

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Dissertação de Mestrado

The logo of the Universidade Federal da Paraíba is centered in the background. It features three lit torches at the top, a shield with a blue and white pattern and a yellow fleur-de-lis in the center, and a blue banner at the bottom with the Latin motto 'SAPIENTIA AEDIFICAT' in yellow capital letters.

Projeto Simultâneo do Regulador Automático
de Tensão e Estabilizador de Sistema de
Potência Utilizando Otimização por Enxame
de Partículas Modificado

Frank Wesley Rodrigues

João Pessoa
Julho - 2019

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação da Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado da Paraíba (FAPESQ) - Termo *nº* 280\18.

FRANK WESLEY RODRIGUES

**Projeto Simultâneo do Regulador Automático de Tensão
e Estabilizador de Sistema de Potência Utilizando
Otimização por Enxame de Partículas Modificado**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - PPGEE, da Universidade Federal da Paraíba - UFPB, como requisito final para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Clivaldo Silva Araújo

Coorientador: Prof. Dr. Yuri Percy Molina Rodriguez

João Pessoa - PB

2019

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

R696p Rodrigues, Frank Wesley.

Projeto Simultâneo do Regulador Automático de Tensão e Estabilizador de Sistema de Potência Utilizando Otimização por Enxame de Partículas Modificado / Frank Wesley Rodrigues. - João Pessoa, 2019.

130 f. : il.

Orientação: Clivaldo Silva Araújo.

Coorientação: Yuri Percy Molina Rodriguez.

Dissertação (Mestrado) - UFPB/CEAR.

1. Controle Ótimo. 2. Regulador Automático de Tensão. 3. Estabilizador de Sistema de Potência. 4. Otimizador por Enxame de Partícula. I. Araújo, Clivaldo Silva. II. Rodriguez, Yuri Percy Molina. III. Título.

UFPB/BC

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA – UFPB
CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS – CEAR
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA - PPGE

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a Dissertação

PROJETO SIMULTÂNEO DE REGULADOR AUTOMÁTICO DE TENSÃO E ESTABILIZADOR DE SISTEMA DE POTÊNCIA UTILIZANDO OTIMIZAÇÃO POR ENXAME DE PARTÍCULAS MODIFICADO

Elaborada por

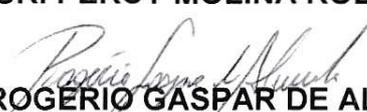
FRANK WESLEY RODRIGUES

como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Elétrica.

COMISSÃO EXAMINADORA


PROF. DR. CLIVALDO SILVA DE ARAUJO (Presidente)


PROF. DR. YURI PÉRCY MOLINA RODRIGUEZ


PROF. DR. ROGERIO GASPARGASPAR DE ALMEIDA


PROF. DR. ALEXANDRE CÉZAR DE CASTRO

João Pessoa, 30 de julho de 2019

Dedicatória

*Dedico este trabalho à minha avó Isabel (in memoriam), pelo seu amor incondicional,
pelos sonhos e por seus conselhos sobre a vida.*

Agradecimentos

Agradeço a Deus, em primeiro lugar, pela minha vida e pelo dom da perseverança, que me permitiu concluir este trabalho.

Agradeço aos meus pais José Eroley e Ana Vilma, pelos seus ensinamentos sobre humildade, trabalho e superação e por ter se esforçado tanto para me proporcionar uma boa educação.

Agradeço também aos meus irmãos, Mateus Rodrigues e Marcia Rodrigues, pelo qual sirvo de exemplo, e também a minha namorada pelo companheirismo ao longo desses anos.

Ao meu orientador e coorientador, Professores Clivaldo Araújo e Yuri Molina, que colaboraram com paciência, empenho, orientação para a elaboração deste trabalho.

Agradeço aos amigos Antônio Venâncio, Joaquim Nilson, Filipe Vieira, Kaio Farias, Diego Cavalcante, Kaique Rhuan, Joel Adelaide, Jonathan Moura, Rafael Medeiros e aos colegas do GICA pela união, companheirismos e pelos momentos de superação ao longo do curso.

Agradeço a FAPESQ-PB que me proporcionou apoio financeiro necessário para a concentração e desempenho necessários para a realização deste trabalho.

Enfim, agradeço a todos que de alguma forma, passaram pela minha vida e contribuíram para a construção de quem sou hoje.

*“Peçam, e será dado;
busquem, e encontrarão;
batam, e a porta será aberta.
Pois todo o que pede, recebe;
o que busca, encontra; e
àquele que bate, a porta será aberta.
(Bíblia Sagrada, Mateus 7:7-8)*

Resumo

Este trabalho apresenta o projeto de controle ótimo para determinação simultânea de parâmetros dos controles associados com a regulação de tensão e o aumento do amortecimento das oscilações no gerador síncrono utilizando a técnica de Otimização por Enxame de Partículas (PSO - *Particle Swarm Optimization*) com modificações propostas. Neste trabalho é possível verificar com detalhes como empregar o algoritmo proposto para pesquisa eficiente dos melhores parâmetros do Regulador Automático de Tensão (AVR - *Automatic Voltage Regulator*) e do Estabilizador de Sistema de Potência (PSS - *Power System Stabilizer*) para um Sistema Máquina Barra Infinita (SMIB - *System Machine Infinity Bus*) e no sistema 9 Barras do Anderson. As modificações propostas no PSO clássico são representadas por alterações na forma de cálculo do fator de inércia do algoritmo. Os valores encontrados foram comparados com os parâmetros obtidos utilizando técnicas de sintonia convencionais, baseados em modelos de equações diferenciais linearizadas e também com a técnica do PSO clássico. Para análise do desempenho dos controles, utilizou-se uma função objetivo baseada na resposta no tempo do sistema. Análise dos resultados das simulações com o método proposto mostrou que as modificações realizadas proporcionaram um melhor desempenho do algoritmo, destacando-se pela sua simplicidade, característica de convergência estável e ajuste rápido dos parâmetros do controlador ótimo do AVR e PSS.

Palavras-chave: Controle Ótimo. Regulador Automático Tensão. Estabilizador Sistema Potência. Otimização por Enxame Partícula Modificado.

Abstract

This work presents the optimum control design for simultaneous determination of control parameters associated with voltage regulation and increased damping of the oscillations in the synchronous generator using the Particle Swarm Optimization (PSO) technique with modifications proposals. In this work it is possible to verify in detail how to use the proposed algorithm for efficient research of the best parameters of the Automatic Voltage Regulator (AVR) and the Power System Stabilizer (PSS) for an Infinite Bus Machine System (SMIB) and Anderson's 9-Bus system. The proposed modifications in classical PSO are represented by changes in the calculation of the inertia factor of the algorithm. The values found were compared with the parameters obtained using conventional tuning techniques, based on linearized differential equation models and also with classical PSO technique. For the analysis of the performance of the controls, an objective function based on the system time response was used. Analysis of the simulation results with the proposed method showed that the modifications performed provided a better performance of the algorithm, standing out for its simplicity, stable convergence characteristic and fast adjustment of the parameters of the AVR and PSS optimal controller.

