixo direto, E_{fdk} a tensão de campo do gerador síncrono e T'_{d0k} é a constante de tempo transitória de eixo direto em circuito aberto (KUNDUR, 1994; ANDERSON; FOUAD, 2003).

$$T'_{d0k} \dot{E}'_{qk} = E_{fdk} - [E'_{qk} + (x_{dk} - x'_{dk}) I_{dk}] \quad (194)$$

Linearizando a equação (194) e considerando pequenas variações em torno do ponto de equilíbrio, se obtém a equação (195), que depende das variações da corrente de eixo direto. Que se substituída resulta em (196) que é a expressão da tensão interna do gerador k .

$$T'_{d0k} \Delta\dot{E}'_{qk} = \left(\frac{\partial (T'_{d0k} \dot{E}'_{qk})}{\partial E_{fdk}} \right) \Delta E_{fdk} + \left(\frac{\partial (T'_{d0k} \dot{E}'_{qk})}{\partial E'_{qk}} \right) \Delta E'_{qk} + \left(\frac{\partial (T'_{d0k} \dot{E}'_{qk})}{\partial I_{dk}} \right) \Delta I_{dk} \quad (195)$$

$$T'_{d0k} \Delta\dot{E}'_{qk} = \Delta E_{fdk} - \frac{x_{dk}}{x'_{dk}} \Delta E'_{qk} + K_{Vk} \Delta V_k - K_{Ak} \Delta \delta_k + K_{Ak} \Delta \theta_k \quad (196)$$

No modelo de sensibilidade de potência, os coeficientes K_{Vk} e K_{Ak} são denominados de coeficientes de reação de armadura do gerador síncrono k . Essas constantes quantificam a desmagnetização do fluxo do rotor devido à reação de armadura, em uma parcela desmagnetizante rápida (dependente da defasagem elétrica θ_k), e da parcela desmagnetizante lenta (dependente da dinâmica do gerador síncrono δ_k) (DECKMANN; COSTA, 1994).

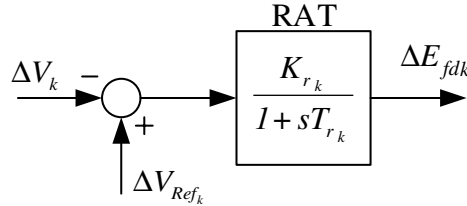
$$K_{Vk} = \frac{(x_{dk} - x'_{dk}) \cos(\delta_k - \theta_k)}{x'_{dk}} \quad (197)$$

$$K_{Ak} = \frac{(x_{dk} - x'_{dk}) V_k \sin(\delta_k - \theta_k)}{x'_{dk}} \quad (198)$$

4.5 TENSÃO DE CAMPO DO GERADOR SÍNCRONO

A tensão do enrolamento de campo (E_{fdk}) é ajustada por um sistema de excitação, conhecido como Regulador Automático de Tensão (RAT), que regula a magnitude da tensão terminal do gerador síncrono (V_k), próximo ao valor de referência especificada (V_{Refk}). Na Figura 15, o diagrama de blocos do RAT de rápida atuação (DEMELLO; CONCORDIA, 1969).

Figura 15 - Controlador do sistema de excitação do gerador síncrono.



Fonte: (ANDERSON; FOUAD, 2003), adaptada pelo autor.

Dentre os vários modelos de RAT, aqui será considerado o de primeira ordem, composto de um controlador do tipo Proporcional Integrador (PI) para atuação no valor de regime permanente, composto por elementos de eletrônica de potência (regular estático de rápida atuação), representado por um ganho K_{rk} e por uma constante de tempo T_{rk} , muito utilizado em estudos da estabilidade a pequenas perturbações (HEFFRON; PHILLIPS, 1952; DEMELLO; CONCORDIA, 1969).

Por inspeção do diagrama da Figura 15, se obtém em (199) a tensão de campo E_{fdk} .

$$E_{fdk} = \frac{K_{rk}}{1 + sT_{rk}} (V_{refk} - V_k) \Rightarrow \dot{E}_{fdk} = -\frac{E_{fdk}}{T_{rk}} + \frac{K_{rk}}{T_{rk}} (V_{refk} - V_k) \quad (199)$$

Linearizando (199) por expansão em série de Taylor, resulta em (200).

$$\Delta \dot{E}_{fdk} = -\frac{1}{T_{rk}} \Delta E_{fdk} + \frac{K_{rk}}{T_{rk}} \Delta V_{refk} - \frac{K_{rk}}{T_{rk}} \Delta V_k \quad (200)$$

4.6 REPRESENTAÇÃO DO SISTEMA MULTIMÁQUINAS PELO MSP

Agrupando as equações algébricas de potências, as diferenciais dos geradores, reguladores de tensão e controladores PI dos FACTS, na forma de espaço de estados, monta-se a representação (201), que preserva as informações de todos os elementos que compõem o sistema de potência.

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{x} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J1 & J2 \\ J3 & Jac \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B1 \\ B2 \end{bmatrix} [\Delta u] \quad (201)$$

As matrizes A e B são formadas manipulando matematicamente as submatrizes, conforme (202), resultando na representação em espaço de estados em (203).

$$\Delta \dot{x} = (J1 - J2 \times Jac^{-1} \times J3) \Delta x + (B1 - J2 \times Jac^{-1} \times B2) \Delta u \quad (202)$$

$$\Delta \dot{x} = A \Delta x + B \Delta u \quad (203)$$

$$\Delta y = C \Delta x + D \Delta u$$

Sendo A a matriz de estados, B a matriz de entradas, C a matriz de saída e D a matriz de transição. O vetor Δx (204) agrupa as variáveis de estado, Δu (205) o vetor de entradas, Δy (203) o vetor de saídas e finalmente Δz (206), que é o vetor de variáveis algébricas.

Do modelo equivalente, pode-se avaliar a dinâmica de todo o sistema de potência, frente a ocorrência de uma perturbação em um dos sinal de entrada, gerando as oscilações eletromecânicas (DECKMANN; COSTA, 1994).

$$\Delta x = \begin{bmatrix} [\Delta \omega_1 \dots \Delta \omega_{ng}] [\Delta \delta_1 \dots \Delta \delta_{ng}] [\Delta E'_{q1} \dots \Delta E'_{qng}] [\Delta E_{fd1} \dots \Delta E_{fdng}] \\ [\Delta V_{ST1} \dots \Delta V_{ST_{nf}}, \Delta V_{SC1} \dots \Delta V_{SC_{nf}}] [\Delta W_V \dots \Delta W_{2nf}] \end{bmatrix}^t \quad (204)$$

$$\Delta u = \begin{bmatrix} [\Delta P_{Mec1} \dots \Delta P_{Mecng}] [\Delta V_{ref1} \dots \Delta V_{refng}] [\Delta P_{L1} \dots \Delta P_{Lnb}] [\Delta Q_{L1} \dots \Delta Q_{Lnb}] \end{bmatrix}^t \quad (205)$$

$$\Delta z = \begin{bmatrix} [\Delta \theta_1 \dots \Delta \theta_{nb}] [\Delta V_1 \dots \Delta V_{nb}] [\Delta \alpha_1 \dots \Delta \alpha_n, \Delta \beta_1 \dots \Delta \beta_n] \end{bmatrix}^t \quad (206)$$

As variáveis anteriores multiplicam as submatrizes $J1$, $J2$, $J3$, Jac , $B1$ e $B2$, que resultarão na representação de estados, mas para tal, considere um sistema multimáquinas constituído de ng geradores e nb barras, um STATCOM controlando tensão, e um SSSC controlando o fluxo de potência ativa, conforme descrito nas submatrizes a seguir.

Na matriz (207) cada elemento representado por $[D_G]$, $[M_G]$, $[A1_G]$, $[K_A]$ etc. representam uma matriz diagonal e os elementos que compõem a diagonal principal são os dados individuais de cada gerador (por exemplo, o elemento $M_{G(k \times k)}$, é o momento de inércia do gerador k , presente na linha e coluna k da matriz $[M_G]$).

$$J1 = \begin{bmatrix} -\frac{[D_G]}{[M_G]} & -\frac{[A1_G]}{[M_G]} & -\frac{[A2_G]}{[M_G]} & [0]_{ng \times ng} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ [w_0] & [0]_{ng \times ng} & [0]_{ng \times ng} & [0]_{ng \times ng} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ [0]_{ng \times ng} & -\frac{[K_A]}{[T'_{d0}]} & -\frac{[x_d]}{[x'_d][T'_{d0}]} & [T'_{d0}]^{-1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ [0]_{ng \times ng} & [0]_{ng \times ng} & [0]_{ng \times ng} & -[T_r]^{-1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial \dot{V}_{ST}}{\partial V_{ST}} & 0 & \frac{\partial \dot{V}_{ST}}{\partial W_V} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial \dot{V}_{SC}}{\partial V_{SC}} & 0 & \frac{\partial \dot{V}_{SC}}{\partial W_P} \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial \dot{W}_P}{\partial V_{SC}} & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (207)$$

$$J2 = \begin{bmatrix} -\frac{[A3_G]}{[M_G]} & [0]_{ng \times nb-ng} & -\frac{[A4_G]}{[M_G]} & [0]_{ng \times nb-ng} & 0 & 0 \\ [0]_{ng \times ng} & [0]_{ng \times nb-ng} & [0]_{ng \times ng} & [0]_{ng \times nb-ng} & 0 & 0 \\ \frac{[K_A]}{[T'_{d0}]} & [0]_{ng \times nb-ng} & \frac{[K_V]}{[T'_{d0}]} & [0]_{ng \times nb-ng} & 0 & 0 \\ [0]_{ng \times ng} & [0]_{ng \times nb-ng} & -\frac{[K_r]}{[T_r]} & [0]_{ng \times nb-ng} & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & \frac{\partial \dot{V}_{ST}}{\partial V_k} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\partial \dot{V}_{SC}}{\partial \theta_k} & \frac{\partial \dot{V}_{SC}}{\partial \theta_m} & \frac{\partial \dot{V}_{SC}}{\partial V_k} & \frac{\partial \dot{V}_{SC}}{\partial V_m} & 0 & \frac{\partial \dot{V}_{SC}}{\partial \beta_k} \\ \hline 0 & 0 & \frac{\partial \dot{W}_V}{\partial V_k} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\partial \dot{W}_P}{\partial \theta_k} & \frac{\partial \dot{W}_P}{\partial \theta_m} & \frac{\partial \dot{W}_P}{\partial V_k} & \frac{\partial \dot{W}_P}{\partial V_m} & 0 & \frac{\partial \dot{W}_P}{\partial \beta} \end{bmatrix} \quad (208)$$

Em $J1$ e $J2$, os elementos acima da linha contínua correspondem as expressões originais do MSP, conforme proposto por Deckmann e Costa (1994). Abaixo da linha contínua a linearização das expressões de tensão do STATCOM e SSSC, respectivamente, e abaixo da linha tracejada, as expressões linearizadas de W , com o STATCOM controlando tensão e SSSC controlando potência ativa.

Na matriz $J3$ as expressões relativas ao balanço de potência do MSP, com os termos que ponderam as variáveis algébricas (rápida variação). Os termos acima da linha horizontal pontilhada correspondem ao balanço de potência ativa, enquanto que abaixo da linha pontilhada, ao balanço de reativos das nb barras.

$$J3 = \begin{bmatrix} [0]_{ng \times ng} & [A1_G] & [A2_G] & [0]_{ng \times ng} & [N_{FACTS}]_{nb \times nf} \\ [0]_{nb-ng \times ng} & [0]_{nb-ng \times ng} & [0]_{nb-ng \times ng} & [0]_{nb-ng \times ng} & \dots \\ \hline [0]_{ng \times ng} & [R1_G] & [R2_G] & [0]_{ng \times ng} & [L_{FACTS}]_{nb \times nf} \\ [0]_{nb-ng \times ng} & [0]_{nb-ng \times ng} & [0]_{nb-ng \times ng} & [0]_{nb-ng \times ng} & \dots \\ \hline [0]_{nf \times ng} & [0]_{nf \times ng} & [0]_{nf \times ng} & [0]_{nf \times ng} & \frac{\partial PE_{ST}}{\partial \alpha} & [0]_{nf \times ng} \\ [0]_{nf \times ng} & [0]_{nf \times ng} & [0]_{nf \times ng} & [0]_{nf \times ng} & [0]_{nf \times ng} & \frac{\partial PE_{SC}}{\partial \beta} \end{bmatrix} \quad (209)$$

A matriz Jacobiana é a calculada no fluxo de potência anteriormente, já com a inclusão dos FACTS ativos, mas as linhas e colunas correspondentes as magnitudes de tensão e ângulo dos FACTS devem ser removidas da formulação inicial da Jacobiana, já que esses elementos fazem parte das submatrizes $J1$ e $J2$. Para finalizar as submatrizes $B1$ e $B2$.

$$B1 = \begin{bmatrix} [M_G]^{-1} & [0]_{ng \times ng} & [0]_{ng \times nb} & [0]_{ng \times nb} & [0]_{ng \times nf} \\ [0]_{ng \times ng} & [0]_{ng \times ng} & [0]_{ng \times nb} & [0]_{ng \times nb} & [0]_{ng \times nf} \\ [0]_{ng \times ng} & [0]_{ng \times ng} & [0]_{ng \times nb} & [0]_{ng \times nb} & [0]_{ng \times nf} \\ [0]_{ng \times ng} & [K_r] [T_r]^{-1} & [0]_{ng \times nb} & [0]_{ng \times nb} & [0]_{ng \times nf} \\ \hline [0]_{nf \times ng} & [0]_{nf \times ng} & [0]_{nf \times nb} & [0]_{nf \times nb} & [0]_{nf \times nf} \\ [0]_{nf \times ng} & [0]_{nf \times ng} & [0]_{nf \times nb} & [0]_{nf \times nb} & [0]_{nf \times nf} \end{bmatrix} \quad (210)$$

$$B2 = \left[\begin{array}{cccc} [0]_{nb \times ng} & [0]_{nb \times ng} & [diag(-1)]_{nb \times nb} & [0]_{nb \times nb} \\ [0]_{nb \times ng} & [0]_{nb \times ng} & [0]_{nb \times nb} & [diag(-1)]_{nb \times nb} \\ [0]_{nf \times ng} & [0]_{nf \times ng} & [0]_{nf \times nb} & [0]_{nf \times nb} \end{array} \right] \quad (211)$$

Os elementos acima da linha contínua nas equações (210) correspondem as expressões dinâmicas das do sinal de entrada do gerador, enquanto que abaixo, as expressões linearizadas de tensão do STATCOM e SSSC, respectivamente, e abaixo da linha tracejada, as expressões linearizadas de W , com o STATCOM controlando tensão e SSSC controlando potência ativa.

Na equação (211) os termos acima da linha horizontal pontilhada correspondem ao balanço de potência ativa, e abaixo, o balanço de reativos, similar à $J3$.

A implementação computacional destas equações permite o estudo da estabilidade de um sistema multimáquinas, considerando a atuação simultânea de dispositivos FACTS controlando o fluxo de potência.

No próximo capítulo são desenvolvidos controladores aplicados aos geradores e FACTS, para melhorar a estabilidade do SEP.

5 CONTROLADORES DE SISTEMAS DE POTÊNCIA E SEUS AJUSTES

Neste capítulo são equacionados controladores ESP (Estabilizador de Sistema de Potência) a serem aplicados ao circuito de excitação dos geradores, e controladores POD (*Power Oscillation Damping*) atuando na magnitude de tensão dos dispositivos FACTS. A partir da estrutura dos controladores, desenvolve-se expressões, que são inseridas nas matrizes do MSP.

Para determinar a localização dos FACTS é aplicada a técnica dos resíduos, e para o ajuste dos controladores é aplicada a técnica PSO (*Particle Swarm Optimization*), que simultaneamente determina os parâmetros de todos os controladores presentes no SEP.

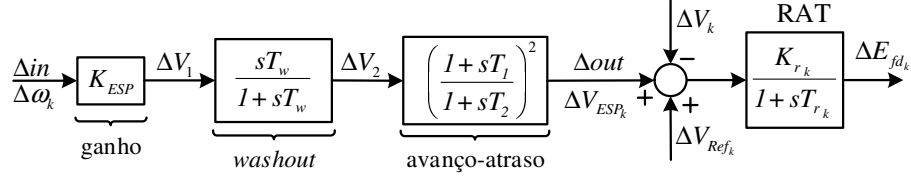
5.1 ESTABILIZADOR DO SISTEMA DE POTÊNCIA - ESP

O ESP, também conhecido como PSS (do inglês *Power System Stabilizer*), atua no sistema de excitação dos geradores. A alimentação do enrolamento de campo em CC, é inserido um sinal suplementar, este sinal é ajustado em magnitude e fase, forçando à indução de correntes na armadura que minimizam as amplitudes das correntes geradas pelas oscilações eletromecânicas (CAI; ERLICH, 2003; LARSEN; SWANN, 1981; ANDERSON; FOUAD, 2003).

Das diferentes topologias aplicadas ao ESP, neste trabalho opta-se pela aplicação do ESP convencional, de única entrada. Outras topologias envolvem ESP com dois ou mais sinais de entrada, e o ESP multibanda, que a partir de várias entradas atuante em diferentes bandas de frequência, gera individualmente como sinal de saída o somatório dos sinais modulados (MOEINI; KAMWA, 2016).

Tipicamente são utilizados, como sinal de entrada do ESP, a variação da velocidade angular do rotor ($\Delta\omega$), a variação da frequência (Δf) e as variações de potência ativa (ΔP_G). Neste trabalho o sinal de entrada é a variação da velocidade do gerador k , em que o ESP se encontra instalado ($\Delta\omega_k$).

Devido aos atrasos intrínsecos do circuito de campo do gerador e da eletrônica do sistema de excitação, o sinal de entrada deve ter a fase corrigida pelos blocos de avanço e atraso, para que o sinal suplementar esteja necessariamente em anti-fase as oscilações eletromecânicas. O diagrama de blocos do ESP convencional é ilustrado na Figura 16.

Figura 16 - Diagrama de blocos do ESP convencional, aplicado a excitação do gerador k .

Fonte: (LARSEN; SWANN, 1981), adaptada pelo autor.

A modelagem do ESP, é realizada inspecionando a Figura 16. O equacionamento resultante, conforme as expressões (212), (213) e (214), permite a inclusão do ESP no MSP.

$$\Delta \dot{V}_1 = K_{ESP} \Delta \dot{\omega}_k - \frac{1}{T_w} \Delta V_1 \quad (212)$$

$$\Delta \dot{V}_2 = \frac{T_1}{T_2} \Delta \dot{V}_1 + \frac{1}{T_2} \Delta V_1 - \frac{1}{T_2} \Delta V_2 \quad (213)$$

$$\Delta \dot{V}_{ESP} = \frac{T_1}{T_2^2} \Delta V_2 + \frac{T_1}{T_2} \Delta \dot{V}_2 - \frac{1}{T_2} \Delta V_{ESP} \quad (214)$$

O sinal do ESP é dependente da aceleração angular do gerador, definida em (192), por sua vez, é dependente da potência ativa gerada (161). Fazendo as substituições necessárias, se obtém as expressões completas do ESP, conforme (215), (216) e (217).

$$\Delta \dot{V}_1 = -\frac{K_{ESP} D_{Gk}}{M_{Gk}} \Delta \omega_k - \frac{K_{ESPA1Gk}}{M_{Gk}} \Delta \delta_k - \frac{K_{ESPA2Gk}}{M_{Gk}} \Delta E'_{qk} - \frac{1}{T_w} \Delta V_{1k} + \frac{K_{ESPA3Gk}}{M_{Gk}} \Delta \theta_k - \frac{K_{ESPA4Gk}}{M_{Gk}} \Delta V_k + \frac{K_{ESP}}{M_{Gk}} \Delta P_{Mec_k} \quad (215)$$

$$\Delta \dot{V}_2 = -\frac{K_{ESP} D_{Gk} T_1}{M_{Gk} T_2} \Delta \omega_k - \frac{K_{ESPA1Gk} T_1}{M_{Gk} T_2} \Delta \delta_k - \frac{K_{ESPA2Gk} T_1}{M_{Gk} T_2} \Delta E'_{qk} - \left(\frac{1}{T_2} - \frac{T_1}{T_w T_2} \right) \Delta V_{1k} - \frac{1}{T_2} \Delta V_{2k} + \frac{K_{ESPA3Gk} T_1}{M_{Gk} T_2} \Delta \theta_k - \frac{K_{ESPA4Gk} T_1}{M_{Gk} T_2} \Delta V_k + \frac{K_{ESP} T_1}{M_{Gk} T_2} \Delta P_{Mec_k} \quad (216)$$

$$\Delta \dot{V}_{ESP} = -\frac{K_{ESP} D_{Gk} T_1^2}{M_{Gk} T_2^2} \Delta \omega_k - \frac{K_{ESPA1Gk} T_1^2}{M_{Gk} T_2^2} \Delta \delta_k - \frac{K_{ESPA2Gk} T_1^2}{M_{Gk} T_2^2} \Delta E'_{qk} - \left(1 - \frac{T_1}{T_w} \right) \frac{T_1}{T_2^2} \Delta V_{1k} + \left(1 - \frac{T_1}{T_2} \right) \frac{1}{T_2} \Delta V_{2k} - \frac{1}{T_2} \Delta V_{ESP} + \frac{K_{ESPA3Gk} T_1^2}{M_{Gk} T_2^2} \Delta \theta_k - \frac{K_{ESPA4Gk} T_1^2}{M_{Gk} T_2^2} \Delta V_k + \frac{K_{ESP} T_1^2}{M_{Gk} T_2^2} \Delta P_{Mec_k} \quad (217)$$

O sinal de saída do ESP é inserido na malha do regulador de tensão do gerador. Para o gerador k , que recebe o sinal suplementar do ESP, a expressão de tensão de campo (200), é adaptada para (218). A matriz $J1$ é modificada, para os geradores que tem o ESP ativo.

$$\Delta \dot{E}_{fdk} = \frac{K_{rk}}{T_{rk}} \Delta V_{ESP} - \frac{1}{T_{rk}} \Delta E_{fdk} + \frac{K_{rk}}{T_{rk}} \Delta V_{refk} - \frac{K_{rk}}{T_{rk}} \Delta V_k \quad (218)$$

5.2 POWER OSCILLATION DAMPING - POD

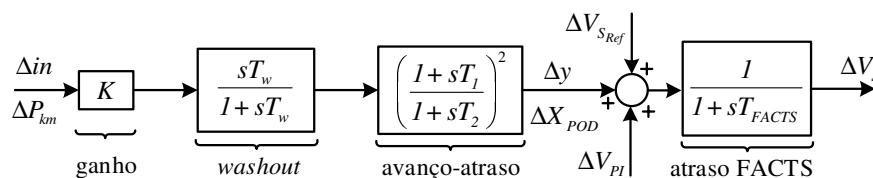
Os controladores ESP operam muito bem amortecendo os modos de oscilação local, caracterizados por oscilações entre geradores síncronos eletricamente próximos, isso porque minimizam as oscilações na armadura devido ao sinal suplementar acrescentado no enrolamento de campo (LARSEN; SWANN, 1981).

Para atenuar as oscilações que se propagam pelas interligações do SEP, por meio das linhas de transmissão, pode-se aplicar os dispositivos FACTS controlados por POD, que podem ser instalados em qualquer local do sistema de transmissão.

O conceito é similar ao do ESP, o FACTS troca potência ativa com a barra ou linha de transmissão em que se encontra instalado, gerando sinal em anti-fase com as oscilações, amortecendo a magnitude e/ou dificultando sua propagação aos demais elementos do SEP.

O objetivo do POD é controlar o FACTS à inserir um sinal (ΔV_S) modelado em amplitude e fase capaz de amortecer as oscilações, e para isso deve ser coerentemente ajustado. Constituído por blocos de avanço e atraso de fase, e de ganho para ajuste da magnitude, o POD é de estrutura similar ao ESP, a Figura 17 ilustra a estrutura do POD adotada (HUSSAIN; BEHERA, 1991).

Figura 17 - Diagrama de blocos do POD e da malha de controle do FACTS.



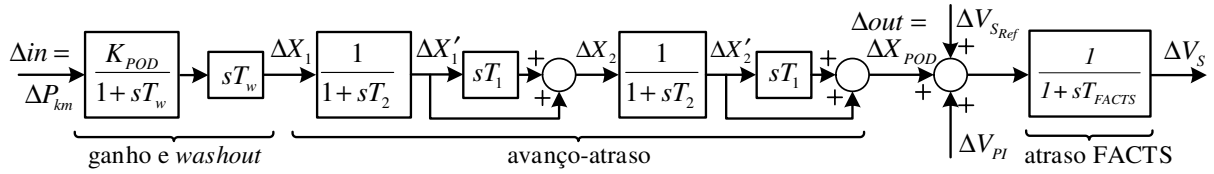
Fonte: (HUSSAIN; BEHERA, 1991), adaptada pelo autor.

O sinal adotado como entrada para o POD do SSSC é a variação da potência ativa (ΔP_{km}) da linha de transmissão em que se encontra instalado (86), já para o STATCOM, o sinal de entrada é a potência ativa de saída do STATCOM (linearização apresentada em (5)).

O bloco de *washout* filtra os sinais de frequências inferiores às das oscilações eletromecânicas, como as de variações de carga do sistema, e do governador/distribuidor da turbina do gerador síncrono. O sinal de saída do POD (ΔX_{POD}) é inserido na entrada da dinâmica do FACTS, já apresentada na Figura 9 para o STATCOM, e na Figura 11, 12 ou 13 para o SSSC. Durante os transitórios do sistema, o bloco de *washout* filtra as lentas variações de potência do controlador PI, e o sinal (ΔV_{PI}) é nulo no transitório.

Como o sinal de entrada do POD não é uma variável de estado, para facilitar a modelagem do POD faz-se o desmembramento dos blocos de *washout* e avanço-atraso, devido a integração desempenhada nestes blocos, conforme a Figura 18.

Figura 18 - Desmembramento do diagrama de blocos do POD.



Fonte: (FURINI; ARAUJO, 2008), adaptada pelo autor.

São obtidas as expressões que modelam o POD, sendo $\Delta X'_1$ e $\Delta X'_2$ um sinal interno do POD, entre etapas, sem qualquer significado físico. O equacionamento resultante permite a inclusão do POD no MSP.

$$\Delta \dot{X}'_1 = -\frac{1}{T_w} \Delta X'_1 + \frac{K_{POD}}{T_w} (A1_{km} \Delta \theta_k + A2_{km} \Delta V_k + A3_{km} \Delta \theta_m + A4_{km} \Delta V_m + A5_{km} \Delta \theta_S + A6_{km} \Delta V_S) \quad (219)$$

$$\Delta \dot{X}'_2 = -\frac{1}{T_2} \Delta X'_1 - \frac{1}{T_2} \Delta X'_2 + \frac{K_{POD}}{T_2} (A1_{km} \Delta \theta_k + A2_{km} \Delta V_k + A3_{km} \Delta \theta_m + A4_{km} \Delta V_m + A5_{km} \Delta \theta_S + A6_{km} \Delta V_S) \quad (220)$$

$$\Delta \dot{X}'_{POD} = -\frac{T_1}{T_2^2} \Delta X'_1 + \left(1 - \frac{T_1}{T_2}\right) \frac{1}{T_2} \Delta X'_2 - \frac{1}{T_2} \Delta X'_{POD} + \frac{K_{POD} T_1}{T_2^2} (A1_{km} \Delta \theta_k + A2_{km} \Delta V_k + A3_{km} \Delta \theta_m + A4_{km} \Delta V_m + A5_{km} \Delta \theta_S + A6_{km} \Delta V_S) \quad (221)$$

$$\Delta \dot{V}_S = \frac{T_1^2}{T_2^2 T_{FACTS}} \Delta X'_1 - \left(1 - \frac{T_1}{T_2}\right) \frac{T_1}{T_2 T_{FACTS}} \Delta X'_2 - \left(1 - \frac{T_1}{T_2}\right) \frac{1}{T_{FACTS}} \Delta X'_{POD} + \frac{1}{T_{FACTS}} \Delta V_{S_{Ref}} - \frac{K_{POD} T_1^2}{T_2^2 T_{FACTS}} (A1_{km} \Delta \theta_k + A2_{km} \Delta V_k + A3_{km} \Delta \theta_m + A4_{km} \Delta V_m + A5_{km} \Delta \theta_S) - \left(\frac{1}{T_{FACTS}} + \frac{K_{POD} A6_{km} T_1^2}{T_2^2 T_{FACTS}}\right) \Delta V_S \quad (222)$$

A presença do POD controlando o FACTS modifica a formação das matrizes do MSP. Para elucidar as adaptações do modelo, nas equações (223), (226), (227), (228) e (229), as submatrizes que integram a representação de estados de todo o sistema. Devido as dimensões das matrizes é considerado um FACTS SSSC controlado por POD, e um controlador ESP em um gerador, podendo o modelo ser expandido para n_f FACTS e n_{ESP} ativos.

$$J1 = \begin{bmatrix} \begin{array}{ccc|c|c} -\frac{[D_G]}{[M_G]} & -\frac{[A1_G]}{[M_G]} & -\frac{[A2_G]}{[M_G]} & [0]_{ng \times ng} & [0]_{ng \times 2nESP} & [0]_{ng \times 2nESP} \\ [0]_{ng \times ng} & [0]_{ng \times ng} & [0]_{ng \times ng} & [0]_{ng \times ng} & [0]_{ng \times 2nESP} & [0]_{ng \times 2nESP} \\ [0]_{ng \times ng} & -\frac{[K_A]}{[T'_{d0}]} & -\frac{[x_d]}{[T'_{d0}]} & \frac{1}{[T'_{d0}]} & [0]_{ng \times 2nESP} & [0]_{ng \times 2nESP} \\ [0]_{ng \times ng} & [0]_{ng \times ng} & [0]_{ng \times ng} & -\frac{1}{[T_r]} & [0]_{ng \times 2nESP} & \frac{[K_r]}{[T_r]} \end{array} & [0]_{4nf \times 4nf} & \\ \hline [0]_{4nf \times 4nESP} & J_{POD} & [0]_{4nf \times 4nESP} \\ \hline -\frac{K_{ESP}D_{Gk}}{M_{Gk}} & -\frac{K_{ESP}A1_{Gk}}{M_{Gk}} & -\frac{K_{ESP}A2_{Gk}}{M_{Gk}} & [0]_{nESP \times ng} & & \\ -\frac{K_{ESP}D_{Gk}T_1}{M_{Gk}T_2} & -\frac{K_{ESP}A1_{Gk}T_1}{M_{Gk}T_2} & -\frac{K_{ESP}A2_{Gk}T_1}{M_{Gk}T_2} & [0]_{nESP \times ng} & [0]_{3nESP \times 4nf} & J_{ESP} \\ -\frac{K_{ESP}D_{Gk}T_1^2}{M_{Gk}T_2^2} & -\frac{K_{ESP}A1_{Gk}T_1^2}{M_{Gk}T_2^2} & -\frac{K_{ESP}A2_{Gk}T_1^2}{M_{Gk}T_2^2} & [0]_{nESP \times ng} & & \end{bmatrix} \quad (223)$$

Em que:

$$J_{POD} = \begin{bmatrix} -\left(\frac{1}{T_{FACTS}} + \frac{K_{POD}A6_{km}T_1^2}{T_2^2 T_{FACTS}}\right) & \frac{T_1^2}{T_2^2 T_{FACTS}} & -\left(1 - \frac{T_1}{T_2}\right) \frac{T_1}{T_2 T_{FACTS}} & -\left(1 - \frac{T_1}{T_2}\right) \frac{1}{T_{FACTS}} \\ \frac{K_{POD}A6_{km}}{T_w} & -\frac{1}{T_w} & 0 & 0 \\ \frac{K_{POD}A6_{km}}{T_2} & -\frac{1}{T_2} & -\frac{1}{T_2} & 0 \\ \frac{K_{POD}A6_{km}T_1}{T_2^2} & -\frac{T_1}{T_2^2} & \left(1 - \frac{T_1}{T_2}\right) \frac{1}{T_2} & -\frac{1}{T_2} \end{bmatrix} \quad (224)$$

$$J_{ESP} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_w} & 0 & 0 \\ \left(1 - \frac{T_1}{T_w}\right) \frac{1}{T_2} & -\frac{1}{T_2} & 0 \\ \left(1 - \frac{T_1}{T_w}\right) \frac{T_1}{T_2^2} & \left(1 - \frac{T_1}{T_2}\right) \frac{1}{T_2} & -\frac{1}{T_2} \end{bmatrix} \quad (225)$$

Enquanto que as demais submatrizes da representação de estados do sistema resultam conforme (226) até (229).

$$J2 = \begin{bmatrix} \begin{array}{ccc|c|c} -\frac{[A3_G]}{[M_G]} & [0]_{ng \times nb-ng} & -\frac{[A4_G]}{[M_G]} & [0]_{ng \times nb-ng} & 0 \\ [0]_{ng \times ng} & [0]_{ng \times nb-ng} & [0]_{ng \times ng} & [0]_{ng \times nb-ng} & 0 \\ \frac{[K_A]}{[T'_{d0}]} & [0]_{ng \times nb-ng} & \frac{[K_V]}{[T'_{d0}]} & [0]_{ng \times nb-ng} & 0 \\ [0]_{ng \times ng} & [0]_{ng \times nb-ng} & -\frac{[K_r]}{[T_r]} & [0]_{ng \times nb-ng} & 0 \end{array} & \\ \hline -\frac{K_{POD}A1_{km}T_1^2}{T_2^2 T_{SSSC}} & -\frac{K_{POD}A3_{km}T_1^2}{T_2^2 T_{SSSC}} & -\frac{K_{POD}A2_{km}T_1^2}{T_2^2 T_{SSSC}} & -\frac{K_{POD}A4_{km}T_1^2}{T_2^2 T_{SSSC}} & -\frac{K_{POD}A5_{km}T_1^2}{T_2^2 T_{SSSC}} \\ \frac{K_{POD}A1_{km}}{T_w} & \frac{K_{POD}A3_{km}}{T_w} & \frac{K_{POD}A2_{km}}{T_w} & \frac{K_{POD}A4_{km}}{T_w} & \frac{K_{POD}A5_{km}}{T_w} \\ \frac{K_{POD}A1_{km}}{T_2} & \frac{K_{POD}A3_{km}}{T_2} & \frac{K_{POD}A2_{km}}{T_2} & \frac{K_{POD}A4_{km}}{T_2} & \frac{K_{POD}A5_{km}}{T_2} \\ \frac{K_{POD}A1_{km}T_1}{T_2^2} & \frac{K_{POD}A3_{km}T_1}{T_2^2} & \frac{K_{POD}A2_{km}T_1}{T_2^2} & \frac{K_{POD}A4_{km}T_1}{T_2^2} & \frac{K_{POD}A5_{km}T_1}{T_2^2} \\ \hline -\frac{K_{ESP}A3_{Gk}}{M_{Gk}} & [0]_{nESP \times nb-ng} & -\frac{K_{ESP}A4_{Gk}}{M_{Gk}} & [0]_{nESP \times nb-ng} & [0]_{nESP \times nf} \\ -\frac{K_{ESP}A3_{Gk}T_1}{M_{Gk}T_2} & [0]_{nESP \times nb-ng} & -\frac{K_{ESP}A4_{Gk}T_1}{M_{Gk}T_2} & [0]_{nESP \times nb-ng} & [0]_{nESP \times nf} \\ -\frac{K_{ESP}A3_{Gk}T_1^2}{M_{Gk}T_2^2} & [0]_{nESP \times nb-ng} & -\frac{K_{ESP}A4_{Gk}T_1^2}{M_{Gk}T_2^2} & [0]_{nESP \times nb-ng} & [0]_{nESP \times nf} \end{array} \quad (226)$$

$$J3 = \begin{bmatrix} [0]_{ng \times ng} & [A1_G] & [A2_G] & [0]_{ng \times ng} & [NFACTS]_{nb \times nf} \\ [0]_{nb-ng \times ng} & [0]_{nb-ng \times ng} & [0]_{nb-ng \times ng} & [0]_{nb-ng \times ng} & \\ \hline [0]_{ng \times ng} & [R1_G] & [R2_G] & [0]_{ng \times ng} & [LFACTS]_{nb \times nf} \\ [0]_{nb-ng \times ng} & [0]_{nb-ng \times ng} & [0]_{nb-ng \times ng} & [0]_{nb-ng \times ng} & \\ \hline [0]_{nf \times ng} & [0]_{nf \times ng} & [0]_{nf \times ng} & [0]_{nf \times ng} & \frac{\partial PE_{SC}}{\partial \beta} \end{bmatrix} \quad (227)$$

$$B1 = \begin{bmatrix} \frac{1}{[M_G]} & [0]_{ng \times ng} & [0]_{ng \times nb} & [0]_{ng \times nb} \\ [0]_{ng \times ng} & [0]_{ng \times ng} & [0]_{ng \times nb} & [0]_{ng \times nb} \\ [0]_{ng \times ng} & [0]_{ng \times ng} & [0]_{ng \times nb} & [0]_{ng \times nb} \\ [0]_{ng \times ng} & \begin{bmatrix} [K_r] \\ [T_r] \end{bmatrix} & [0]_{ng \times nb} & [0]_{ng \times nb} \\ \hline [0]_{2nf \times ng} & [0]_{2nf \times ng} & [0]_{2nf \times ng} & [0]_{2nf \times ng} \\ [0]_{2nf \times ng} & [0]_{2nf \times ng} & [0]_{2nf \times ng} & [0]_{2nf \times ng} \end{bmatrix} \quad (228)$$

$$B2 = \begin{bmatrix} [0]_{nb \times ng} & [0]_{nb \times ng} & [diag(-1)]_{nb \times nb} & [0]_{nb \times nb} & [0]_{nb \times nf} \\ [0]_{nb \times ng} & [0]_{nb \times ng} & [0]_{nb \times nb} & [diag(-1)]_{nb \times nb} & [0]_{nb \times nf} \\ \hline [0]_{nf \times ng} & [0]_{nf \times ng} & [0]_{nf \times nb} & [0]_{nf \times nb} & [0]_{nf \times nf} \end{bmatrix} \quad (229)$$

Agrupando as submatrizes anteriores, conforme equação (230).

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{x} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J1 & J2 \\ J3 & Jac \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B1 \\ B2 \end{bmatrix} [\Delta u] \quad (230)$$

Em que Δx , Δz e Δu são formadas conforme (231), (232) e (233).

$$\Delta x = [[\Delta \omega_1 \dots \Delta \omega_{ng}] [\Delta \delta_1 \dots \Delta \delta_{ng}] [\Delta E'_{q1} \dots \Delta E'_{qng}] [\Delta E_{fd1} \dots \Delta E_{fdng}] [\Delta V_{SC1}] [\Delta X'_1] [\Delta X'_2] [\Delta X'_{POD}] [\Delta V_1] [\Delta V_2] [\Delta V_{ESP}]]^t \quad (231)$$

$$\Delta u = [[\Delta P_{Mec1} \dots \Delta P_{Mecng}] [\Delta V_{ref1} \dots \Delta V_{refng}] [\Delta P_{L1} \dots \Delta P_{Lnb}] [\Delta Q_{L1} \dots \Delta Q_{Lnb}] [\Delta V_{S0}]]^t \quad (232)$$

$$\Delta z = [[\Delta \theta_1 \dots \Delta \theta_{nb}] [\Delta V_1 \dots \Delta V_{nb}] [\Delta \beta_1]]^t \quad (233)$$

Finalmente reduzindo a dimensão total da matriz, pela eliminação das linhas correspondentes as expressões algébricas (Δz), conforme (234), obtêm-se finalmente a representação de estados final (235).

$$\Delta \dot{x} = (J1 - J2 \times Jac^{-1} \times J3) \Delta x + (B1 - J2 \times Jac^{-1} \times B2) \Delta u \quad (234)$$

$$\Delta \dot{x} = A \Delta x + B \Delta u \quad (235)$$

5.3 FATORES DE PARTICIPAÇÃO

Da representação de estados do sistema (235), é possível a determinação dos fatores de participação (p_{ki}), que permitem quantificar a influência de uma variável de estado qualquer em específico modo oscilatório (λ_i), que pode ser calculado de acordo com a equação (236).

$$p_{ki} = \phi_{ki} \psi_{ik} \quad (236)$$

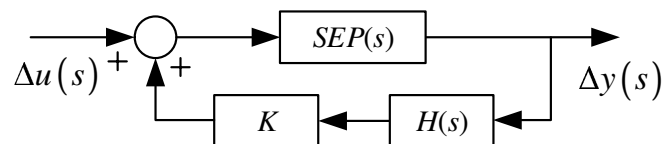
Onde ϕ_{ki} é o autovetor direito relativo à variável de estado k , enquanto que ψ_{ik} é o autovetor esquerdo relacionado ao modo oscilatório i , definindo assim a participação (p_{ki}) de uma variável de estado k na oscilação do modo i . O que permite definir qual dispositivo do SEP mais atua no surgimento do modos oscilante, e conseguinte, será o dispositivo que pode amortecer essas oscilações.