Keywords: Great Control. Automatic Voltage Regulator. Stabilizer System Power. Modified Particle Swarm Optimization.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Classificação do problema de estabilidade.	32
Figura 2 – Tipos de estabilidade durante um transitório através da resposta angular.	35
Figura 3 – Estrutura clássica de um AVR conectado a um gerador.	36
Figura 4 – Diagrama de bloco das malhas de controle de um sistema de potência.	37
Figura 5 – Circuito equivalente de uma máquina síncrona.	41
Figura 6 – Sistema de referência para medição da posição do rotor.	43
Figura 7 – Diagrama esquemático dos enrolamentos na máquina síncrona.	45
Figura 8 – Máquina ligada a uma barra infinita através de uma reatância.	61
Figura 9 – Diagrama de blocos do modelo linearizado SMIB.	63
Figura 10 – Configuração física dos componentes do sistema de excitação.	64
Figura 11 – Resposta do sistema de controle de excitação para uma entrada ao degrau.	66
Figura 12 – Representação em diagrama de bloco do modelo IEEE ST1C.	68
Figura 13 – Diagrama de bloco do modelo ST1C simplificado e sensor de tensão.	69
Figura 14 – Diagrama de bloco do modelo linearizado SMIB incluindo o AVR.	69
Figura 15 – Diagrama de bloco para o Estabilizador de Sistema Potência Clássico.	71
Figura 16 – Diagrama de bloco para o Estabilizador de Sistema Potência Simples.	72
Figura 17 – Diagrama de bloco do modelo linearizado SMIB incluindo o AVR e PSS.	73
Figura 18 – Movimento da partícula de acordo com a equação da velocidade.	79
Figura 19 – Valor do fator de inércia com a função oscilatória.	84
Figura 20 – Valor do fator de inércia com a função oscilatória com decaimento exponencial.	86
Figura 21 – Fluxograma do PSO proposto.	88
Figura 22 – Representação do sistema.	90
Figura 23 – Resposta do sistema sem controle para uma entrada degrau unitário na tensão de referência.	92
Figura 24 – Resposta do sistema com AVR para uma entrada degrau unitário na tensão de referência.	93
Figura 25 – Resposta do sistema com AVR e PSS para uma entrada degrau unitário na tensão de referência.	95
Figura 26 – Resposta do sistema para os parâmetros do AVR e PSS determinados pelo PSO clássico.	97
Figura 27 – Resposta do sistema para os parâmetros do AVR e PSS determinados pelo PSO com fator de inércia oscilatório.	101
Figura 28 – Sistema 9 Barras do Anderson.	104
Figura 29 – Sistema 9 Barras do Anderson no <i>PowerFactory</i>	105

Figura 30 – Resposta da tensão terminal dos geradores G2 e G3 para os parâmetros do AVR e PSS determinados pelo PSO clássico.	108
Figura 31 – Resposta do Ângulo do rotor dos geradores G2 e G3 para os parâmetros do AVR e PSS determinados pelo PSO clássico.	109
Figura 32 – Resposta da tensão terminal dos geradores G2 e G3 para os parâmetros do AVR e PSS determinados pelo PSO com fator de inércia oscilatório.	111
Figura 33 – Resposta do Ângulo do rotor dos geradores G2 e G3 para os parâmetros do AVR e PSS determinados pelo PSO com fator de inércia oscilatório.	112
Figura 34 – Resposta da tensão terminal dos geradores G2 e G3 para os parâmetros do AVR e PSS determinados pelo PSO com fator de inércia ODE.	114
Figura 35 – Resposta do Ângulo do rotor dos geradores G2 e G3 para os parâmetros do AVR e PSS determinados pelo PSO com fator de inércia ODE.	115

Lista de tabelas

Tabela 1 – Resultado do fluxo de carga.	90
Tabela 2 – Impedância equivalente e constantes do modelo de 3ª ordem ligado a um SMIB.	91
Tabela 3 – Parâmetros do PSS encontrados através do método clássico.	94
Tabela 4 – Análise comparativa entre os indicadores da resposta temporal do sistema.	95
Tabela 5 – Parâmetros do AVR e PSS determinados utilizando o PSO clássico.	97
Tabela 6 – Indicadores da resposta temporal do sistema com AVR e PSS ajustados pelo PSO clássico.	98
Tabela 7 – Parâmetros do AVR e PSS determinados pelo PSO com fator de inércia oscilatório.	100
Tabela 8 – Indicadores da resposta temporal do sistema com AVR e PSS ajustados pelo PSO com fator de inércia oscilatório.	102
Tabela 9 – Parâmetros determinados por diferentes métodos do PSO.	103
Tabela 10 – Análise comparativa entre os índices de desempenho por diferentes métodos.	103
Tabela 11 – Parâmetros do AVR e PSS determinados utilizando o PSO clássico.	107
Tabela 12 – Análise da convergência da execução do algoritmo do PSO clássico.	110
Tabela 13 – Parâmetros do AVR e PSS determinados utilizando o PSO com fator de inércia oscilatório.	110
Tabela 14 – Análise da convergência da execução do algoritmo do PSO com fator de inércia oscilatório.	113
Tabela 15 – Parâmetros do AVR e PSS determinados utilizando o PSO com fator de inércia ODE.	113
Tabela 16 – Análise comparativa entre os índices de desempenho por diferentes tipos de algoritmos do PSO.	116
Tabela 17 – Análise da convergência da execução com diferentes tipos de algoritmos do PSO.	117
Tabela 18 – Dados técnicos do gerador a gás de 131,6 MVA.	127
Tabela 19 – Dados técnicos do gerador a vapor de 144,6 MVA.	128
Tabela 20 – Dados dos geradores.	129
Tabela 21 – Dados das linhas de transmissão.	130
Tabela 22 – Dados dos barramentos do sistema.	130
Tabela 23 – Dados dos transformadores do sistema.	130

Lista de abreviaturas e siglas

AVR	<i>Automatic Voltage Regulator</i>
BFO	<i>Bacterial Foraging Optimization</i>
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
DE	<i>Differential Evolution</i>
DIGSILENT	<i>DIGital SIMulation of Eletrical Networks</i>
DP	Desvio Padrão
DPL	<i>DIGSILENT Programming Language</i>
EPSO	<i>Evolutionary Particle Swarm Optimization</i>
FO	Função Objetivo
GPSO	<i>Global Particle Swarm Optimization</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IPSO	<i>Iteration Particle Swarm Optimization</i>
ITAE	<i>Integral of Time Multiplied for Time</i>
ODE	Oscilatório com Decremento Exponencial
PI	Proporcional Integral
PID	Proporcional Integral Derivativo
PSO	<i>Particle Swarm Optimization</i>
PSOTVAC	<i>Particle Swarm With Time Varying Acceleration Coefficient</i>
PSS	<i>Power System Stabilizer</i>
SEP	Sistemas Elétricos de Potência
SMIB	<i>System Machine Infinity Bus</i>
SPPSO	<i>Small Population Particle Swarm Optimization</i>

Lista de símbolos

c_1	Fator de aprendizagem cognitivo
c_2	Fator de aprendizagem social
d	Número da dimensão da partícula
E	Energia cinética
E'	Tensão atrás da reatância transitória
E''	Tensão atrás da reatância subtransitória
E_B	Tensão da barra infinita
e'_d	Tensão interna atrás da reatância transitória no eixo direto
e''_d	Tensão interna atrás da reatância subtransitória no eixo direto
E_{fd}	Tensão de excitação
$E_{fd\Delta}$	Variação na tensão de saída da excitatriz
E_I	Tensão proporcional à corrente de campo
E_{Ikq}	Tensão proporcional à corrente do enrolamento amortecedor no eixo em quadratura
E_{Iq}	Tensão proporcional à corrente do circuito do ferro no eixo em quadratura
e'_q	Tensão interna atrás da reatância transitória no eixo em quadratura
$E'_{q\Delta}$	Variação da componente no eixo-q da tensão interna fictícia na armadura proporcional ao fluxo concatenado no campo
e''_q	Tensão interna atrás da reatância subtransitória no eixo em quadratura
E_{ss}	Erro de regime permanente
E_t	Tensão terminal do gerador síncrono
$E_{t\Delta}$	Variação da tensão terminal do gerador síncrono
f	Frequência
FO_i	Valor da função objetivo para partícula i

g_{best}	Melhor posição encontrada pelo enxame
H	Constante de inércia
I	Momento de inércia
i	Número da partícula do enxame
$i_{a,b,c}$	Correntes elétrica nas fases a, b e c
I_{best}	Melhor valor encontrado pelas partículas na iteração atual
$i_{d,q,0}$	Correntes elétricas nos enrolamentos da armadura referenciadas ao eixo dq0
i_e, i_{kq}	Correntes elétricas nos enrolamentos amortecedores do eixo em quadratura
i_{fd}	Corrente elétrica no enrolamento de campo
i_{kd}	Corrente elétrica no enrolamento amortecedor do eixo direto
I_{LR}	Corrente de campo na excitatriz estática
I_t	Corrente terminal da máquina
$iter$	Iteração atual
$iter_{max}$	Número máximo de iteração
K_A	Ganho do amplificador associado ao AVR
K_c	Coefficiente que determina a reatância de comutação na excitatriz CA
K_{LR}	Coefficiente que determina a limitação de corrente de campo na excitatriz estática
K_{stab}	Ganho do estabilizador de sistema de potência
K_1	Constante que representa a variação no torque elétrico para uma pequena variação no ângulo do rotor, com o fluxo concatenado constante no eixo direto
K_2	Constante que representa a variação no torque elétrico para uma pequena variação no fluxo concatenado no eixo direto, com o ângulo do rotor constante
K_3	Fator de impedância

K_4	Constante que representa o efeito desmagnetizador de uma variação do ângulo do rotor, com E_{fd} constante
K_5	Constante que representa a variação na tensão terminal E_t para uma pequena variação do ângulo do rotor, com fluxo concatenado constante no eixo direto
K_6	Constante que representa a variação na tensão terminal E_t para uma pequena variação no fluxo concatenado no eixo direto, com o ângulo do rotor constante
K_D	Coefficiente de amortecimento
$L_{aa,bb,cc}$	Indutâncias próprias dos enrolamentos das fases a, b e c
$L_{ab,ac,bc}$	Indutâncias mútuas entre os enrolamentos das fases a, b e c
L_{ad}	Indutância mútua no eixo direto entre os enrolamentos do estator e do rotor
L_{aq}	Indutância mútua no eixo em quadratura entre os enrolamentos do estator e do rotor
$L_{d,q,0}$	Indutâncias da armadura referenciadas ao eixo dq0
$L_{ea,eb,ec}$	Indutâncias mútuas entre o enrolamento amortecedores do eixo em quadratura e os enrolamentos das fases a, b e c
$L_{ee,kqkq}$	Indutâncias próprias dos enrolamentos amortecedores do eixo em quadratura
L_{ekq}	Indutância mútua entre os enrolamentos amortecedores do eixo em quadratura
$L_{fda,fdb,fdc}$	Indutâncias mútuas entre o enrolamento de campo e os enrolamentos das fases a, b e c
$L_{fde,fdkq}$	Indutâncias mútuas entre o enrolamento de campo e os enrolamentos amortecedores do eixo em quadratura
L_{dfd}	Indutância própria do enrolamento de campo
L_{fdkd}	Indutância mútua entre o enrolamento de campo e o enrolamento amortecedor do eixo direto
$L_{kda,kdb,kdc}$	Indutâncias mútuas entre o enrolamento amortecedor do eixo direto e os enrolamentos das fases a, b e c

$L_{kde,kdkq}$	Indutâncias mútuas entre o enrolamento amortecedor do eixo direto e os enrolamentos amortecedores do eixo em quadratura
L_{kdkd}	Indutância própria do enrolamento amortecedor do eixo direto
$L_{kqa,kqb,kqc}$	Indutâncias mútuas entre os enrolamentos amortecedores do eixo em quadratura e os enrolamentos das fases a, b e c
L_m	Indutância de magnetização
L_s	Indutância do estator
m	Multiplicador da função não monótona
$M_{e,kq}$	Amplitude das indutâncias mútuas entre os enrolamentos amortecedores do eixo em quadratura e as fases a, b ou c
M_{fd}	Amplitude da indutância mútua entre o enrolamento de campo e as fases a, b ou c
M_{kd}	Amplitude da indutância mútua entre o enrolamento amortecedor do eixo direto e as fases a, b ou c
M_p	Máximo sobre-sinal da resposta temporal ao degrau unitário
M_s	Parte constante da indutância mútua entre os enrolamentos da armadura
p	Número de polos da máquina
P_{best_i}	Melhor valor encontrada pela partícula i
P_e	Potência elétrica
P_m	Potência mecânica
$port$	Sinal responsável pelo decaimento exponencial do fator de inércia
R	Magnitude da resistência dos enrolamentos da armadura
r_a	Resistência da armadura
$R_{a,b,c}$	Resistências do enrolamento da armadura
R_E	Resistência equivalente de Thévenin
$R_{e,kq}$	Resistências dos enrolamentos amortecedores do eixo em quadratura
R_{fd}	Resistência de campo
R_{kd}	Resistências dos enrolamentos amortecedores do eixo direto

rpm	Rotações Por Minuto
r_1, r_2	Número aleatória entre 0 e 1
s	Deslocamento da função não monótona
t	Tempo
T_a	Torque de acomodação
T_A	Constante de tempo do amplificador associado ao AVR
T_{BASE}	Torque base
$T_{B,B1,C,C1}$	Constantes de tempo do filtro <i>lead-lag</i>
t_d	Tempo de atraso
T'_{d0}	Constante de tempo transitória de circuito aberto no eixo direto
T''_{d0}	Constante de tempo subtransitória de circuito aberto no eixo direto
T_e	Torque Elétrico
$T_{e\Delta}$	Variação do torque elétrico
T_l	Torque líquido
T_m	Torque mecânico
$T_{m\Delta}$	Variação do torque mecânico
t_p	Tempo de pico
T'_{q0}	Constante de tempo transitória de circuito aberto no eixo em quadratura
T''_{q0}	Constante de tempo subtransitória de circuito aberto no eixo em quadratura
t_r	Tempo de subida
T_R	Constante de tempo do sensor de tensão
t_s	Tempo de acomodação
T_s	Torque de sincronização
T_W	Constante de tempo do filtro <i>washout</i>
T_1, T_2	Constantes de tempo do compensador de avanço de fase associado ao PSS

\bar{T}	Matriz de transformação de Park
V_A	Tensão de saída do regulador de tensão
$v_{a,b,c}$	Tensões na fase a, b e c
$V_{Amax,Amin}$	Tensões limites inferior e superior para a saída do regulador de tensão
V_c	Tensão de saída do sensor de tensão
$V_{c\Delta}$	Variação da tensão de saída do sensor de tensão
$v_{d,q,0}$	Tensões nos enrolamentos da armadura referenciadas ao eixo dq0
V_F	Tensão de saída do estabilizador do sistema de excitação
v_{fd}	Tensão de campo
V_i	Tensão de entrada do regulador de tensão
v_i	Velocidade da partícula i
V_{max}	Velocidade máxima da partícula do enxame
V_{OEL}	Tensão de sobreexcitação
V_{ref}	Tensão de referência para o AVR
V_s	Sinal de saída do estabilizador de sistema de potência
$V_{s\Delta}$	Variação do sinal de saída do estabilizador de sistema de potência
V_t	Tensão terminal
V_{UEL}	Tensão de subexcitação
V_{x0}	Tensão fictícia que defini a posição do eixo e que fornece o valor inicial do ângulo de torque da máquina
w	Fator de inércia
w_{min}	Fator de inércia mínimo
w_{max}	Fator de inércia máximo
x_{ad}	Reatância mútua no eixo direto
$x_{ae,akq}$	Reatâncias mútuas entre o enrolamento da armadura e os enrolamentos amortecedores do eixo em quadratura

x_{afd}	Reatância mútua entre o enrolamento da armadura e o enrolamento de campo
x_{akd}	Reatância mútua entre o enrolamento da armadura e o enrolamento amortecedor do eixo direto
x_{aq}	reatância mútua no eixo em quadratura
x_d	Reatância no eixo direto
x'_d	Reatância transitória de eixo direto
x''_d	Reatância subtransitória do eixo em quadratura
X_E	Reatância equivalente de Thévenin
$x_{e,kq}$	Reatâncias próprias dos enrolamentos amortecedores do eixo em quadratura
x_{ekq}	Reatância mútua entre os enrolamentos amortecedores do eixo em quadratura
x_{fd}	Reatância própria do campo principal
x_{fdkd}	Reatância mútua entre o enrolamento de campo e o enrolamento amortecedor do eixo direto
$x_i(t)$	Posições atual da partícula
x_{kd}	Reatância própria do enrolamento amortecedor do eixo direto
x_l	Reatância de dispersão
x_{max}	Limite superior para os parâmetros
x_{min}	Limite inferior para os parâmetros
x_q	Reatância no eixo em quadratura
x'_q	Reatância transitória do eixo em quadratura
Z_{eq}	Impedância equivalente de Thévenin
α	Aceleração angular mecânica
δ	Ângulo de torque
ΔT_a	Componente do torque de amortecimento
ΔT_s	Componente do torque de sincronização