5.4 MÉTODO DOS RESÍDUOS

O método dos resíduos consiste em uma técnica de controle clássico, que permite o ajuste dos parâmetros dos controladores ESP e POD, a partir da compensação de fase e atribuição de ganho para atingir o amortecimento desejado (YANG; LIU; MCCALLEY, 1998).

Conforme Pagola, Perez-Arriaga e Verghese (1989) e Yang, Liu e McCalley (1998), os resíduos obtidos da função de transferência de malha aberta ($SEP(s)$ - Figura 19) entre o sinal de entrada e de saída do controlador, fornecem informações da controlabilidade de um modo oscilatório específico. Essas informações são uteis para ajustar os parâmetros do controlador e identificar uma boa localização para instalação dos FACTS e ESP.

Figura 19 - Diagrama de blocos representativo da função de transferência do SEP, com realimentação por controlador ESP ou POD.



Fonte: (FURINI, 2011), adaptada pelo autor.

A função de transferência de malha fechada $G(s)$ (237), representa a dinâmica de todo o SEP, obtida da representação de espaço de estados em (203) (YANG; LIU; MCCALLEY, 1998).

$$G(s) = \frac{\Delta y(s)}{\Delta u(s)} = C \frac{adj(sI - A)}{det(sI - A)} B + D \quad (237)$$

Em específico, a função de transferência $G_{jk}(s)$ referente ao j th sinal de entrada, em relação

ao k th sinal de saída, pode ser expresso em função dos resíduos e dos autovalores do sistema (λ_i), conforme (238).

$$G_{jk}(s) = \sum_{i=1}^n \frac{R_{ijk}}{(s - \lambda_i)} \quad (238)$$

Então pode-se calcular o resíduo (R_{ijp}) associado ao i th modo oscilante (autovalor λ_i), considerando o j th sinal de entrada do controlador, fornecendo a p th sinal de saída, conforme (239).

$$R_{ijp} = C_{jt}v_iB_p \quad (239)$$

O módulo do resíduo também pode ser obtido a partir da controlabilidade e observabilidade do controlador para determinados sinais de entrada e saída. Para o POD o sinal de entrada é ΔP_{km} , e ΔX_{POD} o sinal de saída. Em (240) t_i e v_i representam os autovetores direito e esquerdo associados ao autovalor i th, C_p é a p th linha da matriz C , e B_j a j th coluna de B . A regra de formação de B e C são descritas detalhadamente em (YANG; LIU; MCCALLEY, 1998), mas consideram as expressões linearizadas dos controladores e submatrizes $J3$, Jac e $B2$ descritas ao final da seção 4.6.

$$|R_{ijp}| = obsv_{ip} \cdot contr_{ij} = |C_p t_i| \cdot |v_i B_j| \quad (240)$$

Quanto maior o módulo do resíduo (240), melhor é a localização para instalação do controlador. Enquanto que, com o resíduo (239), pode-se determinar os parâmetros do controlador (K , T_1 e T_2), suficientes para deslocar um autovalor para a esquerda em um plano complexo, garantindo maior amortecimento ao correspondente modo oscilatório. Em (241) como o controlador desloca o autovalor com ajuste a partir dos resíduos.

$$\Delta \lambda_i = R_{ijp} \cdot CONTROL(\lambda_i) \quad (241)$$

Definindo $CONTROL$ como a função de transferência do controlador POD ou ESP que atua no autovalor λ_i , correspondente a um modo oscilatório de interesse.

Os parâmetros do controlador são obtidos a partir da especificação do amortecimento desejado (ξ_{des}), e consequente posição do autovalor ($\lambda_{i_{des}}$) correspondente ao modo oscilatório que se deseja amortecer.

O controlador atrasa ou adianta a fase do sinal de saída conforme o correspondente sinal de entrada, deslocando o autovalor no plano complexo. O sinal de entrada do POD é a variação do fluxo de potência ativa que flui pelo FACTS, ΔP_{ST} no caso do STATCOM e ΔP_{km} no caso do SSSC, definidos de forma genérica em (173), enquanto que para o ESP o sinal de entrada é a

variação de velocidade angular (192). A partir do conjunto de expressões descritas em (242), é possível determinar individualmente para o POD e ESP os parâmetros de ajuste.

$$\begin{aligned}
 \beta &= 180^\circ - \arg(R_{ijp}) \\
 K &= \left| \frac{\lambda_{ides} - \lambda_i}{R_{ijp} \cdot H(\lambda_i)} \right| \\
 \alpha &= \frac{T_2}{T_1} = \frac{1 - \sin(\beta/2)}{1 + \sin(\beta/2)} \quad \left| \quad \alpha = \frac{T_1}{T_2} = \frac{1 - \sin(\beta/2)}{1 + \sin(\beta/2)} \right. \\
 T_1 &= \frac{1}{\omega_i \sqrt{\alpha}} \quad \left. \begin{array}{l} ESP \\ POD \end{array} \right. \quad T_2 = \frac{1}{\omega_i \sqrt{\alpha}} \quad \left. \begin{array}{l} POD \\ ESP \end{array} \right.
 \end{aligned} \tag{242}$$

Apesar da existência de diferentes técnicas de ajustes de controladores, inclusive meta-heurísticas, técnicas coordenadas e de visão global do SEP, é apresentado um método clássico como os resíduos, por permitir avaliar como o tipo de controle de fluxo de potência exercido pelo FACTS pode influenciar nas oscilações eletromecânicas de baixa frequência.

5.5 PARTICLE SWARM OPTIMIZATION - PSO

Para ajuste dos controladores ESP e POD é sugerida a utilização do *Particle Swarm Optimization* (PSO). É um recurso atual, muito utilizado para a solução de problemas de ajuste, devido à sua robustez, estabilidade e rápida convergência (MONDAL; SENGUPTA, 2014).

Inicialmente proposto por Kennedy e Eberhart (1995), o PSO consiste em um algoritmo de busca baseado na inteligência de uma população formada por um grupo de partículas. Cada partícula representa um candidato à solução do problema, podendo ao final das iterações, ser um resultado descartável ou atingir a posição desejada.

Cada partícula i ocupa uma posição no espaço (x_i^t) na iteração t e se desloca pelo espaço (Δx_i^t), com saltos menores conforme mais próximo da melhor localização já atingida ou, dito de outra forma, quanto melhor for a solução propiciada pela partícula aos ajustes dos controladores. Em (243) a atualização da posição da partícula a cada iteração do processo.

$$x_i^{(t+1)} = x_i^t + \Delta x_i^{(t+1)} \tag{243}$$

Pela experiência individual e a capacidade de memória de cada partícula, é definida a região $Pbest(x_i)$ como a melhor localização que a partícula i já visitou, e se na próxima varredura (iteração) o resultado for superior, é atualiza a região $Pbest(x_i)$. A região $Gbest(x_g)$ corresponde à melhor localização atingida por uma partícula que pertencem ao enxame. Individualmente, a localização das partículas é atualizada aleatoriamente para novas regiões, mas partindo da posição $Pbest(x_i)$, direcionados pelo individuo g que atingiu a $Gbest(x_g)$ até então. Assim

as demais partículas do enxame são influenciadas a buscar regiões semelhantes (KENNEDY; EBERHART, 1995; CHANSAREEWITTAYA; JIRAPONG, 2014).

Os fatores de correção (fc) ponderam a influência de $Pbest(x_i)$ e $Gbest(x_g)$ na próxima busca/iteração, pois ponderam a melhor localização individual e a melhor localização global até o momento, isso garante o mimetismo do processo, e a atingir regiões que apresentam tendências de otimização de resposta.

Os proponentes do PSO, sugerem o uso de dois fatores de correção, fc_1 para ponderar $Pbest(x_i)$ e fc_2 para $Gbest(x_g)$, garantindo que a soma dos dois seja igual a quatro. Mas também sugerem pesquisas de possíveis valores ideais, devido as especificidades de cada aplicação. Alterar a razão entre fc_1 e fc_2 equivale a priorizar uma das respostas, para fc_1 a individual e para fc_2 a global (KENNEDY; EBERHART, 1995; MONDAL; SENGUPTA, 2014).

Para forçar o deslocamento das partículas, é calculado o deslocamento, conforme a posição anterior, imitando o elemento g ($Gbest$), ou sua própria melhor resposta ($Pbest$). O deslocamento é calculado a partir de (244).

$$\Delta x_i^{(t+1)} = \psi \cdot \Delta x_i^t + fc_1 \cdot rand \cdot (Pbest(x_i) - x_i^t) + fc_2 \cdot rand \cdot (Gbest(x_g) - x_i^t) \quad (244)$$

O termo *rand* de (244) determina a aleatoriedade de deslocamento das partículas no espaço e assume valores entre zero e um. O parâmetro ψ , chamado fator de inércia, é uma ponderação que possibilita as partículas explorarem regiões mais distantes, podendo atingir novos pontos “ótimo” quanto maior seu valor, pois maior será o salto da partícula na próxima iteração. Se ψ for pequeno a região de ação ficará limitada ao “ótimo” local, podendo não atingir o “ótimo” global. Caso seja muito elevado o fator de inércia, o salto poderá ser muito grande, levando a partícula para regiões impraticáveis, desenvolvendo inutilmente uma iteração, daí a importância de se adotar valores limites (KENNEDY; EBERHART, 1995).

Cada partícula i mantém consigo os parâmetros dos controladores, sejam, o ganho (k_h) e tempos (T_{1h} e T_{2h}) de ajuste do controlador genérico h (POD ou ESP), ativos no SEP. No caso o controlador h será ajustado com os parâmetros k , T_1 e T_2 , que corresponde a localização atingida pela partícula, que também carrega consigo, os vetores de deslocamento ($[\Delta x_i]$), a melhor posição local ($[x_L]$) e global ($[x_G]$) visitada por ela até o momento e os melhores resultados de $Pbest$ e $Gbest$. Em (245) a formação do vetor com todas as informações pertencentes a uma única partícula.

$$x_{ih}^t = [k_{ih}^t \ T_{1ih}^t \ T_{2ih}^t \ [\Delta x_i] \ [x_L] \ [x_G] \ Pbest \ Gbest] \quad (245)$$

Para manter o processo dentro de uma região factível são importantes os limites mínimos e máximos adotados para os parâmetros dos controladores, variáveis conforme a aplicação. Em estudos de estabilidade à pequenas perturbações, os ajustes de ganho e tempo ficam tipicamente

limitados aos valores descritos em (246).

$$\begin{aligned}
 k_{min} \leq k \leq k_{m\acute{a}x} &\Rightarrow 0 \leq k \leq 20 \\
 T_{1min} \leq T_1 \leq T_{1min} &\Rightarrow 0 \leq T_1 \leq 2 \\
 T_{2min} \leq T_2 \leq T_{2min} &\Rightarrow 0 \leq T_2 \leq 2
 \end{aligned}
 \tag{246}$$

Todo processo de busca do PSO depende das definições das funções objetivo (f_o), são os resultados destes objetivos que direcionam as partículas a regiões factíveis. Podem ser adotadas uma ou mais f_o .

Neste trabalho o principal objetivo da aplicação do PSO, é obter ajuste dos controladores que agregue amortecimento as oscilações eletromecânicas, por este motivo a f_o de $Gbest$ é o amortecimento dos autovalores oscilantes da matriz de estados A (ξ_i).

Cada partícula fornece os parâmetros de ajuste dos controladores, a partir da simulação teste do SEP, utilizando dos ajustes fornecidos pela partícula, calculando os autovalores da matriz de estados A (235). Se o sistema apresentar estabilidade (todos os autovalores com parte real negativa - primeiro método de Lyapunov) são calculados os amortecimentos dos modos oscilatórios, e ξ_i assume o valor de menor valor.

Se ξ_i é maior que na última iteração, as informações de k , T_1 e T_2 , são armazenadas em $Gbest$, e todas as partículas do enxame serão influenciadas a procurarem regiões semelhantes a visitada por $Gbest$ (KENNEDY; EBERHART, 1995).

O Algoritmo 1 descreve o processo de atualização de ξ_i e $Gbest$. O fator ξ_{des} é o amortecimento mínimo desejado para todos os modos oscilatórios presentes no SEP e σ_i representa a parte real dos autovalores ($\lambda_i = \sigma_i \pm j \cdot \omega_d$) da matriz de estados A . Neste trabalho, define-se um valor “pequeno” para ξ_{des} , e sempre que ξ_i o superar, o valor de ξ_{des} é incrementado, forçando o PSO a sempre buscar amortecimentos maiores.

Para reduzir o tempo de simulação, a $Gbest$ somente sofrerá atualização se o amortecimento atingido pela partícula superar a soma do amortecimento desejado com o amortecimento previamente atingido por $Gbest$, ou seja, $\xi_{des} = \xi_{des} + \xi_i(Gbest)$. Tal mudança acarreta em novas considerações a serem feitas. O ξ_{des} não deve ser de valor elevado, pois caso contrário a atualização de $Gbest$ poderá nunca ocorrer, principalmente nas primeiras iterações.

Também a f_o de $Gbest$ é atrativa na busca de “máximo” amortecimento, pois o valor desejado de amortecimento aumenta a cada iteração que $Gbest$ é atualizada. Neste caso o critério de parada é o número máximo de iterações permitidas.

Inicialmente foi adotada somente uma f_o para $Pbest(x_i)$, priorizando a movimentação individual da partícula com foco na localização dos autovalores sobre o eixo real negativo (amortecimento positivo), só dos modos oscilatórios presentes no SEP. Se as condições exigidas

Algoritmo 1: *fo* de *Gbest*

Início;

$t = 0$;

enquanto $t \leq t_{m\acute{a}x}$, **faça**

 calcular matriz A ;

 calcular autovalores de A ($\lambda_i = \sigma_i \pm j \cdot \omega_d$);

 verificar a estabilidade do SEP ;

se ($\sigma_i < 0$) **então**

 calcular $\xi_i = -\sigma_i / (\sigma_i^2 + \omega_d^2)$;

se $\xi_i > \xi_{des}$ **então**

$Gbest(x_g^{t+1}) = x_i^t$;

$\xi_{des} = \xi_{des} + \xi_i(Gbest)$;

senão

$Gbest(x_g^{t+1}) = Gbest(x_g^t)$

fim

fim

fim

por *fo* de *Pbest* forem satisfeitas, então a atual posição da partícula será a “melhor” localização. O Algoritmo 2 descreve este processo, com σ_i representando a parte real dos autovalores ($\lambda_i = \sigma_i \pm j \cdot \omega_d$) da matriz de estados A .

A posição somente será atualizada caso todos os autovalores tenham parte real negativa, assegurando a estabilidade do SEP no ponto de operação considerado. Essa *fo* é baseada no primeiro método de *Lyapunov* que garante a estabilidade se todos os autovalores estão localizados no semiplano esquerdo do plano complexo. O valor máximo para $\sigma_{des} = 0$, valores menores a este tendem a atingir maiores amortecimentos em SEP pequenos e de fácil estabilidade, mas dificilmente o PSO encontrará resultados factíveis em sistemas complexos.

Ambas as funções objetivos (*fo*) de $Pbest(x_i)$ e $Gbest(x_g)$ tem visão global do sistema, ajustando simultaneamente todos os controladores, mas só são atualizadas quando o SEP apresentar estabilidade com amortecimento superior ao desejado. Ao final do processo, espera-se que todos os autovalores estejam dentro das regiões de interesse (Figura 20) das duas funções objetivo ($\sigma_{des} < 0$ e $\xi_i > \xi_{des}$).

O critério de parada pode ser definido como a obtenção do amortecimento desejado (ξ_{des}) para todos os autovalores, somente aos de interesse, ou como foi adotado neste trabalho, um número máximo de iterações. Este critério é mais interessante, pois permite que o PSO busque valores “ótimos”, direcionando ao limite de amortecimento e estabilidade do SEP.

No trabalho é proposta uma modificação do PSO para ser aplicada aos SEP de maior complexidade (médio e grande porte). A técnica resultante foi chamada de PSOHC (*Particle Swarm Optimization with High Convergence*). A necessidade da modificação é devido à dificuldade de

Algoritmo 2: *fo* de *Pbest*

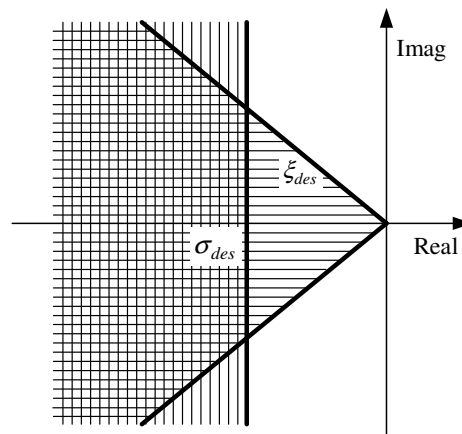
Início;

 $t = 0$;**enquanto** $t \leq t_{m\acute{a}x}$, **faça** calcular matriz *A*; calcular autovalores de *A* ($\lambda_i = \sigma_i \pm j \cdot \omega_d$);

verificar a estabilidade do SEP ;

se ($\sigma_i < 0$) **então** calcular $\xi_i = -\sigma_i / (\sigma_i^2 + \omega_d^2)$; **se** $\sigma_i < \sigma_{des}$ **então** $Pbest(x_i^{t+1}) = x_i^t$; $\sigma_{des} = \sigma_{des} + \sigma_i(Pbest)$; **senão** $Pbest(x_i^{t+1}) = Pbest(x_i^t)$ **fim** **fim****fim**

Figura 20 - Região desejada para os autovalores no plano complexo.



Fonte: elaborada pelo autor.

convergência do PSO original quando o sistema a ser controlado é mais complexo (maior número de controladores em consequência do maior número de modos oscilatórios).

5.6 PSO WITH HIGH CONVERGENCE - PSOHC

Na sua formulação original, o PSO atinge valores muito bons de ajustes de controladores e, conseqüentemente, SEP com oscilações bem amortecidas. Entretanto, existe diferença entre aplicar o PSO em sistemas de pequenas dimensões e em grandes sistemas de potência. Isso porque os sistemas de dimensão elevada, apresentam uma grande dificuldade de convergência, dependendo do grau de instabilidade natural apresentada pelo SEP e da quantidade de controladores necessários.

Visando reduzir os casos de simulação que não produzem resultados factíveis, uma modi-

ficação é proposta na estrutura principal do PSO, originando o PSOHC (*Particle Swarm Optimization with High Convergence*). Como o algoritmo depende fortemente da atualização das posições $Pbest$ e $Gbest$, o PSO pode ter dificuldade em atingir valores de ajustes que caracterizem o sistema como estável.

Enquanto $Pbest$ ou $Gbest$ não assumirem um resultado factível, o algoritmo continuará atribuindo randomicamente ajustes aos controladores. Nessa condição as partículas se movimentam aleatoriamente, sem qualquer indivíduo que possa servir de referencial para os outros, inibindo o mimetismo característico do PSO. Tal situação impossibilita atingir um resultado factível (PUPIN *et al.*, 2015; PUPIN; ARAUJO, 2017).

Com foco em SEP mais complexos, de difícil análise e controle, é proposta a inclusão de outra função objetivo, que seja de fácil atualização e ainda seja capaz de informar um “ótimo”.

A nova f_o atualizará a chamada $Pbest2$, baseada na média de amortecimentos dos modos oscilantes da matriz de estados A ($méd(\xi)$), independente do sistema ser ou não estável para os atuais parâmetros dos controladores.

Tal consideração eleva o processamento de todo o algoritmo PSO, mas apresenta melhor qualidade de convergência. Estão descritas no Algoritmo 3 os passos necessários para esta implementação.

Algoritmo 3: f_o de $Pbest2$

Início;

$t = 0$;

enquanto $t \leq t_{máx}$, **faça**

 calcular matriz A ;

 calcular autovalores de A ($\lambda_i = \sigma_i \pm j \cdot \omega_d$);

 calcular a média dos amortecimentos;

se $méd(\xi_i^t) > méd(\xi_{Pbest2})$ **então**

 | $Pbest2(x_i^{t+1}) = x_i^t$;

senão

 | $Pbest2(x_i^{t+1}) = Pbest2(x_i^t)$

fim

fim

A expressão de deslocamento apresentada em (239) é adaptada para comportar a nova f_o de $Pbest2$. Outras alterações são feitas em relação ao fator de correção fc_3 e aos valores randômicos. Na condição específica de usar o PSO para obtenção de ajuste de controladores em sistemas de difícil convergência (SEP de dimensão elevada e grande número de controladores), se nas primeiras iterações, não for atingido um possível valor que estabilize o sistema e conseqüentemente force a atualização de $Pbest$ e $Gbest$ originais, o PSO não convergirá. A adição de outra f_o pode prejudicar a obtenção do “ótimo” para as outras f_o , dessa forma o fator de

correção (fc_3) pode ser menor que os demais, reduzindo a participação deste termo na busca do “ótimo”. Importante salientar que não foi necessário alterar o valor de fc_3 nas simulações que foram realizadas, utilizando $fc_1 = fc_2 = fc_3 = 2,0$.

Outra proposta é alterar o intervalo de *rand* no termo que pondera fc_3 , podendo assumir também valores negativos. No caso do *software* MATLAB, o comando *randn* atribui valores randômicos que podem assumir valores negativos dentro do intervalo de $[-2,2]$, somente no termo da nova *fo* $Pbest2$, como em (247).

$$\Delta x_i^{(t+1)} = \psi \cdot \Delta x_i^t + fc_1 \cdot rand \cdot (Pbest1(x_i) - x_i^t) + fc_2 \cdot rand \cdot (Gbest(x_g) - x_i^t) + fc_3 \cdot randn \cdot (Pbest2(x_i) - x_i^t) \quad (247)$$

Desenvolvido o modelo de simulação do SEP, partindo da solução do fluxo de potência considerando os dispositivos FACTS, com os resultados do fluxo desenvolve-se o Modelo de Sensibilidade de Potência, considerando controlador ESP e POD ativos. Ao final pode-se avaliar a estabilidade do SEP ajustando os controladores pela técnica PSOHC e assim avaliar a influência transitória dos dispositivos instalados.

Na sequência do trabalho são simulados SEP testes e os resultados obtidos são apresentados e discutidos.

6 SIMULAÇÕES E RESULTADOS

Neste Capítulo, simulações computacionais em sistemas de potência teste são realizadas e os resultados obtidos apresentados e discutidos. Os comentários envolvem a aplicação de FACTS no controle do fluxo de potência, e a influência destes dispositivos na estabilidade do SEP, com foco nas oscilações eletromecânicas de baixa frequência.

As simulações são realizadas com o *software* MATLAB, por algoritmo desenvolvido pelo autor, utilizando da modelagem desenvolvida. O estudo da estabilidade é pelo primeiro método de *Lyapunov* (ANDERSON; FOUAD, 2003; KUNDUR, 1994). Com análises no domínio do tempo a partir de curvas, e da frequência, por meio dos autovalores da matriz de estados.

Ao todo três sistemas teste são simulados, o primeiro de pequena dimensão chamado de sistema *Stagg*. O segundo é chamado de sistema simétrico, também de pequenas dimensões, mas de arranjo específico, o outro sistema é considerado de grande dimensão, conhecido como Sistema New York.

6.1 SISTEMA STAGG

Para iniciar as simulações é adotado um sistema de pequenas dimensões, proposto por (STAGG; EL-ABIAD, 1968). Este sistema de dois geradores, cinco barras e quatro cargas, foi escolhido por facilitar a interpretação das mudanças advindas da aplicação dos dispositivos FACTS controlando o fluxo de potência. No caso base, com dados reproduzidos no Apêndice A, este SEP apresenta como resultado do fluxo de potência os dados da Tabela 1, sendo de 100 MVA a potência base.

Tabela 1 - Resultado do fluxo de potência do sistema Stagg em (pu) no caso base.

# Da Barra	# Para Barra	P_{km}	P_{mk}	Q_{km}	Q_{mk}
1	2	0,893	-0,868	0,740	-0,729
1	3	0,418	-0,403	0,168	-0,175
2	3	0,245	-0,241	-0,025	-0,004
2	4	0,277	-0,273	-0,017	-0,008
2	5	0,547	-0,534	0,056	-0,048
3	4	0,194	-0,193	0,029	-0,047
4	5	0,066	-0,066	0,005	-0,052

Fonte: Resultados obtidos pelo autor.

Enquanto que os fasores das tensões obtidos são apresentados na Tabela 2.

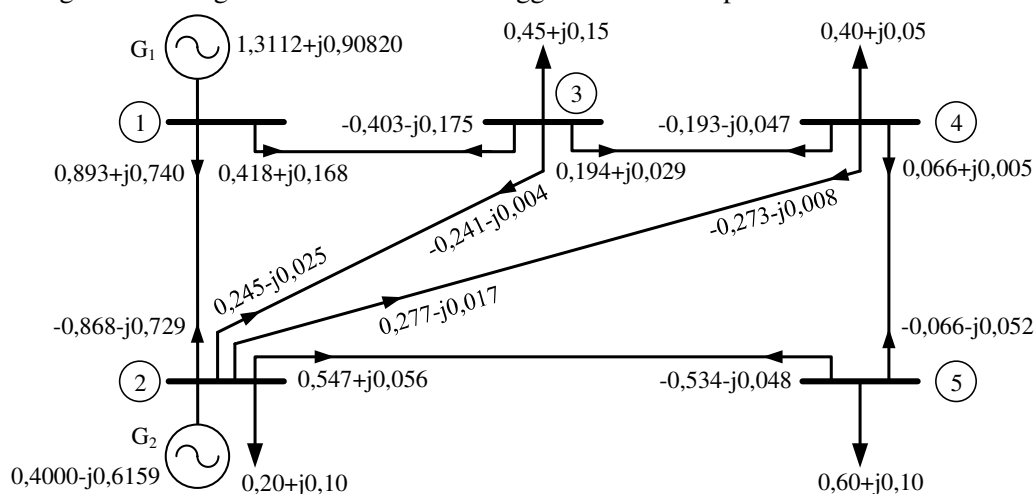
Tabela 2 - Resultado das tensões do sistema Stagg em (pu) no caso base.

Barra	Tensão
1	1,0600 / +0,0000°
2	1,0000 / -2,0612°
3	0,9872 / -4,6367°
4	0,9841 / -4,9570°
5	0,9717 / -5,7649°

Fonte: Resultados obtidos pelo autor.

Na Figura 21 é reproduzido o diagrama unifilar do SEP Stagg, com a representação dos fluxos de potência originais.

Figura 21 - Diagrama unifilar do SEP Stagg com fluxos de potência em seu caso base.



Fonte: (STAGG; EL-ABIAD, 1968), adaptada pelo autor.

Com os resultados do fluxo de potência, modela-se o sistema para a análise da estabilidade à pequenas perturbações. Na Tabela 3 constam todos os autovalores da matriz de estados A , considerando que nenhum controlador está atuando no SEP. E na Tabela 4 os modos oscilatórios de baixa frequência (autovalores dominantes) e suas frequências de oscilação (ω_n) e taxas de amortecimento (ξ) para a condição base.

Tabela 3 - Autovalores do sistema Stagg no caso base.

Autovalores
-987,7846
-997,5136
$-0,3490 \pm j9,5883$
-12,3880
-0,2759
-2,9030

Fonte: Resultados obtidos pelo autor.

Tabela 4 - Modos oscilatórios, frequências e coeficientes de amortecimento do SEP Stagg no caso base.

Modo	Autovalores	ω_n (Hz)	ξ (pu)
Local 1	$-0,3490 \pm j9,5883$	1,5270	0,0364

Fonte: Resultados obtidos pelo autor.

Analisando os valores das Tabelas 3 e 4 conclui-se que este SEP apresenta no ponto de operação original um modo oscilatório classificado como local ($0,8 < \omega_n < 2,0$ Hz), de parte real negativa, ou seja, pelo método de *Lyapunov*, é um modo oscilante estável. Como todos os autovalores da Tabela 3, têm parte real negativa, conclui-se pela estabilidade do SEP.

Originalmente o SEP Stagg não apresenta problemas de estabilidade, mas tem-se como objetivo avaliar a capacidade de controle do fluxo de potência exercida pelos dispositivos FACTS. Para completar o trabalho são apresentados os transitórios do SEP. São simuladas diferentes condições operacionais dos FACTS, para diferentes tipos de controle de fluxo.

6.1.1 Operação do STATCOM no Sistema Stagg

Considerando um dispositivo STATCOM instalado na barra de menor magnitude de tensão, no caso a barra 5 (Tabela 2), controlando a magnitude de tensão da barra 5 conforme os valores desejados, sendo eles de $\pm 2\%$ e $\pm 8\%$ do valor original de tensão ($V_5 = 0,9717$ pu). Das simulações se obtêm o fluxo de potência ativa (Tabela 5), e reativa (Tabela 6). Os fasores tensão das barras e do dispositivo STATCOM (Tabela 7), os parâmetros requeridos do STATCOM (Tabela 8), para que o valor especificado de tensão seja atingido, e por último os autovalores da matriz de estados A (Tabela 9 e Tabela 10), para análise da estabilidade do SEP.

Para as simulações adotou-se $Z_{ST} = 0,001 + j0,1$ pu, como a impedância equivalente do STATCOM, a dinâmica do STATCOM com $T_{STATCOM} = 0,001$, e para o controlador PI que regula o regime permanente do STATCOM o ganho de $K_{PI} = 1,0$ e o tempo de $T_{PI} = 0,01$. A tolerância adotada para solução do método de Newton é de 1μ .

Tabela 5 - Fluxos de potência ativa do SEP Stagg para controle de tensão da barra 5 com STATCOM.

de	para	Caso Base		Caso -8%		Caso -2%		Caso 0%		Caso +2%		Caso +8%	
		$V_5 = 0,9717$		$V_{-8\%} = 0,8940$		$V_{-2\%} = 0,9523$		$V_{0\%} = 0,9717$		$V_{+2\%} = 0,9911$		$V_{+8\%} = 1,0494$	
		P_{km}	P_{mk}	P_{km}	P_{mk}	P_{km}	P_{mk}	P_{km}	P_{mk}	P_{km}	P_{mk}	P_{km}	P_{mk}
1	2	0,893	-0,868	0,918	-0,892	0,896	-0,871	0,893	-0,868	0,893	-0,868	0,908	-0,882
1	3	0,418	-0,403	0,425	-0,407	0,419	-0,403	0,418	-0,403	0,418	-0,403	0,421	-0,408
2	3	0,245	-0,241	0,249	-0,245	0,246	-0,242	0,245	-0,241	0,244	-0,240	0,242	-0,238
2	4	0,277	-0,273	0,282	-0,277	0,278	-0,273	0,277	-0,273	0,276	-0,272	0,275	-0,270
2	5	0,547	-0,534	0,561	-0,529	0,547	-0,533	0,547	-0,534	0,548	-0,536	0,565	-0,540
3	4	0,194	-0,193	0,202	-0,201	0,195	-0,195	0,194	-0,193	0,193	-0,193	0,195	-0,195
4	5	0,066	-0,066	0,078	-0,072	0,068	-0,067	0,066	-0,066	0,065	-0,064	0,065	-0,061

Fonte: Resultados obtidos pelo autor.

Tabela 6 - Fluxos de potência reativa do SEP Stagg para controle de tensão da barra 5 com STATCOM.

de	para	Caso Base $V_5 = 0,9717$		Caso -8% $V_{-8\%} = 0,8940$		Caso -2% $V_{-2\%} = 0,9523$		Caso 0% $V_{0\%} = 0,9717$		Caso +2% $V_{+2\%} = 0,9911$		Caso +8% $V_{+8\%} = 1,0494$	
		Q_{km}	Q_{mk}	Q_{km}	Q_{mk}	Q_{km}	Q_{mk}	Q_{km}	Q_{mk}	Q_{km}	Q_{mk}	Q_{km}	Q_{mk}
1	2	0,740	-0,729	0,733	-0,720	0,739	-0,728	0,740	-0,729	0,740	-0,729	0,736	-0,724
1	3	0,168	-0,175	0,231	-0,230	0,184	-0,189	0,168	-0,175	0,152	-0,161	0,104	-0,115
2	3	-0,025	-0,004	0,055	-0,082	-0,005	-0,023	-0,025	-0,004	-0,045	0,016	-0,105	0,077
2	4	-0,017	-0,008	0,086	-0,108	0,009	-0,034	-0,017	-0,008	-0,043	0,017	-0,120	0,096
2	5	0,056	-0,048	0,689	-0,619	0,214	-0,201	0,056	-0,048	-0,104	0,111	-0,583	0,628
3	4	0,029	-0,047	0,162	-0,178	0,063	-0,080	0,029	-0,047	-0,006	-0,013	-0,111	0,093
4	5	0,005	-0,052	0,236	-0,261	0,064	-0,108	0,005	-0,052	-0,055	0,007	-0,238	0,198

Fonte: Resultados obtidos pelo autor.

Tabela 7 - Fasores tensões do SEP Stagg para controle de tensão da barra 5 em (pu) com STATCOM.

barra	Caso Base $V_5 = 0,9717$		Caso -8% $V_{-8\%} = 0,8940$		Caso -2% $V_{-2\%} = 0,9523$		Caso 0% $V_{0\%} = 0,9717$		Caso +2% $V_{+2\%} = 0,9911$		Caso +8% $V_{+8\%} = 1,0494$	
	V	\angle	V	\angle	V	\angle	V	\angle	V	\angle	V	\angle
1	1,0600	/+0,0000°	1,0600	/+0,0000°	1,0600	/+0,0000°	1,0600	/+0,0000°	1,0600	/+0,0000°	1,0600	/+0,0000°
2	1,0000	/-2,0612°	1,0000	/-2,1486°	1,0000	/-2,0702°	1,0000	/-2,0612°	1,0000	/-2,0609°	1,0000	/-2,1121°
3	0,9872	/-4,6367°	0,9724	/-4,5237°	0,9835	/-4,5950°	0,9872	/-4,6367°	0,9909	/-4,6874°	1,0020	/-4,8938°
4	0,9841	/-4,9570°	0,9650	/-4,7897°	0,9794	/-4,9001°	0,9841	/-4,9570°	0,9889	/-5,0241°	1,0031	/-5,2859°
5	0,9717	/-5,7649°	0,8940	/-4,6604°	0,9523	/-5,4704°	0,9717	/-5,7650°	0,9911	/-6,0717°	1,0494	/-7,0631°
ST	-	-	0,8068	/-4,6045°	0,9304	/-5,4572°	0,9717	/-5,7650°	1,0131	/-6,0844°	1,1377	/-7,1112°

Fonte: Resultados obtidos pelo autor.

Tabela 8 - Parâmetros do STATCOM obtidos na solução do fluxo de potência.

	Caso -8% $V_{-8\%} = 0,8940$		Caso -2% $V_{-2\%} = 0,9523$		Caso 0% $V_{0\%} = 0,9717$		Caso +2% $V_{+2\%} = 0,9911$		Caso +8% $V_{+8\%} = 1,0494$	
	V	\angle	V	\angle	V	\angle	V	\angle	V	\angle
\tilde{V}_{ST}	0,8068	/-4,6045°	0,9304	/-5,4572°	0,9717	/-5,7650°	1,0131	/-6,0844°	1,1377	/-7,1112°
\tilde{I}_{ST}	0,8715	/-94,6045°	0,2189	/-95,4572°	0,0000	/+84,2347°	0,2196	/+83,9156°	0,8823	/+82,8888°
\tilde{S}_{ST}	0,7791	/+89,9441°	0,2084	/+89,9868°	0,0000	/+89,9998°	0,2177	/-89,9873°	0,9259	/-89,9518°

Fonte: Resultados obtidos pelo autor.

Tabela 9 - Autovalores do SEP Stagg, com STATCOM sem atuação de controladores suplementares.

Caso Base	Caso -8% $V_{-8\%} = 0,8940$	Caso -2% $V_{-2\%} = 0,9523$	Caso 0% $V_{0\%} = 0,9717$	Caso +2% $V_{+2\%} = 0,9911$	Caso +8% $V_{+8\%} = 1,0494$
	-1477,1063	-1475,4993	-1475,4652	-1476,1863	-1512,8737
	-987,7846	-1126,8755	-1126,9926	-1126,9458	-1124,5673
	-997,5136	-997,9879	-991,1300	-991,1580	-998,7011
	-0,3490±j9,5882	-991,0795	-997,9746	-997,9725	-991,4078
	-12,3880	-0,1399±j11,7165	-0,2536±j10,1632	-0,3584±j9,6704	-0,5526±j9,3452
	-0,2759	-10,0050	-9,9488	-9,9102	-9,6238
	-2,9030	-0,2755	-0,2757	-0,2758	-0,2685
		-3,0867	-2,8720	-2,6685	-2,2816
					-0,0821

Fonte: Resultados obtidos pelo autor.

Dos resultados obtidos, nota-se que foram atingidos os valores especificados de tensão à barra com o STATCOM. O fluxo já não converge para tensões inferiores a 82% da tensão original da barra 5, assim como para valores superiores a 123%. Estes resultados não foram abordados por exigir potências em torno de 300 MVar, que é o dobro de toda a potência gerada. Naturalmente o SEP apresenta limitações operacionais no controle de tensão, por ser de pequenas dimensões, inflexível às modificações.

Tabela 10 - Modos oscilatórios, frequências e coeficientes de amortecimento do SEP Stagg, com atuação do STATCOM sem controlador suplementar.

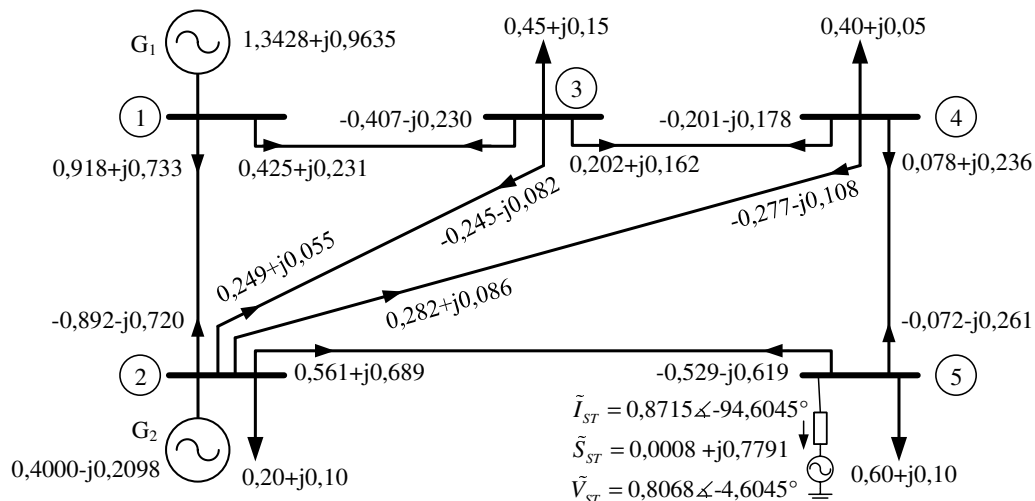
Caso	Modo	Autovalores	ω_n (Hz)	ξ (pu)
Caso Base	Local 1	$-0,3490 \pm j9,5883$	1,5270	0,0364
Caso -8%	Local 1	$-0,1399 \pm j11,7165$	1,8649	0,0119
Caso -2%	Local 1	$-0,2536 \pm j10,1632$	1,6180	0,0249
Caso +0%	Local 1	$-0,3584 \pm j9,6704$	1,5401	0,0370
Caso +2%	Local 1	$-0,5526 \pm j9,3452$	1,4899	0,0590
Caso +8%	Local 1	$-1,1871 \pm j15,6225$	2,4936	0,0758

Fonte: Resultados obtidos pelo autor.