$\delta\Delta$	Variação da posição angular do rotor
θ	Ângulo formado entre o eixo direto (rotor) e a referência fixa ao estator (fase a)
θ_e	Ângulo elétrico
θ_m	Ângulo mecânico
$\varphi_{a,b,c}$	Fluxos magnéticos concatenados nas fases a, b e c
$\varphi_{d,q,0}$	Fluxos nos enrolamentos da armadura referenciadas ao eixo dq0
$\varphi_{e,kq}$	Fluxos magnéticos nos enrolamentos amortecedores do eixo em quadratura
φ_{fd}	Fluxo magnético de campo
φ_{kd}	Fluxo magnético no enrolamento amortecedor do eixo direto
ω	Velocidade angular
ω_0	Velocidade angular nominal
$\omega_{r\Delta}$	Variação de velocidade do rotor

Sumário

1	INTRODUÇÃO	24
1.1	Estado da Arte	26
1.2	Justificativa e Motivação	28
1.3	Objetivos	29
1.3.1	Objetivo Geral	29
1.3.2	Objetivos Específicos	29
1.4	Desenvolvimento do Trabalho	29
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	31
2.1	Estabilidade de Sistemas de Potência	31
2.1.1	Estabilidade Angular	33
2.2	Regulador Automático de Tensão	35
2.3	Estabilizador de Sistema de Potência	36
2.3.1	Tipos de Sinais de Entrada do PSS	37
2.3.1.1	Variação de Velocidade	38
2.3.1.2	Frequência Terminal	38
2.3.1.3	Potência Acelerante	39
3	MODELAGEM DA MÁQUINA SÍNCRONA	40
3.1	A Máquina Síncrona	40
3.2	Equação de Oscilação da Máquina Síncrona	42
3.3	Equação Elétrica da Máquina Síncrona	44
3.3.1	Equações do Fluxo Magnético	45
3.3.1.1	Indutâncias como função do estator	46
3.3.1.2	Indutâncias como função do rotor	47
3.3.1.3	Indutâncias mútuas entre estator e rotor	47
3.3.1.4	Equação de Park para os fluxos concatenados	48
3.3.2	Equação da Tensão nos Enrolamentos	50
3.3.3	Sistema Por Unidade	51
3.3.3.1	Fluxos magnéticos em p.u.	51
3.3.4	Modelagem para Simulação Dinâmica da Máquina Síncrona	54
3.3.4.1	Equação para variação do fluxo no campo principal da máquina	55
3.3.4.2	Equação para variação do fluxo no circuito do ferro no eixo em quadratura	56
3.3.4.3	Equações para a variação do fluxo no enrolamento amortecedor do eixo direito e do eixo em quadratura	57
3.3.4.4	Expressão para as componentes da tensão interna E''	58

3.3.4.5	Expressão para tensão proporcional à corrente de campo	59
3.4	Modelo de 6ª Ordem Para Simulação Dinâmica da Máquina Síncrona	60
3.5	Modelo de 3ª ordem para as Máquinas Síncronas	61
4	SISTEMA DE EXCITAÇÃO	64
4.1	Introdução	64
4.2	Tipos de Excitação	65
4.3	Desempenho do Sistema de Excitação para Pequenos Sinais	65
4.4	Modelagem do Sistema de Excitação IEEE ST1C	67
4.5	Efeitos do Sistema de Excitação na Estabilidade Dinâmica	69
4.6	Modelagem dos Estabilizadores de Sistemas de Potência	71
5	OTIMIZAÇÃO POR ENXAME DE PARTÍCULAS	74
5.1	Princípio Básico	74
5.2	Versão do PSO Clássico	75
5.2.1	Ajuste dos Parâmetros do PSO Clássico	79
5.2.1.1	Ajuste da velocidade	79
5.2.1.2	Constante de aceleração	79
5.2.1.3	Fator de Inércia	80
5.3	Modificações no PSO	80
5.3.1	Fator de Inércia Oscilatório	82
5.4	Proposta do PSO com Fator de Inércia Oscilatório com Decremento Exponencial	84
5.5	Algoritmo para o PSO Proposto	86
6	SINTONIA DO AVR E PSS UTILIZANDO PSO	89
6.1	Sistema Máquina Barra Infinita	89
6.1.1	Sistema Sem Controle	91
6.1.2	Projeto Convencional	92
6.1.2.1	Projeto Convencional do AVR	92
6.1.2.2	Projeto Convencional do PSS	94
6.1.3	Projeto Utilizando PSO Clássico	96
6.1.4	Projeto Utilizando PSO com Fator de Inércia Oscilatório	98
6.1.4.1	Fator de inércia oscilatório	99
6.1.5	Proposta do PSO com fator de inércia ODE	102
6.2	Sistema 9 Barras Anderson	104
6.2.1	PSO Clássico	105
6.2.2	PSO com Fator de Inércia Oscilatório	110
6.2.3	Proposta do PSO com Fator de Inércia ODE	113
7	CONCLUSÕES	118

7.1	Conclusões	118
7.2	Trabalhos Futuros	118

REFERÊNCIAS	120
-----------------------	-----

ANEXOS	126
---------------	------------

	ANEXO A – DADOS TÉCNICOS DO SMIB.	127
A.1	Gerador a Gás (G1 e G2)	127
A.2	Gerador a Vapor (G3)	128

	ANEXO B – DADOS TÉCNICOS DO SISTEMA 9 BARRAS DO ANDERSON.	129
B.1	Dados dos Geradores	129
B.2	Dados das Linhas de Transmissão	130
B.3	Dados dos Barramentos	130
B.4	Dados dos Transformadores	130

1 Introdução

Os Sistemas Elétricos de Potência (SEPs) estão sujeitos a modificações constantemente devido a necessidade de atender a demanda energéticas da sociedade moderna. O SEP tem como principal função gerar e fornecer energia elétrica a consumidores levando em consideração os princípios básicos de segurança e confiabilidade. A segurança de um sistema está associado a sua capacidade de manutenção em níveis aceitáveis de tensão e frequência, enquanto a confiabilidade está relacionado com a capacidade do sistema de funcionamento mesmo com a ocorrência de condições adversas como: faltas, afundamentos de tensão, variação da carga e distúrbios transitórios (KUNDUR, 1994).

Para que um sistema possa cumprir de forma efetiva com esses requisitos, torna-se necessário as utilizações de controladores associados as máquinas síncronas nas unidades geradoras. Nesse sentido, as utilizações do Regulador Automático de Tensão (AVR - *Automatic Voltage Regulator*) e do Estabilizador de Sistema de Potência (PSS - *Power System Stabilizer*) ganham destaque.

O AVR tem como principal função corrigir o desvio de tensão terminal da máquina síncrona de acordo com o valor da tensão de referência. Este também pode proporcionar os controles da potência reativa gerada e do fator de potência da máquina. Já o PSS é um dispositivo adicional ao sistema de excitação, onde é responsável por aumentar a componente de torque de amortecimento dos geradores através da modulação da tensão de referência do sistema de excitação do gerador (OLIVEIRA, 2006; CARDOSO, 2011).