Da Tabela 5, se nota pequenas mudanças no fluxo de potência ativa de todo o sistema, já na Tabela 6, são grandes as modificações nos fluxos reativos, pequenas nas barras conectadas aos geradores, e muito grandes nas barras próximas ao STATCOM. Conforme esperado, inverteu-se o sentido do fluxo de reativos das linhas conectadas a barra 5, conforme o STATCOM operava em característica indutiva (consumindo reativos de 5 - casos -8% e -2%), e capacitiva (fornecendo reativos - casos +2% e +8%).

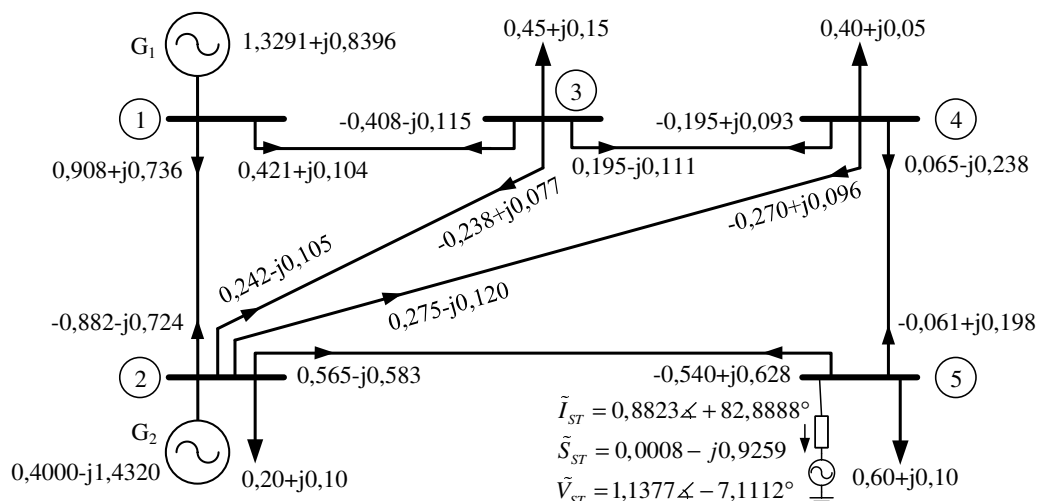
Dos parâmetros do STATCOM, na Tabela 8, observa-se pequenas variações no ângulo da tensão interna do STATCOM, ao contrário da magnitude, que foi a responsável por regular a tensão da barra 5. O FACTS se mostrou eficaz em flexibilizar a tensão da barra 5, atuando na injeção/absorção de reativos, pelo conhecido acoplamento QV . Nos ajustes extremos ($\pm 8\%$), a quantidade de reativos trocada com a barra chegou a 78 MVar (absorção) e 93 MVar (injeção).

Figura 22 - Diagrama unifilar do SEP com as potências geradas e transmitidas no caso -8%.



Da análise transitória, claramente o STATCOM retirou amortecimento do único modo oscilatório do SEP Stagg operando no modo indutivo (reduzindo a tensão da barra 5), e adicionou amortecimento ao modo quando elevando a tensão da barra. As mudanças deslocaram o autovalor sobre o eixo real e imaginário, conforme se observa da Figura 24.

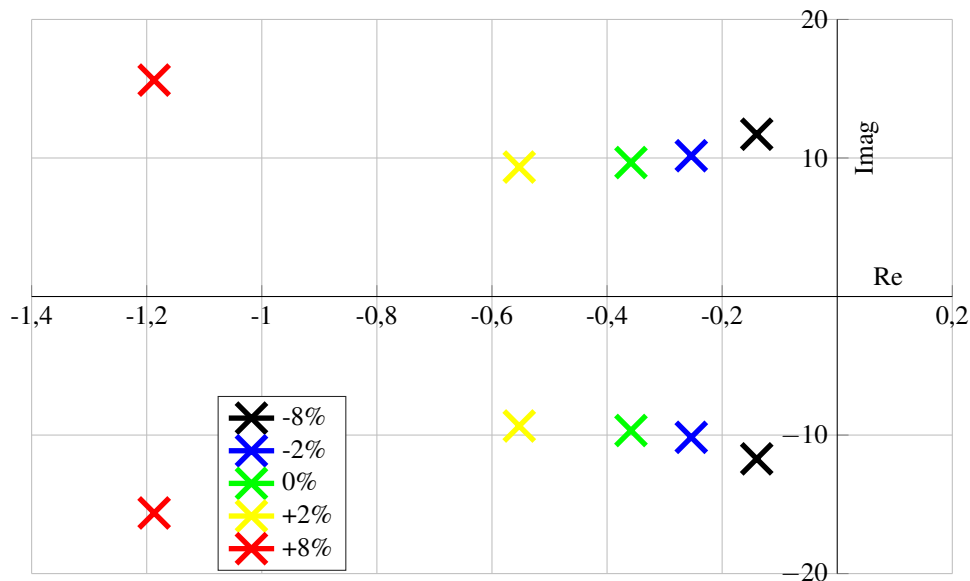
Figura 23 - Diagrama unifilar do SEP com as potências geradas e transmitidas no caso +8%.



Fonte: (STAGG; EL-ABIAD, 1968), adaptada pelo autor.

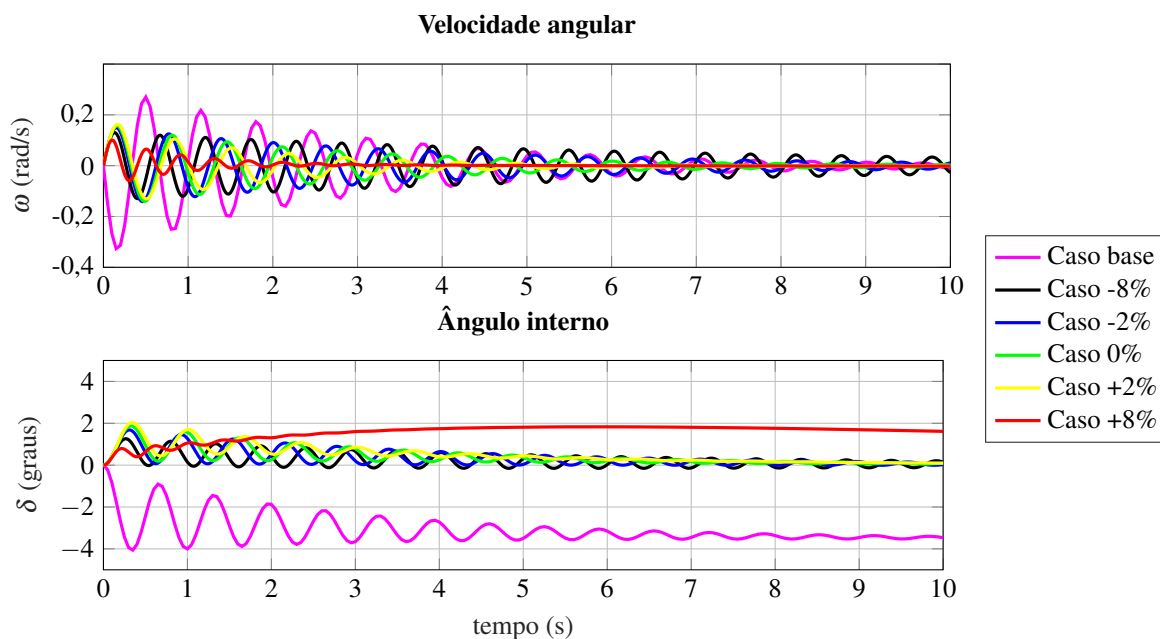
A ativação de um STATCOM forçou o surgimento de dois novos autovalores, que correspondem as linhas das expressões de W_V (55) e de CE_{ST} (56), que correspondem a dinâmica do dispositivo.

Figura 24 - Autovalores correspondentes ao modo oscilante no sistema Stagg com STATCOM.



Fonte: Resultados obtidos pelo autor.

Para ilustrar a influência do STATCOM na dinâmica de todo o sistema Stagg, na Figura 24 são apresentadas as curvas da variação da velocidade de giro do rotor e do ângulo interno do gerador 01, adotando o gerador 02 como referência. Para obtenção das curvas aplica-se perturbação do tipo degrau de magnitude +0,05 pu no torque mecânico do gerador 01.

Figura 25 - Curvas dinâmicas de velocidade e ângulo para o SEP Stagg com STATCOM controlando V_5 .

6.1.2 Operação do SSSC no Sistema Stagg

Similar a análise realizada ao STATCOM, o dispositivo SSSC é aplicado ao SEP Stagg, o fluxo de potência resolvido e a estabilidade avaliada.

Como o SSSC permite controle do fluxo de potência ativa, reativa e tensão das barras terminais, cada tipo de controle é avaliado individualmente.

6.1.2.1 Operação do SSSC controlando tensão

Considerando o dispositivo SSSC instalado na linha de transmissão que liga a barra 2 à barra 5, controlando a magnitude de tensão da barra 5, de 84% até 100% do seu valor original ($V_5 = 0,9717$ pu). Das simulações se obtêm o fluxo de potência ativa (Tabela 11), e reativa (Tabela 12). Os fasores tensão das barras e do dispositivo SSSC (Tabela 13), os parâmetros operacionais do SSSC (Tabela 14), para que o valor especificado de tensão seja atingido, e por último os autovalores da matriz de estados A (Tabela 15 e Tabela 16), para análise da estabilidade do SEP.

Objetivando a comparação operacional do SSSC com o STATCOM, na condição de controle de tensão, não houve convergência do fluxo para tensões maiores que a tensão original da barra, por este motivo a tensão especificada não coincide com os definidos anteriormente.

Para as simulações adotou-se $Z_{SC} = 0,001 + j0,1$ pu, como a impedância equivalente do SSSC, a dinâmica do SSSC com $T_{SSSC} = 0,001$, e para o controlador PI que regula o regime

permanente do SSSC o ganho de $K_{PI} = 1,0$ e o tempo de $T_{PI} = 0,1$. A tolerância adotada para solução do método de Newton é de 1μ .

Tabela 11 - Fluxos de potência ativa do SEP Stagg para controle de tensão da barra 5 com SSSC.

de	para	Caso Base $V_5 = 0,9717$		Caso -16% $V_{-16\%} = 0,8162$		Caso -8% $V_{-8\%} = 0,8940$		Caso -2% $V_{-2\%} = 0,9523$		Caso 0% $V_{0\%} = 0,9717$	
		P_{km}	P_{mk}	P_{km}	P_{mk}	P_{km}	P_{mk}	P_{km}	P_{mk}	P_{km}	P_{mk}
1	2	0,893	-0,868	0,820	-0,797	0,823	-0,799	0,855	-0,831	0,890	-0,866
1	3	0,418	-0,403	0,589	-0,557	0,532	-0,507	0,465	-0,446	0,420	-0,405
2	3	0,245	-0,241	0,488	-0,472	0,412	-0,402	0,316	-0,310	0,249	-0,245
2	4	0,277	-0,273	0,586	-0,563	0,490	-0,475	0,367	-0,359	0,282	-0,278
2	5	0,547	-0,534	-0,077	0,081	0,097	-0,094	0,348	-0,342	0,534	-0,523
3	4	0,194	-0,193	0,580	-0,576	0,459	-0,457	0,306	-0,305	0,200	-0,200
4	5	0,066	-0,066	0,739	-0,681	0,532	-0,506	0,264	-0,258	0,077	-0,077

Fonte: Resultados obtidos pelo autor.

Tabela 12 - Fluxos de potência reativa do SEP Stagg para controle de tensão da barra 5 com SSSC.

de	para	Caso Base $V_5 = 0,9717$		Caso -16% $V_{-16\%} = 0,8162$		Caso -8% $V_{-8\%} = 0,8940$		Caso -2% $V_{-2\%} = 0,9523$		Caso 0% $V_{0\%} = 0,9717$	
		Q_{km}	Q_{mk}	Q_{km}	Q_{mk}	Q_{km}	Q_{mk}	Q_{km}	Q_{mk}	Q_{km}	Q_{mk}
1	2	0,740	-0,729	0,762	-0,756	0,761	-0,755	0,751	-0,743	0,741	-0,730
1	3	0,168	-0,175	0,286	-0,242	0,222	-0,200	0,178	-0,175	0,168	-0,174
2	3	-0,025	-0,004	0,110	-0,102	0,032	-0,040	-0,018	-0,004	-0,026	-0,002
2	4	-0,017	-0,008	0,154	-0,125	0,055	-0,049	-0,008	-0,007	-0,018	-0,007
2	5	0,056	-0,048	-0,103	0,040	0,032	-0,034	0,091	-0,069	0,061	-0,052
3	4	0,029	-0,047	0,194	-0,199	0,090	-0,102	0,029	-0,045	0,027	-0,045
4	5	0,005	-0,052	0,274	-0,140	0,101	-0,066	0,002	-0,031	0,001	-0,048

Fonte: Resultados obtidos pelo autor.

Tabela 13 - Fasores tensões do SEP Stagg para controle de tensão da barra 5 em (pu) com SSSC.

barra	Caso Base $V_5 = 0,9717$	Caso -16% $V_{-16\%} = 0,8162$	Caso -8% $V_{-8\%} = 0,8940$	Caso -2% $V_{-2\%} = 0,9523$	Caso 0% $V_{0\%} = 0,9717$
1	1,0600/+0,0000°	1,0600/-0,0000°	1,0600/0,0000°	1,0600/-0,0000°	1,0600/-0,0000°
2	1,0000/-2,0612°	1,0000/-1,7989°	1,0000/-1,8088°	1,0000/-1,9247°	1,0000/-2,0507°
3	0,9872/-4,6367°	0,9507/-6,6239°	0,9685/-6,0160°	0,9823/-5,2335°	0,9872/-4,6723°
4	0,9841/-4,9570°	0,9383/-7,6106°	0,9608/-6,8027°	0,9781/-5,7577°	0,9841/-5,0053°
5	0,9717/-5,7649°	0,8162/-19,1873°	0,8940/-14,6763°	0,9523/-9,5309°	0,9717/-5,9955°
SC	-	0,3543/+44,7626°	0,2128/+55,7465°	0,0569/+68,9956°	0,0483/-101,7235°

Fonte: Resultados obtidos pelo autor.

Tabela 14 - Parâmetros do SSSC obtidos na solução do fluxo de potência para controle de tensão V_5 .

	Caso -16% $V_{-16\%} = 0,8162$	Caso -8% $V_{-8\%} = 0,8940$	Caso -2% $V_{-2\%} = 0,9523$	Caso 0% $V_{0\%} = 0,9717$
\tilde{V}_{SC}	0,3543/+44,7626°	0,2128/+55,7465°	0,0569/+68,9956°	0,0483/-101,7235°
\tilde{I}_{SCkm}	0,1285/-52,5154°	0,0997/+158,1732°	0,3573/+163,2169°	0,5360/+171,3125°
\tilde{I}_{SCmk}	0,1055/+134,3407°	0,1163/-34,0030°	0,3695/-20,9759°	0,5432/-11,7304°
\tilde{S}_{kmSC}	1,2453 + j0,3452	0,8395 + j0,1333	0,2421 + j0,0039	-0,2089 + j0,0176
\tilde{S}_{mkSC}	-1,3295 - j0,8595	-0,8823 - j0,3545	-0,2514 - j0,0377	0,2157 - j0,0033
$\tilde{S}_{SC \rightarrow k}$	0,0373/+95,9981°	0,0225/-96,8763°	0,0196/-92,3287°	0,0246/+88,3668°
$\tilde{S}_{SC \rightarrow m}$	0,0414/-84,6048°	0,0230/+83,2925°	0,0207/+87,7953°	0,0261/-91,5394°
$\tilde{S}_{SC_{EQ}}$	0,0000 - j0,0042	0,0000 + j0,0006	0,0000 + j0,0011	0,0000 - j0,0015

Fonte: Resultados obtidos pelo autor.

Tabela 15 - Autovalores do SEP Stagg, com SSSC sem atuação de controladores suplementares.

Caso Base	Caso -16% $V_{-16\%} = 0,8940$	Caso -8% $V_{-8\%} = 0,9523$	Caso -2% $V_{-2\%} = 0,9717$	Caso 0% $V_{0\%} = 0,9911$
	-813,1878	-813,9251	-751,2864	-1118,2759
-987,7846	-1063,8273	-1064,0068	-1070,8370	-988,9611
-997,5136	-991,1819	-990,5767	-989,4250	-997,5774
$-0,3490 \pm j9,5882$	-997,7064	-997,6721	-997,6004	$-0,3433 \pm j9,5914$
-12,3880	-13,3102	-13,0338	$-0,3296 \pm j9,6815$	-12,1743
-0,2759	$-0,2805 \pm j9,8927$	$-0,3028 \pm j9,7877$	-12,8683	-0,2759
-2,9030	-0,2758	-0,2758	-0,2759	-2,9012
	-3,0680	-3,0204	-2,9653	

Fonte: Resultados obtidos pelo autor.

Tabela 16 - Modos oscilatórios, frequências e coeficientes de amortecimento do SEP Stagg, com atuação do SSSC sem controlador suplementar.

Caso	Modo	Autovalores	ω_n (Hz)	ξ (pu)
Caso Base	Local 1	$-0,3490 \pm j9,5883$	1,5270	0,0364
Caso -16%	Local 1	$-0,2805 \pm j9,8927$	1,5751	0,0283
Caso -8%	Local 1	$-0,3028 \pm j9,7877$	1,5585	0,0309
Caso -2%	Local 1	$-0,3296 \pm j9,6815$	1,5418	0,0340
Caso 0%	Local 1	$-0,3433 \pm j9,5914$	1,5275	0,0358

Fonte: Resultados obtidos pelo autor.

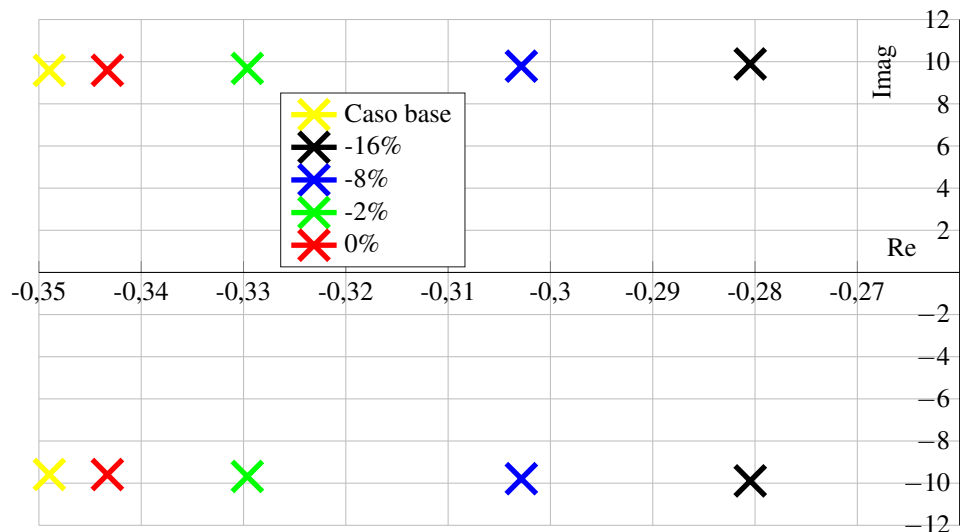
Dos resultados obtidos, nota-se que dentro da faixa de valores abordados, o SSSC regulou a tensão aos níveis especificados. O fluxo já não converge para tensões inferiores a 84% da tensão original da barra 5, e para valores superiores a 100%. O SSSC para controle de tensão apresenta faixa operacional menor que do STATCOM.

Avaliando as tabelas 11 e 12, verifica-se elevada variação no fluxo de potência ativa na LT 2-5, e pequena alteração na potência reativa quando o SSSC controla tensão.

Dos parâmetros do FACTS, na Tabela 14, observa-se grandes variações na magnitude e ângulo da tensão interna do SSSC, sempre ajustada a $\pm 90^\circ$ da corrente, que também se mostra muito variável com o controle do SSSC. Nos casos -16, -8 e -2% a operação é capacitiva, com a tensão \tilde{V}_{SC} atrasada $\approx 90^\circ$ da corrente I_{km} , e no caso 0% opera no modo indutivo.

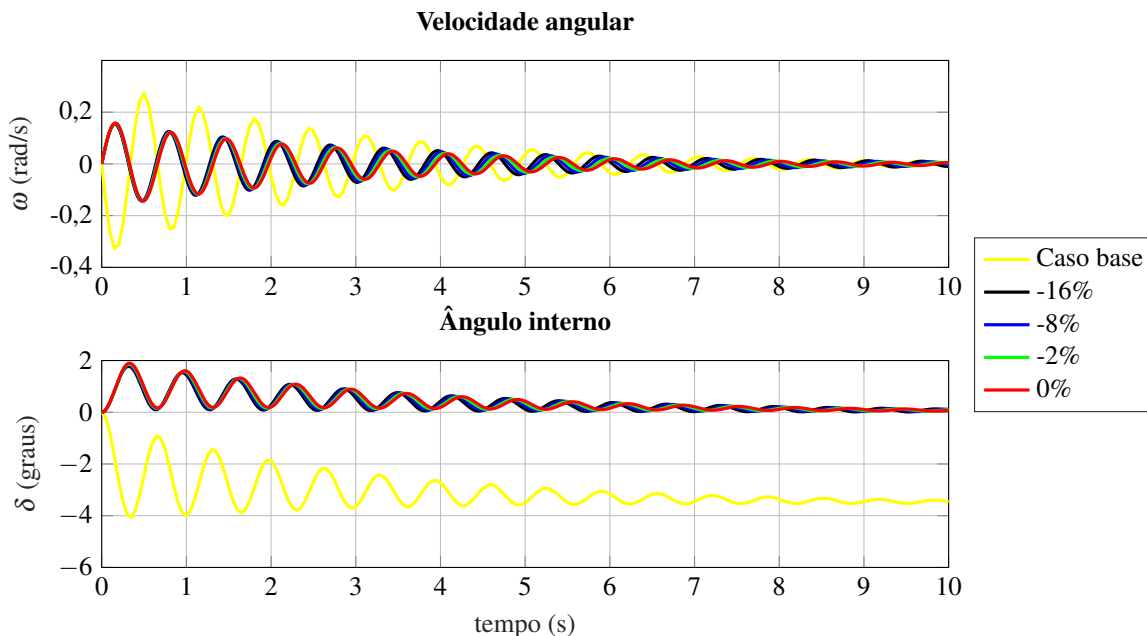
A potência inserida pelo SSSC é pequena em todos os casos, $\tilde{S}_{SC_{EQ}}$ em nenhum momento ultrapassou 0,0050 pu (5 MVA), e a potência ativa fornecida é sempre inferior a tolerância adotada (1μ). Valores bem diferentes aos encontrados para o STATCOM, mas deve-se ressaltar que como o SSSC é inserido em série, deve suportar a corrente da linha de transmissão, no maior caso de aproximadamente 0,60 pu.

A aplicação do SSSC removeu amortecimento do único modo oscilatório local do SEP Stagg. Se desenha uma tendência em elevar o amortecimento, caso a tensão ultrapassasse 100% da tensão original da barra 5, mas para nenhum valor acima deste, ocorreu convergência do fluxo de potência, inibindo qualquer estudo de estabilidade. Na Figura 26 o deslocamento do autovalor representativo ao modo oscilante no plano complexo.

Figura 26 - Autovalores do modo oscilante no sistema Stagg com SSSC controlando a tensão V_5 .

Fonte: Resultados obtidos pelo autor.

Para ilustrar a influência do SSSC na dinâmica de todo o sistema Stagg, na Figura 27 são apresentadas as curvas da variação da velocidade de giro do rotor e do ângulo interno do gerador 01, adotando o gerador 02 como referência. Para obtenção das curvas aplica-se perturbação do tipo degrau de magnitude +0,05 pu no torque mecânico do gerador 01.

Figura 27 - Curvas dinâmicas de velocidade e ângulo para o SEP Stagg com SSSC controlando V_5 .

Fonte: Resultados obtidos pelo autor.

Apesar das curvas da Figura 27 sugerirem uma “melhora” no transitório do sistema Stagg com a operação do SSSC, em qualquer caso, o de maior amortecimento é o ponto natural do SEP, sem a instalação do SSSC.

6.1.2.2 Operação do SSSC controlando fluxo potência ativa

Mantendo o SSSC instalado na linha de transmissão 2-5, controlando o fluxo de potência ativa de 50% até 150% do seu valor original ($P_{25} = 0,547 pu$). Das simulações se obtêm o fluxo de potência ativa (Tabela 17), e reativa (Tabela 18). Os fasores tensão das barras e do dispositivo SSSC (Tabela 19), os parâmetros operacionais do SSSC (Tabela 20), para que o valor especificado de tensão seja atingido, e por último os autovalores da matriz de estados A (Tabela 21 e 22), para análise da estabilidade do SEP.

Para as simulações adotou-se $Z_{SC} = 0,001 + j0,1 pu$, como a impedância equivalente do SSSC, a dinâmica do SSSC com $T_{SSSC} = 0,001$, e para o controlador PI que regula o regime permanente do SSSC o ganho de $K_{PI} = 1,0$ e o tempo de $T_{PI} = 0,1$. A tolerância adotada para solução do método de Newton é de 1μ .

Tabela 17 - Fluxos de potência ativa do SEP Stagg para controle de fluxo ativo LT_{25} com SSSC.

de	para	Caso Base $P_{25} = 0,547$		Caso $P_{50\%}$ $P_{50\%} = 0,273$		Caso $P_{75\%}$ $P_{75\%} = 0,410$		Caso $P_{100\%}$ $P_{100\%} = 0,547$		Caso $P_{125\%}$ $P_{125\%} = 0,683$		Caso $P_{150\%}$ $P_{150\%} = 0,820$	
		P_{km}	P_{mk}	P_{km}	P_{mk}	P_{km}	P_{mk}	P_{km}	P_{mk}	P_{km}	P_{mk}	P_{km}	P_{mk}
1	2	0,893	-0,868	0,841	-0,817	0,865	-0,841	0,894	-0,869	0,927	-0,902	0,966	-0,939
1	3	0,418	-0,403	0,482	-0,463	0,449	-0,432	0,418	-0,403	0,390	-0,376	0,364	-0,351
2	3	0,245	-0,241	0,343	-0,336	0,293	-0,288	0,245	-0,241	0,199	-0,197	0,155	-0,154
2	4	0,277	-0,273	0,401	-0,392	0,338	-0,331	0,278	-0,273	0,219	-0,216	0,164	-0,162
2	5	0,547	-0,534	0,273	-0,271	0,410	-0,403	0,547	-0,533	0,683	-0,662	0,820	-0,789
3	4	0,194	-0,193	0,348	-0,347	0,270	-0,269	0,195	-0,194	0,123	-0,122	0,055	-0,054
4	5	0,066	-0,066	0,339	-0,329	0,200	-0,197	0,067	-0,067	-0,061	0,062	-0,183	0,189

Fonte: Resultados obtidos pelo autor.

Tabela 18 - Fluxos de potência reativa do SEP Stagg para controle de fluxo ativo LT_{25} com SSSC.

de	para	Caso Base $P_{25} = 0,547$		Caso $P_{50\%}$ $P_{50\%} = 0,273$		Caso $P_{75\%}$ $P_{75\%} = 0,410$		Caso $P_{100\%}$ $P_{100\%} = 0,547$		Caso $P_{125\%}$ $P_{125\%} = 0,683$		Caso $P_{150\%}$ $P_{150\%} = 0,820$	
		Q_{km}	Q_{mk}	Q_{km}	Q_{mk}	Q_{km}	Q_{mk}	Q_{km}	Q_{mk}	Q_{km}	Q_{mk}	Q_{km}	Q_{mk}
1	2	0,740	-0,729	0,755	-0,748	0,748	-0,739	0,740	-0,729	0,730	-0,717	0,719	-0,703
1	3	0,168	-0,175	0,184	-0,177	0,172	-0,173	0,169	-0,176	0,175	-0,187	0,192	-0,206
2	3	-0,025	0,110	-0,012	-0,006	-0,024	-0,000	-0,024	-0,005	-0,012	-0,021	0,014	-0,048
2	4	-0,017	0,154	-0,001	-0,009	-0,016	-0,003	-0,015	-0,010	0,000	-0,031	0,033	-0,067
2	5	0,056	-0,103	0,096	-0,076	0,090	-0,070	0,051	-0,044	-0,020	0,002	-0,132	0,072
3	4	0,029	0,194	0,033	-0,048	0,023	-0,040	0,031	-0,049	0,057	-0,076	0,104	-0,123
4	5	0,005	0,274	0,007	-0,024	-0,007	-0,030	0,010	-0,056	0,057	-0,102	0,140	-0,172

Fonte: Resultados obtidos pelo autor.

Tabela 19 - Fasores tensões do SEP Stagg para controle de fluxo ativo LT_{25} com SSSC.

bar-ra	Caso Base $P_{25} = 0,547$	Caso $P_{50\%}$ $P_{50\%} = 0,273$	Caso $P_{75\%}$ $P_{75\%} = 0,410$	Caso $P_{100\%}$ $P_{100\%} = 0,547$	Caso $P_{125\%}$ $P_{125\%} = 0,683$	Caso $P_{150\%}$ $P_{150\%} = 0,820$
1	1,0600/+0,000°	1,0600/-0,000°	1,0600/-0,000°	1,0600/-0,000°	1,0600/-0,000°	1,0600/-0,000°
2	1,0000/-2,061°	1,0000/-1,875°	1,0000/-1,962°	1,0000/-2,064°	1,0000/-2,182°	1,0000/-2,319°
3	0,9872/-4,637°	0,9799/-5,456°	0,9845/-5,045°	0,9870/-4,639°	0,9872/-4,233°	0,9850/-3,827°
4	0,9841/-4,957°	0,9751/-6,057°	0,9808/-5,506°	0,9838/-4,959°	0,9839/-4,410°	0,9810/-3,857°
5	0,9717/-5,765°	0,9433/-10,972°	0,9615/-8,348°	0,9702/-5,764°	0,9693/-3,136°	0,9576/-0,370°
SC	-	0,0992/-111,268°	0,0215/-104,301°	0,0552/+82,565°	0,1345/+89,535°	0,2206/+96,839°

Fonte: Resultados obtidos pelo autor.

Tabela 20 - Parâmetros do SSSC obtidos na solução do fluxo de potência controlando o fluxo ativo LT_{25} .

	Caso $P_{50\%}$ $P_{50\%} = 0,273$	Caso $P_{75\%}$ $P_{75\%} = 0,410$	Caso $P_{100\%}$ $P_{100\%} = 0,547$	Caso $P_{125\%}$ $P_{125\%} = 0,683$	Caso $P_{150\%}$ $P_{150\%} = 0,820$
\tilde{V}_{SC}	0,0992/-111,2681°	0,0215/-104,3014°	0,0552/+82,5650°	0,1345/+89,5352°	0,2206/+96,8393°
$\tilde{I}_{SC_{km}}$	0,3019/-26,5784°	0,4280/-18,1933°	0,5537/-10,5128°	0,6845/-2,9750°	0,8275/+4,7780°
$\tilde{I}_{SC_{mk}}$	0,2872/+158,2966°	0,4173/+165,5143°	0,5471/+172,4847°	0,6822/+179,4947°	0,8297/-173,1978°
$\tilde{S}_{km_{SC}}$	-0,4380-j0,0681	-0,0962-j0,0030	0,2455-j0,0223	0,5871-j0,1277	0,9279-j0,3325
$\tilde{S}_{mk_{SC}}$	0,4181-j0,0019	0,0923-j0,0074	-0,2363+j0,0369	-0,5669+j0,1333	-0,8989+j0,2880
$\tilde{S}_{SC \rightarrow k}$	0,0268/-86,9984°	0,0084/-87,8437°	0,0280/+91,6836°	0,0850/+91,3593°	0,1693/+91,1058°
$\tilde{S}_{SC \rightarrow m}$	0,0293/+92,7486°	0,0091/+91,9847°	0,0304/-88,4458°	0,0919/-88,7426°	0,1827/-88,9755°
$\tilde{S}_{SC_{EQ}}$	0,0000+j0,0025	0,0000+j0,0007	0,0000-j0,0023	0,0000-j0,0069	0,0000-j0,0134

Fonte: Resultados obtidos pelo autor.

Tabela 21 - Autovalores do SEP Stagg, com SSSC sem atuação de controladores suplementares.

Caso Base	Caso $P_{50\%}$ $P_{50\%} = 0,273$	Caso $P_{75\%}$ $P_{75\%} = 0,410$	Caso $P_{100\%}$ $P_{100\%} = 0,547$	Caso $P_{125\%}$ $P_{125\%} = 0,683$	Caso $P_{150\%}$ $P_{150\%} = 0,820$
	-745,5601	-703,8520	-2796,8703	-2823,0064	-2885,1316
-987,7846	-1101,1598	-1090,2703	-997,5106	-997,5123	-997,5122
-997,5136	-987,7118	-987,7312	-987,6721	-987,3938	-987,7684
-0,3490±j9,5882	-997,5045	-997,5081	-985,2635	-986,4290	-987,7684
-12,3880	-0,3184±j9,7141	-0,3319±j9,6525	-0,3488±j9,5865	-0,3700±j9,5105	-0,3991±j9,4225
-0,2759	-12,5684	-12,4678	-12,3961	-12,3415	-12,2877
-2,9030	-0,2758	-0,2760	-0,2760	-0,2760	-0,2761
	-2,9721	-2,9398	-2,9027	-2,8556	-2,7921

Fonte: Resultados obtidos pelo autor.

Tabela 22 - Modos oscilatórios, frequências e coeficientes de amortecimento do SEP Stagg, com atuação do SSSC sem controlador suplementar.

Caso	Modo	Autovalores	ω_n (Hz)	ξ (pu)
Caso Base	Local 1	-0,3490±j9,5882	1,5270	0,0364
Caso $P_{50\%}$	Local 1	-0,3184±j9,7141	1,5469	0,0328
Caso $P_{75\%}$	Local 1	-0,3319±j9,6525	1,5372	0,0344
Caso $P_{100\%}$	Local 1	-0,3488±j9,5865	1,5267	0,0364
Caso $P_{125\%}$	Local 1	-0,3700±j9,5105	1,5148	0,0389
Caso $P_{150\%}$	Local 1	-0,3991±j9,4225	1,5010	0,0423

Fonte: Resultados obtidos pelo autor.

O SSSC se apresentou um ótimo recurso ao controle de fluxo de potência ativa a ser aplicado ao sistema de transmissão, controlando de 50% até 150% o fluxo de potência ativa da LT 2-5. O método não converge para fluxos inferiores a -20% do fluxo de potência ativa original da LT, e para valores superiores a 220%. É necessário ressaltar, que o sistema é estável em todas as simulações em que houve convergência do fluxo de potência.

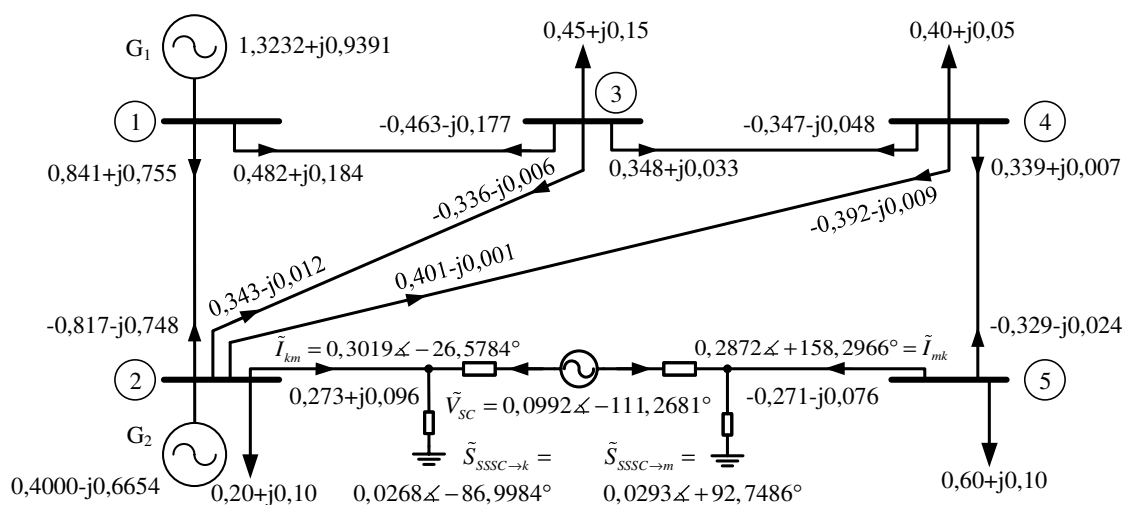
Avaliando as tabelas 17 e 18, verifica-se grande variação no fluxo de potência ativa e pequeno na reativa, mas isto devido ao tipo de controle realizado pelo SSSC. O controle de fluxo ativo na LT 2-5 alterou significativamente o fluxo das demais LT, isso porque originalmente o fluxo nesta linha é elevado, buscando outras rotas para atingir as cargas.

Dos parâmetros do FACTS, na Tabela 20, observa-se grandes variações na magnitude da

tensão interna do SSSC. O ângulo varia dentro de pequeno limite, mas ao comutar de indutivo para capacitivo, a tensão sofre reversão de sentido (180° nos casos $P_{75\%}$ ao $P_{100\%}$).

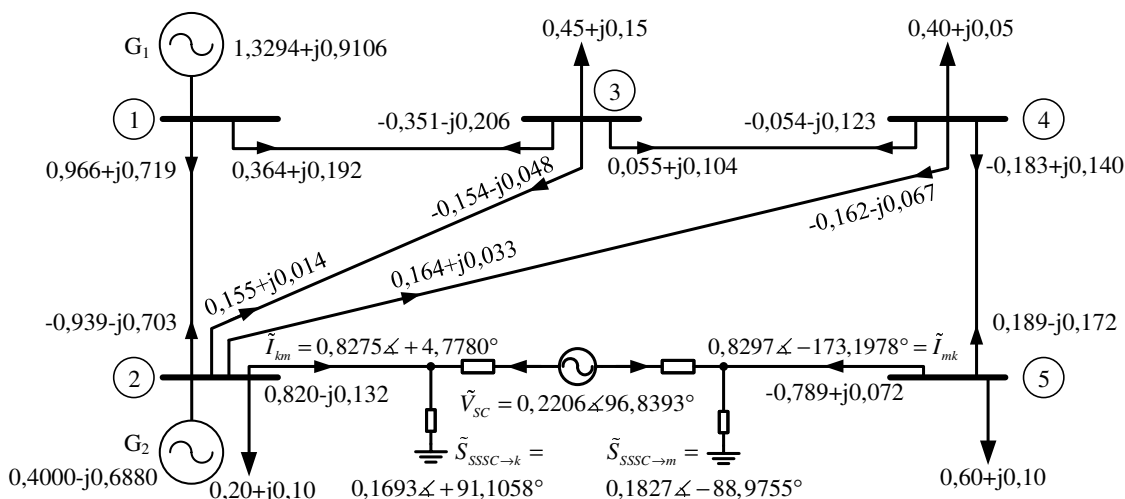
Diferentemente da situação anterior (controle de tensão), no controle de potência ativa a corrente e a potência trocada entre o SSSC e a LT se elevaram, operando dentro dos 0,3 a 0,8 pu de corrente. A potência inserida pelo SSSC permanece sendo pequena em todos os casos, $\tilde{S}_{SC_{EQ}}$, atingindo 0,0134 pu (13 MVar).

Figura 28 - Diagrama unifilar do SEP com as potências geradas e transmitidas para $P_{50\%} = 0,273 pu$.



Fonte: (STAGG; EL-ABIAD, 1968), adaptada pelo autor.

Figura 29 - Diagrama unifilar do SEP com as potências geradas e transmitidas para $P_{150\%} = 0,820 pu$.

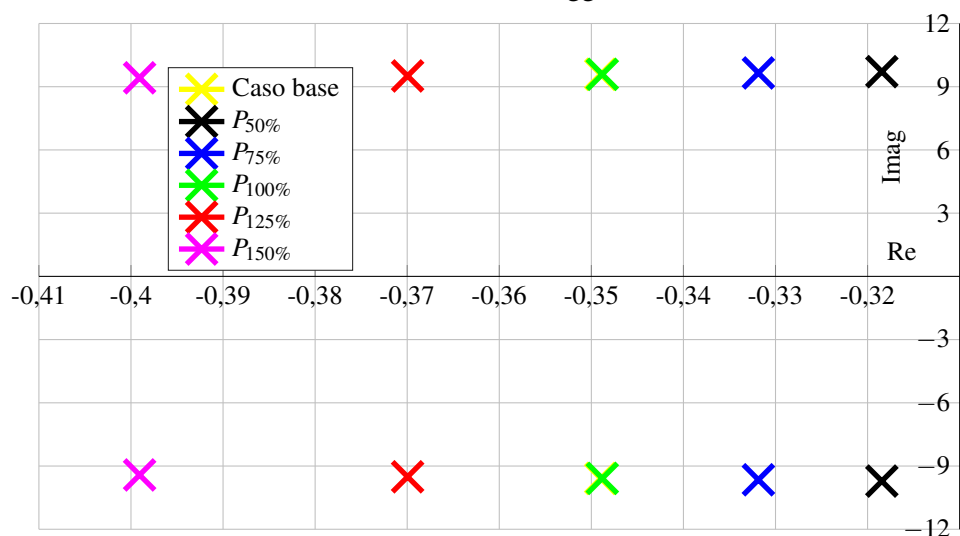


Fonte: (STAGG; EL-ABIAD, 1968), adaptada pelo autor.

Dos autovalores, nota-se a pequena participação do SSSC no transitório do sistema, a atuação no controle de fluxo ativo modifica os autovalores reais, mais especificamente os que aparecem na primeira e segunda linha da Tabela 21. Também pequena variação do amortecimento

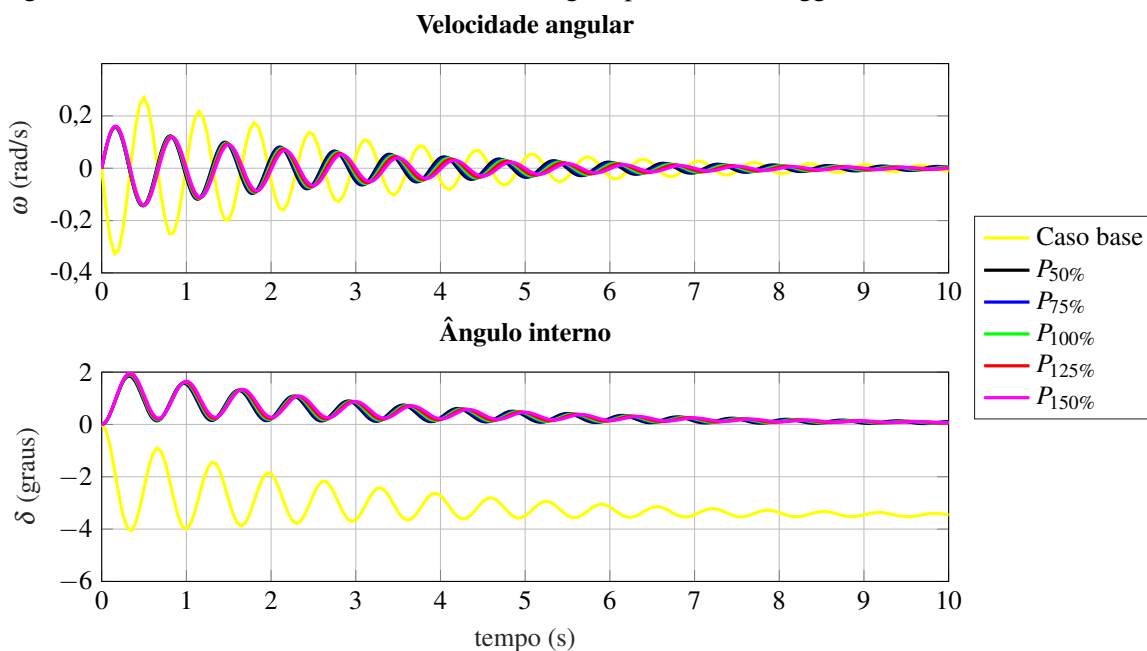
e frequência do modo local. Mantendo característica semelhante a situação do item 6.1.2.1, anterior. Isso por ser um modo local, de oscilações entre geradores, e o SSSC é instalado eletricamente distante das máquinas geradoras. Na Figura 30 o plano complexo, com o autovalor representativo do modo oscilante local, e na Figura 31 as curvas da variação da velocidade do rotor e do ângulo interno do gerador 01, com o gerador 02 como referência ao aplicar uma perturbação do tipo degrau de magnitude +0,05 pu no torque mecânico do gerador 01.

Figura 30 - Autovalores do modo oscilante no sistema Stagg com SSSC controlando o fluxo ativo P_{25} .



Fonte: Resultados obtidos pelo autor.

Figura 31 - Curvas dinâmicas de velocidade e ângulo para o SEP Stagg com SSSC controlando P_{25} .



Fonte: Resultados obtidos pelo autor.

Um ponto que deve ser destacado, é que ao comparar ao caso base, mais amortecimento

foi obtido com o SSSC atuando nos casos $P_{125\%}$ e $P_{150\%}$, ou seja, elevando o fluxo ativo da LT 2-5. Na condição anterior, de controle de tensão, o amortecimento era reduzido. Como nenhum controlador de amortecimento é aplicado, o resultando deixa claro que a atuação do SSSC no controle de fluxo ativo pode retirar ou acrescentar amortecimento a um sistema.

6.1.2.3 Operação do SSSC controlando fluxo potência reativa

Mantendo o SSSC na linha de transmissão 2-5, agora controlando o fluxo de potência reativa de 50% até 150% do seu valor original ($Q_{25} = 0,0556$ pu). Das simulações se obtêm o fluxo de potência ativa (Tabela 23), e reativa (Tabela 24). Os fasores tensão das barras e do dispositivo SSSC (Tabela 25), os parâmetros operacionais do SSSC (Tabela 26), para que o valor especificado de tensão seja atingido, e por último os autovalores da matriz de estados A (Tabela 27 e 28), para análise da estabilidade do SEP.

Para as simulações adotou-se $Z_{SC} = 0,001 + j0,1$ pu, como a impedância equivalente do SSSC, a dinâmica do SSSC com $T_{SSSC} = 0,001$, e para o controlador PI que regula o regime permanente do SSSC o ganho de $K_{PI} = 1,0$ e o tempo de $T_{PI} = 0,1$. A tolerância adotada para solução do método de Newton é de 1μ .

Tabela 23 - Fluxos de potência ativa do SEP Stagg para controle de fluxo reativo LT_{25} com SSSC.

de	para	Caso Base $Q_{25} = 0,0556$		Caso $Q_{50\%}$ $Q_{50\%} = 0,0278$		Caso $Q_{75\%}$ $Q_{75\%} = 0,0417$		Caso $Q_{100\%}$ $Q_{100\%} = 0,0556$		Caso $Q_{125\%}$ $Q_{125\%} = 0,0695$		Caso $Q_{150\%}$ $Q_{150\%} = 0,0834$	
		P_{km}	P_{mk}	P_{km}	P_{mk}	P_{km}	P_{mk}	P_{km}	P_{mk}	P_{km}	P_{mk}	P_{km}	P_{mk}
1	2	0,893	-0,868	0,906	-0,881	0,899	-0,874	0,892	-0,867	0,883	-0,858	0,872	-0,848
1	3	0,418	-0,40	0,407	-0,392	0,413	-0,398	0,421	-0,405	0,430	-0,414	0,442	-0,425
2	3	0,245	-0,241	0,227	-0,224	0,237	-0,234	0,249	-0,245	0,263	-0,259	0,281	-0,277
2	4	0,277	-0,273	0,255	-0,251	0,268	-0,263	0,282	-0,278	0,300	-0,295	0,324	-0,317
2	5	0,547	-0,534	0,599	-0,583	0,570	-0,555	0,536	-0,523	0,495	-0,485	0,443	-0,434
3	4	0,194	-0,193	0,166	-0,166	0,182	-0,182	0,200	-0,200	0,222	-0,222	0,251	-0,251
4	5	0,066	-0,066	0,017	-0,017	0,045	-0,045	0,078	-0,077	0,117	-0,115	0,168	-0,166

Fonte: Resultados obtidos pelo autor.

Tabela 24 - Fluxos de potência reativa do SEP Stagg para controle de fluxo reativo LT_{25} com SSSC.

de	para	Caso Base $Q_{25} = 0,0556$		Caso $Q_{50\%}$ $Q_{50\%} = 0,0278$		Caso $Q_{75\%}$ $Q_{75\%} = 0,0417$		Caso $Q_{100\%}$ $Q_{100\%} = 0,0556$		Caso $Q_{125\%}$ $Q_{125\%} = 0,0695$		Caso $Q_{150\%}$ $Q_{150\%} = 0,0834$	
		Q_{km}	Q_{mk}	Q_{km}	Q_{mk}	Q_{km}	Q_{mk}	Q_{km}	Q_{mk}	Q_{km}	Q_{mk}	Q_{km}	Q_{mk}
1	2	0,740	-0,729	0,736	-0,724	0,738	-0,727	0,740	-0,730	0,743	-0,733	0,746	-0,737
1	3	0,168	-0,175	0,171	-0,179	0,170	-0,177	0,169	-0,176	0,169	-0,174	0,171	-0,173
2	3	-0,025	-0,004	-0,020	-0,010	-0,022	-0,007	-0,024	-0,004	-0,025	-0,002	-0,025	-0,000
2	4	-0,017	-0,008	-0,011	-0,017	-0,014	-0,013	-0,016	-0,009	-0,017	-0,006	-0,017	-0,003
2	5	0,056	-0,048	0,028	-0,029	0,042	-0,038	0,056	-0,047	0,070	-0,056	0,083	-0,066
3	4	0,029	-0,047	0,039	-0,058	0,034	-0,053	0,030	-0,048	0,026	-0,044	0,023	-0,041
4	5	0,005	-0,052	0,024	-0,071	0,015	-0,062	0,007	-0,053	-0,000	-0,044	-0,006	-0,034

Fonte: Resultados obtidos pelo autor.

Tabela 25 - Fasores tensões do SEP Stagg para controle de fluxo reativo LT_{25} com SSSC.

bar-ra	Caso Base $Q_{25} = 0,0556$	Caso $Q_{50\%}$ $Q_{50\%} = 0,0278$	Caso $Q_{75\%}$ $Q_{75\%} = 0,0417$	Caso $Q_{100\%}$ $Q_{100\%} = 0,0556$	Caso $Q_{125\%}$ $Q_{125\%} = 0,0695$	Caso $Q_{150\%}$ $Q_{150\%} = 0,0834$
1	1,0600/+0,000°	1,0600/-0,000°	1,0600/-0,000°	1,0600/-0,000°	1,0600/-0,000°	1,0600/-0,000°
2	1,0000/-2,061°	1,0000/-2,108°	1,0000/-2,083°	1,0000/-2,056°	1,0000/-2,024°	1,0000/-1,985°
3	0,9872/-4,637°	0,9873/-4,482°	0,9871/-4,570°	0,9868/-4,671°	0,9863/-4,791°	0,9853/-4,948°
4	0,9841/-4,957°	0,9842/-4,747°	0,9840/-4,866°	0,9836/-5,002°	0,9830/-5,164°	0,9818/-5,375°
5	0,9717/-5,765°	0,9710/-4,758°	0,9707/-5,325°	0,9698/-5,969°	0,9680/-6,733°	0,9644/-7,728°
SC	-	0,0853/+85,237°	0,0683/+83,731°	0,0490/+82,020°	0,0263/+79,990°	0,0032/-102,655°

Fonte: Resultados obtidos pelo autor.

Tabela 26 - Parâmetros do SSSC obtidos na solução do fluxo de potência controlando fluxo reativo LT_{25} .

	Caso $Q_{50\%}$ $Q_{50\%} = 0,0278$	Caso $Q_{75\%}$ $Q_{75\%} = 0,0417$	Caso $Q_{100\%}$ $Q_{100\%} = 0,0556$	Caso $Q_{125\%}$ $Q_{125\%} = 0,0695$	Caso $Q_{150\%}$ $Q_{150\%} = 0,0834$
\tilde{V}_{SC}	0,0853/+85,2369°	0,0683/+83,7307°	0,0490/+82,0198°	0,0263/+79,9896°	0,0032/-102,6532°
\tilde{I}_{SCkm}	0,6033/-7,6015°	0,5753/-9,2387°	0,5436/-11,1110°	0,5063/-13,3535°	0,4580/-16,3153°
\tilde{I}_{SCmk}	0,5984/+175,1776°	0,5694/+173,6606°	0,5367/+171,9343°	0,4981/+169,8804°	0,4483/+167,1960°
\tilde{S}_{kmSC}	0,3776 - j0,0524	0,3033 - j0,0339	0,2184 - j0,0177	0,1174 - j0,0053	-0,0143 - j0,0000
\tilde{S}_{mkSC}	-0,3639 + j0,0678	-0,2921 + j0,0495	-0,2102 + j0,0316	-0,1128 + j0,0144	0,0137 - j0,0014
$\tilde{S}_{SC \rightarrow k}$	0,0474/+91,5463°	0,0361/+91,6214°	0,0245/+91,7141°	0,0122/+91,8367°	0,0013/-87,9781°
$\tilde{S}_{SC \rightarrow m}$	0,0513/-88,5713°	0,0391/-88,5027°	0,0265/-88,4179°	0,0132/-88,3061°	0,0014/+91,8626°
$\tilde{S}_{SC EQ}$	0,0000 - j0,0039	0,0000 - j0,0030	0,0000 - j0,0020	0,0000 - j0,0010	0,0000 + j0,0001

Fonte: Resultados obtidos pelo autor.

Tabela 27 - Autovalores do SEP Stagg, com SSSC sem atuação de controladores suplementares.

Caso Base	Caso $Q_{50\%}$ $Q_{50\%} = 0,0278$	Caso $Q_{75\%}$ $Q_{75\%} = 0,0417$	Caso $Q_{100\%}$ $Q_{100\%} = 0,0556$	Caso $Q_{125\%}$ $Q_{125\%} = 0,0695$	Caso $Q_{150\%}$ $Q_{150\%} = 0,0834$
	-648,0214	-635,5435	-620,4260	-601,4994	-1403,4685
-987,7846	-997,5723	-988,4389	-988,1530	-988,0002	-987,8949
-997,5136	-989,5847	-997,6971	-997,4185	-997,4787	-997,4995
-0,3490±j9,5882	-991,1451	-995,8681	-1000,3827	-1004,8043	-1010,5162
-12,3880	-0,3570±j9,5585	-0,3525±j9,5744	-0,3478±j9,5921	-0,3425±j9,6124	-0,3363±j9,6384
-0,2759	-12,5231	-12,5260	-12,5304	-12,5374	-12,3932
-2,9030	-0,2758	-0,2758	-0,2758	-0,2758	-0,2759
	-2,8792	-2,8886	-2,8987	-2,9101	-2,9351

Fonte: Resultados obtidos pelo autor.

Tabela 28 - Modos oscilatórios, frequências e coeficientes de amortecimento do SEP Stagg, com atuação do SSSC sem controlador suplementar.

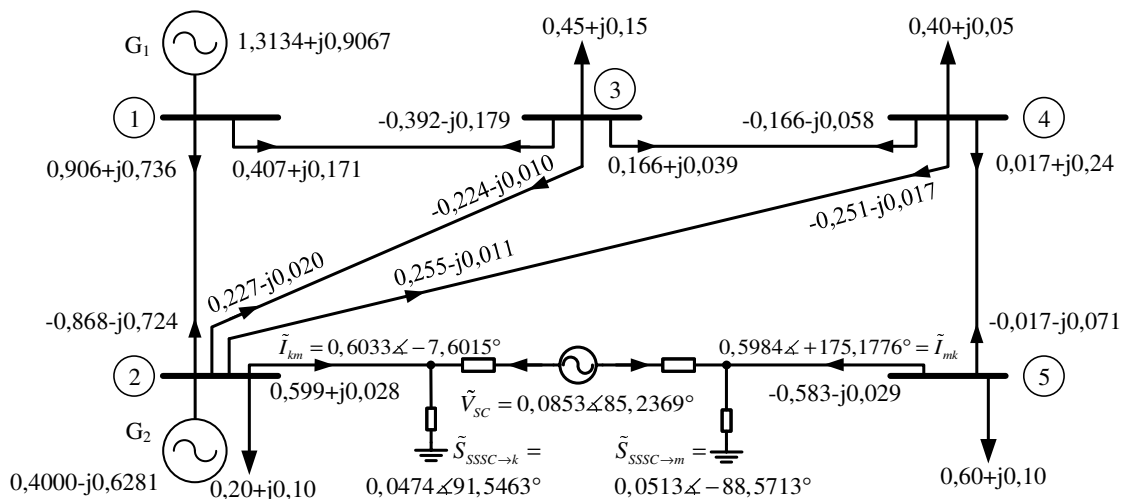
Caso	Modo	Autovalores	ω_n (Hz)	ξ (pu)
Caso Base	Local 1	-0,3490±j9,5882	1,5270	0,0364
Caso $Q_{50\%}$	Local 1	-0,3570±j9,5585	1,5223	0,0373
Caso $Q_{75\%}$	Local 1	-0,3525±j9,5744	1,5248	0,0368
Caso $Q_{100\%}$	Local 1	-0,3478±j9,5921	1,5276	0,0362
Caso $Q_{125\%}$	Local 1	-0,3425±j9,6124	1,5308	0,0356
Caso $Q_{150\%}$	Local 1	-0,3363±j9,6384	1,5349	0,0349

Fonte: Resultados obtidos pelo autor.

O SSSC se apresentou um ótimo recurso ao controle de fluxo de potência reativa a ser aplicado ao sistema de transmissão, controlando de 50% até 150% o fluxo de potência reativa da

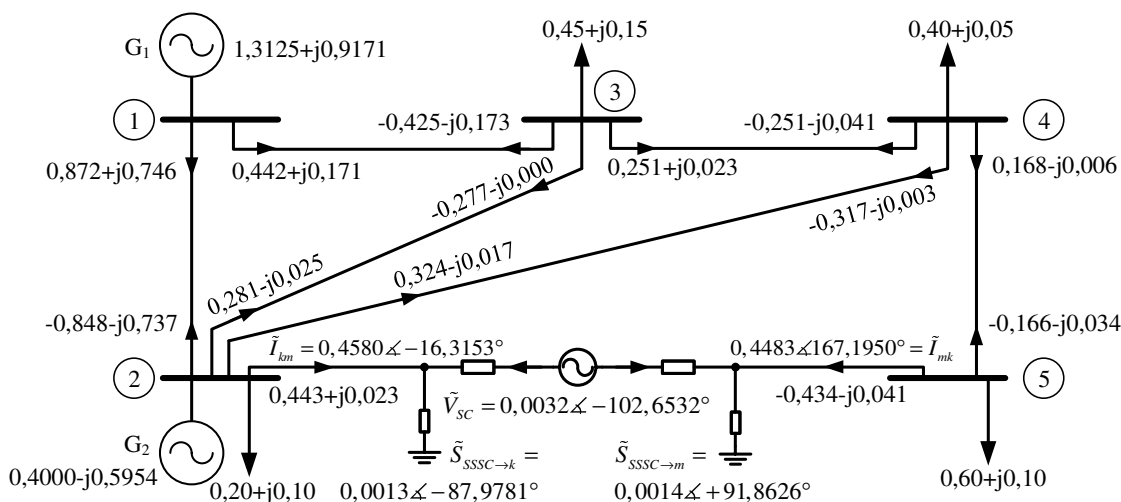
LT 2-5. Com elevada taxa de convergência do método de Newton, e flexibilidade em controlar o fluxo reativo original da LT. Em todos os resultados o SEP sempre se apresentou estável, perdendo pouco amortecimento do caso original.

Figura 32 - Diagrama unifilar do SEP com as potências geradas e transmitidas para $Q_{50\%} = 0,273 pu$.



Fonte: (STAGG; EL-ABIAD, 1968), adaptada pelo autor.

Figura 33 - Diagrama unifilar do SEP com as potências geradas e transmitidas para $Q_{150\%} = 0,820 pu$.



Fonte: (STAGG; EL-ABIAD, 1968), adaptada pelo autor.

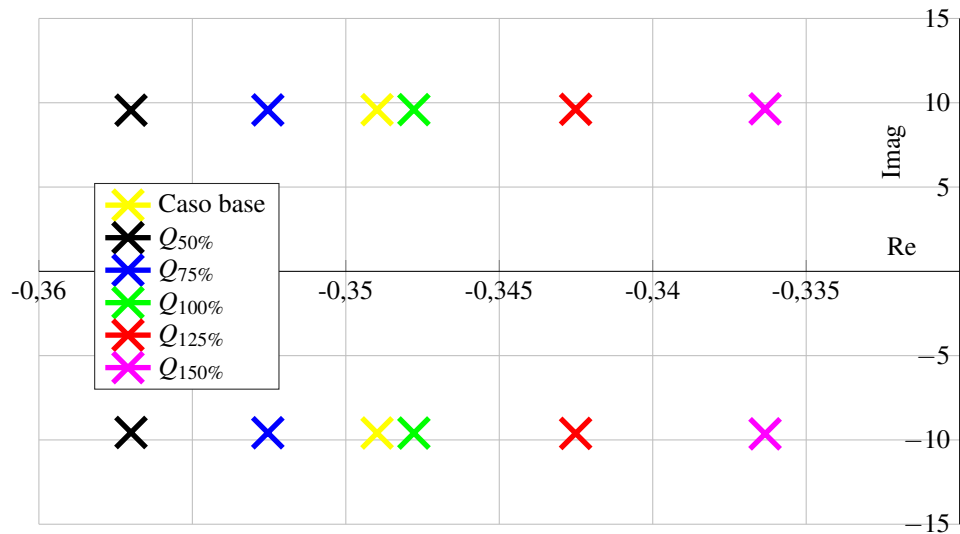
Avaliando os fluxos das tabelas 23 e 24, verifica-se pequena variação no fluxo de potência ativa e reativa. Mesmo na LT 2-5 as mudanças são sutis.

Dos parâmetros do FACTS, na Tabela 26, são pequenas as variações na magnitude da tensão interna do SSSC. A operação do SSSC só comuta de indutivo para capacitivo ($0,0032 / -102,6532^\circ$ pu) no Caso $Q_{150\%}$, trocando pequena potência com o sistema. A corrente trocada entre o SSSC e a LT permanecem elevadas, similar a situação anterior, de controle de fluxo ativo. A potência

inserida pelo SSSC é significativa (0,0040 pu), ao se levar em consideração que o fluxo original da LT é 0,0556 pu.

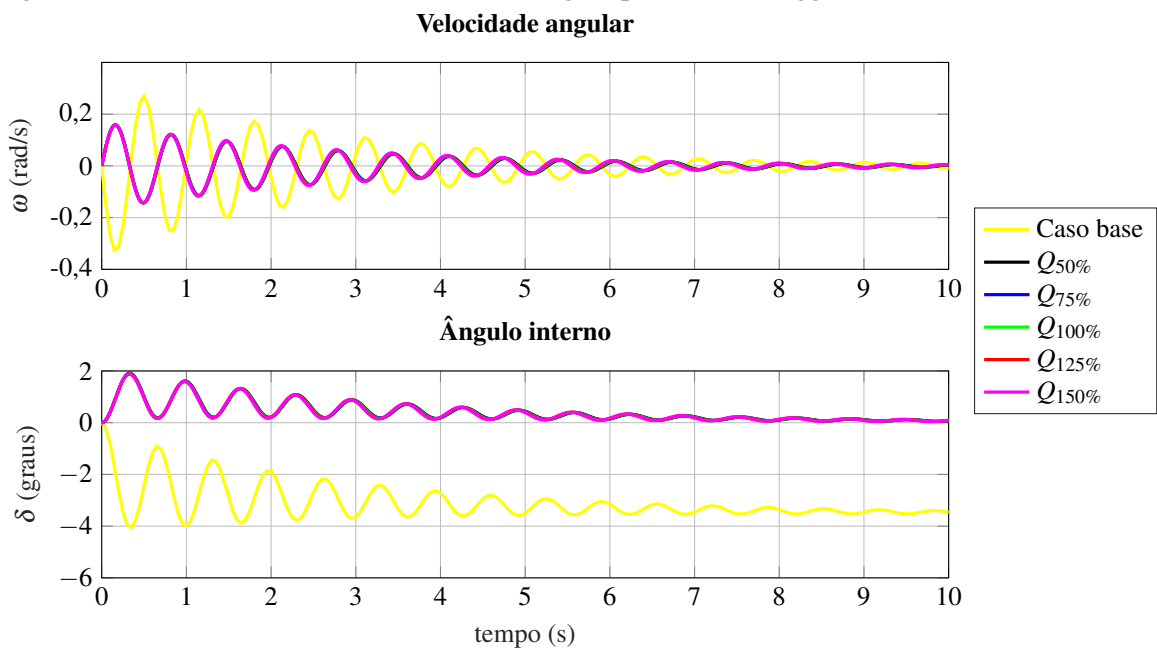
A análise transitória também se assemelha da situação anterior, o SSSC controlando reati- vos pouco modifica o modo oscilante e os demais autovalores, exceto os correspondentes a sua operação. Na Figura 34, o deslocamento no plano complexo do autovalor correspondente ao modo oscilante, e na Figura 35 as curvas da variação da velocidade do rotor e do ângulo interno do gerador 01, com o gerador 02 como referência.

Figura 34 - Autovalores do modo oscilante no sistema Stagg com SSSC controlando o fluxo ativo Q_{25} .



Fonte: Resultados obtidos pelo autor.

Figura 35 - Curvas dinâmicas de velocidade e ângulo para o SEP Stagg com SSSC controlando Q_{25} .



Fonte: Resultados obtidos pelo autor.

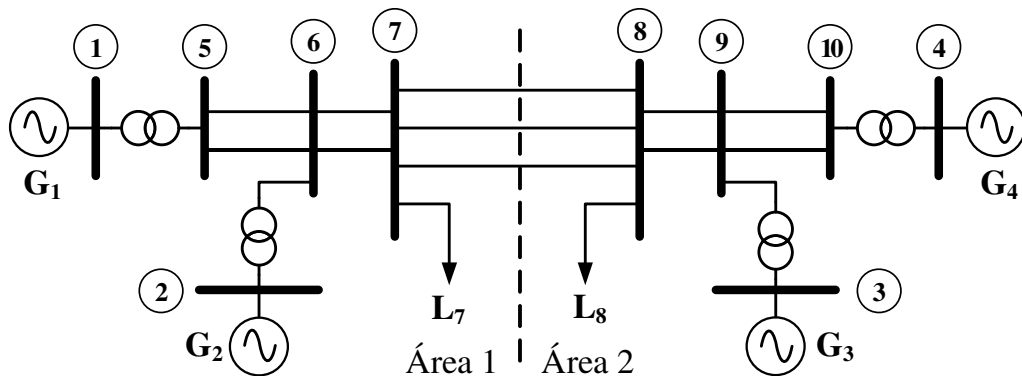
A operação do SSSC controlando fluxo de potência reativa desloca o autovalor sobre o eixo real, mudando pouco a frequência da oscilação.

Até o presente momento, o modelo desenvolvido se mostrou eficaz no controle do fluxo de potência, os valores especificados foram atingidos, e as consequências da aplicação do STATCOM e SSSC avaliadas. Na sequência, são aplicados sistemas de potência testes de maior dimensão, permitindo avaliar a atuação dos controladores e a aplicação simultânea de dispositivos FACTS.

6.2 SISTEMA SIMÉTRICO

O estudo agora é focado no sistema teste simétrico, composto por 4 geradores, 10 barras e 2 cargas distribuídas em duas áreas, apresentado em (SAUER; PAI, 1998), também em (KUNDUR, 1994), e reproduzido no diagrama unifilar da Figura 36.

Figura 36 - Diagrama unifilar do SEP simétrico.



Fonte: (KUNDUR, 1994; SAUER; PAI, 1998), adaptada pelo autor.

Este sistema tem como particularidade, a operação similar a um sistema radial, com os fluxos de potência orientados as cargas, mas mantendo a conexão de duas áreas por um sistema de transmissão fraco. Este arranjo não flexibiliza o controle do fluxo de potência, mas garante problemas de estabilidade ao SEP.

Primeiramente são apresentados os resultados do fluxo de potência originais deste sistema simétrico, na Tabela 29 os fasores tensões, e na Tabela 30 os fluxos de potência.

Neste sistema o fluxo de potência se direciona dos geradores para as carga das barras 7 e 8, e apesar das diversas interligações, se comporta como um sistema radial.

Tabela 29 - Fasores tensões resultantes no sistema simétrico em (pu) no caso base.

Barra	Tensão
1	1,0000 / +8,6831°
2	1,0000 / -2,0881°
3	1,0000 / -11,9243°
4	1,0000 / +0,0000°
5	0,9729 / +3,8461°
6	0,9357 / -6,9280°
7	0,8863 / -16,1618°
8	0,8646 / -26,5749°
9	0,9241 / -16,7652°
10	0,9681 / -5,1487°

Fonte: Resultados obtidos pelo autor.

Tabela 30 - Resultado do fluxo de potência do sistema simétrico em (pu) no caso base.

# Da Barra	# Para Barra	P_{km}	P_{mk}	Q_{km}	Q_{mk}
1	5	7,000	-6,947	1,960	-1,326
2	6	7,000	-6,925	5,053	-4,158
7	8	0,638	-0,626	-0,308	-0,335
7	8	0,638	-0,626	-0,308	-0,335
7	8	0,638	-0,626	-0,308	-0,335
6	7	6,870	-6,752	2,134	-0,999
6	7	6,870	-6,752	2,134	-0,999
4	10	7,437	-7,376	2,361	-1,630
3	9	7,000	-6,915	6,015	-4,993
9	8	7,069	-6,936	2,602	-1,318
9	8	7,069	-6,936	2,602	-1,318
5	6	3,474	-3,407	0,627	-0,101
5	6	3,474	-3,407	0,627	-0,101
10	9	3,688	-3,612	0,780	-0,150
10	9	3,688	-3,612	0,780	-0,150

Fonte: Resultados obtidos pelo autor.

Com o resultado do fluxo de potência, aplicado ao Modelo de Sensibilidade de Potência são determinados os autovalores da matriz de estados A , para o estudo da estabilidade. Na Tabela 31 os modos oscilatórios de baixa frequência (autovalores dominantes - λ), as frequências de oscilação (ω_n em Hz) e o coeficiente de amortecimento (ξ em pu).

Tabela 31 - Modos oscilatórios, frequências e coeficientes de amortecimento do SEP simétrico, no caso base.

Modo	Autovalores	ω_n (Hz)	ξ (pu)
Local 1	-0,2351 ± j6,2944	1,0025	0,0373
Local 2	-0,1576 ± j5,8769	0,9357	0,0268
Interárea	0,0468 ± j4,1404	0,6590	-0,0113

Fonte: Resultados obtidos pelo autor.

Analisando os valores da Tabela 31 conclui-se que este SEP apresenta no ponto de operação original três modos oscilatórios. Dois deles são classificados como modos locais, com parte real negativa, caracterizando oscilações amortecidas. O modo interárea ($0,2 < \omega_n < 0,8 Hz$

(KUNDUR *et al.*, 2004)) possui parte real positiva e é o responsável pela instabilidade do SEP (primeiro método de *Lyapunov*).

Para controlar o fluxo de potência deste sistema, e agregar amortecimento ao modo instável, tornando o sistema hábil a operar seguramente, são inseridos dispositivos FACTS do tipo STATCOM e SSSC. Os efeitos da inserção destes dispositivos na estabilidade é inicialmente estudada, e posteriormente são acrescentados controladores suplementares.

Nas próximas seções do trabalho, o objetivo é avaliar a estabilidade do sistema de potência com a inclusão de dispositivos FACTS. A capacidade de controle de fluxo de potência foi em detalhes avaliada até este ponto.

6.2.1 Sistema simétrico com atuação do dispositivo STATCOM

O sistema simétrico se apresenta instável devido a existência do modo interárea de oscilação de amortecimento negativo, para tornar o sistema estável é proposta a inclusão de dispositivos FACTS com controladores POD, para acréscimo de amortecimento ao modo interárea. Para tanto, é utilizado do método dos resíduos.

A partir do módulo dos resíduos da função de transferência de malha aberta é possível avaliar a localização de instalação do FACTS, e seu efeito no amortecimento de um modo oscilante específico.

No caso do conjunto STATCOM/POD, o controle do fluxo de potência é na tensão da barra de instalação, que pode ser de diferentes intensidades. Para a montagem da Tabela 32 o STATCOM foi instalado em todas as barras do sistema simétrico (com exceção das de geração), atuando no controle de tensão da barra nas intensidades de $\pm 5\%$ e 0% da tensão nominal.

Para a análise da influência do dispositivo STATCOM na estabilidade do sistema de potência se considera o dispositivo operando com o controlador POD, e deste se determina o resíduo e os parâmetros de ajuste do POD para atuação no modo interárea desejando amortecimento de $\xi_{des} = 0,10$. O sinal de entrada do POD para o STATCOM é a potência fornecida pela STATCOM a barra de instalação (ΔP_{ST}). Todos os demais parâmetros são mantidos os considerados nas simulações anteriores.

Para finalizar, o ajuste é aplicado ao controlador, o autovalor e o amortecimento do modo interárea são apresentados na última coluna da Tabela 32, para comprovar a efetividade do STATCOM em amortecer o modo interárea.

Primeiramente avaliando os resultados do fluxo de potência da Tabela 32, verifica-se a ampla faixa de valores que se pode ajustar a tensão com o dispositivo STATCOM (5%). Em todas as aplicações o STATCOM opera na forma indutiva ao especificar a tensão da barra -5% do valor original, e no modo capacitivo ao definir incremento de +5% na tensão da barra de

Tabela 32 - Resultados do fluxo de potência e da análise de estabilidade do SEP simétrico com a atuação do STATCOM controlando a tensão de diferentes barras.

Tensão especificada	$\tilde{V}_{ST} (pu)$	$\tilde{S}_{ST} (pu)$	$\tilde{I}_{ST} (pu)$	Resí- duos	Parâmetros do POD			Autovalor do Interárea	$\xi (pu)$
					K	T_1	T_2		
$V_5=0,924$	0,8719 $\angle +4,7834^\circ$	0,0274 + j4,8413	0,4368 - j5,2196	13,93	0,004	0,7109	0,086	-0,172 ± j4,329	0,0397
$V_5=0,973$	0,9730 $\angle +3,8461^\circ$	0,0000 - j0,0002	0,0000 + j0,0002	17,24	0,003	0,7597	0,079	-0,208 ± j4,401	0,0471
$V_5=1,022$	1,0739 $\angle +1,9805^\circ$	0,0273 - j5,3411	-0,1807 + j5,2251	20,22	0,002	0,8209	0,069	-0,158 ± j4,540	0,0348
$V_6=0,889$	0,8395 $\angle -6,1308^\circ$	0,0245 + j4,3965	-0,5282 - j4,9177	17,58	0,003	0,7185	0,088	-0,336 ± j4,171	0,0803
$V_6=0,936$	0,9357 $\angle -6,9281^\circ$	0,0000 - j0,0004	0,0001 + j0,0004	22,09	0,002	0,7263	0,083	-0,408 ± j4,230	0,0960
$V_6=0,983$	1,0326 $\angle -8,4394^\circ$	0,0251 - j4,9211	0,7351 + j4,9547	29,40	0,001	0,7732	0,074	-0,497 ± j4,285	0,1153
$V_7=0,842$	0,8183 $\angle -16,0458^\circ$	0,0056 + j1,9925	-0,6541 - j2,2741	9,69	0,005	0,7094	0,087	-0,221 ± j4,370	0,0506
$V_7=0,886$	0,8863 $\angle -16,1618^\circ$	0,0000 + j0,0001	0,0000 - j0,0001	11,68	0,005	0,7025	0,084	-0,278 ± j4,474	0,0621
$V_7=0,931$	0,9547 $\angle -16,5363^\circ$	0,0058 - j2,2393	0,6848 + j2,3066	14,21	0,004	0,7041	0,081	-0,354 ± j4,591	0,0768
$V_8=0,821$	0,7996 $\angle -27,6282^\circ$	0,0047 + j1,7831	-1,0067 - j1,9233	10,88	0,006	0,6670	0,091	-0,240 ± j4,352	0,0551
$V_8=0,865$	0,8646 $\angle -26,5748^\circ$	0,0000 - j0,0002	0,0001 + j0,0002	12,53	0,005	0,6632	0,088	-0,270 ± j4,439	0,0607
$V_8=0,908$	0,9303 $\angle -25,7206^\circ$	0,0050 - j2,0394	0,9749 + j2,0239	14,68	0,004	0,6665	0,085	-0,315 ± j4,533	0,0694
$V_9=0,878$	0,8317 $\angle -17,4874^\circ$	0,0214 + j4,0594	-1,3895 - j4,4103	13,90	0,004	0,7076	0,087	-0,362 ± j4,315	0,0837
$V_9=0,924$	0,9241 $\angle -16,7652^\circ$	0,0000 + j0,0001	0,0000 - j0,0001	17,31	0,003	0,7184	0,082	-0,469 ± j4,368	0,1067
$V_9=0,970$	1,0184 $\angle -16,3539^\circ$	0,0231 - j4,6648	1,3537 + j4,6131	23,21	0,002	0,7635	0,074	-0,605 ± j4,330	0,1384
$V_{10}=0,920$	0,8685 $\angle -4,9333^\circ$	0,0262 + j4,7079	-0,4402 - j5,0999	11,24	0,005	0,7169	0,084	-0,406 ± j4,279	0,0948
$V_{10}=0,968$	0,9681 $\angle -5,1487^\circ$	0,0000 + j0,0000	0,0000 + j0,0000	13,79	0,003	0,7681	0,077	-0,130 ± j4,397	0,0295
$V_{10}=1,017$	1,0682 $\angle -5,4166^\circ$	0,0267 - j5,2556	0,4880 + j5,1470	15,62	0,003	0,8119	0,070	-0,101 ± j4,457	0,0226

Fonte: Resultados obtidos pelo autor.

instalação, tal fato pode ser evidenciado avaliando a parte imaginária da potência complexa trocada entre o dispositivo e a barra, na coluna \tilde{S}_{ST} da Tabela 32.

Na coluna “Resíduos” são apresentados os módulos dos resíduos da função de transferência na condição adotada. A instalação na barra 6 é a que apresenta a maior média dos resíduos, e o amortecimento do modo interárea ficou próximo ao valor desejado ($\xi_{des} = 0,10$), a instalação na barra 9 também é efetiva, pois o amortecimento desejado é atingido.

O STATCOM só é capaz de controlar a magnitude da tensão, a partir da injeção de potência reativa a barra, assim, não se pode avaliar de que forma o tipo de controle de fluxo exercido pelo FACTS altera a característica dinâmica do SEP. Mas apresenta-se uma “tendência” de que quanto maior é a tensão na barra, maior o amortecimento obtido.

Para continuar as simulações, a seguir é considerado o FACTS SSSC atuando no mesmo SEP, mas neste caso podendo alterar o tipo de controle exercido.

6.2.2 Sistema simétrico com atuação do dispositivo SSSC

Para o FACTS SSSC são consideradas três possibilidades de controle, sendo a tensão de uma das barras limites da linha de transmissão de instalação, ou o fluxo ativo ou reativo.

O SSSC é instalado em todas as linhas de transmissão, com exceção das barras de geração,

os resultados do fluxo de potência e o estudo da estabilidade realizado ao final.

6.2.2.1 Controle de tensão com SSSC

Nesta seção o SSSC controla a tensão da barra inicial da linha de instalação. Os valores especificados de tensão são iguais ao da seção 6.2.1.

Como sinal de entrada do POD se adota a variação do fluxo de potência ativa da LT de instalação, e o valor desejado para o amortecimento do modo interárea é de $\xi_{des} = 0,10$.

Tabela 33 - Resultados do fluxo de potência e da análise de estabilidade do SEP simétrico com a atuação do SSSC controlando a tensão da barra inicial da LT.