O projeto desses dispositivos junto as unidades geradoras tem sido realizado por meio de técnicas matemáticas de modelagem e linearização do comportamento dinâmico da máquina síncrona (MOTA, 2006; JUNIOR, 2007; SOUZA, 2007). Essas técnicas podem ser aplicadas quando a perturbação ocorre próximas ao ponto de operação nominal e são inadequadas para descrever o comportamento não-linear do sistema quando se encontrar distante do ponto de equilíbrio. Nesse contexto, a sintonia desses controladores pode apresentar oportunidade de melhoria quanto ao desempenho do sistema.

Dentre as dificuldades encontradas para análise do projeto de controle de tensão e amortecimento, se destacam:

- Inexistência da garantia de desempenho dinâmico do sistema, devido a variação do ponto de equilíbrio;
- A dificuldade de caracterização do sistema na ocorrência de uma perturbação, devido a modelagem poder ou não se apresentar de forma não-linear na ocorrência de uma perturbação, o que pode levar a um desempenho inadequado dos controladores.

No entanto, para resolver esses problemas é possível a aplicação de algum método para ajuste dos parâmetros dos controladores de plantas não-lineares, com intuito de melhorar o desempenho do sistema diante de perturbações externas. Nesse contexto, técnicas de inteligência computacional surgiram como uma aplicação para determinar os parâmetros ótimos para esses controladores, onde possa proporcionar o melhor comportamento dinâmico possível para o sistema.

No meio das técnicas de inteligência computacional, os algoritmos de computação evolutiva ganharam notoriedade nas últimas décadas. Esses têm como principal característica encontrar soluções ótimas para problemas complexos, evitando o problema de mínimos locais e considerando um amplo espaço de busca para soluções (GAING, 2004).

Entre os processos evolutivos que se baseiam em população dois se destacam: algoritmos evolutivos e inteligência de enxame. Esse último é constituído por um conjunto de técnicas baseadas no comportamento coletivo dos sistemas auto-organizados, distribuídos, flexíveis e dinâmicos. As técnicas mais conhecidas de inteligência evolutiva são: otimização por colônia de formigas, otimização por enxame de partículas, algoritmo *shuffled frog-leaping*, algoritmos de coleta de alimentos por bactérias e algoritmos de colônia de abelhas (SERAPIAO, 2009).

Dentre os processos de Inteligência de Enxame, merece destaque a Otimização por Enxame de Partículas (PSO - *Particle Swarm Optimization*) que foi proposto e introduzido por Kennedy e Eberhart (1995). O PSO é um algoritmo evolutivo que surgiu da análise de experiência com métodos que modelam o comportamento social e cognitivo dos animais, como o de cardumes de peixes e bandos de aves. Uma característica encontrada no PSO, é o modo em que sua população evolui no espaço de busca através da melhoria das posições das partículas a cada iteração, rumo a melhores soluções (SANTOS, 2013). Geralmente o PSO é caracterizado como conceito simples, fácil de implementar e baixo esforço computacional (não requer cálculo de derivadas).

Para o projeto dos parâmetros ótimos do AVR e do PSS o algoritmo do PSO apresenta um bom desempenho, no entanto, a sua taxa de convergência na busca do ótimo global ainda pode ser melhorada. Para alcançar esse benefício uma nova proposta baseada em uma modificação no PSO clássico foi realizada em busca de melhorar a velocidade de convergência e a qualidade das soluções encontradas, para isso foi modificado a forma de controle do fator de inércia do algoritmo.

Neste contexto, este trabalho apresenta uma nova proposta baseada em modificações no algoritmo do PSO clássico para sintonia simultânea de parâmetros ótimos do AVR e PSS na regulação de tensão e melhoria do amortecimento da máquina síncrona. O algoritmo proposto será empregado com o objetivo de aperfeiçoar o comportamento dinâmico e a taxa de convergência do algoritmo em um Sistema Máquina Barra Infinita (SMIB - *System Machine Infinity Bus*) e também para um Sistema Multimáquinas.

1.1 Estado da Arte

Nas últimas décadas, novas estratégias e métodos de controle simultâneos de AVR e PSS para compensação de oscilações eletromecânicas de baixa frequência foram proposta na literatura. Apesar desse surgimento, os métodos mais utilizados nas indústrias e mais difundidos na literatura, são os convencionais. Estes são baseados em controladores lineares com ganhos fixos, tais como PI (Proporcional Integral), PID (Proporcional Integral Derivativo) e avanço-atraso de fase (*lead-lag*) e apresentam implementação relativamente simples e pouco esforço computacional.

O estudo de problemas relacionados com estabilidade de sistemas de potência teve início no trabalho pioneiro de Steinmetz (1920), que utilizava o modelo clássico da máquina síncrona. O modelo consiste em representá-la como uma fonte de tensão em série com uma reatância.

Heffron e Phillips (1952) realizaram um estudo a respeito da utilização de reguladores de ação contínua que estendiam os limites de operação estável de um gerador síncrono para regiões onde não seria possível na hipótese ação do controle manual. Este estudo provocou o aumento da estabilidade proporcionada pela utilização do AVR, onde foi verificado o comportamento dinâmico de um Sistema Máquina Barra Infinita (SMIB - System Machine Infinity Bus) equipado com AVR, através de um modelo linearizado em torno de um ponto nominal.

Os estudos de DeMello e Concordia (1969) e DeMello e Laskowski (1975) foram os primeiros sobre compensação de oscilações eletromecânicas em SEPs. Estes trabalhos introduziram conceitos e regras a respeito do projeto dos dispositivos AVR e PSS. Utilizando o modelo de um SMIB desenvolvido por Heffron-Philips, foi possível notar o efeito que alto ganho do amplificador do AVR pode provocar, podendo causar a perda de estabilidade em oscilações posteriores a primeira. Através dessa análise foi sugerido adição do PSS, visando aumentar o amortecimento das oscilações eletromecânicas do sistema através da excitação do gerador. Desde então, os projetos dos AVRs e PSSs, são aplicados em sistemas de geração de energia, aonde são projetados por meio de técnicas convencionais e controladores clássicos lineares.

Anderson e Fouad (1994) desenvolveram a versão mais consagrada na indústria para projeto de PSS. Esta técnica consiste do ajuste sequencial, com a aplicação do modelo de Heffron-Philips-Concordia e conceitos de controle convencional a cada máquina isoladamente. Esta técnica ficou conhecida como Projeto Convencional de Estabilizador de Sistema de Potência. Na literatura é possível encontrar outros métodos, como: Larsen e Swann (1981), Yu (1983), Kundur (1994), Sauer e Pai (1998), Ong (1998), Chaturvedi D. K. (2004), Awed-Badeeb (2006), Mota (2006), Souza (2007) e Rossi (2012).

Nos últimos tempos, tem se utilizado métodos heurístico para projeto de controle

de tensão e amortecimento de oscilações em geradores síncronos. Do-Bomfim, Taranto e Falcao (2000) implementaram um método de otimização de busca dos parâmetros do PSS baseado em algoritmos genéticos. Apesar do algoritmo apresentar busca bem sucedida na descoberta do ótimo global, essa técnica possui um grande esforço computacional quando aumenta-se o número de parâmetros a serem otimizados. Ela também apresenta problemas de degradação da eficiência quando os parâmetros de otimização são altamente correlacionados.

Já Abido (2001) propôs um novo algoritmo baseado na abordagem do projeto ótimo para PSSs em sistemas de potência com multimáquinas. Essa nova proposta desenvolve e emprega o método de Otimização por Enxame de Partículas para encontrar valores ótimos dos parâmetros do PSS quando o sistema é exposto a diversas situações de configuração e carregamento.

Gaing (2004) desenvolveu um método para determinar os parâmetros ótimos para o controlador PID em um dispositivo AVR. A proposta teve características superiores aos métodos tradicionais, incluindo fácil implementação, característica de convergência estável e boa eficiência computacional. O ajuste rápido dos parâmetros ótimos do controlador PID produziu uma solução de alta qualidade para ajudar a estimar o desempenho do controlador proposto, e uma nova função de critério de desempenho no domínio do tempo foi definida. O método proposto foi comparado com algoritmo genético, onde se apresentou mais eficiente e robusto para a resposta ao degrau no sistema AVR.