LT	Tensão especificada	$\tilde{V}_{SC} (pu)$	$\tilde{S}_{SC_{EQ}} (pu)$	$\tilde{I}_{km} (pu)$	Resí- duos	Parâmetros do POD			Autovalor do Interárea	$\xi (pu)$
						K	T ₁	T ₂		
5-6	V ₅ =0,924	0,4259/+35,2084°	0-j0,0828	5,3154-j7,6637	5,66	0,211	0,166	0,321	0,049±j4,018	-0,0121
	V ₅ =0,973	0,0012/-95,8485°	0+j0,0002	7,2313-j0,8861	2,89	1,025	0,096	0,612	-0,236±j4,346	0,0543
	V ₅ =1,022	0,5194/+85,9649°	0-j0,0822	7,2845-j0,6523	- ^a	- ^a	- ^a	- ^a	- ^a	- ^a
6-7	V ₆ =0,889	0,1927/-110,3571°	0+j0,0701	16,9974-j6,3590	15,40	0,193	0,111	0,668	-0,366±j3,622	0,1006
	V ₆ =0,936	0,0363/+65,3415°	0-j0,0112	13,9815-j6,4742	11,05	0,231	0,104	0,573	-0,408±j4,058	0,1000
	V ₆ =0,983	0,4064/+61,0454°	0-j0,1153	12,2755-j6,8424	7,27	0,328	0,101	0,559	-0,410±j4,245	0,0961
7-8	V ₇ =0,842	- ^b	- ^b	- ^b	- ^b	- ^b	- ^b	- ^b	- ^b	- ^b
	V ₇ =0,886	0,0001/+78,3246°	0+j0,0000	2,1198-j1,2815	10,84	0,257	0,099	0,597	-0,416±j4,127	0,1002
	V ₇ =0,931	0,3005/+105,1536°	0-j0,0351	2,9122-j0,0045	2,63	62,791	0,010	2,699	-0,790±j7,991	0,0984
8-9	V ₈ =0,821	0,3596/-131,4835°	0-j0,0151	-12,8393+j11,3109	- ^a	- ^a	- ^a	- ^a	- ^a	- ^a
	V ₈ =0,865	0,4147/-126,9076°	0-j0,0165	-13,0547+j9,7579	8,59	0,314	0,105	0,635	-0,387±j3,847	0,1002
	V ₈ =0,908	0,4900/-121,7872°	0-j0,0186	-13,2709+j8,1729	7,82	0,341	0,102	0,621	-0,397±j3,931	0,1004
9-8	V ₉ =0,878	0,1420/-140,7545°	0+j0,0553	12,3059-j15,1141	10,89	0,250	0,105	0,635	-0,392±j3,837	0,1016
	V ₉ =0,924	0,0423/+52,9556°	0-j0,0139	13,0691-j9,9172	8,47	0,322	0,100	0,592	-0,413±j4,125	0,0996
	V ₉ =0,970	- ^b	- ^b	- ^b	- ^b	- ^b	- ^b	- ^b	- ^b	- ^b
10-9	V ₁₀ =0,920	0,4444/+49,6712°	0-j0,0921	7,5171-j6,5189	- ^a	- ^a	- ^a	- ^a	- ^a	- ^a
	V ₁₀ =0,968	0,0019/+72,4331°	0-j0,0003	7,4575-j2,5056	2,51	1,035	0,102	0,573	-0,130±j4,350	0,0298
	V ₁₀ =1,017	- ^b	- ^b	- ^b	- ^b	- ^b	- ^b	- ^b	- ^b	- ^b

-^a O SEP apresentou instabilidade aperiódica devido surgimento de autovalor real positivo. -^b Não houve convergência do fluxo de potência.

Fonte: Resultados obtidos pelo autor.

Dos resultados apresentados na Tabela 33, deve-se comentar da dificuldade do SSSC em controlar a tensão da barra inicial, em várias condições o fluxo de potência não convergiu, e em alguns casos onde ocorre a convergência, o dispositivo altera substancialmente a tensão das demais barras do sistema, ocasionando a instabilidade aperiódica (autovalor puramente real positivo), estes resultados foram suprimidos da tabela.

Para conseguir realizar o controle da tensão, o dispositivo SSSC opera inserindo uma elevada tensão série (\tilde{V}_{SC}) com fase próxima a da corrente que flui pela linha de transmissão. Mesmo que a tensão \tilde{V}_{SC} seja de elevada magnitude, assim como a corrente que flui pela linha de transmissão (\tilde{I}_{km}), a potência trocada pelo SSSC com a LT é inferior ao caso do STATCOM.

Dos resultados obtidos do fluxo de potência, deve-se ressaltar que os parâmetros do SSSC

se apresentam próximos, mas não iguais, mesmo que instalado na mesma linha de transmissão, só alterando a orientação de corrente. No caso sua instalação na LT 8-9 e 9-8 requer ajuste de tensão série e potência (\tilde{V}_{SC} e $\tilde{S}_{SC_{EQ}}$) próximos. Isso se explica, pelo fato do modelo desenvolvido, considerar as susceptâncias *shunts* da linha de transmissão (b_{km}^{sh}), que possuem equivalentes diferentes para as barras 8 e 9.

Da análise transitória, o SSSC foi capaz de amortecer o modo interárea, mas só se instalado nas linhas 6-7, 7-8 ou 8-9. Nas demais existe grande dificuldade de controle pelo dispositivo. O modo interárea nestas linhas atingiram amortecimento próximo ao desejado ($\xi_{des} = 0, 10$).

6.2.2.2 Controle de fluxo ativo com SSSC

Agora se considera o SSSC controlando o fluxo de potência ativa na linha de instalação, nas com variação de $\pm 2\%$ do valor original. São utilizados os mesmos parâmetros de ajuste do SSSC anteriormente aplicados.

Tabela 34 - Resultados do fluxo de potência e da análise de estabilidade do SEP simétrico com a atuação do SSSC controlando o fluxo de potência ativa da LT.

LT	Potência especificada	\tilde{V}_{SC} (pu)	$\tilde{S}_{SC_{EQ}}$ (pu)	\tilde{I}_{km} (pu)	Resí- duos	Parâmetros do POD			Autovalor do Interárea	ξ (pu)
						K	T ₁	T ₂		
5-6	$P_{5-6}=6,808$	$0,9655 \angle -44,9549^\circ$	$0-j0,2728$	$9,7837+j9,8210$	$_{-a}$	$_{-a}$	$_{-a}$	$_{-a}$	$_{-a}$	$_{-a}$
	$P_{5-6}=6,947$	$0,0032 \angle +83,9434^\circ$	$0-j0,0005$	$7,2258-j0,9122$	2,89	0,856	0,105	0,5596	$-0,273 \pm j4,343$	0,0627
	$P_{5-6}=7,086$	$_{-b}$	$_{-b}$	$_{-b}$	$_{-b}$	$_{-b}$	$_{-b}$	$_{-b}$	$_{-b}$	$_{-b}$
6-7	$P_{6-7}=13,465$	$0,2784 \angle -108,6594^\circ$	$0+j0,0893$	$22,5310-j7,6521$	$_{-a}$	$_{-a}$	$_{-a}$	$_{-a}$	$_{-a}$	$_{-a}$
	$P_{6-7}=13,740$	$0,0381 \angle +65,6747^\circ$	$0-j0,0080$	$14,0195-j6,3932$	11,06	0,23	0,104	0,573	$-0,407 \pm j4,054$	0,1000
	$P_{6-7}=14,015$	$_{-b}$	$_{-b}$	$_{-b}$	$_{-b}$	$_{-b}$	$_{-b}$	$_{-b}$	$_{-b}$	$_{-b}$
7-8	$P_{7-8}=1,875$	$0,6060 \angle -85,9440^\circ$	$0+j0,0759$	$2,4068-j0,5710$	9,25	0,253	0,123	0,638	$-0,357 \pm j3,509$	0,1013
	$P_{7-8}=1,913$	$0,0012 \angle +78,2827^\circ$	$0-j0,0001$	$2,1196-j1,2828$	10,84	0,257	0,098	0,596	$-0,416 \pm j4,128$	0,1002
	$P_{7-8}=1,951$	$0,2575 \angle +99,3116^\circ$	$0-j0,0299$	$2,6923-j0,3502$	9,51	0,485	0,092	0,403	$-0,248 \pm j4,642$	0,0533
9-8	$P_{9-8}=13,855$	$_{-b}$	$_{-b}$	$_{-b}$	$_{-b}$	$_{-b}$	$_{-b}$	$_{-b}$	$_{-b}$	$_{-b}$
	$P_{9-8}=14,138$	$0,0589 \angle +53,9874^\circ$	$0-j0,0130$	$13,0693-j9,5530$	8,39	0,325	0,099	0,590	$-0,414 \pm j4,137$	0,0996
	$P_{9-8}=14,421$	$0,1795 \angle -145,1238^\circ$	$0+j0,0506$	$11,9131-j17,1410$	$_{-a}$	$_{-a}$	$_{-a}$	$_{-a}$	$_{-a}$	$_{-a}$
10-9	$P_{10-9}=7,229$	$_{-b}$	$_{-b}$	$_{-b}$	$_{-b}$	$_{-b}$	$_{-b}$	$_{-b}$	$_{-b}$	$_{-b}$
	$P_{10-9}=7,376$	$0,1676 \angle +73,2312^\circ$	$0-j0,0282$	$7,4364-j2,3856$	2,83	1,376	0,082	0,718	$-0,045 \pm j4,281$	0,0105
	$P_{10-9}=7,524$	$0,5102 \angle -122,0717^\circ$	$0+j0,0973$	$7,6041-j4,9051$	4,22	0,883	0,090	0,666	$-0,322 \pm j4,359$	0,0737

$_{-a}$ O SEP apresentou instabilidade aperiódica devido surgimento de autovalor real positivo. $_{-b}$ Não houve convergência do fluxo de potência.

Fonte: Resultados obtidos pelo autor.

Na Tabela 34 observa-se diversos casos em que não há convergência do método de Newton, para o SSSC controlando o fluxo de potência ativa. Essa é uma particularidade característica do SEP simétrico, devido a distribuição simétrica dos elementos em duas áreas, pode-se afirmar que os geradores 1 e 2 alimentam a carga da barra 7, enquanto que os geradores 3 e 4 a carga 8. A distribuição dos fluxos é similar a dois sistemas de características radial, sem rotas alternativas para redistribuição do fluxo de potência.

O fluxo de potência não converge ao aumentar (+2%) o fluxo ativo das linhas 5→6 e 6→7. Fato este esperado, pois o SSSC não deve inserir ativos ($PE_{SC}=0$), e o fornecimento de ativos dos geradores 1 e 2 são fixados na definição do SEP (barra de geração - PV), não existindo outra fonte de fluxo ativo. Análise análoga se faz na redução do fluxo ativos (-2%) de 10→9 e 9→8, pois se os geradores 3 e 4 reduzirem a potência fornecida as cargas das barras 7 e 8, os geradores 1 e 2 não serão mais capazes de alimentar estas cargas. Estes resultados garantem a correta modelagem do fluxo de potência, por não resultar em condições operacionais impossíveis.

O elevado fluxo de potência e corrente que flui nas linhas de transmissão 6-7 e 9-8 dificultam a consideração das não idealidades do SSSC, que é uma impedância inserida em série a da linha de transmissão. Por menor que seja z_{SSSC} (0,0001+j0,01 pu), há grande influência na capacidade de troca de potência entre as barras, exigindo valores impraticáveis de \tilde{V}_{SC} , \tilde{V}_k e \tilde{V}_m , o que instabilizou de forma aperiódica o SEP.

A atuação do conjunto SSSC/POD foi capaz de amortecer o modo interárea nas poucas condições em que o fluxo de potência convergiu, e o amortecimento ficou próximo ao valor desejado.

6.2.2.3 Controle de fluxo reativo com SSSC

Para a análise final da influência na estabilidade, pelo tipo de controle de fluxo exercido pelo SSSC, é considerada a atuação do FACTS controlando o fluxo de potência reativa das linhas analisadas na seção anterior. Utilizando dos mesmos parâmetros e intensidade de controle. Os resultados estão dispostos na Tabela 35.

Tabela 35 - Resultados do fluxo de potência e da análise de estabilidade do SEP simétrico com a atuação do SSSC controlando o fluxo de potência reativa da LT.

LT	Potência especificada	\tilde{V}_{SC} (pu)	$\tilde{S}_{SC_{EQ}}$ (pu)	\tilde{I}_{km} (pu)	Resf- duos	Parâmetros do POD			Autovalor do Interárea	ξ (pu)
						K	T ₁	T ₂		
5-6	$Q_{5-6}=1,230$	$0,0483 \angle +81,7468^\circ$	$0-j0,0076$	$7,1676-j1,1857$	2,94	0,875	0,102	0,573	$-0,226 \pm j4,343$	0,0519
	$Q_{5-6}=1,254$	$0,0337 \angle +82,4742^\circ$	$0-j0,0053$	$7,1870-j1,0954$	2,92	0,869	0,103	0,568	$-0,241 \pm j4,343$	0,0553
	$Q_{5-6}=1,280$	$0,0206 \angle +83,1174^\circ$	$0-j0,0033$	$7,2040-j1,0153$	2,91	0,863	0,104	0,564	$-0,254 \pm j4,344$	0,0585
6-7	$Q_{6-7}=4,183$	$0,0461 \angle +65,5375^\circ$	$0-j0,0097$	$13,9556-j6,4046$	10,95	0,232	0,103	0,571	$-0,408 \pm j4,062$	0,1000
	$Q_{6-7}=4,268$	$0,0401 \angle +65,6410^\circ$	$0-j0,0084$	$14,0037-j6,3960$	11,03	0,231	0,104	0,573	$-0,408 \pm j4,056$	0,1000
	$Q_{6-7}=4,353$	$0,0341 \angle +65,7445^\circ$	$0-j0,0072$	$14,0523-j6,3875$	11,11	0,229	0,104	0,572	$-0,407 \pm j4,050$	0,1000
7-8	$Q_{7-8}=-0,905$	$0,1816 \angle +87,9327^\circ$	$0-j0,0220$	$2,3590-j0,8826$	9,86	0,393	0,092	0,545	$-0,444 \pm j4,412$	0,1000
	$Q_{7-8}=-0,923$	$0,1841 \angle +88,2626^\circ$	$0-j0,0223$	$2,3674-j0,8688$	10,83	0,399	0,092	0,542	$-0,445 \pm j4,425$	0,0999
	$Q_{7-8}=-0,941$	$0,1865 \angle +88,5927^\circ$	$0-j0,0225$	$2,3760-j0,8550$	9,80	0,405	0,092	0,539	$-0,446 \pm j4,437$	0,0999
9-8	$Q_{9-8}=5,100$	$0,0491 \angle +53,4165^\circ$	$0-j0,0109$	$13,0439-j9,7346$	8,48	0,321	0,100	0,591	$-0,414 \pm j4,128$	0,0997
	$Q_{9-8}=5,204$	$0,0424 \angle +53,0224^\circ$	$0-j0,0094$	$13,0262-j9,8611$	8,55	0,318	0,100	0,591	$-0,413 \pm j4,122$	0,0998
	$Q_{9-8}=5,308$	$0,0358 \angle +52,6300^\circ$	$0-j0,0080$	$13,0085-j9,9880$	8,62	0,316	0,100	0,592	$-0,413 \pm j4,116$	0,0999
10-9	$Q_{10-9}=1,529$	$0,0555 \angle +73,1543^\circ$	$0-j0,0093$	$7,4502-j2,4006$	2,55	1,095	0,098	0,597	$-0,100 \pm j4,327$	0,0230
	$Q_{10-9}=1,560$	$0,0358 \angle +72,9243^\circ$	$0-j0,0060$	$7,4528-j2,4341$	2,53	1,071	0,100	0,587	$-0,110 \pm j4,335$	0,0254
	$Q_{10-9}=1,591$	$0,0190 \angle +72,6946^\circ$	$0-j0,0032$	$7,4551-j2,4675$	2,51	1,052	0,101	0,579	$-0,120 \pm j4,343$	0,0276

Fonte: Resultados obtidos pelo autor.

Diferente ao caso anterior, o SSSC facilmente controla o fluxo reativo nas linhas simuladas, em todos os casos houve convergência do método de Newton, e os resultados apresentam uma tendência suave conforme alterada a intensidade de controle desejada.

Ao ser aplicado nas linhas 6→7, 7→8 e 9→8, o amortecimento desejado foi atingido, já nas LT 5→6 e 10→9 o amortecimento do interárea ficou abaixo do desejado.

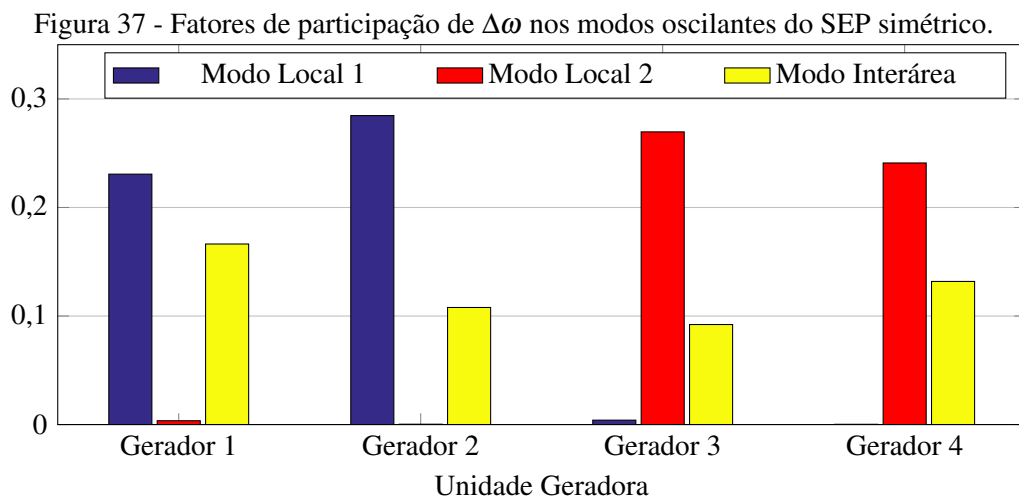
Ao final das simulações dos sistemas Stagg e Simétrico pode-se concluir que o tipo de controle exercido pelo dispositivo FACTS, e a intensidade de controle não alteram significativamente a capacidade de amortecer os modos oscilatórios, sendo mais importante a localização de instalação. A intensidade e o tipo de controle influenciam na capacidade de convergência do fluxo de potência, que em situações específicas, exigem grandes alterações nas tensões e correntes do SEP, e que pode acarretar instabilidades aperiódicas.

6.2.3 Análise da estabilidade para o sistema simétrico

Superadas as simulações que avaliam a influência dos FACTS STATCOM e SSSC na dinâmica do sistema de potência, conforme a atuação, agora o trabalho foca na análise da estabilidade. Os dispositivos são aplicados para acrescentar amortecimento as oscilações eletromecânicas.

Como já apresentado na Tabela 31, o SEP simétrico apresenta dois modos oscilantes locais estáveis. O modo local 1 corresponde as interações entre os geradores 1 e 2, presentes na Área 1. Já o modo local, na Área 2, pela atuação dos geradores 3 e 4.

Para elevar o amortecimento destas oscilações locais é proposta a inclusão de controladores ESP, no sistema de excitação dos geradores pertencentes a estas áreas. Para definir as máquinas de instalação do ESP é utilizado do fator de participação apresentado na seção 5.3.



Fonte: Resultados obtidos pelo autor.

Dos fatores de participação que os geradores da área 1 ($G1$ e $G2$) atuam fortemente na geração do modo local 1, já $G3$ e $G4$ no modo local 2. Portanto, $G2$ e $G3$ terão o controlador ESP instalado.

Para atuação no modo interárea, conforme os resultados anteriores (Tabela 32), pode-se concluir, pela instalação do STATCOM na barra 6 ou 9, controlando a tensão da barra. Em ambos os casos o maior amortecimento foi obtido ao elevar em 5% a tensão destas barras.

Outra possibilidade é a instalação do SSSC podendo controlar a tensão, o fluxo ativo ou reativo. Os melhores resultados foram obtidos ao realizar o controle do fluxo reativo, principalmente pela fácil convergência do método de Newton, independente da intensidade do controle.

Assim, são realizadas simulações considerando o ESP instalado nos geradores 2 e 3 ($ESP2$ e $ESP3$), e em um primeiro momento o STATCOM atuando no sistema controlando a tensão da barra 6 (STATCOM6), e depois da barra 9 (STATCOM9). O ajuste dos controladores é pelo método dos resíduos e pela técnica PSO.

Posteriormente, o STATCOM é substituído pelo SSSC controlando o fluxo ativo e reativo, instalado nas linhas 6-7, 7-8 e 9-8. Com os controladores também ajustados pelos resíduos e PSO.

6.2.3.1 $ESP2$, $ESP3$ e STATCOM no SEP simétrico

Considerando controladores ESP nos geradores 2 e 3, e o STATCOM/POD controlando a tensão da barra de instalação sem alterar o magnitude original, no primeiro caso na barra 6 ($V_6=0,936$ pu), e no segundo caso, STATCOM na barra 9 ($V_9=0,924$ pu). Os parâmetros de ajuste dos controladores que compõem a Tabela 36, são resultados da técnica dos resíduos.

Tabela 36 - Parâmetros de ajuste dos controladores ESP e POD obtido a partir dos resíduos.

Caso	Dispositivo	Resíduo	T_w	K	T_1	T_2
$V_6=0,936$	STATCOM-V6	22,0924	10	0,0022	0,7263	0,0828
	ESP2	0,0804	1	2,3792	0,2280	0,0804
	ESP3	0,0516	1	4,4800	0,2329	0,0516
$V_9=0,924$	STATCOM-V9	17,3160	10	0,0030	0,7184	0,0821
	ESP2	0,0671	1	3,1149	0,2192	0,1151
	ESP3	0,0634	1	3,4013	0,2385	0,1194

Fonte: Resultados obtidos pelo autor.

Na Tabela 37 os autovalores dominantes, frequência de oscilação e amortecimento dos modos oscilatórios, para o sistema simétrico com a atuação dos controladores conforme os parâmetros da Tabela 36.

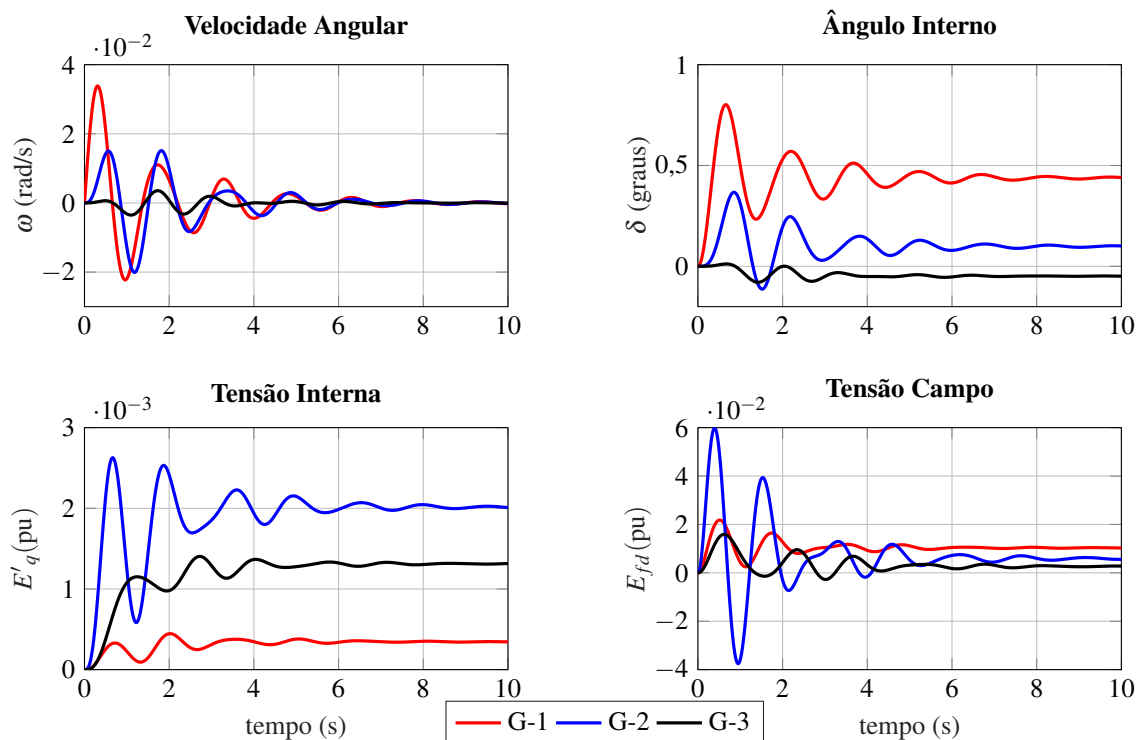
Nas Figuras 38 e 39 as variações de velocidade, ângulo interno, tensão interna e tensão de campo dos geradores 1, 2 e 3 do sistema simétrico, com a atuação dos controladores. Para elaboração das curvas são feitas as mesmas considerações do item 6.2.3.1.

Tabela 37 - Modos oscilatórios, frequências e coeficientes de amortecimento do SEP simétrico, com atuação do STATCOM/POD, ESP2 e ESP3.

Caso	Modo	Autovalores	ω_n (Hz)	ξ (pu)
$V_6=0,936$	Local 1	$-0,7322 \pm j6,1842$	0,9911	0,1176
	Local 2	$-0,5960 \pm j5,7585$	0,9214	0,1029
	Interárea	$-0,4821 \pm j4,1650$	0,6673	0,1150
	Controlador ESP2	$-8,9590 \pm j3,8166$	1,5499	0,9200
	Controlador ESP3	$-8,7898 \pm j4,0326$	1,5391	0,9089
	POD V6	$-2,7707 \pm j5,1402$	0,9294	0,4745
$V_9=0,924$	Local 1	$-0,6205 \pm j6,1703$	0,9870	0,1001
	Local 2	$-0,7076 \pm j5,7197$	0,9173	0,1228
	Interárea	$-0,5897 \pm j4,2936$	0,6898	0,1361
	Controlador ESP2	$-9,3028 \pm j3,7713$	1,5976	0,9267
	Controlador ESP3	$-8,2924 \pm j4,1494$	1,4758	0,8943
	POD V9	$-2,4447 \pm j4,7563$	0,8511	0,4571

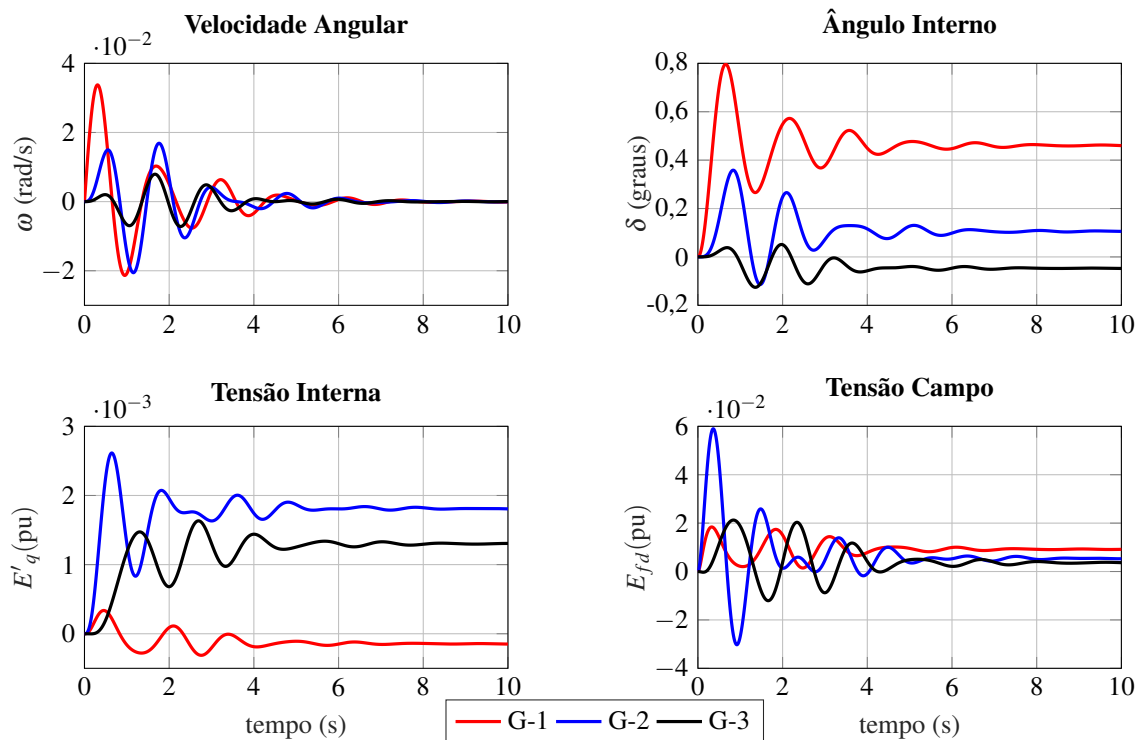
Fonte: Resultados obtidos pelo autor.

Figura 38 - Dinâmica dos geradores para sistema simétrico com atuação dos controladores ESP e STATCOM-V6.



Fonte: Resultados obtidos pelo autor.

Figura 39 - Dinâmica dos geradores para sistema simétrico com atuação dos controladores ESP e STATCOM-V9.



Fonte: Resultados obtidos pelo autor.

6.2.3.2 ESP2, ESP3 e SSSC-Q no SEP simétrico

Considerando controladores ESP nos geradores 2 e 3, e o SSSC/POD controlando o fluxo de potência reativa sem alterar o fluxo original (0%), da linha de transmissão 6-7 ($Q_{67}=4,268$ pu), da 7-8 ($Q_{78}=-0,923$ pu) e da LT 9-8 ($Q_{98}=5,204$ pu). Os parâmetros de ajuste dos controladores, são resultantes da técnica dos resíduos, conforme a Tabela 38.

Tabela 38 - Parâmetros de ajuste dos controladores ESP e POD obtido a partir dos resíduos.

Caso	Dispositivo	Resíduo	T_w	K	T_1	T_2
$Q_{67}=4,268$	SSSC-Q67	11,0225	10	0,2314	0,1035	0,5725
	ESP2	0,0677	1	3,0742	0,2196	0,1148
	ESP3	0,0512	1	4,5318	0,2344	0,1231
$Q_{78}=-0,923$	SSSC-Q78	9,8634	10	0,3972	0,0918	0,5430
	ESP2	0,0820	1	2,2341	0,2294	0,1085
	ESP3	0,0582	1	4,0254	0,2359	0,1202
$Q_{98}=5,204$	SSSC-Q89	8,4745	10	0,3218	0,0997	0,5920
	ESP2	0,0672	1	3,1086	0,2197	0,1148
	ESP3	0,0513	1	4,5144	0,2343	0,1231

Fonte: Resultados obtidos pelo autor.

Na Tabela 39 os autovalores dominantes, frequência de oscilação e amortecimento dos modos oscilatórios, para o sistema simétrico com a atuação dos controladores conforme os parâmetros da Tabela 38.

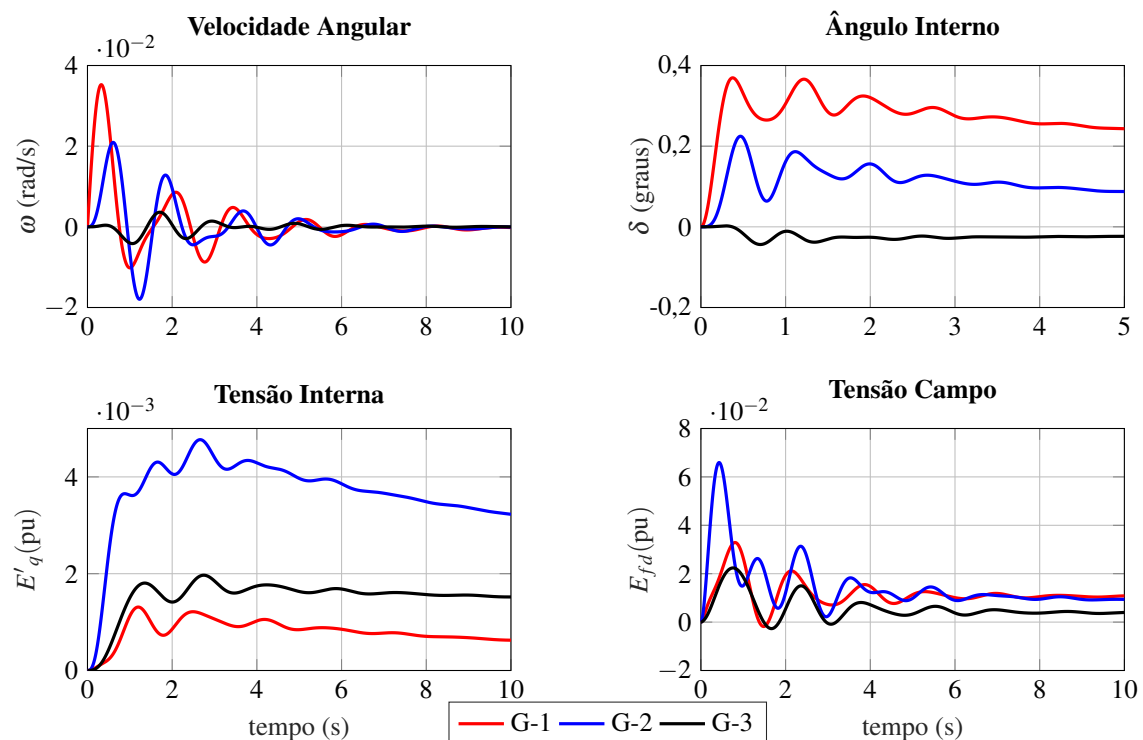
Tabela 39 - Modos oscilatórios, frequências e coeficientes de amortecimento do SEP simétrico, com atuação do SSSC-Q/POD, ESP2 e ESP3.

Caso	Modo	Autovalores	ω_n (Hz)	ξ (pu)
$Q_{67}=4,268$	Local 1	$-0,6133 \pm j6,1767$	0,9879	0,0988
	Local 2	$-0,5911 \pm j5,7543$	0,9207	0,1022
	Interárea	$-0,4633 \pm j4,0160$	0,6434	0,1146
	Controlador ESP2	$-9,4302 \pm j3,8303$	1,6199	0,9265
	Controlador ESP3	$-9,0958 \pm j4,0333$	1,5836	0,9142
	POD Q67	$-1,5775 \pm j0,4343$	0,2604	0,9641
$Q_{78}=-0,923$	Local 1	$-0,6195 \pm j6,1436$	0,9827	0,1003
	Local 2	$-0,6171 \pm j5,7770$	0,9247	0,1062
	Interárea	$-0,6122 \pm j4,3803$	0,7039	0,1384
	Controlador ESP2	$-9,5812 \pm j3,8242$	1,6419	0,9288
	Controlador ESP3	$-8,7891 \pm j4,8967$	1,6013	0,8736
	POD Q78	$-1,6488 \pm j0,8249$	0,2934	0,8943
$Q_{98}=5,204$	Local 1	$-0,6187 \pm j6,1626$	0,9857	0,0999
	Local 2	$-0,5890 \pm j5,7637$	0,9221	0,1017
	Interárea	$-0,4706 \pm j4,0819$	0,6540	0,1145
	Controlador ESP2	$-9,4415 \pm j3,8631$	1,6236	0,9255
	Controlador ESP3	$-9,0888 \pm j4,0104$	1,5811	0,9149

Fonte: Resultados obtidos pelo autor.

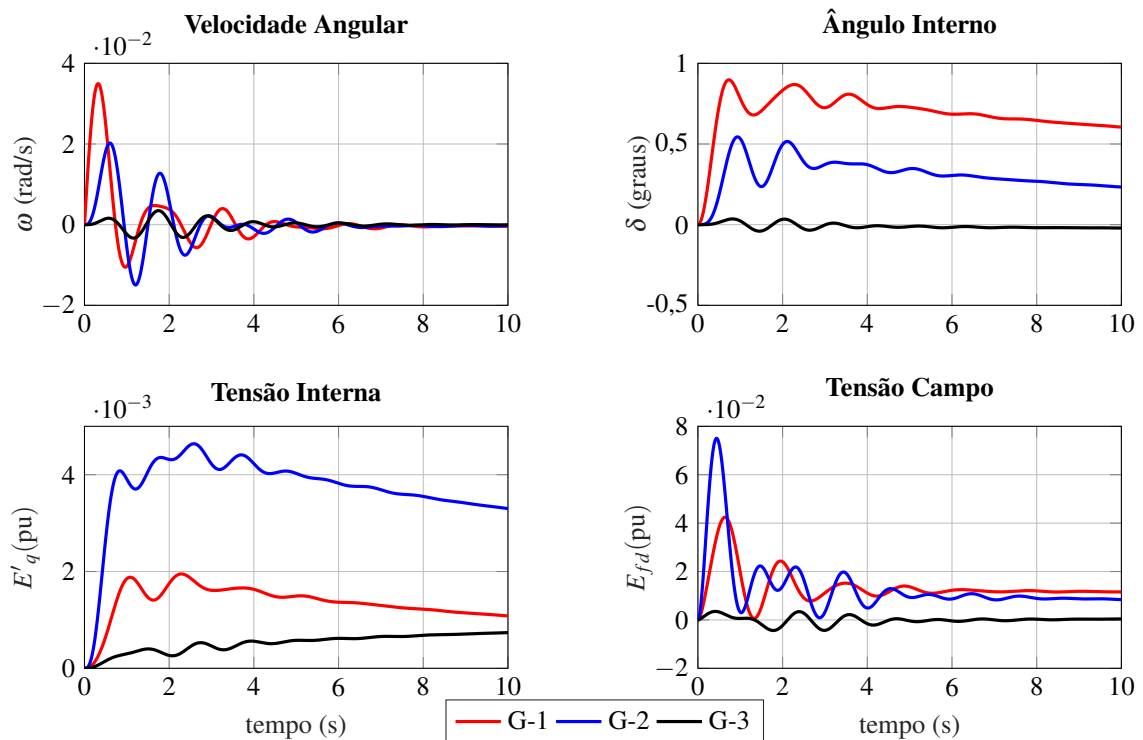
Nas Figuras 40, 41 e 42 as variações de velocidade, ângulo interno, tensão interna e tensão de campo dos geradores 1, 2 e 3 do sistema simétrico, com o gerador 4 como referência para os demais, considerando a atuação dos controladores. Para elaboração das curvas são feitas as mesmas considerações do item 6.2.3.1.

Figura 40 - Dinâmica dos geradores para sistema simétrico com atuação dos controladores ESP e SSSC-Q67.



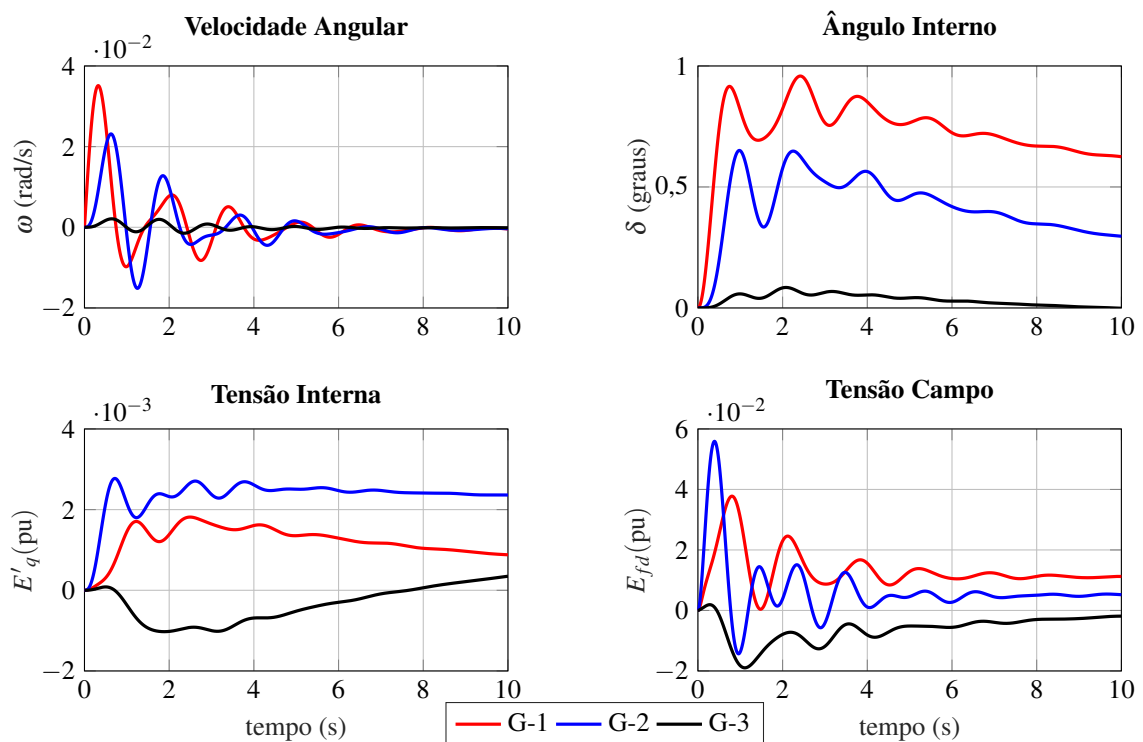
Fonte: Resultados obtidos pelo autor.

Figura 41 - Dinâmica dos geradores para sistema simétrico com atuação dos controladores ESP e SSSC-Q78.



Fonte: Resultados obtidos pelo autor.

Figura 42 - Dinâmica dos geradores para sistema simétrico com atuação dos controladores ESP e SSSC-Q98.



Fonte: Resultados obtidos pelo autor.

6.2.3.3 ESP2, ESP3 e SSSC-P no SEP simétrico

Considerando controladores ESP nos geradores 2 e 3, e o SSSC/POD controlando o fluxo de potência ativa sem alterar o fluxo original (0%), da linha de transmissão 6-7 ($P_{67}=13,740$ pu), da 7-8 ($P_{78}=1,913$ pu) e da LT 9-8 ($P_{98}=14,138$ pu). Os parâmetros de ajuste dos controladores, são resultantes da técnica dos resíduos, conforme a Tabela 40.

Tabela 40 - Parâmetros de ajuste dos controladores ESP e POD obtido a partir dos resíduos.

Caso	Dispositivo	Resíduo	T_w	K	T_1	T_2
$P_{67}=13,740$	SSSC-P67	11,0491	10	0,2310	0,1035	0,5727
	ESP2	0,0675	1	3,0872	0,2195	0,1148
	ESP3	0,0511	1	4,5389	0,2344	0,1231
$P_{78}=1,913$	SSSC-P78	10,8352	10	0,2569	0,0985	0,5965
	ESP2	0,0676	1	3,0835	0,2195	0,1148
	ESP3	0,0515	1	4,4608	0,2342	0,1235
$P_{98}=14,138$	SSSC-P89	8,3889	10	0,3247	0,0994	0,5899
	ESP2	0,0679	1	3,0414	0,2197	0,1148
	ESP3	0,0525	1	4,3027	0,2344	0,1237

Fonte: Resultados obtidos pelo autor.

Na Tabela 41 os autovalores dominantes, frequência de oscilação e amortecimento dos modos oscilatórios, para o sistema simétrico com a atuação dos controladores conforme os parâmetros da Tabela 40.

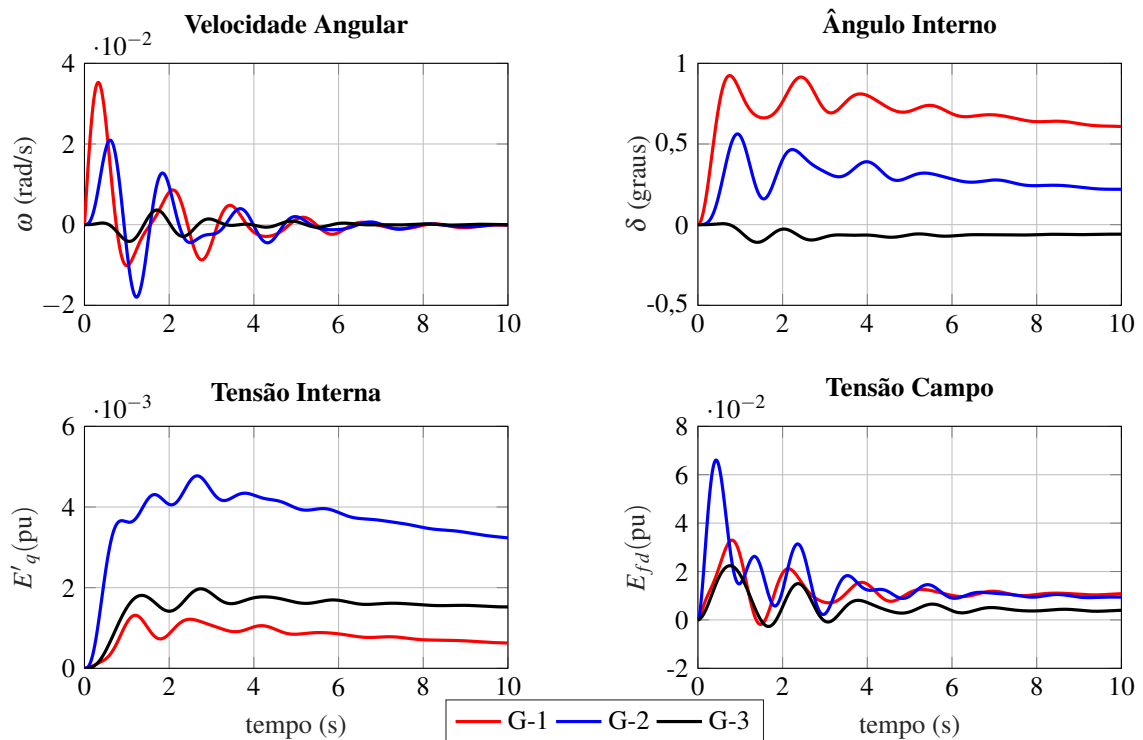
Tabela 41 - Modos oscilatórios, frequências e coeficientes de amortecimento do SEP simétrico, com atuação do SSSC-P/POD, ESP2 e ESP3.

Caso	Modo	Autovalores	ω_n (Hz)	ξ (pu)
$P_{67}=13,740$	Local 1	$-0,6133 \pm j6,1768$	0,9879	0,0988
	Local 2	$-0,5912 \pm j5,7547$	0,9207	0,1022
	Interárea	$-0,4631 \pm j4,0139$	0,6431	0,1146
	Controlador ESP2	$-9,4330 \pm j3,8355$	1,6207	0,9264
	Controlador ESP3	$-9,0966 \pm j4,0357$	1,5838	0,9141
	POD P67	$-1,5775 \pm j0,4435$	0,2608	0,9627
$P_{78}=1,913$	Local 1	$-0,6166 \pm j6,1701$	0,9869	0,0994
	Local 2	$-0,5908 \pm j5,7491$	0,9198	0,1022
	Interárea	$-0,4724 \pm j4,0862$	0,6547	0,1148
	Controlador ESP2	$-9,4434 \pm j3,8376$	1,6223	0,9264
	Controlador ESP3	$-9,0649 \pm j3,9705$	1,5750	0,9160
	POD P78	$-1,5302 \pm j0,7289$	0,2698	0,9028
$P_{98}=14,138$	Local 1	$-0,6192 \pm j6,1625$	0,9857	0,1000
	Local 2	$-0,5862 \pm j5,7538$	0,9202	0,1014
	Interárea	$-0,4709 \pm j4,0956$	0,6561	0,1142
	Controlador ESP2	$-9,4390 \pm j3,8271$	1,6210	0,9267
	Controlador ESP3	$-9,0398 \pm j3,9249$	1,5685	0,9173

Fonte: Resultados obtidos pelo autor.

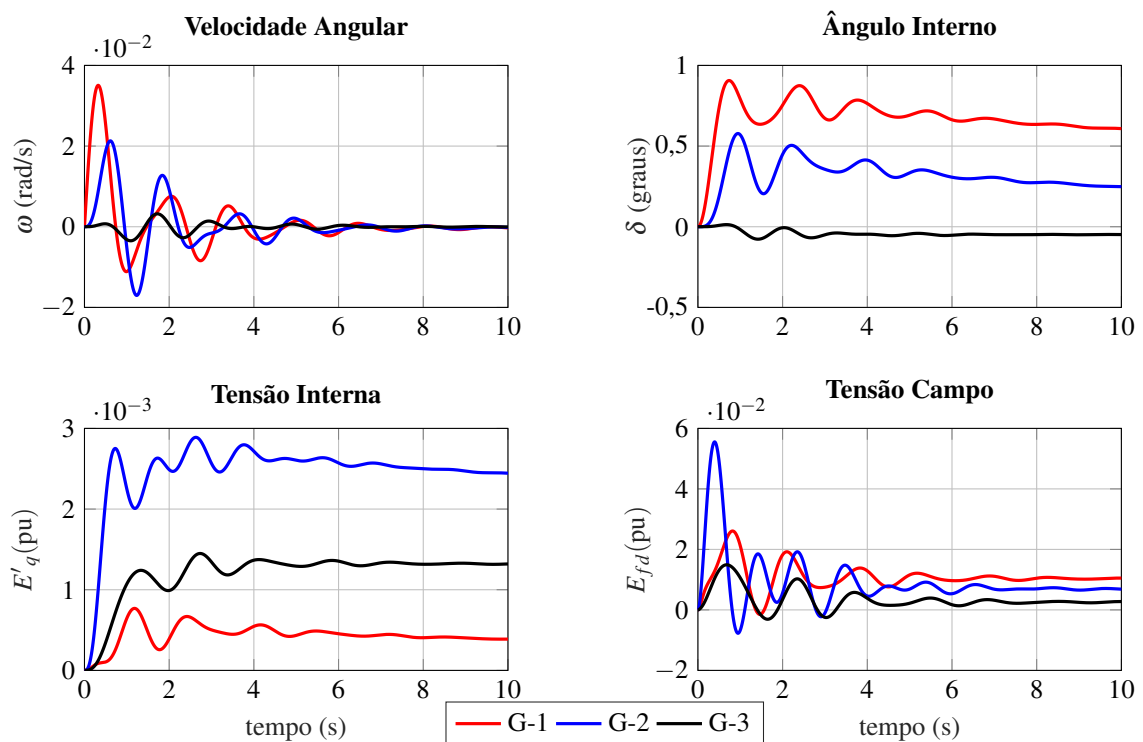
Nas Figuras 43, 44 e 45 as variações de velocidade, ângulo interno, tensão interna e tensão de campo dos geradores 1, 2 e 3 do sistema simétrico, com o gerador 4 como referência para os demais, considerando a atuação dos controladores. Para elaboração das curvas são feitas as mesmas considerações do item 6.2.3.1.

Figura 43 - Dinâmica dos geradores para sistema simétrico com atuação dos controladores ESP e SSSC-P67.



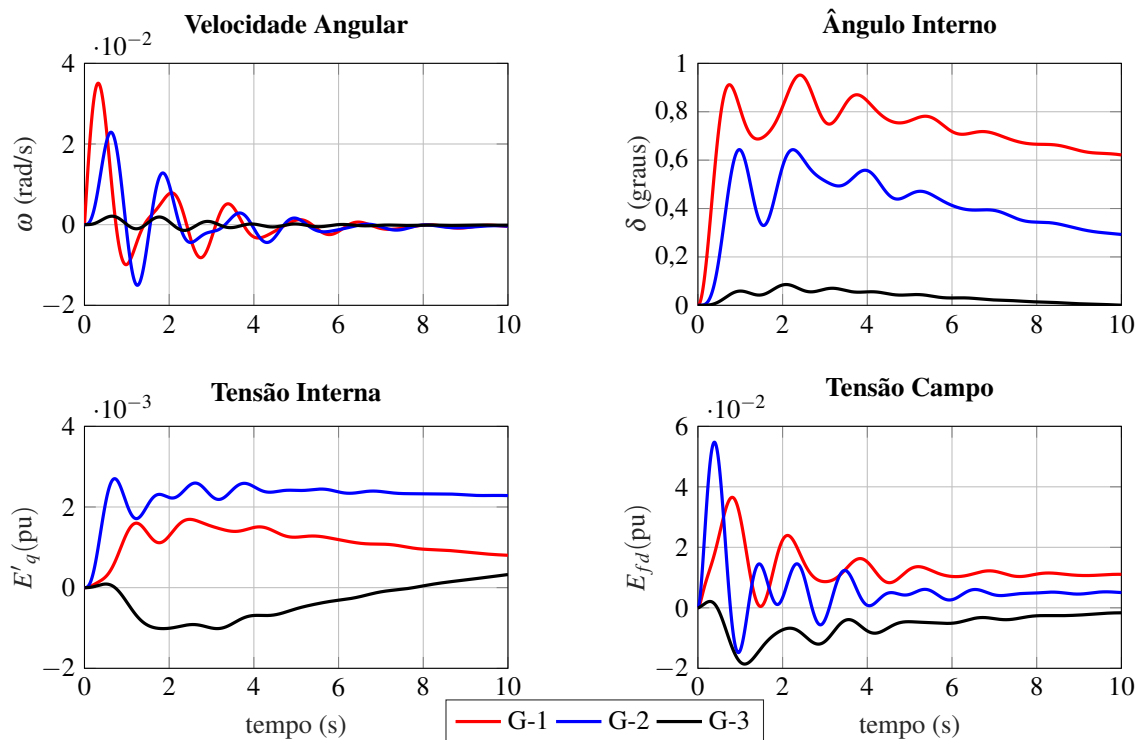
Fonte: Resultados obtidos pelo autor.

Figura 44 - Dinâmica dos geradores para sistema simétrico com atuação dos controladores ESP e SSSC-P78.



Fonte: Resultados obtidos pelo autor.

Figura 45 - Dinâmica dos geradores para sistema simétrico com atuação dos controladores ESP e SSSC-P98.



Fonte: Resultados obtidos pelo autor.

Ao avaliar os resultados obtidos, nota-se que as mudanças são sùteis da operação com SSSC controlando potência ativa ou reativa, em todos os casos os amortecimentos desejados foram atingidos, em alguns casos, maiores que os valores desejados. Pequenas mudanças são notadas entre a atuação do STATCOM e do SSSC.

Conclui-se que os dispositivos FACTS no SEP simétrico é capaz de amortecer o modo oscilatório interárea, enquanto que os dispositivos ESP, amortecem os modos locais. Para buscar o máximo amortecimento de todos os modos oscilantes é aplicado a técnica de ajuste PSO.

6.2.4 Sistema Simétrico com PSOHC

Nos resultados anteriores, se conclui que a presença do dispositivo SSSC no SEP, influencia sua dinâmica, ao controlar o fluxo de potência ativa ou reativa. A localização de instalação do FACTS não alterou significativamente a estabilidade do sistema, desde que instalado entre as barras 6, 7, 8 e 9 (linhas em série). Sendo assim, a proposta agora é aplicar a técnica de otimização PSO desenvolvida na seção 5.6 para encontrar parâmetros de ajustes dos controladores que forneça o máximo amortecimento aos modos oscilatórios.

Para a aplicação do PSO, inicialmente deve-se resolver o fluxo de potência do sistema, conforme o tipo e intensidade de controle desejado, posteriormente aplicar o MSP para obtenção

das matrizes de estados. Neste caso os controladores devem estar ativos, para que seu equacionamento seja incluído nas matrizes, independentemente do ajuste aplicado. Na sequência deve-se executar o PSO, buscando os ajustes dos controladores, que forneçam o máximo de amortecimento as oscilações eletromecânicas (função objetivo).

Na Tabela 42 os parâmetros definidos pelo autor para a execução do PSO. Esses valores são adaptáveis conforme a especificidade do sistema a ser aplicado.

Tabela 42 - Parâmetros especificados para o PSOHC, aplicado ao SEP simétrico.

Partículas	f_{c1}	f_{c2}	f_{c3}	ψ	$\xi_{inicial}$	Máximo iterações	$K_{mín}$	$K_{máx}$	$T_{1mín}$	$T_{1máx}$	$T_{2mín}$	$T_{2máx}$
50	2,0	2,0	2,0	0,4	0,001%	20	0,0001	10,0	0,0001	2,0	0,0001	2,0

Fonte: Valores definidos pelo autor.

Três casos serão estudados, com a atuação do STATCOM instalado na barra 6, e no segundo o SSSC instalado na linha 7-8 controlando o fluxo ativo e reativo.

Tabela 43 - Parâmetros de ajuste dos controladores ESP e POD obtido a partir dos resíduos.

Caso	Dispositivo	T_w	K	T_1	T_2
$V_6=0,9357$	STATCOM-V6	10	0,0023	0,6806	0,0389
	ESP2	1	10,0000	0,3354	0,1713
	ESP3	1	10,0000	0,9064	0,4772
$P_{78}=1,913$	SSSC-P78	10	2,1012	0,1050	0,6599
	ESP2	1	7,8100	1,2975	0,4894
	ESP3	1	9,8751	0,5009	0,2251
$Q_{78}=-0,923$	SSSC-Q78	10	0,8154	0,2716	0,6949
	ESP2	1	4,6044	1,404	0,5990
	ESP3	1	10,0000	0,3942	0,2235

Fonte: Resultados obtidos pelo autor.

Com os ajustes proporcionados pelo PSOHC, eleva-se substancialmente o amortecimento dos modos oscilatórios do SEP simétrico, operando com dois ESP e um FACTS. Na aplicação do STATCOM o modo oscilatório de menor amortecimento foi o Local 2, com 22,65%. E na aplicação do SSSC o modos menos amortecido apresentou 36,35% controlando ativos, e 41,65% de amortecimento ao controlar os reativos.

É preciso destacar que o PSO apresenta valores distintos a cada simulação, ou seja, não apresenta resultados tendenciosos. Em uma simulação pode atingir 5% de amortecimento, e na seguinte 40%.

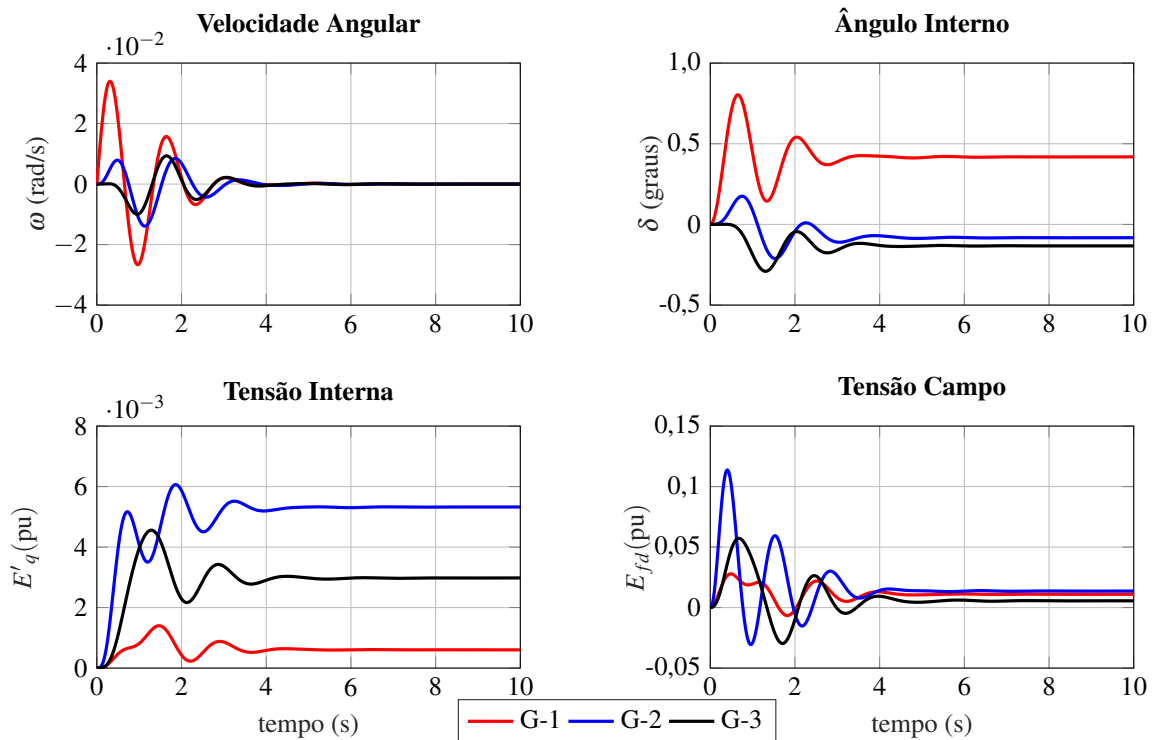
As curvas das Figuras 46, 47 e 48 ilustram o comportamento dinâmico dos geradores para os resultados apresentados na Tabela 44. Para a geração das curvas é aplicada uma perturbação de grau de 5% no torque mecânico do gerador 1.

Tabela 44 - Modos oscilatórios, frequências e coeficientes de amortecimento do SEP simétrico, com atuação do SSSC/POD, STATCOM/POD, ESP2 e ESP3.

Caso	Modo	Autovalores	ω_n (Hz)	ξ (pu)
$V_6=0,935$	Local 1	$-2,8186 \pm j4,9800$	0,9107	0,4926
	Local 2	$-1,2000 \pm j5,1605$	0,8432	0,2265
	Interárea	$-0,9123 \pm j3,7000$	0,6065	0,2394
	Controlador ESP2	$-4,9194 \pm j9,5055$	1,7034	0,4596
	Controlador ESP3	$-2,6531 \pm j6,7032$	1,1474	0,3680
	POD V6	$-2,8576 \pm j2,8777$	0,6454	0,7046
$P_{78}=1,913$	Local 1	$-1,9070 \pm j4,8875$	0,8350	0,3635
	Local 2	$-1,9474 \pm j4,3124$	0,7531	0,4116
	Interárea	$-1,4515 \pm j2,3381$	0,4380	0,5274
	Controlador ESP2	$-5,2010 \pm j9,0982$	1,6679	0,4963
	Controlador ESP3	$-5,6700 \pm j8,2087$	1,5878	0,5683
	POD P78	$-0,5995 \pm j1,1945$	0,2127	0,4486
$Q_{78}=-0,9238$	Local 1	$-2,3608 \pm j5,0321$	0,8846	0,4247
	Local 2	$-2,0450 \pm j4,4642$	0,7815	0,4165
	Interárea	$-1,1892 \pm j2,4851$	0,4385	0,4316
	Controlador ESP2	$-3,5076 \pm j7,4193$	1,3061	0,4274
	Controlador ESP3	$-3,5746 \pm j4,7181$	0,9421	0,6039
	POD Q78	$-1,4508 \pm j0,5685$	0,2480	0,9311

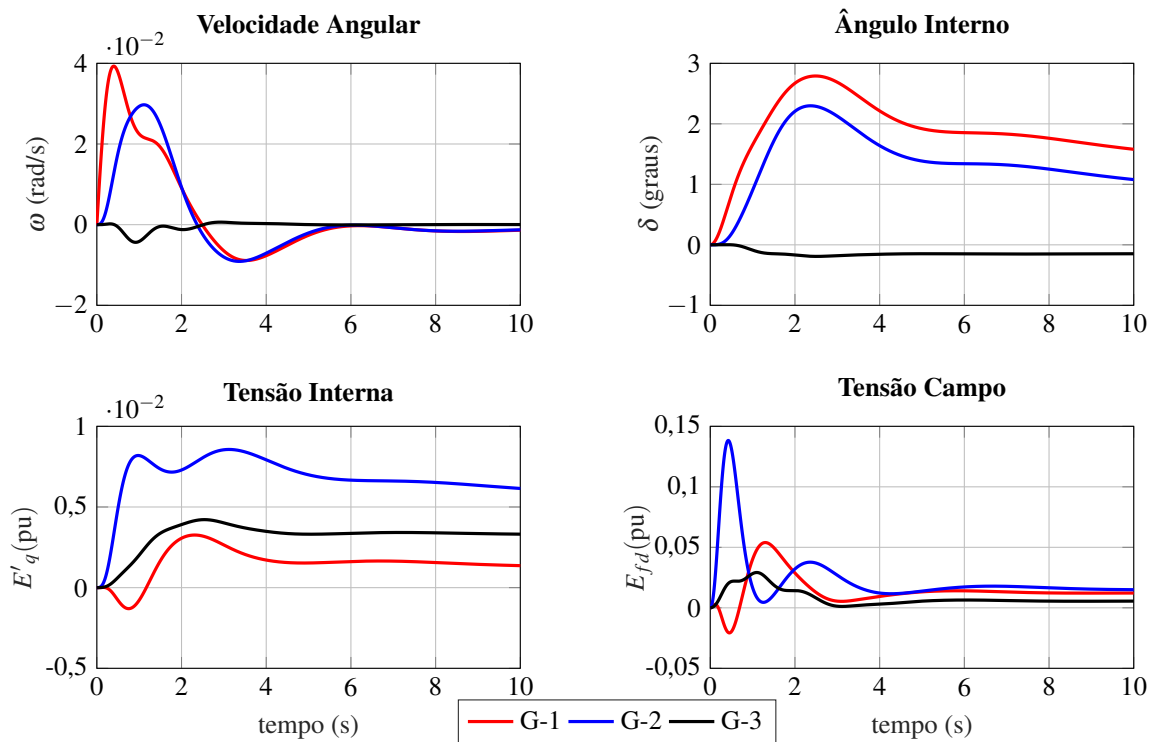
Fonte: Resultados obtidos pelo autor.

Figura 46 - Dinâmica dos geradores para sistema simétrico com atuação dos controladores ESP e STATCOM-V6.



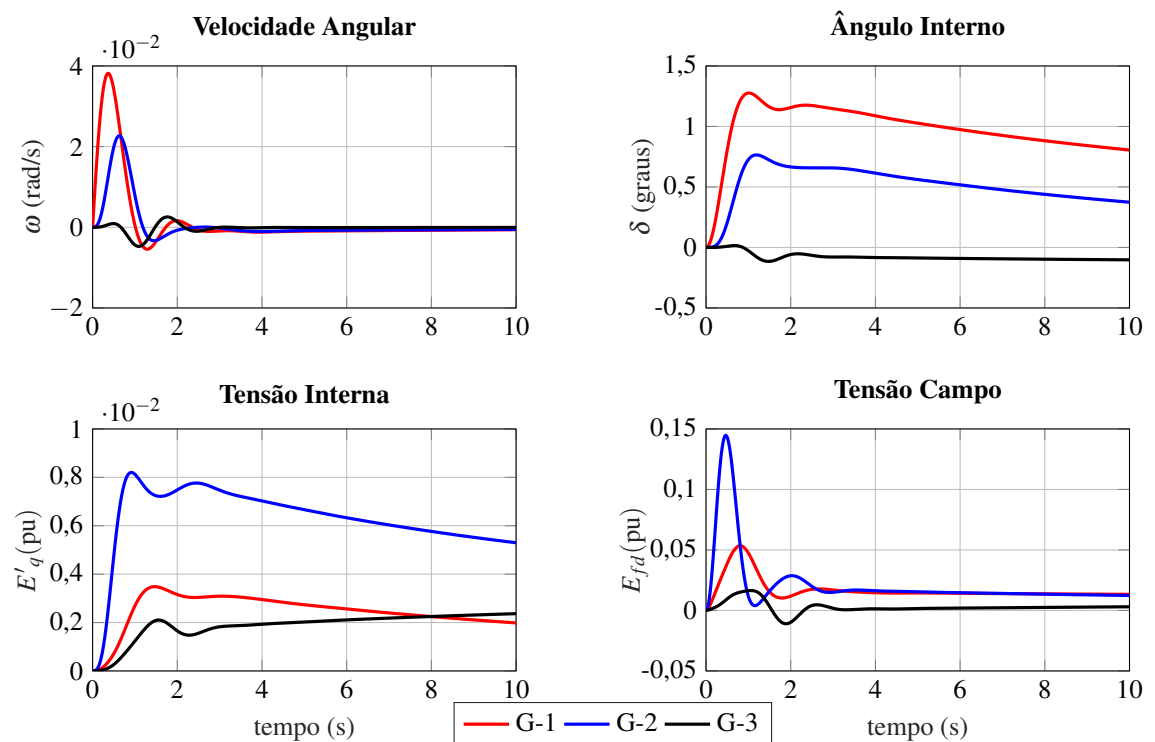
Fonte: Resultados obtidos pelo autor.

Figura 47 - Dinâmica dos geradores para sistema simétrico com atuação dos controladores ESP e SSSC-P78.



Fonte: Resultados obtidos pelo autor.

Figura 48 - Dinâmica dos geradores para sistema simétrico com atuação dos controladores ESP e SSSC-Q78.



Fonte: Resultados obtidos pelo autor.

6.3 SISTEMA NEW YORK

Para comprovar a efetividade da aplicação dos dispositivos FACTS em controlar o fluxo de potência e agregar amortecimento aos modos oscilatórios de baixa frequência, é considerado um sistema de grandes dimensões conhecido como New York, proposto por (ROGERS, 2000). Com dados disponíveis no Apêndice C, o sistema possui 16 geradores, 68 barras e 86 interligações distribuídas em duas áreas.

Graças as dimensões do SEP, vários dispositivos FACTS e controladores POD e ESP devem ser aplicados para tornar o sistema estável, utilizando todo o potencial do modelo desenvolvido.

6.3.1 Análise da estabilidade para o sistema New York

Inicialmente, o SEP New York têm sua estabilidade estudada na condição original, os autovalores, frequência das oscilações e o amortecimento são apresentados na Tabela 45.

Tabela 45 - Modos oscilatórios, frequências e coeficientes de amortecimento do SEP New York na condição original.

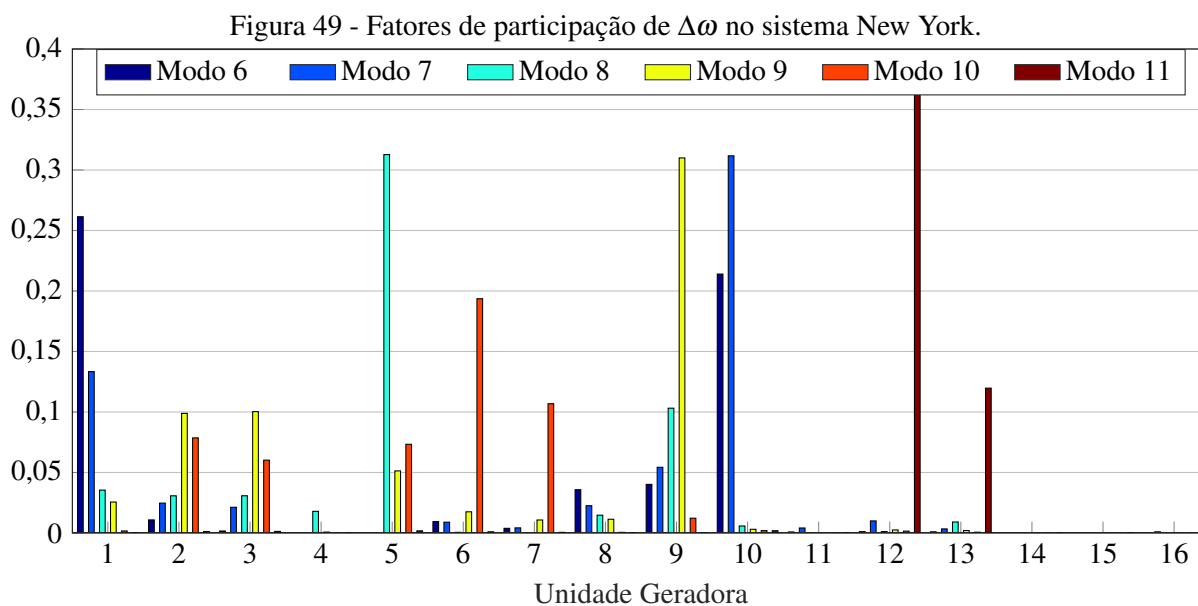
Modo	Autovalores	ω_n (Hz)	ξ (pu)
Local 1	$-0,4924 \pm j10,1650$	1,6197	0,0484
Local 2	$-0,2437 \pm j8,2492$	1,3135	0,0295
Local 3	$-0,2792 \pm j8,2009$	1,3060	0,0340
Local 4	$-0,2438 \pm j8,1133$	1,2919	0,0300
Local 5	$-0,0806 \pm j7,1666$	1,1407	0,0113
Local 6	$0,0122 \pm j7,0598$	1,1236	-0,0017
Local 7	$0,0244 \pm j6,8589$	1,0916	-0,0036
Local 8	$0,1861 \pm j6,0424$	0,9621	-0,0308
Local 9	$0,2301 \pm j6,3706$	1,0146	-0,0361
Local 10	$0,0487 \pm j6,5740$	1,0463	-0,0074
Local 11	$0,0045 \pm j6,3756$	1,0147	-0,0007
Interárea 1	$0,1037 \pm j4,6068$	0,7334	-0,0225
Interárea 2	$0,0201 \pm j4,3341$	0,6898	-0,0046
Interárea 3	$0,0231 \pm j3,6716$	0,5844	-0,0063
Interárea 4	$0,0191 \pm j2,3851$	0,3796	-0,0080

Fonte: Resultados obtidos pelo autor.

Observa-se a existência de 11 modos locais de oscilação, sendo seis destes instáveis devido a falta de amortecimento (parte real positiva). O SEP também apresenta quatro modos interárea, sendo todos instáveis.

Para estabilizar o SEP inicialmente é investigada a participação de cada gerador nos modos locais de oscilação. Com uso da Figura 49 é possível ponderar, qual dos geradores com ESP instalados, que mais participará no amortecimento das oscilações de modo local, no caso, os modos locais instáveis ($0,8 < \omega_n < 2,0$ Hz).

Observa-se grande participação do gerador 1 (GI) no modo local 6, sendo um bom local



Fonte: Resultados obtidos pelo autor.

para instalação do ESP (ESP1) para amortecer o referido modo oscilante. Para amortecer o modo local 7, é instalado o ESP10 no gerador 10, para o modo local 8, o ESP5 em G5. O ESP9 em G9 para o modo local 9, ESP6 em G6 para o modo local 10, e finalmente ESP12 em G12 para o modo local 11.

Com a atuação dos seis ESP aplicados aos geradores, espera-se que os modos oscilantes locais fiquem amortecidos, para tanto devem ser adequadamente parametrizados. Para o ajuste é aplicado o método dos resíduos, sendo duas condições consideradas, na primeira o amortecimento desejado é de 10% ($\xi_{des} = 0,10$), na segunda condição de 20% o amortecimento desejado ($\xi_{des} = 0,20$), resultando nos valores apresentados na Tabela 46.

Tabela 46 - Parâmetros de ajuste dos controladores ESP obtido a partir dos resíduos, para atuação nos modos locais do SEP New York.

Caso	Dispositivo	T_w	K	T_1	T_2
Caso A $\xi_{des} = 0,10$	ESP1	1	14,0001	0,3547	0,0566
	ESP5	1	5,1103	0,3207	0,0853
	ESP6	1	7,9337	0,2963	0,0781
	ESP9	1	6,8364	0,2456	0,1002
	ESP10	1	4,1289	0,3618	0,0587
	ESP12	1	3,6021	0,3141	0,0783
Caso B $\xi_{des} = 0,20$	ESP1	1	27,8674	0,3547	0,0566
	ESP5	1	9,0449	0,3207	0,0853
	ESP6	1	15,3763	0,2963	0,0781
	ESP9	1	11,8939	0,2456	0,1002
	ESP10	1	8,1464	0,3618	0,0587
	ESP12	1	7,2064	0,3141	0,0783

Fonte: Resultados obtidos pelo autor.

Com a aplicação dos controladores ESP, os novos autovalores obtidos no SEP New York são apresentados na Tabela 47.

Tabela 47 - Modos oscilatórios, frequências e coeficientes de amortecimento do SEP simétrico, com atuação dos controladores ESP.

Caso	Modo	Autovalores	ω_n (Hz)	ξ (pu)
Caso A $\xi_{des} = 0,10$	Local 1	$-0,5702 \pm j10,1405$	1,6165	0,0561
	Local 2	$-0,4824 \pm j8,2171$	1,3100	0,0586
	Local 3	$-0,5025 \pm j8,0259$	1,2799	0,0625
	Local 4	$-0,1825 \pm j6,4167$	1,0217	0,0284
	Local 5	$-0,0839 \pm j7,1659$	1,1406	0,0117
	Local 6	$-1,4260 \pm j6,2441$	1,0194	0,2226
	Local 7	$-1,2240 \pm j7,3439$	1,1849	0,1644
	Local 8	$-1,1543 \pm j6,2828$	1,0167	0,1807
	Local 9	$-0,8677 \pm j6,2290$	1,0009	0,1380
	Local 10	$-0,6422 \pm j6,1875$	0,9901	0,1032
	Local 11	$-0,7354 \pm j5,6210$	0,9022	0,1297
	Interárea 1	$0,1024 \pm j4,6014$	0,7325	-0,0222
	Interárea 2	$-0,0700 \pm j4,2172$	0,6713	0,0166
	Interárea 3	$0,0208 \pm j3,6689$	0,5839	-0,0057
	Interárea 4	$0,0226 \pm j2,3902$	0,3804	-0,0095
	Controlador ESP1	$-16,1621 \pm j9,3527$	2,9719	0,8655
	Controlador ESP5	$-11,9490 \pm j8,6030$	2,3434	0,8115
Controlador ESP6	$-13,2524 \pm j6,1827$	2,3274	0,9062	
Controlador ESP9	$-10,8913 \pm j8,5358$	2,2023	0,7871	
Controlador ESP10	$-11,9426 \pm j4,6234$	2,0382	0,9326	
Controlador ESP12	$-9,4948 \pm j6,5597$	1,8367	0,8227	
Caso B $\xi_{des} = 0,20$	Local 1	$-0,6048 \pm j10,0962$	1,6097	0,0598
	Local 2	$-0,5188 \pm j8,1132$	1,2939	0,0638
	Local 3	$-0,4839 \pm j7,8949$	1,2589	0,0612
	Local 4	$-0,2713 \pm j6,5209$	1,0387	0,0416
	Local 5	$-0,0849 \pm j7,1668$	1,1407	0,0118
	Local 6	$-1,2651 \pm j5,8453$	0,9518	0,2115
	Local 7	$-1,3637 \pm j6,8550$	1,1124	0,1951
	Local 8	$-1,2601 \pm j5,4910$	0,8966	0,2237
	Local 9	$-1,7717 \pm j5,1150$	0,8615	0,3273
	Local 10	$-2,3302 \pm j4,7032$	0,8354	0,4439
	Local 11	$-1,2699 \pm j4,9953$	0,8203	0,2464
	Interárea 1	$0,1016 \pm j4,5999$	0,7323	-0,0221
	Interárea 2	$-0,1587 \pm j4,1404$	0,6594	0,0383
	Interárea 3	$0,0174 \pm j3,6672$	0,5837	-0,0048
	Interárea 4	$0,0275 \pm j2,3959$	0,3814	-0,0115
	Controlador ESP1	$-15,6737 \pm j13,6648$	3,3095	0,7538
	Controlador ESP5	$-10,3622 \pm j13,9727$	2,7686	0,5957
Controlador ESP6	$-11,7586 \pm j12,5078$	2,7322	0,6849	
Controlador ESP9	$-12,2192 \pm j9,0192$	2,4171	0,8046	
Controlador ESP10	$-9,1128 \pm j9,4927$	2,0943	0,6925	
Controlador ESP12	$-11,3540 \pm j6,8967$	2,1143	0,8547	

Fonte: Resultados obtidos pelo autor.

Da análise dos autovalores, pode-se concluir que os dispositivos ESP acrescentaram amortecimento aos modos locais, para o quais foram ajustados, e inclusive aos demais. Nos dois casos (A e B) o efeito global da aplicação dos dispositivos ESP acrescentou mais amortecimento que o desejado aos demais modos oscilantes. Isso porque os resíduos ajustam os controladores para

que o autovalor correspondente se desloque até o ponto desejado, sem considerar a influência dos demais dispositivos/controladores.

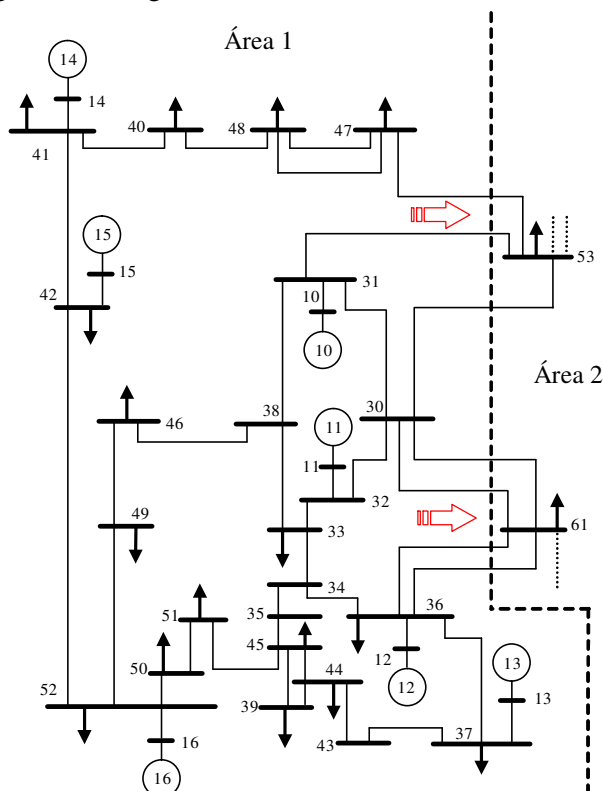
O modo interárea 2, também se tornou estável, com a aplicação dos ESP. Mas os demais modos interárea pouco sofreram influência destes controladores.