Das e Venayamoorthy (2006) utilizaram o algoritmo do PSO modificado com uma pequena população para projeto ótimo do PSS. O algoritmo de Otimização por Enxame de Partículas para Pequenas Populações (SPPSO - *Small Population Particle Swarm Optimization*) foi desenvolvido para determinar parâmetros ótimos de vários PSSs simultaneamente em um sistema de potência multimáquinas sob circunstâncias de pequenas e grandes perturbações, onde o método proposto apresentou convergência em poucas interações e um menor esforço computacional.

El-Zonkoly (2006) realizou o projeto simultâneo e coordenado dos parâmetros do PSSs e AVRs para um sistema de potência multimáquinas utilizando o algoritmo PSO. O método proposto foi verificado para um sistema New-England sob diferentes tipos de perturbações, onde apresentou menor esforço computacional e melhores características de convergência do que outros métodos estocásticos.

Falehi, Rostami e Mehrjadi (2011) implementaram o projeto coordenado do AVR e PSS para um SMIB utilizando a técnica de PSO. Neste trabalho é utilizado a integral do erro absoluto multiplicada pelo tempo (ITAE - *Integral of Time Multiplied for Time*) do sinal de desvio da velocidade como função objetivo. Os resultados da simulação mostraram que a estabilidade do sistema de potência é superiormente melhor do que a determinada pelo projeto não coordenado dos controladores AVR e PSS.

Um novo método baseado nas combinações entre a técnica de Otimização por Enxame de Partícula (PSO) e a técnica de Otimização de Forrageamento Bacteriano (BFO - *Bacterial Foraging Optimization*) foi proposto por Manuaba *et al.* (2011). Esse método foi aplicado para sintonia do controlador PID do PSS e do ganho do AVR em um SMIB.

Junior (2012) realizou o projeto simultâneo dos parâmetros do PSS e AVR em um SMIB utilizando a técnica de PSO. Diferentemente dos métodos apresentados na literatura, este estudo se baseia nas características de desempenho do sistema com relação em sua resposta no tempo para uma perturbação na sua tensão de referência. O método proposto apresentou um melhor desempenho dinâmico quando comparado com o projeto clássico.

Usman *et al.* (2014) utilizou o método de Iteração por Enxame de Partícula (IPSO - *Iteration Particle Swarm Optimization*) que é uma melhoria na técnica do PSO clássico, para determinar os parâmetros do AVR e do PSS em um SMIB. Esse novo método adiciona o termo (I_{best}) na equação da velocidade, e está relacionado com o melhor valor entre as partículas na iteração atual. O desempenho da técnica de IPSO proposta é comparada em termos de precisão dos parâmetros determinados e do tempo computacional com a técnica do PSO clássica.

Manuaba *et al.* (2015) propôs um novo método baseado nas técnicas de Otimização de Forrageamento Bacteriano (BFO), Otimização por Enxame de Partículas com Coeficientes de Aceleração Variáveis no Tempo (PSOTVAC - *Particle Swarm With Time Varying Acceleration Coefficient*) e Evolução Diferencial (DE - *Differential Evolution*) para o ajuste simultâneo do AVR e do controlador PID do PSS em um SMIB.

Além da técnica de PSO outros métodos tem sido utilizados para sintonia do AVR e PSS, como : Algoritmo Genético (SELVABALA; DEVARAJ, 2010a; KAHOUALI *et al.*, 2009), Lógica *Fuzzy* (MOHANTY; BEHERA; PANIGRAHI, 2016; KHEZRI; BEVRANI, 2015a; KHEZRI; BEVRANI, 2015b), Evolução Diferencial (SELVABALA; DEVARAJ, 2010b).

1.2 Justificativa e Motivação

O aumento da demanda energética associada a limitações operacionais resultou em uma redução da margem de estabilidade a pequenas perturbações em sistemas elétricos de potência, criando circunstâncias favoráveis ao aparecimento de oscilações. Nessa situação, a robustez se caracteriza como uma boa alternativa nos projetos de controladores de amortecimento (OLIVEIRA, 2006).

Os controles lineares obtidos por meio de técnicas de controle clássico atuam considerando um ponto de operação no projeto o que dificulta a obtenção do desempenho esperado, isso ocorre devido as condições dos sistemas que são variáveis. Este problema

pode ser resolvido utilizando técnicas de otimização robustas baseadas em computação evolutiva, onde são obtidos controladores que garantem a estabilidade e o desempenho do sistema para diferentes condições de operações. Neste segmento, a técnica de otimização por enxame de partículas ganha destaque devido a sua fácil implementação, baixo esforço computacional e pelo seu bom desempenho. Porém, o algoritmo do PSO clássico ainda pode ser melhorado em relação a sua taxa de convergência, e para isso, algumas modificações no algoritmo do PSO clássico foram propostas.

Neste sentido, a motivação deste trabalho abrange a necessidade de desenvolvimento de uma nova proposta para o algoritmo do PSO para o ajuste ótimo e simultâneo dos parâmetros do AVR e PSS. Para isso, uma nova modificação no controle do fator de inércia do PSO clássico é realizada, objetivando melhorar ainda mais da qualidade das soluções e a convergência das simulações.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

Desenvolver uma nova proposta para o algoritmo de otimização por enxame de partículas para a sintonia simultânea dos parâmetros do AVR e PSS, de modo que proporcione uma melhoria na estabilidade dinâmica como na taxa de convergência entre suas simulações.

1.3.2 Objetivos Específicos

Para cumprir o objetivo principal, o projeto terá os seguintes objetivos específicos:

- Realizar a representação do modelo linearizado da máquina síncrona, sistema de excitação, AVR e PSS;
- Analisar os conceitos introdutórios relacionados com a implementação do algoritmo do PSO clássico e do PSO proposto;
- Desenvolver e executar o algoritmo PSO proposto para sintonia ótima do AVR e PSS para um sistema SMIB e em um sistema multimáquinas.

1.4 Desenvolvimento do Trabalho

Como forma de sistematizar o tema abordado neste trabalho, o texto foi organizado em sete capítulos:

- Capítulo 2: São apresentados conceitos que servem de subsídio para o bom entendimento do trabalho. Dentre esses, julga-se necessário: estabilidade de sistema de potência, conceitos relacionados ao AVR e também sobre o PSS.
- Capítulo 3: Desenvolvimento da modelagem matemática para simulação dinâmica da máquina síncrono. Através do modelo de sexta ordem apresentado é obtido o modelo de terceira ordem linearizado do sistema máquina conectado a uma barra infinita;
- Capítulo 4: Serão expostas as características e a modelagem matemática do sistema de excitação, AVR e PSS para simulações de pequenos sinais;
- Capítulo 5: É realizada uma introdução sobre os conceitos relacionados ao comportamento social e cognitivo da otimização por enxame de partícula. É desenvolvida uma nova proposta de PSO, que baseia-se na modificação realizada no PSO clássico;
- Capítulo 6: Apresenta os parâmetros do AVR e PSS determinados simultaneamente através do algoritmo do PSO proposto em um SMIB e para o sistema 9 barras do Anderson. De acordo com os modelos desenvolvido nos capítulos 3 e 4, é analisado o comportamento dinâmico do sistema e definidos os parâmetros e requisitos de desempenho para o algoritmo de otimização. Esses resultados são comparados com o projeto realizado através do método clássico e do PSO clássico, onde é feita uma comparação entre métodos e realizado uma análise quanto ao seu desempenho;
- Capítulo 7: Por fim, é realizada algumas conclusões obtidas com aplicação do método proposto e apresentado sugestões para o desenvolvimentos de trabalhos futuros.

2 Fundamentação Teórica

Neste capítulo é realizada uma revisão teórica a respeito de estabilidade em sistemas de potência, com ênfase em estabilidade angular dos rotores à pequenas perturbações, pois o estudo do mesmo é uma boa ferramenta de análise para projeto de Reguladores Automáticos de Tensão (AVRs) e Estabilizadores de Sistemas de Potência (PSSs) utilizados para melhorar a regulação de tensão e a estabilidade oscilatória angular dos sistemas. Além disso, é apresentado conceitos relacionados com os dispositivos AVR e PSS.

2.1 Estabilidade de Sistemas de Potência

Um sistema elétrico de potência convencional é constituído basicamente por geradores síncronos, linhas de transmissão e cargas. Em regime permanente, todas as máquinas síncronas possuem a mesma velocidade angular e a potência gerada é igual à soma das potências absorvidas pelas cargas, além das perdas do processo de transmissão. O ponto de operação do sistema é estável nessa condição e somente ocorrerá uma mudança no equilíbrio após alguma perturbação (BRETAS; ALBERTO, 2000).

A estabilidade de sistemas elétricos de potência pode ser definida de forma geral como a habilidade de um sistema de potência de manter-se em um estado de equilíbrio em condições nominais de operação e também após ser submetido a distúrbios físicos (KUNDUR *et al.*, 2004). Idealmente, para que a estabilidade de um sistema seja alcançada é necessário que todas as máquinas síncronas interligadas, estejam funcionando em sincronismo, isto é, operando com tensões e frequência constantes ou dentro de certos limites.

Em um Sistema Elétrico de Potência a robustez é medida pela capacidade do sistema de funcionar numa situação de equilíbrio em condições normais e de perturbação. Os estudos de estabilidade analisam o comportamento do sistema na ocorrência de alterações no sistema ou na produção. Um sistema é dito estável se após a ocorrência destas perturbações continuar a funcionar em sincronismo.

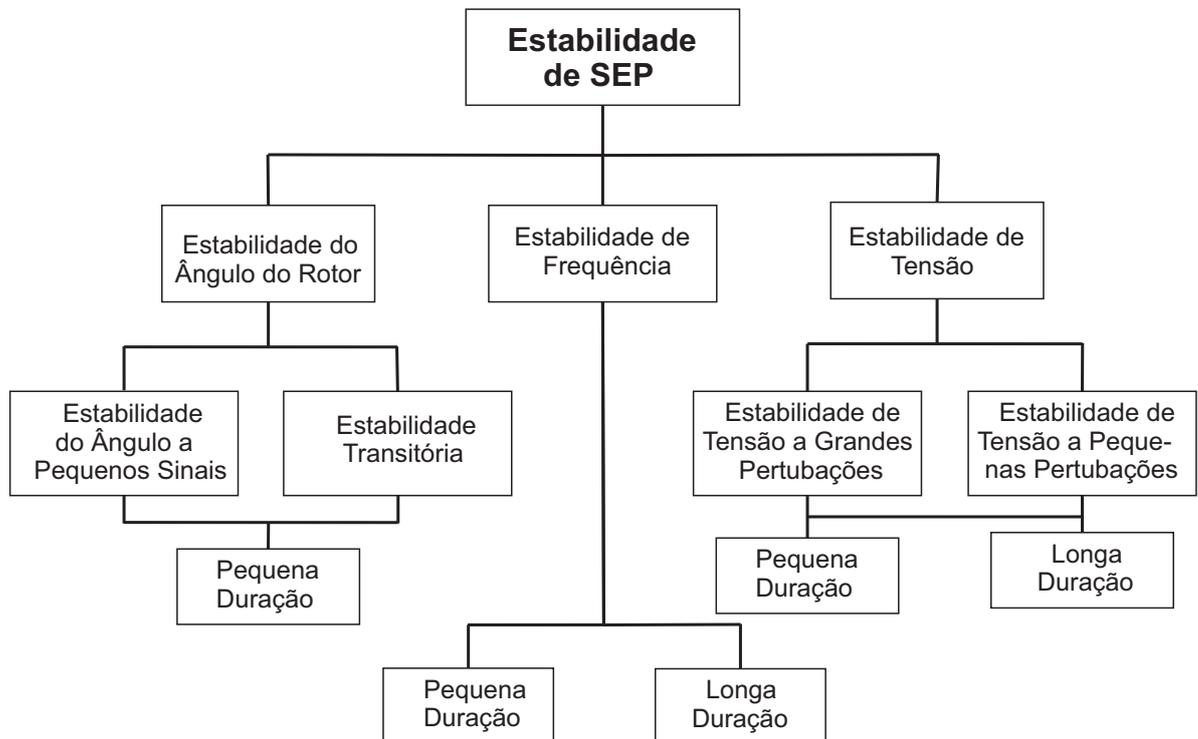
Se a perturbação for pequena e não envolver mudança na configuração do sistema, as máquinas tenderão a voltar para o mesmo estado de operação inicial. O mesmo não se sucederá caso aconteça o contrário, fazendo com que ocorra um desequilíbrio entre a geração e a carga, levando a máquina a estabelecer um novo ponto de operação. No entanto, para qualquer um dos casos, todas as máquinas síncronas terão que continuar a funcionar em sincronismo para que o sistema continue a operar de forma estável (ANDERSON; FOUAD, 1994).

No período transitório que se segue à ocorrência de uma perturbação, o funcionamento do sistema é oscilatório por natureza, o que terá influência nas potências que circulam nas linhas. Porém, se o sistema for estável, estas oscilações serão fortemente amortecidas. A capacidade de um SEP de se manter estável depende fortemente da capacidade das variáveis de controle do sistema para amortecer as oscilações eletromecânicas.

Durante o período transitório após a ocorrência de uma perturbação, o sistema visto pela máquina síncrona é modificado por variação das suas grandezas, tais como tensão terminal, impedância vista pela máquina, ângulo de torque, frequência, etc. Consequentemente, haverá variação da potência de saída do gerador acarretando desequilíbrio entre os torques mecânico (fornecido pela turbina) e elétrico (proporcionado pela carga). Até que o desequilíbrio seja sentido e corrigido pelos controladores, a variação da potência de saída será compensada pela energia armazenada nas partes girantes da máquina, podendo ocorrer perda de estabilidade (MOTA, 2006).

Na Figura 1 é ilustrado o problema de estabilidade de sistemas elétricos de potência, identificando suas categorias e subcategorias.

Figura 1 – Classificação do problema de estabilidade.



Fonte: Kundur *et al.* (2004) - Adaptado.

Segundo Kundur *et al.* (2004) a classificação de estabilidade de sistemas de potência pode ser baseada nas seguintes vertentes:

1. A natureza física do modo de instabilidade resultante, conforme indicado pela variável do sistema principal, na qual a instabilidade pode ser observada:
 - Ângulo
 - Tensão
 - Frequência
2. O tamanho da perturbação considerada, que influencia o método de cálculo utilizado e na previsão de estabilidade:
 - Grandes perturbações
 - Pequenas perturbações
3. Os dispositivos, processos e o intervalo de tempo que deve ser levado em consideração para avaliar a estabilidade:
 - Curto prazo (*short-term stability analysis*)
 - Médio prazo (*mid-term stability analysis*)
 - Longo prazo (*long-term stability analysis*)

2.1.1 Estabilidade Angular

A estabilidade angular do rotor, que é o foco de estudo nesse trabalho, é definido como a habilidade de máquinas síncronas interconectadas de permanecerem em sincronismo tanto em condições normais de operação, quando após sofrerem uma perturbação (KUNDUR *et al.*, 2004). Estudos desta natureza consideram os efeitos das oscilações eletromecânicas inerentes ao sistema, analisando o comportamento existente entre as potências fornecidas pelos geradores e os deslocamentos angulares de seus rotores.

O problema de estabilidade angular do rotor envolve o estudo das oscilações eletromecânicas inerentes aos sistemas de potência. Um fator fundamental nesse problema é a maneira pela qual as potências de saídas das máquinas síncronas variam conforme os ângulos dos rotores mudam. Sob condições de estado estacionário, há equilíbrio entre o torque mecânico de entrada e o torque eletromagnético de saída de cada gerador, e a velocidade permanece constante.