Para amortecer os modos interárea, e assim tornar o sistema estável é proposta a inclusão dos dispositivos FACTS com controlador POD, também ajustados por resíduos. Para definir a localização da instalação destes dispositivos é avaliado o módulo dos resíduos, conforme a Tabela 48. Para a obtenção destes resíduos foi considerado o SSSC controlando o fluxo reativo de potência em 0%, devido a fácil convergência desta condição.

Segundo as informações presentes na Tabela 48, para amortecer o modo interárea 1, deve ser alocado um dispositivo FACTS na linha de transmissão que liga as barras 52 e 42. Para atuar no interárea 2, ser instalado na LT 61-36, para o interárea 3 na LT 42-41. Já para o modo interárea 4, resultaram em 6 possíveis linhas de transmissão, com os mais elevados resíduos próximos ao valor de 2,2. Neste caso, algumas hipóteses são formuladas, para definir a melhor localização dos FACTS.

Nos resultados dos resíduos presentes na Tabela 48, as linhas de transmissão que apresentam os maiores módulos dos resíduos são as próximas aos geradores 14, 15 e 16, como pode ser comprovado com uso da Figura 50, que possui o trecho citado.

Figura 50 - Diagrama unifilar do SEP New York reduzido.



Fonte: (ROGERS, 2000), adaptada pelo autor.

Tabela 48 - Resíduos associados ao modos oscilatórios interárea do SEP New York na condição original.

Linha de Transmissão	Módulo dos Resíduos			
	Interárea 1	Interárea 2	Interárea 3	Interárea 4
53-54	0,1525	4,9320	0,1543	0,4999
53-30	0,1858	2,2776	0,3199	0,1576
54-55	0,0092	0,5014	0,0075	0,0564
54-25	0,0344	0,8550	0,0232	0,0460
55-56	0,0207	0,1405	0,0047	0,0017
55-18	0,0508	1,1832	0,0287	0,0461
56-57	0,0646	0,9894	0,0316	0,0142
56-66	0,0160	0,3189	0,0083	0,0143
57-58	0,0020	0,0487	0,0016	0,0045
57-60	0,0589	1,1496	0,0394	0,0354
58-59	0,0456	0,8638	0,0293	0,0277
58-63	0,0451	0,9274	0,0286	0,0242
59-60	0,0389	0,8083	0,0275	0,0279
60-61	0,0318	1,4273	0,1144	0,0748
61-30	0,7559	1,9201	0,0668	0,7266
62-63	0,0356	0,7538	0,0254	0,0388
62-65	0,0236	0,3067	0,0091	0,0060
65-66	0,0158	0,2180	0,0055	0,0010
66-67	0,0327	0,7722	0,0227	0,0225
67-68	0,0760	1,3078	0,0318	0,0105
68-17	0,0738	1,9730	0,0439	0,1200
68-19	0,1096	2,3032	0,0482	0,0462
68-21	0,0263	0,5255	0,0122	0,0166
68-24	0,0125	0,2246	0,0051	0,0035
17-18	0,0481	1,1140	0,0270	0,0484
19-20	0,0233	0,4728	0,0088	0,0031
21-22	0,0253	0,4563	0,0089	0,0013
25-26	0,0113	0,3115	0,0072	0,0236
28-29	0,0045	0,0957	0,0034	0,0126
61-30	0,7559	1,9201	0,0668	0,7266
61-36	1,1667	13,8053	0,5502	0,1338
36-37	1,2925	1,2925	0,0661	1,5101
34-36	1,1537	0,4845	0,2231	0,7225
35-34	0,5949	0,0336	0,3642	0,5743
33-34	0,0625	0,8831	0,0955	0,0061
32-33	0,0175	0,3158	0,0838	0,0049
30-31	0,0738	0,0102	0,0096	0,0594
30-32	0,0039	0,3386	0,0823	0,0033
53-31	0,0082	0,3538	0,1434	0,0018
31-38	0,0400	0,1216	0,0498	0,0086
33-38	0,0634	0,1733	0,0007	0,0214
38-46	0,3679	0,0248	0,3200	0,3513
46-49	0,4370	0,0244	0,3565	0,3948
53-47	0,0014	0,0032	0,0305	0,2145
47-48	0,0032	0,0195	0,5315	2,1747
48-40	0,0033	0,0148	0,4579	2,2741
35-45	0,3954	0,0293	0,2374	0,3951
37-43	0,2193	0,0601	0,0549	0,1374
43-44	0,2506	0,0511	0,0621	0,1399
44-45	0,1289	0,0319	0,0301	0,0830
39-44	0,0360	0,0080	0,0085	0,0206
39-45	0,0505	0,0144	0,0110	0,0340
45-51	2,4344	0,0341	1,2708	2,1200
50-52	2,2222	0,0383	1,2265	2,3386
50-51	2,4980	0,0329	1,4681	2,4012
49-52	0,4582	0,0176	0,3641	0,4488
52-42	4,6347	0,8149	0,2686	1,0925
42-41	0,7989	0,3643	11,1463	0,0121
41-40	0,0014	0,0286	0,6097	2,2775

Fonte: Resultados obtidos pelo autor.

Do diagrama unifilar é possível verificar que a Área 1 se conecta a Área 2 por meio das barras 53 e 61, gerando os modos interárea. Para acrescentar amortecimento aos quatro modos interárea deste sistema é proposta a inclusão do dispositivo FACTS nas proximidades dos geradores que mais contribuem para o surgimento dos modos interárea ($G14$, $G15$ e $G16$).

São avaliadas três situações individuais para cada dispositivo FACTS. O STATCOM/POD será instalado nas barras 41, 50 e 52. Já o SSSC/POD nas linhas de transmissão 50-51, 50-52 e 52-42.

Na Tabela 49 os parâmetros de ajuste dos controladores POD e autovalores resultantes do respectivo ajuste, para dispositivos STATCOM e SSSC em diversas localidades, atuando no amortecimento de específico modo interárea (IA - ver Tabela 47) obtido a partir dos resíduos, para amortecimento do SEP New York. a condição de instalação, os ajustes, os autovalores e amortecimento dos modos interáreas.

Dos resultados da Tabela 49, pode-se concluir que uma boa localização para instalação do FACTS SSSC para amortecimento dos quatro modos interárea, é na linha de transmissão 52-42, pois em acrescentou amortecimento aos quatro interárea, independentemente se ajustado para atuar no modo IA1, 2, 3 ou IA4. Já o STATCOM apresentou bons resultados atuando na barra 52 ou 50, também agregando amortecimento a todos os quatro modos interárea.

Como já definida a instalação do SSSC na LT 52-42, para evitar conflitos de controle do SSSC com o STATCOM, opta-se pela instalação do STATCOM na barra 50.

Definidas as localizações dos FACTS e dos ESP, são ajustados os controladores a partir da técnica dos resíduos, conforme parâmetros apresentados na Tabela 49. Aleatoriamente o dispositivo SSSC é ajustado para controlar o fluxo de potência reativa, mas o controle poderia ser de fluxo ativo. Já o STATCOM controlando a tensão da barra 50, reduzindo em 5% a tensão original desta barra. Optou-se por reduzir a magnitude da tensão, pois essa barra sofre de sobretensões devido a grande quantidade de susceptâncias *shunt* das linhas conectadas a barra ($V_{50} = 1,005pu$).

Tabela 50 - Parâmetros de ajuste dos controladores ESP e POD obtido a partir dos resíduos, para amortecimento do SEP New York.

Dispositivo	T_w	K	T_1	T_2
ESP1	1	14,418	0,3529	0,0568
ESP5	1	5,119	0,3206	0,0854
ESP6	1	7,944	0,2962	0,0781
ESP9	1	6,852	0,2455	0,1003
ESP10	1	4,294	0,3600	0,0590
ESP12	1	3,617	0,3150	0,0781
STATCOM-V50	10	0,0763	0,5039	0,1477
SSSC-Q52-42	10	1,4780	0,1936	0,9254

Fonte: Resultados obtidos pelo autor.

Tabela 49 - Parâmetros do POD, autovalores e amortecimento dos interárea, para o SEP New York.

SSSC/POD									
	LT 50-51			LT 50-52			LT 52-42		
	λ	$\omega_n(Hz)$	$\xi(pu)$	λ	$\omega_n(Hz)$	$\xi(pu)$	λ	$\omega_n(Hz)$	$\xi(pu)$
IA1	$K=2,1949, T_1=0,0696, T_2=0,6895$			$K=1,0239, T_1=0,1081, T_2=0,4420$			$K=0,3161, T_1=0,1591, T_2=0,3081$		
	$0,0257 \pm j4,3277$	0,6888	-0,0059	$0,0283 \pm j4,3341$	0,6898	-0,0065	$-0,0129 \pm j4,3947$	0,6994	0,0029
	$-0,0569 \pm j4,3891$	0,6986	0,0130	$-0,0015 \pm j4,4291$	0,7049	0,0003	$-0,3069 \pm j4,1684$	0,6652	0,0734
	$-0,0452 \pm j3,4725$	0,5527	0,0130	$-0,0097 \pm j3,5322$	0,5622	0,0028	$-0,0139 \pm j3,6607$	0,5826	0,0038
	$-0,0579 \pm j1,9542$	0,3112	0,0296	$-0,0375 \pm j2,0419$	0,3250	0,0184	$-0,0490 \pm j2,1612$	0,3441	0,0227
IA2	$K=25,9763, T_1=0,1683, T_2=0,3164$			$K=389,799, T_1=0,0403, T_2=1,3211$			$K=2,2302, T_1=0,0966, T_2=0,5558$		
	$0,0061 \pm j4,3624$	0,6943	-0,0014	$0,0241 \pm j4,3751$	0,6963	-0,0055	$-1,5897 \pm j4,8247$	0,8085	0,3129
	$0,0409 \pm j4,3306$	0,6893	-0,0094	$0,0390 \pm j4,3438$	0,6914	-0,0090	$-0,0023 \pm j4,3787$	0,6969	0,0005
	$0,0174 \pm j3,4670$	0,5518	-0,0050	$0,0244 \pm j3,5055$	0,5579	-0,0070	$-0,0153 \pm j3,7042$	0,5895	0,0041
	$0,0166 \pm j1,9407$	0,3089	-0,0086	$0,0196 \pm j1,9836$	0,3157	-0,0099	$-0,9936 \pm j2,9029$	0,4883	0,3238
IA3	$K=1,5164, T_1=0,1149, T_2=0,6534$			$K=2,0241, T_1=0,1086, T_2=0,6889$			$K=6,1480, T_1=0,1363, T_2=0,5447$		
	$0,0260 \pm j4,3300$	0,6892	-0,0060	$-0,0190 \pm j4,4255$	0,7044	0,0043	$0,0028 \pm j4,3815$	0,6973	-0,0006
	$-0,0401 \pm j4,4167$	0,7030	0,0091	$0,0283 \pm j4,3322$	0,6895	-0,0065	$-0,0219 \pm j3,7267$	0,5931	0,0059
	$-0,0429 \pm j3,4975$	0,5567	0,0123	$-0,0207 \pm j3,5218$	0,5605	0,0059	$-0,5127 \pm j3,2342$	0,5212	0,1566
	$-0,0689 \pm j1,9817$	0,3156	0,0347	$-0,0483 \pm j2,0096$	0,3199	0,0240	$-0,1667 \pm j1,5338$	0,2455	0,1080
IA4	$K=0,6153, T_1=0,1787, T_2=1,0243$			$K=0,6654, T_1=0,1732, T_2=1,0421$			$K=1,9328, T_1=0,1541, T_2=1,1704$		
	$0,0077 \pm j4,5356$	0,7219	-0,0017	$0,0185 \pm j4,5454$	0,7234	-0,0041	$-0,2266 \pm j4,6378$	0,7390	0,0488
	$0,0223 \pm j4,3328$	0,6896	-0,0052	$0,0223 \pm j4,3339$	0,6898	-0,0051	$-0,0181 \pm j4,3611$	0,6941	0,0042
	$-0,0391 \pm j3,6114$	0,5748	0,0108	$-0,0291 \pm j3,6213$	0,5764	0,0080	$0,0057 \pm j3,6819$	0,5860	-0,0016
	$-0,1774 \pm j2,2095$	0,3528	0,0800	$-0,1712 \pm j2,2206$	0,3545	0,0769	$-0,2177 \pm j2,3504$	0,3757	0,0922
STATCOM/POD									
IA1	Barra 41			Barra 52			Barra 50		
	$K=13,8734, T_1=0,3140, T_2=0,1500$			$K=0,0010, T_1=1,2745, T_2=0,0374$			$K=0,1542, T_1=0,2511, T_2=0,1829$		
	$0,1027 \pm j4,6076$	0,7335	-0,0223	$-0,0109 \pm j4,3637$	0,6945	0,0025	$-0,1171 \pm j4,5172$	0,7192	0,0259
	$0,0186 \pm j4,3393$	0,6906	-0,0043	$-0,4605 \pm j4,3193$	0,6913	0,1060	$-0,0079 \pm j4,3360$	0,6901	0,0018
	$0,0296 \pm j3,8255$	0,6089	-0,0077	$-0,0531 \pm j3,6377$	0,5790	0,0146	$-0,0402 \pm j3,4870$	0,5550	0,0115
$0,0410 \pm j2,5885$	0,4120	-0,0158	$0,0110 \pm j2,3782$	0,3785	-0,0046	$-0,0835 \pm j2,7510$	0,4380	0,0303	
IA2	Barra 41			Barra 52			Barra 50		
	$K=1,4152, T_1=0,4559, T_2=0,1168$			$K=0,0147, T_1=0,7926, T_2=0,0672$			$K=1,8733, T_1=0,2660, T_2=0,2000$		
	$0,1027 \pm j4,6076$	0,7335	-0,0223	$0,0028 \pm j4,3689$	0,6953	-0,0006	$-0,0427 \pm j4,6284$	0,7367	0,0092
	$0,0186 \pm j4,3392$	0,6906	-0,0043	$-0,0583 \pm j3,7358$	0,5947	0,0156	$0,0072 \pm j4,3346$	0,6899	-0,0017
	$0,0282 \pm j3,8254$	0,6088	-0,0074	$-0,0158 \pm j2,3367$	0,3719	0,0068	$-0,0234 \pm j3,6263$	0,5772	0,0064
$0,0388 \pm j2,5881$	0,4120	-0,0150	$-1,4363 \pm j2,8149$	0,5030	0,4545	$-0,0164 \pm j2,5635$	0,4080	0,0064	
IA3	Barra 41			Barra 52			Barra 50		
	$K=0,0223, T_1=0,6658, T_2=0,1115$			$K=0,0193, T_1=0,7629, T_2=0,0982$			$K=0,0706, T_1=0,5129, T_2=0,1435$		
	$0,1031 \pm j4,6036$	0,7329	-0,0224	$0,0035 \pm j4,3686$	0,6953	-0,0008	$-0,0729 \pm j4,4340$	0,7058	0,0164
	$0,0144 \pm j4,3235$	0,6881	-0,0033	$-0,0508 \pm j3,7356$	0,5946	0,0136	$-0,0302 \pm j4,3275$	0,6888	0,0070
	$-0,3720 \pm j3,4400$	0,5507	0,1075	$-0,0266 \pm j2,3395$	0,3724	0,0114	$0,1000 \pm j3,4421$	0,5481	-0,0290
$-0,3910 \pm j2,4952$	0,4020	0,1548	$-1,6306 \pm j2,5127$	0,4767	0,5444	$-0,2965 \pm j2,6797$	0,4291	0,1100	
IA4	Barra 41			Barra 52			Barra 50		
	$K=0,0074, T_1=1,0864, T_2=0,1619$			$K=0,2141, T_1=0,4396, T_2=0,3990$			$K=0,0157, T_1=0,9173, T_2=0,1829$		
	$0,1026 \pm j4,6046$	0,7330	-0,0223	$0,0068 \pm j4,3691$	0,6954	-0,0015	$-0,0301 \pm j4,4762$	0,7124	0,0067
	$0,0135 \pm j4,3272$	0,6887	-0,0031	$-0,0240 \pm j3,7439$	0,5959	0,0064	$-0,0097 \pm j4,3124$	0,6863	0,0022
	$-0,2795 \pm j3,5654$	0,5692	0,0782	$-0,0625 \pm j2,3782$	0,3786	0,0263	$0,1110 \pm j3,5505$	0,5654	-0,0313
$-0,2696 \pm j2,3921$	0,3831	0,1120				$-0,2367 \pm j2,4880$	0,3978	0,0947	

Fonte: Resultados obtidos pelo autor.

Ajustando os controladores, conforme disposto na Tabela 50, é feita a análise da estabilidade do SEP New York partir dos autovalores da matriz de estados, conforme resultados que compõem a Tabela 51.

Tabela 51 - Modos oscilatórios, frequências e coeficientes de amortecimento do SEP New York com SSSC/POD e ESP ajustados por resíduos.

Modo	Autovalores	ω_n (Hz)	ξ (pu)
Local 1	$-0,5569 \pm j10,1267$	1,6142	0,0549
Local 2	$-0,4842 \pm j8,2136$	1,3095	0,0588
Local 3	$-0,5041 \pm j8,0232$	1,2794	0,0627
Local 4	$-1,2265 \pm j7,3443$	1,1851	0,1647
Local 5	$-0,0835 \pm j7,1654$	1,1405	0,0117
Local 6	$-0,1829 \pm j6,4148$	1,0214	0,0285
Local 7	$-1,1769 \pm j6,2783$	1,0166	0,1842
Local 8	$-1,4264 \pm j6,2447$	1,0195	0,2227
Local 9	$-0,6422 \pm j6,1864$	0,9899	0,1033
Local 10	$-0,8822 \pm j6,2201$	0,9999	0,1404
Local 11	$-0,7381 \pm j5,6168$	0,9016	0,1303
Interárea 2	$-0,1703 \pm j4,2584$	0,6783	0,0400
Interárea 1	$-0,3904 \pm j4,4076$	0,7042	0,0882
Interárea 3	$-0,0496 \pm j3,6294$	0,5777	0,0137
Interárea 4	$-0,2649 \pm j2,4338$	0,3896	0,1082
Controlador ESP1	$-16,0565 \pm j9,3966$	2,9609	0,8631
Controlador ESP5	$-13,7030 \pm j5,9095$	2,3751	0,9183
Controlador ESP6	$-11,7188 \pm j8,7147$	2,3243	0,8024
Controlador ESP9	$-10,9095 \pm j8,4333$	2,1946	0,7912
Controlador ESP10	$-12,1343 \pm j4,6307$	2,0671	0,9343
Controlador ESP12	$-9,4879 \pm j6,5834$	1,8380	0,8216
STATCOM/POD V50	$-2,1786 \pm j0,9479$	0,3781	0,9170
SSSC/POD Q52-42	$-1,0231 \pm j0,8741$	0,2142	0,7603

Fonte: Resultados obtidos pelo autor.

Observa-se que com aplicação dos controladores o sistema se tornou estável, todos os modos oscilatórios possuem parte real negativa. A dinâmica deste sistema é ilustrada nas curvas da Figura 51. O gerador 13 é considerado como referência angular para obtenção das curvas.

Apesar de elevado amortecimento de alguns modos oscilatórios, o sistema ainda se apresenta pouco amortecido por conta dos modo local 5 e interárea 3. Por este motivo é proposta a aplicação da técnica PSOHC para o ajuste dos controladores. Os valores definidos para o PSO neste caso estão descritos na Tabela 52.

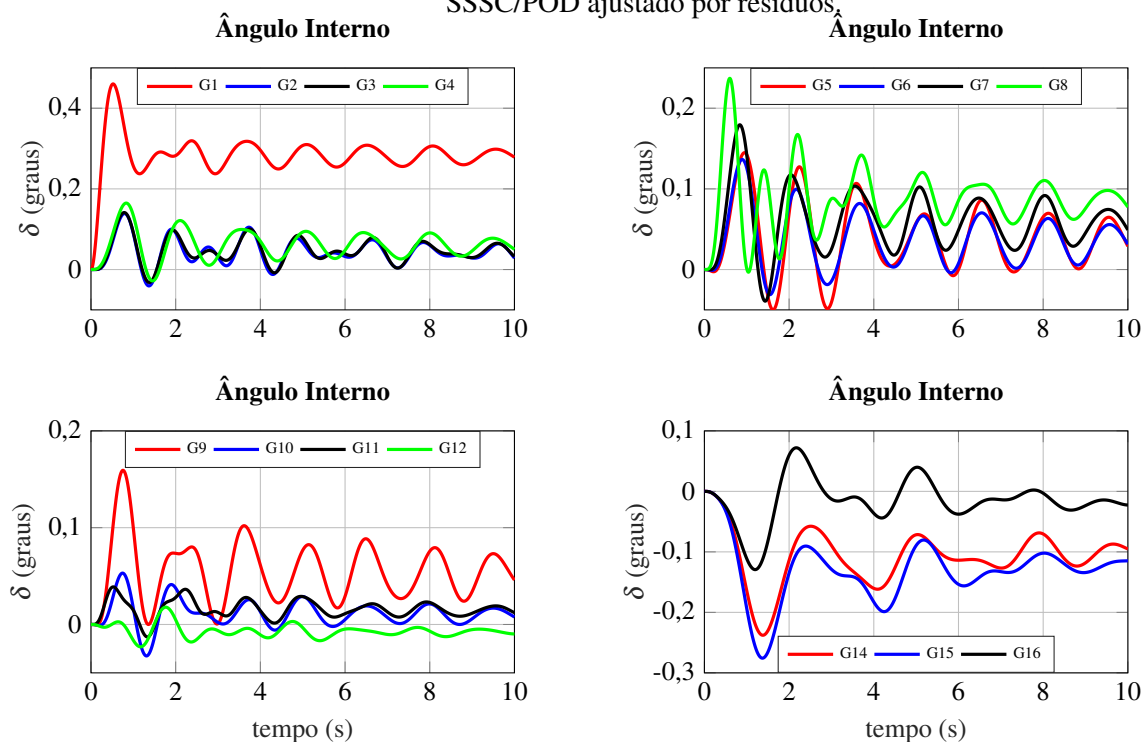
Tabela 52 - Parâmetros especificados para o PSOHC, aplicado ao SEP New York.

Partículas	f_{c1}	f_{c2}	f_{c3}	ψ	$\xi_{inicial}$	Máximo iterações	$K_{mín}$	$K_{máx}$	$T_{1mín}$	$T_{1máx}$	$T_{2mín}$	$T_{2máx}$
70	2,0	2,0	0,4	0,3	0,001%	10	0,0001	22,0	0,0001	1,5	0,0001	1,5

Fonte: Valores definidos pelo autor.

Apesar das adaptações nos parâmetros do PSOHC, existe dificuldade do método em atualizar os ajustes dos controladores, isso devido a grande dimensão do SEP, e a quantidade de

Figura 51 - Dinâmica dos geradores para sistema New York com atuação dos controladores ESP e SSSC/POD ajustado por resíduos.



Fonte: Resultados obtidos pelo autor.

controladores ativos. Os valores encontrados de ajuste dos controladores ESP e POD compõem a Tabela 53. Os autovalores resultante na Tabela 54.

Tabela 53 - Parâmetros de ajuste dos controladores ESP e POD obtido a partir do PSOHC, para amortecimento do SEP New York.

Dispositivo	T_w	K	T_1	T_2
ESP1	1	19,682	0,34838	0,0001
ESP5	1	0,3969	0,57983	0,0001
ESP6	1	21,0400	0,4489	0,0001
ESP9	1	16,9020	0,2437	0,01147
ESP10	1	5,0543	0,0046	0,02047
ESP12	1	10,6860	0,0001	0,0001
SSSC Q52-42	10	2,8600	0,4685	1,7513
STATCOM V50	10	0,2670	1,7674	0,0001

Fonte: Resultados obtidos pelo autor.

Da análise dos autovalores, e da curva da variação do ângulo interno dos geradores do SEP da Figura 52, pode-se concluir que o PSO atingiu um ponto operacional ligeiramente melhor (modo menos amortecido 1,42%) que o obtido por resíduos (1,17%). Não foram obtidos melhores resultados pela existência de modos locais pouco amortecidos, que não sofrem influência dos ESP instalados ($G1$, $G5$, $G6$, $G9$, $G10$ e $G12$).

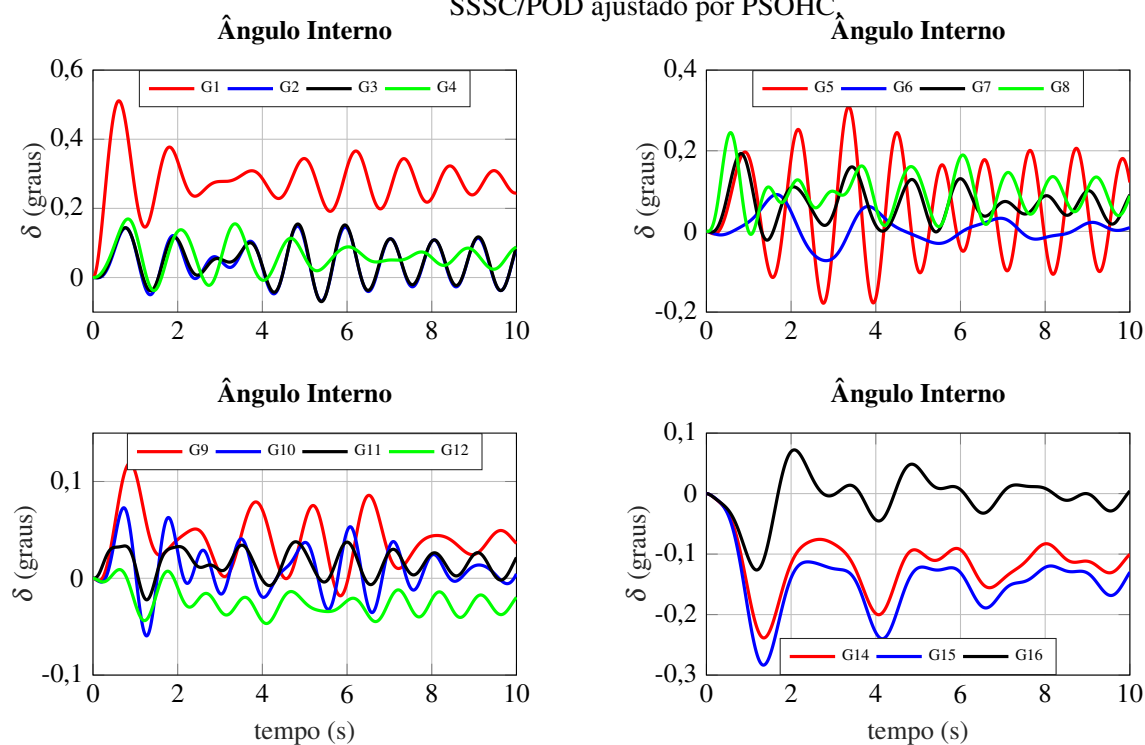
Para melhorar a característica dinâmica do SEP New York é proposta a ativação dos ESP de todos os 16 geradores deste sistema, o STATCOM permanece instalado na barra 50, reduzindo em 5% a tensão desta barra, e o SSSC na LT 52-42, mantendo o fluxo reativo original. Para

Tabela 54 - Modos oscilatórios, frequências e coeficientes de amortecimento do SEP New York com SSSC/POD e ESP ajustados pela técnica PSOHC.

Modo	Autovalores	ω_n (Hz)	ξ (pu)
Local 1	$-0,4790 \pm j10,1494$	1,6171	0,0471
Local 2	$-0,3492 \pm j8,1707$	1,3016	0,0427
Local 3	$-0,3814 \pm j7,9504$	1,2668	0,0479
Local 4	$-0,2045 \pm j7,0657$	1,1250	0,0289
Local 5	$-0,1016 \pm j7,1602$	1,1397	0,0142
Local 6	$-0,1015 \pm j7,1518$	1,1384	0,0142
Local 7	$-0,1790 \pm j6,7978$	1,0823	0,0263
Local 8	$-0,0900 \pm j5,9537$	0,9477	0,0151
Local 9	$-0,2728 \pm j5,7579$	0,9174	0,0473
Local 10	$-0,3978 \pm j4,1413$	0,6621	0,0956
Local 11	$-0,3570 \pm j3,0728$	0,4923	0,1154
Interárea 1	$-0,2094 \pm j4,6763$	0,7450	0,0447
Interárea 2	$-0,3859 \pm j3,9108$	0,6254	0,0982
Interárea 3	$-0,1025 \pm j3,6613$	0,5829	0,0280
Interárea 4	$-0,2139 \pm j2,3340$	0,3730	0,0913
Controlador ESP1	$-80,6493 \pm j106,2376$	21,2284	0,6046
Controlador ESP6	$-48,9095 \pm j1,4675$	7,7877	0,9996
Controlador ESP9	$-1,2249 \pm j0,3177$	0,2014	0,9680
STATCOM/POD 50	$-0,6897 \pm j0,4948$	0,1351	0,8125
SSSC/POD 52-42	$-0,2784 \pm j0,3810$	0,0751	0,5900

Fonte: Resultados obtidos pelo autor.

Figura 52 - Dinâmica dos geradores para sistema New York com atuação dos controladores ESP e SSSC/POD ajustado por PSOHC.



Fonte: Resultados obtidos pelo autor.

ajuste dos controladores é utilizado do PSOHC, para buscar um bom amortecimento a todos os modos oscilantes do SEP.

Uma vantagem do PSO é que não é necessário indicar em qual modo oscilatório qual controlador atuará. Isso reduz os esforços do operador que deve especificar um controlador para cada modo oscilante, dependendo de técnicas como resíduos, fator de participação etc. Mas é necessário antes definir a localização dos dispositivos FACTS. Os parâmetros de ajuste utilizados no PSO são apresentados na Tabela 55.

Tabela 55 - Parâmetros especificados para o PSOHC, aplicado ao SEP New York.

Partículas	f_{c1}	f_{c2}	f_{c3}	ψ	$\xi_{inicial}$	Máximo iterações	$K_{mín}$	$K_{máx}$	$T_{1mín}$	$T_{1máx}$	$T_{2mín}$	$T_{2máx}$
30	0,2	0,2	0,1	0,3	0,001%	10	0,0001	20,0	0,0001	1,8	0,0001	1,8

Fonte: Valores definidos pelo autor.

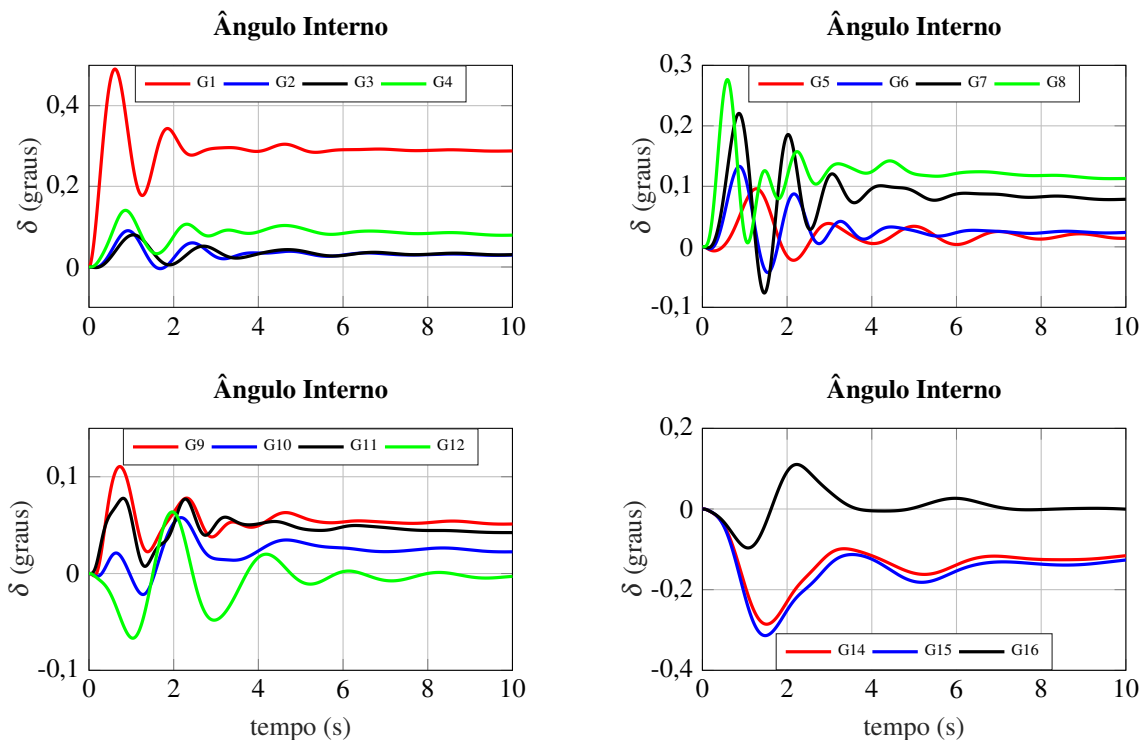
Os pequenos valores de inércia e de correção das funções objetivos, se apresentam interessantes nesta nova condição, já que são 18 controladores dependentes de ajustes. Os parâmetros obtidos estão distribuídos na Tabela 56.

Tabela 56 - Parâmetros de ajuste dos controladores ESP e POD obtido a partir do PSOHC, para amortecimento do SEP New York.

Dispositivo	T_w	K	T_1	T_2
ESP1	1	19,4580	0,3751	0,0200
ESP2	1	19,5301	0,2575	0,0277
ESP3	1	19,3735	0,3213	0,0225
ESP4	1	4,1526	1,4640	0,4455
ESP5	1	19,5302	0,3418	0,0119
ESP6	1	19,5723	0,1134	0,0108
ESP7	1	0,4090	0,7334	0,0141
ESP8	1	0,0077	1,4482	0,4934
ESP9	1	16,6125	0,7997	0,4438
ESP10	1	8,4448	1,4171	0,3361
ESP11	1	0,0462	0,1021	0,0265
ESP12	1	19,4285	0,4928	0,0124
ESP13	1	19,4719	0,2776	0,0510
ESP14	1	19,4978	0,8124	0,4753
ESP15	1	5,6955	0,0087	0,0151
ESP16	1	0,0114	0,0113	0,0286
SSSC/POD Q52-42	10	1,7866	0,1585	0,5032
STATCOM/POD V50	10	0,0217	0,0143	0,0096

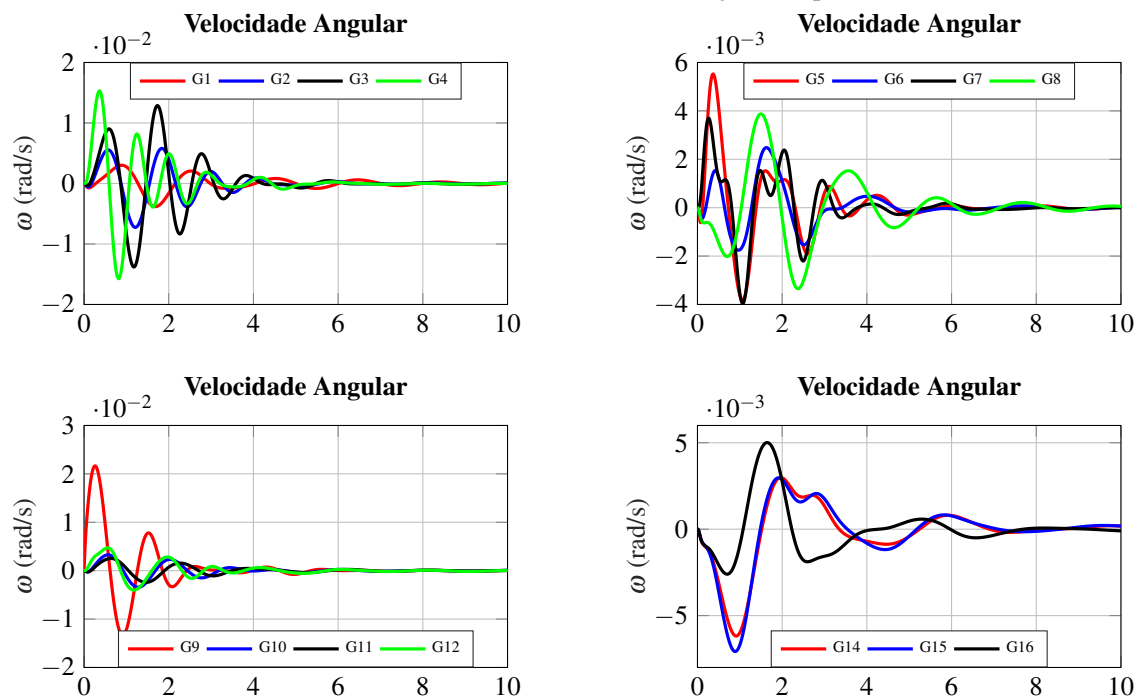
Fonte: Resultados obtidos pelo autor.

Figura 53 - Variações do ângulo interno dos geradores do sistema New York, com atuação dos controladores ESP e SSSC/POD ajustado por PSOHC.



Fonte: Resultados obtidos pelo autor.

Figura 54 - Variações de velocidade angular dos geradores do sistema New York, com atuação dos controladores ESP e SSSC/POD ajustado por PSOHC.



Fonte: Resultados obtidos pelo autor.

Tabela 57 - Modos oscilatórios, frequências e coeficientes de amortecimento do SEP New York com SSSC/POD e ESP ajustados pela técnica PSOHC.

Modo	Autovalores	ω_n (Hz)	ξ (pu)
Local 1	$-2,5564 \pm j11,7987$	1,9214	0,2118
Local 2	$-2,3211 \pm j11,0575$	1,7982	0,2054
Local 3	$-1,3012 \pm j9,6917$	1,5563	0,1331
Local 4	$-2,4905 \pm j8,6339$	1,4302	0,2772
Local 5	$-1,0334 \pm j8,2041$	1,3160	0,1250
Local 6	$-1,0551 \pm j6,7934$	1,0942	0,1535
Local 7	$-0,9221 \pm j6,0262$	0,9703	0,1513
Local 8	$-0,7984 \pm j4,7630$	0,7686	0,1653
Local 9	$-1,5636 \pm j4,1760$	0,7097	0,3507
Local 10	$-1,2603 \pm j3,8511$	0,6449	0,3110
Local 11	$-0,6689 \pm j3,5279$	0,5715	0,1863
Interárea 1	$-0,4458 \pm j3,4307$	0,5506	0,1289
Interárea 2	$-0,4244 \pm j3,2464$	0,5211	0,1296
Interárea 3	$-0,6052 \pm j2,9944$	0,4862	0,1981
Interárea 4	$-0,7683 \pm j2,2256$	0,3747	0,3263
Controlador ESP1	$-68,8737 \pm j143,7279$	25,3658	0,4321
Controlador ESP2	$-74,9649 \pm j126,4972$	23,4024	0,5098
Controlador ESP3	$-89,3946 \pm j44,3774$	15,8842	0,8957
Controlador ESP4	$-86,1757 \pm j17,0490$	13,9811	0,9810
Controlador ESP5	$-71,1060 \pm j42,0789$	13,1500	0,8606
Controlador ESP6	$-41,2403 \pm j65,8719$	12,3690	0,5306
Controlador ESP7	$-47,1126 \pm j34,5689$	9,3002	0,8062
Controlador ESP8	$-34,0327 \pm j37,6417$	8,0764	0,6707
Controlador ESP9	$-37,7390 \pm j1,2780$	6,0098	0,9994
Controlador ESP10	$-13,1556 \pm j10,4888$	2,6778	0,7819
Controlador ESP11	$-2,0849 \pm j0,1679$	0,3329	0,9968
Controlador ESP12	$-1,2613 \pm j0,3961$	0,2104	0,9541
Controlador ESP15	$-1,1081 \pm j0,1820$	0,1787	0,9868
Controlador ESP13	$-1,4408 \pm j2,1751$	0,4152	0,5522
Controlador ESP14	$-0,4309 \pm j1,7643$	0,2891	0,2373
Controlador ESP15	$-34,9065 \pm j0,0441$	5,5556	1,0000
Controlador ESP16	$-1,0048 \pm j0,0005$	0,1599	1,0000
STATCOM/POD 50	$-2,0276 \pm j2,6464$	0,5306	0,6082
SSSC/POD 52-42	$-1,2557 \pm j1,8166$	0,3515	0,5686

Fonte: Resultados obtidos pelo autor.

Ao final se conclui pela capacidade dos controladores em acrescentar amortecimento as oscilações eletromecânicas do SEP New York, que têm como o modo oscilante de menor amortecimento, o modo Local 5, com 12,5% de taxa de amortecimento. Valor bem superior, se comparado ao caso anterior (6 ESP, 1 STATCOM e 1 SSSC).

Apesar dos diversos modos oscilatórios instáveis deste sistema, foi possível atingir sua estabilidade, e ainda obter um ponto de operação seguro, com elevada taxa de amortecimento a todas as oscilações eletromecânicas.

7 CONCLUSÕES

Este trabalho aborda a modelagem dos dispositivos FACTS SSSC e STATCOM aplicados ao fluxo de potência controlando uma grandeza do fluxo, a modelagem impacta na estabilidade a pequenas perturbações do sistema, conforme o dispositivo e tipo de controle desempenhado.

A simples inserção de FACTS não acrescenta amortecimento as oscilações, atua sim inserindo ou removendo pequenas parcelas de torque de amortecimento, mas nada suficiente para tornar mais segura a operação do sistema de potência.

Os controladores suplementares de amortecimento do tipo ESP e POD, controlando respectivamente a excitação dos geradores, e a tensão inserida pelos FACTS, podem inserir amortecimento as oscilações, mas é necessária a parametrização dos controladores para que as dinâmicas dos elementos do sistema sejam consideradas, e os sinais suplementares sejam inseridos em correta fase.

A consideração das não idealidades dos dispositivos FACTS em sua modelagem, além da dificuldade do equacionamento, traz como consequência, dificuldades na convergência do fluxo de potência pelo método de Newton-Raphson. Das simulações desenvolvidas notou-se grande dificuldade de convergência do fluxo de potência utilizando valores elevados de resistência equivalente, o valor utilizado sempre foi de 0,001 pu. Tipicamente os trabalhos com assuntos semelhantes abordam somente a reatância do FACTS, que é inserida na matriz Y_{BARRA} .

O fluxo apresenta problemas de convergência conforme as interligações do sistema. Os grandes sistemas normalmente são muito “malhados”, permitindo diferentes rotas para o fluxo de potência, isso garante flexibilização na atuação dos FACTS e facilita a convergência, enquanto que os pequenos sistemas possuem poucas rotas alternativas de potência, dificultando o controle do fluxo de potência.

O Sistema Stagg facilita a interpretação do fluxo de potência controlado, mas a convergência é difícil. Por ser um sistema em anel, o controle de uma rota de potência, impede o controle da segunda rota, ao se aplicar o SSSC. No caso do STATCOM, a convergência não apresenta problemas, exatamente por não fixar o fluxo ativo ou reativo a uma linha de transmissão específica.

O sistema simétrico apresenta condição ainda mais delicada, por não existir caminhos alternativos para o fluxo de potência, só apresenta convergência operando com a potência original ou valores abaixo desta. Esse resultado ajuda a comprovar a correta operação do modelo desenvolvido, pois não se pode forçar maior fluxo de potência neste sistema, sem aumentar a geração.

Esse SEP também permite avaliar a influência da resistência série representativa das perdas ativas dos FACTS no modelo, elevados valores de resistência dissipam elevada potência, o que dificulta fechar o balanço de potência de todo o sistema, impedindo a convergência do método de Newton.

Já as grandes dimensões do SEP New York permite a instalação de vários dispositivos FACTS, mas a convergência também é comprometida caso sejam instalados nas barras vizinhas de geradores, ou se instalados próximos. Isso porque o balanço de potência deve ser satisfeito, mesmo se controlarem grandezas distintas (acoplamento $P\theta$ e QV).

A atuação de vários dispositivos STATCOM controlando o fluxo de potência se mostra mais “maleável”, e de fácil convergência, já a instalação do SSSC, deve ser melhor estudada e parametrizada, para que se atinja a condição especificada. Isto porque o SSSC atua modificando intensamente a tensão e o fluxo de potência das barras vizinhas a sua instalação, diferente do STATCOM.

Da análise transitória, a inserção do FACTS regulado com controlador PI, pode acrescentar ou remover amortecimento de um ou vários modos oscilatórios. As variações se apresentaram pequenas, para mais ou menos amortecimento, O tipo de controle e em qual intensidade, também modifica a dinâmica do SEP, mas as mudanças são amenas. A grande mudança vem do esforço realizado pelo FACTS em conseguir controlar o fluxo conforme especificado, alterando muito a magnitude da tensão das barras vizinhas, implicando mudanças na dinâmica de todo o SEP.

A aplicação do ESP e POD inserindo amortecimento as oscilações se mostrou efetiva, como sempre. O POD em específico, notou-se que conforme o valor da tensão inserida pelos FACTS resultante do fluxo (\tilde{V}_{ST} ou \tilde{V}_{SC}), o mesmo ajuste de ganho e fase, não surte os mesmos resultados de amortecimento. Isto se explica pela mudança dos valores de $A5_{km}$, $A6_{km}$, $R5_{km}$, $R6_{km}$ que são dependentes do fasor tensão do FACTS, que também alteram o sinal ΔP_{km} , que é o sinal de entrada do POD.

Atuando vários controladores simultaneamente no SEP, como se esperava, os amortecimentos obtidos são elevados, garantindo regiões operacionais mais seguras. A técnica de ajuste pelos resíduos se apresenta útil em apresentar uma boa localização para instalação dos controladores, e também aos ajustes destes. Já o PSO é uma ferramenta poderosa em buscar valores de ajustes que propiciem mais amortecimento ao SEP, conforme suas funções objetivos, além de facilitar a aplicação em sistema mais complexos, pois não requer a especificação do autovalor de interesse.

Parte deste mérito é que o PSO trabalha sobre todos os modos oscilantes, com visão global do sistema com os controladores. Diferente de outras técnicas clássicas de ajustes que objetivam o amortecimento de um modo oscilatório específico, que como consequência, pode prejudicar

outro modo oscilante. Se essa interferência ocorre no PSO, na próxima iteração o algoritmo passa a atuar sobre o modo oscilante negativamente perturbado.

A modificação sugerida ao PSO, chamada de PSOHC, se mostra eficaz em buscar regiões factíveis, atingindo um ponto de operação estável do SEP, facilitando a evolução do algoritmo na busca de um resultado “ótimo”.

No caso do sistema simétrico, o PSO atingiu resultados que mantêm todos os modos oscilantes, inclusive os oriundos dos controladores aplicados, com amortecimentos próximos a 40%. Já no SEP New York, não são obtidos resultados tão bons, isso porque o sistema é complexo, e requer diversos controladores ativos para atingir a estabilidade, dificultando o algoritmo a encontrar bons resultados. Ainda assim, o PSO conseguiu encontrar parâmetros de ajustes dos 18 controladores, e o amortecimento de todos os modos oscilantes do New York foram superiores a 12%, em um sistema originalmente com 10 modos eletromecânicos instáveis.

Ao final do trabalho, pode-se concluir que é necessário representar o mais fiel possível o sistema de potência, considerando particularidades dos dispositivos presentes. A atuação de qualquer elemento influencia os demais, e podem ser violados os limites operacionais e térmicos.

7.1 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Os resultados obtidos neste trabalho estimulam a investigação de outras metodologias e técnicas, que aperfeiçoem as análises de estabilidade de sistemas de potência. Algumas sugeridas e que podem ser trabalhadas futuramente:

- Modelagem de FACTS mais complexos como UPFC, IPFC e GUPFC, seguindo as mesmas considerações;
- Aprimorar o controle de fluxo pelos FACTS, como compensação de reativos nas linhas e controle de potência reativa injetada na barra, além de controles simultâneos;
- Melhorar o algoritmo do PSOHC, além do uso dos parâmetros, que melhorem a convergência e busca de resultados factíveis;
- Otimizar o algoritmo PSO, reduzindo esforços computacionais e tempo de simulação;
- Dentre as sugestões anteriores, especial atenção em investigar um método que identifique a “ótima” localização para instalação dos FACTS, conforme o tipo de controle desempenhado e deficiências do SEP.

8 ARTIGOS SUBMETIDOS E PUBLICADOS

PUPIN, C. E.; ARAUJO, P. B.. Aplicação do STATCOM no Fluxo de Potência com Controladores Ajustados pelo PSO, para Avaliação da Estabilidade a Pequenas Perturbações. *In: 12th Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission*, 2017, Mar del Plata. Argentina. *CLAGTEE* 2017.

PUPIN, C. E.; ARAUJO, P. B.; MENEZES, M. M.; FORTES, E. V. Ajuste de Controladores ESP e POD de Sistemas de Potência pela Técnica Particle Swarm Optimization. *In: XI Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission 'Bioenergy for Electricity Generation' and 'Ecological Issues in Power Plants'*, 2015, São José dos Campos. *CLAGTEE* 2015.

FORTES, E. V.; MIOTTO, E. L.; ARAUJO, P. B.; PUPIN, C. E.; MENEZES, M. M. Ajuste dos parâmetros de controladores suplementares de amortecimento utilizando o algoritmo bacterial foraging optimization. *In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA - CBQEE*. 11., 2015, Campina Grande. Anais..., Campina Grande: [s.n.], 2015. p. 1 - 6.

PUPIN C. E.; ARAUJO P. B.; FORTES, E. V. Atuação do SSSC no controle do fluxo de potência e acrescentando amortecimento as oscilações eletromecânicas. *In: XXII Congresso Brasileiro de Automática, CBA*. João Pessoa - PB. 2018.

FORTES E. V., MACEDO L. MIOTTO E. L., MARTINS L. F. B. ARAUJO P. B., PUPIN C. E. Projeto de Controladores Suplementares de Amortecimento usando o Algoritmo de Busca em Vizinhança Variável. *In: XXII Congresso Brasileiro de Automática, CBA*. João Pessoa - PB. 2018.

PUPIN C. E.; ARAUJO P. B.; FORTES, E. V. Power Flow Control by SSSC and Consequences in Stability to Small Disturbances. Brazilian Society for Automation (SBA): *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*. Brazil. v. XX, n. X, p. XX - XX, 2018. ISSN 2195-3899. (Submetido para publicação).

REFERÊNCIAS

- ANDERSON, P.; FOUAD, A. A. *Power system control and stability*. 2. ed. Iowa: Iowa State University, 2003. 568 p.
- AREDES, M. *Wind Energy in Brazil: perspectives from an academic, research point of view*. Rio de Janeiro: [s.n.], 2012. Acesso em: 27 jan. 2017. Disponível em: <<http://www.nuca.ie.ufrj.br/gesel/tdse/sabworeapresentacoes/mauricioaredes.pdf>>.
- BAKKEN, D. *Smart grids: clouds, communications, open source, and automation*. Boca Raton: CRC Press, 2014. 3602-3617 p. ISSN 1939-0114.
- BHOWMICK, S.; DAS, B.; KUMAR, N. An indirect model of SSSC for reducing complexity of coding in Newton power flow algorithm. *Electric power systems research*, Amsterdã, v. 77, n. 10, p. 1432–1441, ago. 2007. ISSN 0378-7796. Acesso em: 08 ago. 2015. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779606002598>>.
- CAI, L.; ERLICH, I. Simultaneous coordinated tuning of PSS and FACTS controller for damping power system oscillations in multi-machine systems. In: BOLOGNA POWER TECH CONFERENCE PROCEEDINGS, 2003, Bologna. *Proceedings...* Bologna: IEEE, 2003. v. 2, p. 6. ISSN 0885-8950.
- CHANSAREEWITTAYA, S.; JIRAPONG, P. Optimal allocation of multi-type FACTS controllers for total transfer capability enhancement using hybrid particle swarm optimization. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICAL ENGINEERING/ELECTRONICS, COMPUTER, TELECOMMUNICATIONS AND INFORMATION TECHNOLOGY - ECTI-CON, 11., 2014 *Conference...* [S.l.]: IEEE, 2014. p. 1–6.
- DECKMANN, S. M.; COSTA, V. F. A Power sensitivity model for electromechanical oscillation studies. *IEEE Transactions on Power Systems*, Institute of Electrical and Electronics Engineers IEEE, Piscataway, v. 9, n. 2, p. 965–971, may 1994. ISSN 1558-0679.
- DEMELLO, F. P.; CONCORDIA, C. Concepts of synchronous machine stability as affected by excitation control. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, New York, v. 88, n. 4, p. 316–329, 1969.
- FURINI, M. A. *Projeto de controladores suplementares de amortecimento utilizando redes neurais artificiais*. 2011. 129 f. Tese (Doutorado) — Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”- UNESP, Ilha Solteira, 2011.
- FURINI, M. A.; ARAUJO, P. B. de. A comparative study of the damping oscillation function of TCSC and UPFC. In: TRANSMISSION AND DISTRIBUTION CONFERENCE AND EXPOSITION: LATIN AMERICA - IEEE/PES, 2008, Bogota. *Anais...* Bogota: IEEE, 2008. p. 1–6.

- HEFFRON, W.; PHILLIPS, R. Effect of a modern amplidyne voltage regulator on underexcited operation of large turbine generators. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, Piscataway, v. 71, n. 3, p. 692–697, aug 1952. ISSN 0097-2460. Part III: Power Apparatus and Systems, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).
- HINGORANI, N. High power electronics and flexible ac transmission system. *IEEE Power Engineering Review*, Institute of Electrical and Electronics Engineers IEEE, New York, v. 8, n. 7, p. 3–4, jul 1988.
- HINGORANI, S. M.; GYUGYI, L. *Understanding FACTS: concepts and technology of flexible AC transmission system*. New York: IEEE, 2000. 432 p. ISBN 9780470546802.
- HUSSAIN, B.; BEHERA, A. Effective damping of frequency and power oscillations in a multi-machine power system using power electronics. In: IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON CIRCUITS AND SYSTEMS, 1991. *Proceedings...* Singapore: IEEE, 1991. p. 1220–1223.
- KENNEDY, J.; EBERHART, R. Particle swarm optimization. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON NEURAL NETWORKS- ICNN, Australia. *Proceedings...* Perth: IEEE, 1995. v. 4, p. 1942–1948.
- KUNDUR, P. *Power system stability and control*. New York: MacGraw-Hill, 1994. 1176 p.
- KUNDUR, P.; PASERBA, J.; AJJARAPU, V.; ANDERSSON, G.; BOSE, A.; CANIZARES, C.; HATZIARGYRIOU, N.; HILL, D.; STANKOVIC, A.; TAYLOR, C. 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, aug 2004.
- LARSEN, E.; SWANN, D. Applying power system stabilizers. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, New York, PAS-100, n. 6, p. 3017–3024, jun 1981. Part I: General concepts, Part II: Performance objectives and tuning concepts, Part III: Practical considerations.
- MATHUR, R. M.; VARMA, R. K. *Thyristor based FACTS controllers for electrical transmission systems*. New York: John Wiley, 2002. 495 p.
- MOEINI, A.; KAMWA, I. Analytical concepts for reactive power based primary frequency control in power systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, Piscataway, v. 31, n. 6, p. 4217–4230, nov. 2016. ISSN 0885-8950.
- MONDAL, D.; SENGUPTA, A. Nonlinear optimal TCSC control in comparison to PSO based conventional design in small signal stability enhancement. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONTROL, INSTRUMENTATION, ENERGY AND COMMUNICATION- CIEC, 2014. *Proceedings...* Calcutta: [s.n.], 2014. p. 264–268.
- MONTICELLI, A. J. *Fluxo de carga em redes de energia elétrica*. São Paulo: Edgard Blücher, 1983. 163 p.
- MOURA, R. F. *Análise dos zeros da FTMA e ajuste de parâmetros de controladores suplementares de amortecimento acoplado ao dispositivo FACTS UPFC*. 2012. 114 f. Tese

(Doutorado) — Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”- UNESP, Ilha Solteira, abril 2012.

ORTIZ, A.; AREDES, M.; ROLIM, L. G.; BUENO, E.; RODRIGUEZ, P. A new current control for the STATCOM based on secondary order generalized integrators. In: POWER ELECTRONICS SPECIALISTS CONFERENCE- PESC, 2008, Rhodes. *Proceedings...* Rhodes: IEEE, 2008. p. 1378–1383.

PAGOLA, F. L.; PEREZ-ARRIAGA, I. J.; VERGHESE, G. C. On sensitivities, residues and participations: applications to oscillatory stability analysis and control. *IEEE Transactions on Power Systems*, Piscataway, v. 4, n. 1, p. 278–285, fev. 1989. ISSN 0885-8950.

PEREIRA, A. L. d. S. *Utilização de redes neurais artificiais no ajuste de controladores suplementares e dispositivo FACTS STATCOM para a melhoria da estabilidade a pequenas perturbações do sistema elétrico de potência*. 2009. 110 f. Tese (Doutorado) — Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”- UNESP, Ilha Solteira, 2009.

PETEAN-PINA, A.; ARAUJO, P. B. de. Comparison of FACTS STATCOM models for damping oscillations in power system due to small perturbations. In: IEEE/PES TRANSMISSION AND DISTRIBUTION CONFERENCE AND EXPOSITION: LATIN AMERICA- T&D-LA, 2010. *Anais...* São Paulo: IEEE, 2010. p. 465–471.

PUPIN, C. E.; ARAUJO, P. B. de. Aplicação do STATCOM no fluxo de potência com controladores ajustados pelo PSO, para avaliação da estabilidade a pequenas perturbações. In: LATIN-AMERICAN CONGRESS ON ELECTRICITY GENERATION AND TRANSMISSION - CLAGTEE, 12., 2017, Mar del Plata. *Anais...* Mar del Plata: [s.n.], 2017. p. 1–10. ISBN 978-85-61065-03-4.

PUPIN, C. E.; ARAUJO, P. B. de; FORTES, E. de V.; MIOTTO, E. L. Ajuste de controladores ESP e POD de sistemas de potência pela técnica particle swarm optimization. In: LATIN-AMERICAN CONGRESS ON ELECTRICITY GENERATION AND TRANSMISSION ‘BIOENERGY FOR ELECTRICITY GENERATION’ AND ‘ECOLOGICAL ISSUES IN POWER PLANTS’- CLAGTEE, 11., 2015, São José dos Campos. *Anais...* São José dos Campos: [s.n.], 2015. p. 1–10.

RADMAN, G.; RAJE, R. S. Power flow model/calculation for power systems with multiple FACTS controllers. *Electric Power Systems Research*, Amsterdã, v. 77, n. 12, p. 1521–1531, oct 2007. ISSN 0378-7796.

ROGERS, G. *Power system oscillations*. New York: Springer, 2000. 344 p. ISBN 978-1-4615-4561-3.

SAUER, P. W.; PAI, M. A. *Power system dynamics and stability*. New Jersey: Prentice Hall, 1998. 357 p.

SONG, Y. H.; JOHNS, A. T. *Flexible AC transmission systems (FACTS)*. United Kingdom: The Institute of Electrical Engineers, 1999. 592 p.

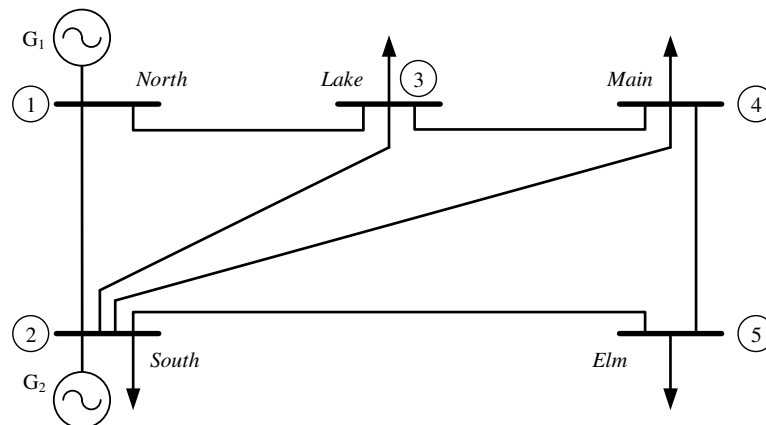
STAGG, G. W.; EL-ABIAD, A. H. *Computer methods in power system analysis*. [S.l.]: McGraw-Hill, 1968.

- 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)- Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, 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) — Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”- UNESP, Ilha Solteira, 2014.
- 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, out. 1998. ISSN 0885-8977.
- WATANABE, E. H.; BARBOSA, P. G.; ALMEIDA, K. C.; TARANTO, G. N. Tecnologia FACTS-Tutorial. *Revista Automação e Controle*, Campinas, v. 9, n. 1, p. 39–55, 1998.
- YANG, N.; LIU, Q.; MCCALLEY, J. TCSC controller design for damping interarea oscillations. *IEEE Transactions on Power Systems*, Piscataway, v. 13, n. 4, p. 1304–1310, 1998.

APÊNDICE A - SISTEMA STAGG

Neste capítulo os dados utilizados para a simulação do chamado sistema de potência Stagg, disponíveis em (STAGG; EL-ABIAD, 1968), de diagrama unifilar conforme Figura 55.

Figura 55 - Diagrama unifilar do SEP Stagg.



Fonte: (STAGG; EL-ABIAD, 1968), adaptada pelo autor.

Tabela 58 - Dados das barras do SEP Stagg no caso original.

Barra	Tensão (pu)	Ângulo (graus)	Pot. Ativa	Pot. Reativa
1	1,0600	0,0000	1,3112	0,9082
2	1,0000	-2,0612	0,2000	-0,7159
3	0,9872	-4,6367	-0,4500	-0,1500
4	0,9841	-4,9570	-0,4000	-0,0500
5	0,9717	-5,7649	-0,6000	-0,1000

Fonte: Resultados obtidos em (STAGG; EL-ABIAD, 1968).

Tabela 59 - Dados das linhas de transmissão do SEP Stagg.

Linha	Barra Inicial	Barra Final	$R_{km}(pu)$	$X_{km}(pu)$	$B_{km}^{sh}(pu)$
1	1	2	0,0200	0,0600	0,0600
2	1	3	0,0800	0,2400	0,0500
3	2	3	0,0600	0,1800	0,0400
4	2	4	0,0600	0,1800	0,0400
5	2	5	0,0400	0,1200	0,0300
6	3	4	0,0100	0,0300	0,0200
7	4	5	0,0800	0,2400	0,0500

Fonte: Resultados obtidos em (STAGG; EL-ABIAD, 1968).

Tabela 60 - Dados dos geradores e dos reguladores automáticos de tensão do SEP Stagg.

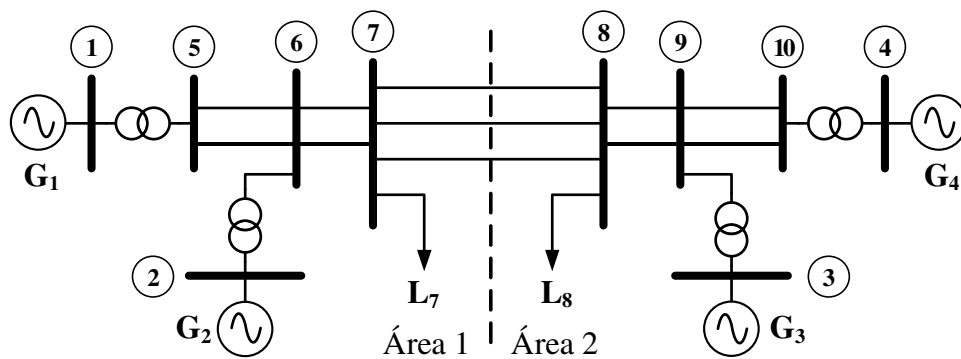
Gerador	$H(s)$	$T'_{d0}(s)$	$x'_d(pu)$	$x_q(pu)$	$x_d(pu)$	D	K_r	T_r
1	6,0	4,0	0,0608	0,1200	0,1460	5	50	0,001
2	3,0	5,0	0,1198	0,6000	0,8958	0	50	0,001

Fonte: Resultados obtidos em (STAGG; EL-ABIAD, 1968).

APÊNDICE B - SISTEMA SIMÉTRICO

Neste capítulo os dados utilizados para a simulação do chamado sistema de potência simétrico, disponíveis em (KUNDUR, 1994) e também em (SAUER; PAI, 1998), de diagrama unifilar conforme Figura 56.

Figura 56 - Diagrama unifilar do SEP simétrico.



Fonte: (SAUER; PAI, 1998; KUNDUR, 1994), adaptada pelo autor.

Tabela 61 - Dados das barras do SEP Stagg no caso original.

Barra	Tensão (pu)	Ângulo (graus)	Pot. Ativa	Pot. Reativa
1	1,0	8,683	7,0000	1,9597
2	1,0	-2,088	7,0000	5,0525
3	1,0	-11,924	7,0000	6,0155
4	1,0	0	7,4369	2,3608
5	0,973	3,846	-	-
6	0,936	-6,928	-	-
7	0,886	-16,162	-11,59	-2,12
8	0,865	-26,575	-15,75	-2,88
9	0,924	-16,765	-	-
10	0,968	-5,149	-	-

Fonte: (SAUER; PAI, 1998; KUNDUR, 1994), adaptada pelo autor.

Tabela 62 - Dados das linhas de transmissão do SEP simétrico.

Linha	Barra Inicial	Barra Final	$R_{km}(pu)$	$X_{km}(pu)$	$B_{km}^{sh}(pu)$
1	1	5	0,001	0,012	-
2	2	6	0,001	0,012	-
3	7	8	0,022	0,22	0,33
4	7	8	0,022	0,22	0,33
5	7	8	0,022	0,22	0,33
6	6	7	0,002	0,02	0,03
7	6	7	0,002	0,02	0,03
8	4	10	0,001	0,012	-
9	3	9	0,001	0,012	-
10	9	8	0,002	0,02	0,03
11	9	8	0,002	0,02	0,03
12	5	6	0,005	0,05	0,075
13	5	6	0,005	0,05	0,075
14	10	9	0,005	0,05	0,075
15	10	9	0,005	0,05	0,075

Fonte: (SAUER; PAI, 1998; KUNDUR, 1994), adaptada pelo autor.

Tabela 63 - Dados dos geradores e dos reguladores automáticos de tensão do SEP simétrico.

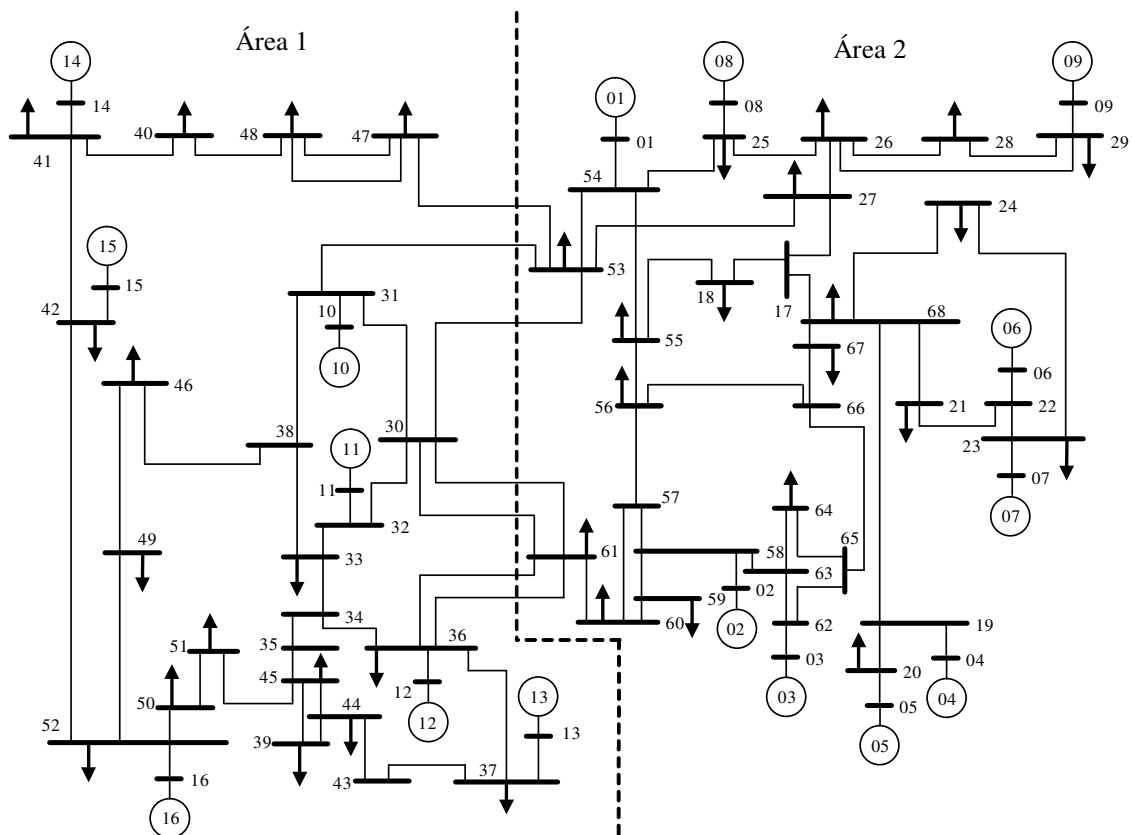
Gerador	$H(s)$	$T'_{d0}(s)$	$x'_d(pu)$	$x_q(pu)$	$x_d(pu)$	D	K_r	T_r
1	54,0	8,0	0,033	0,19	0,2	0,01	200	0,001
2	54,0	8,0	0,033	0,19	0,2	0,01	200	0,001
3	63,0	8,0	0,033	0,19	0,2	0,01	200	0,001
4	63,0	8,0	0,033	0,19	0,2	0,01	200	0,001

Fonte: (SAUER; PAI, 1998; KUNDUR, 1994), adaptada pelo autor.

APÊNDICE C - SISTEMA NEW YORK

Neste capítulo os dados utilizados para a simulação do chamado sistema de potência New York, disponíveis em (ROGERS, 2000) , de diagrama unifilar conforme Figura 57.

Figura 57 - Diagrama unifilar do SEP New York.



Fonte: (ROGERS, 2000), adaptada pelo autor.

Tabela 64 - Dados das barras do SEP New York no caso original.

Barra	Tensão (pu)	Ângulo (graus)	Pot. Ativa	Pot. Reativa
1	1,0000	0,2187	2,5000	0,8421
2	1,0000	0,2664	5,4500	2,3292
3	1,0000	0,3077	6,5000	2,3824
4	1,0000	0,3411	6,3200	1,3995
5	1,0000	0,3170	5,0520	1,3367
6	1,0000	0,4087	7,0000	2,0346
7	1,0000	0,4565	5,6000	1,3461
8	1,0000	0,3223	5,4000	0,3588
9	1,0000	0,4055	8,0000	0,5205
10	1,0000	0,3052	5,0000	0,2278
11	1,0000	0,3509	10,0000	0,5570
12	1,0000	0,0959	13,5000	2,4984
13	1,0000	0,0000	36,0260	9,3875

14	1,0000	0,8485	17,8500	1,1699
15	1,0000	0,7348	10,0000	0,7276
16	1,0000	0,8308	40,0000	5,3238
17	0,9668	0,1360	0,0000	0,0000
18	0,9650	0,1187	-1,5800	-0,3000
19	0,9797	0,2504	0,0000	0,0000
20	0,9755	0,2249	-6,8000	-1,0300
21	0,9585	0,2113	-2,7400	-1,1500
22	0,9761	0,3060	0,0000	0,0000
23	0,9725	0,3000	-2,4800	-0,8500
24	0,9671	0,1616	-3,0900	0,9200
25	0,9963	0,1965	-2,2400	-0,4700
26	0,9904	0,1673	-1,3900	-0,1700
27	0,9752	0,1302	-2,8100	-0,7600
28	0,9915	0,2286	-2,0600	-0,2800
29	0,9933	0,2800	-2,8400	-0,2700
30	0,9971	0,1260	0,0000	0,0000
31	1,0025	0,1752	0,0000	0,0000
32	1,0012	0,2207	0,0000	0,0000
33	1,0025	0,1540	-1,1200	0,0000
34	1,0064	0,0594	0,0000	0,0000
35	1,0089	0,0592	0,0000	0,0000
36	0,9865	-0,0070	-1,0200	0,1946
37	0,9763	-0,1221	-60,0000	-3,0000
38	1,0033	0,1756	0,0000	0,0000
39	0,9732	-0,1467	-2,6700	-0,1260
40	1,0224	0,2964	-0,6563	-0,2353
41	0,9986	0,8217	-10,0000	-2,5000
42	0,9990	0,7198	-11,5000	-2,5000
43	0,9747	-0,1336	0,0000	0,0000
44	0,9746	-0,1340	-2,6755	-0,0484
45	1,0026	0,0592	-2,0800	-0,2100
46	0,9858	0,1919	-1,5070	-0,2850
47	1,0188	0,1492	-2,0312	-0,3259
48	1,0243	0,1849	-2,4120	-0,0220
49	0,9719	0,2511	-1,6400	-0,2900
50	1,0005	0,3647	-1,0000	1,4700
51	1,0073	0,1324	-3,3700	1,2200
52	0,9913	0,7095	-24,7000	-1,2300
53	1,0016	0,1362	-2,5270	-1,1856
54	0,9858	0,1728	0,0000	0,0000
55	0,9661	0,1129	-3,2200	-0,0200
56	0,9429	0,0907	-5,0000	-1,8400
57	0,9484	0,1094	0,0000	0,0000
58	0,9516	0,1228	0,0000	0,0000
59	0,9405	0,0783	-2,3400	-0,8400
60	0,9397	0,0677	-5,2200	-1,7700
61	0,9818	0,0587	-1,0400	-1,2500
62	0,9612	0,1720	0,0000	0,0000
63	0,9565	0,1553	0,0000	0,0000
64	0,9361	0,1558	-0,0900	-0,8800
65	0,9567	0,1591	0,0000	0,0000
66	0,9506	0,1288	0,0000	0,0000
67	0,9473	0,1270	-3,2000	-1,5300
68	0,9621	0,1580	-3,2900	-0,3200

Fonte: (ROGERS, 2000), adaptada pelo autor.

Tabela 65 - Dados das linhas de transmissão do SEP New York.

Linha	Barra Inicial	Barra Final	$R_{km} (pu)$	$X_{km} (pu)$	$B_{km}^{sh} (pu)$
1	53	54	0,0035	0,0411	0,6987
2	53	30	0,0008	0,0074	0,4800
3	54	55	0,0013	0,0151	0,2572
4	54	25	0,0070	0,0086	0,1406
5	54	1	0,0000	0,0181	0,0000
6	55	56	0,0013	0,0213	0,2214
7	55	18	0,0011	0,0133	0,2138
8	56	57	0,0008	0,0128	0,1342
9	56	66	0,0008	0,0129	0,1382
10	57	58	0,0002	0,0026	0,0434
11	57	60	0,0008	0,0112	0,1476
12	58	59	0,0006	0,0092	0,1130
13	58	63	0,0007	0,0082	0,1389
14	58	2	0,0000	0,0250	0,0000
15	59	60	0,0004	0,0046	0,0780
16	60	61	0,0023	0,0363	0,3804
17	61	30	0,0019	0,0183	0,2900
18	62	63	0,0004	0,0043	0,0729
19	62	65	0,0004	0,0043	0,0729
20	62	3	0,0000	0,0200	0,0000
21	64	63	0,0016	0,0435	0,0000
22	64	65	0,0016	0,0435	0,0000
23	65	66	0,0009	0,0101	0,1723
24	66	67	0,0018	0,0217	0,3660
25	67	68	0,0009	0,0094	0,1710
26	68	17	0,0007	0,0089	0,1342
27	68	19	0,0016	0,0195	0,3040
28	68	21	0,0008	0,0135	0,2548
29	68	24	0,0003	0,0059	0,0680
30	17	18	0,0007	0,0082	0,1319
31	17	27	0,0013	0,0173	0,3216
32	19	20	0,0007	0,0138	0,0000
33	19	4	0,0007	0,0142	0,0000
34	20	5	0,0009	0,0180	0,0000
35	21	22	0,0008	0,0140	0,2565
36	22	23	0,0006	0,0096	0,1846
37	22	6	0,0000	0,0143	0,0000
38	23	24	0,0022	0,0350	0,3610
39	23	7	0,0005	0,0272	0,0000
40	25	26	0,0032	0,0323	0,5130
41	25	8	0,0006	0,0232	0,0000
42	26	27	0,0014	0,0147	0,2396
43	26	28	0,0043	0,0474	0,7802
44	26	29	0,0057	0,0625	1,0290
45	28	29	0,0014	0,0151	0,2490
46	29	9	0,0008	0,0156	0,0000
47	61	30	0,0019	0,0183	0,2900
48	61	36	0,0022	0,0196	0,3400
49	61	36	0,0022	0,0196	0,3400
50	36	37	0,0005	0,0045	0,3200
51	34	36	0,0033	0,0111	1,4500
52	35	34	0,0001	0,0074	0,0000
53	33	34	0,0011	0,0157	0,2020
54	32	33	0,0008	0,0099	0,1680
55	30	31	0,0013	0,0187	0,3330

56	30	32	0,0024	0,0288	0,4880
57	53	31	0,0016	0,0163	0,2500
58	31	38	0,0011	0,0147	0,2470
59	33	38	0,0036	0,0444	0,6930
60	38	46	0,0022	0,0284	0,4300
61	46	49	0,0018	0,0274	0,2700
62	53	47	0,0013	0,0188	1,3100
63	47	48	0,0025	0,0268	0,4000
64	47	48	0,0025	0,0268	0,4000
65	48	40	0,0020	0,0220	1,2800
66	35	45	0,0007	0,0175	1,3900
67	37	43	0,0005	0,0276	0,0000
68	43	44	0,0001	0,0011	0,0000
69	44	45	0,0025	0,0730	0,0000
70	39	44	0,0000	0,0411	0,0000
71	39	45	0,0000	0,0839	0,0000
72	45	51	0,0004	0,0105	0,7200
73	50	52	0,0012	0,0288	2,0600
74	50	51	0,0009	0,0221	1,6200
75	49	52	0,0076	0,1141	1,1600
76	52	42	0,0040	0,0600	2,2500
77	42	41	0,0040	0,0600	2,2500
78	41	40	0,0060	0,0840	3,1500
79	31	10	0,0000	0,0260	0,0000
80	32	11	0,0000	0,0130	0,0000
81	36	12	0,0000	0,0075	0,0000
82	37	13	0,0000	0,0033	0,0000
83	41	14	0,0000	0,0015	0,0000
84	42	15	0,0000	0,0015	0,0000
85	52	16	0,0000	0,0030	0,0000
86	53	27	0,0320	0,3200	0,4100

Fonte: (ROGERS, 2000), adaptada pelo autor.

Tabela 66 - Dados dos geradores e dos reguladores automáticos de tensão do SEP New York.

Gerador	$H(s)$	$T'_{d0}(s)$	$x'_d(pu)$	$x_q(pu)$	$x_d(pu)$	D	K_r	T_r
1	42	10	0,0310	0,0600	0,1000	6,82	50	0,001
2	30	7	0,0697	0,2820	0,2950	4,87	50	0,001
3	36	6	0,0531	0,2370	0,2495	5,68	50	0,001
4	29	6	0,0436	0,2580	0,2620	4,64	50	0,001
5	26	5	0,1320	0,6200	0,6700	4,22	50	0,001
6	35	7	0,0500	0,2410	0,2540	5,65	50	0,001
7	26	6	0,0490	0,2920	0,2950	4,28	50	0,001
8	24	7	0,0570	0,2800	0,2900	3,94	50	0,001
9	35	5	0,0570	0,2050	0,2106	5,60	50	0,001
10	31	9	0,0460	0,1150	0,1690	5,02	50	0,001
11	28	4	0,0180	0,1230	0,1280	4,56	50	0,001
12	92	7	0,0310	0,0950	0,1010	10,00	50	0,001
13	248	6	0,0050	0,0280	0,0290	10,00	50	0,001
14	300	4	0,0030	0,0170	0,0180	10,00	50	0,001
15	300	4	0,0030	0,0170	0,0180	10,00	50	0,001
16	225	8	0,0070	0,0330	0,0350	10,00	50	0,001

Fonte: (ROGERS, 2000), adaptada pelo autor.