Na ocorrência de uma perturbação, o equilíbrio entre os torques é perdido e o rotor de uma máquina pode acelerar ou desacelerar. Um aumento na separação angular dos geradores acima de um certo limite é acompanhado da redução na transferência de potência, que ocasiona um maior aumento na separação angular levando a máquina a instabilidade. Se um gerador se apresenta temporariamente mais rápido que outro, a posição angular do seu rotor em relação à da máquina mais lenta avançará. A diferença

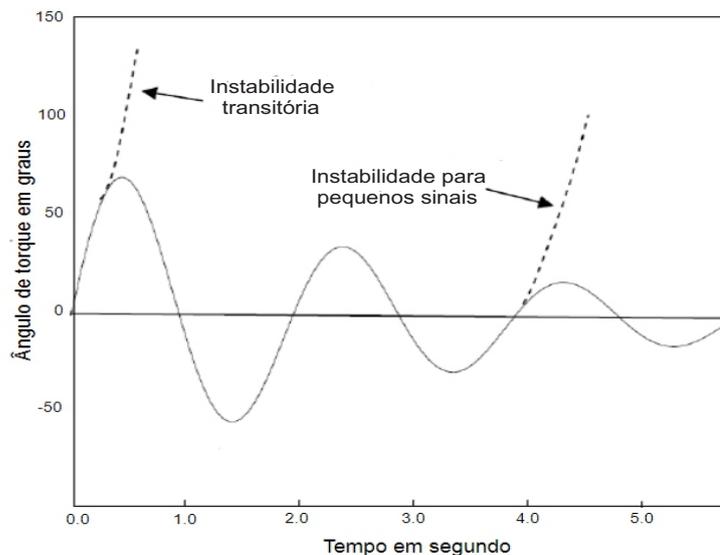
angular resultante transfere parte da carga da máquina lenta para a máquina rápida, dependendo da relação de ângulo e potência. Isso tende a reduzir a diferença de velocidade e, conseqüentemente, a separação angular. A relação de ângulo e potência é altamente não linear. A instabilidade ocorre se o sistema não consegue absorver a energia cinética correspondente a essas diferenças de velocidade do rotor (KUNDUR *et al.*, 2004).

A ocorrência da perda de sincronismo pode acontecer entre uma máquina e o resto do sistema ou entre grupos de máquinas, nesse caso o sincronismo ainda pode ser mantido dentro do grupo de máquinas após a sua separação do restante do sistema.

Segundo Mota (2006) a perda de estabilidade angular do rotor pode ser classificada de acordo com o tipo de perturbação pelo qual foi aplicada a máquina síncrona:

- **Perda de Estabilidade Transitória:** É verificada quando o sistema é submetido a uma grande perturbação, como por exemplo, um curto-circuito no lado de alta tensão do sistema de transmissão, perda de uma grande unidade geradora, etc. Se for verificado que a instabilidade ocorreu nas primeiras oscilações da máquina, o qual depende muito do ponto de operação do sistema e do tempo de duração da perturbação, tem-se um caso típico de instabilidade transitória, como observado na Figura 2. Nesses casos, os reguladores de tensão rápidos são de extrema importância: pois, atuam diminuindo o tempo de desequilíbrio entre a carga e a geração. Caso ocorra a perda de estabilidade, o uso de controladores suplementares não faz efeito, pois geralmente estes se encontram operando nos limites durante uma perturbação.
- **Perda de Estabilidade Para Pequenos Sinais:** Quando o sistema é submetido a uma pequena perturbação, como, por exemplo, uma suave mudança no carregamento do sistema, uma pequena variação na tensão terminal, etc. Essa instabilidade geralmente é provocada pela existência de um modo de oscilação instável associado a algum elemento de controle, como observa-se na Figura 2. Os reguladores rápidos de altos ganhos prejudicam o amortecimento inerente das máquinas, podendo ocorrer instabilidade em oscilações subseqüente à primeira. Para essas situações é muito importante a utilização de sinais estabilizadores através dos reguladores de tensão.

Figura 2 – Tipos de estabilidade durante um transitório através da resposta angular.



Fonte: Mota (2006) - Adaptado.

2.2 Regulador Automático de Tensão

A perda de estabilidade pode ocorrer devido a um desequilíbrio entre a geração e a carga, causado por falhas no gerador, linhas, transformadores ou até variação brusca na demanda. Uma forma de evitar esses desequilíbrios é equipar os geradores síncronos com Reguladores Automáticos de Tensão (*AVR – Automatic Voltage Regulator*).

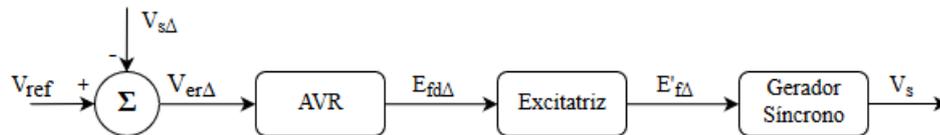
O AVR é constituído basicamente por um amplificador, que é responsável pelo monitoramento da tensão terminal do gerador. Na ocorrência de uma perturbação, o AVR atua no controle de excitação da máquina síncrona para manter a tensão terminal no nível desejado.

De forma geral, as principais funções dos dispositivos AVRs, segundo Kundur (1994) são:

- Controlar a tensão do gerador síncrono, mantendo-a dentro dos limites pré-estabelecidos por normas;
- Regular a potência reativa entre as máquinas que operam em paralelo;
- Efetuar o controle da corrente de campo, com o objetivo de manter os geradores síncronos em sincronismo com o sistema;
- Aumentar a excitação sob condições de curto-circuito, mantendo o gerador em sincronismo com os demais geradores do sistema.

Na Figura 3 é ilustrado o diagrama de blocos simplificado do dispositivo AVR conectado a um gerador. Os AVRs são projetados e implementados por meio de técnicas convencionais e controladores convencionais, como PI, PID e avanço e atraso de fase (BA-MUQABEL; ABIDO, 2006).

Figura 3 – Estrutura clássica de um AVR conectado a um gerador.



Fonte: Autor próprio.

O dispositivo AVR, ilustrado na Figura 3, tem como função controlar a tensão de excitação do campo de modo que a corrente gerada por ela e a potência reativa do gerador síncrono sejam ajustada de maneira desejada. O sinal de tensão de referência (V_{ref}) é comparada com a tensão terminal do gerador ($V_{s\Delta}$) e o resultado dessa subtração, o sinal de tensão de erro ($V_{er\Delta}$), é processado pelo AVR e enviado a excitatriz, que produzirá a corrente necessária para o ajuste da tensão (NETO, 2013).

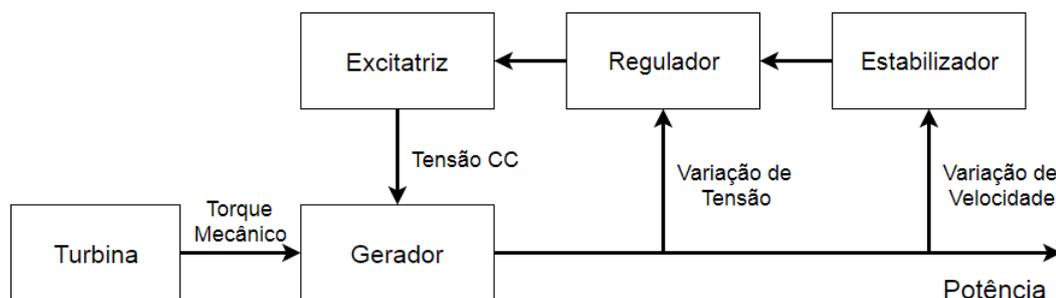
O AVR funciona como um coração para o sistema de excitação. Este dispositivo é responsável por responder a variações na tensão de saída (ou corrente) e proporcionar a devida ação corretiva, mantendo a tensão do gerador dentro do limite desejado. Para elevar a confiabilidade, é necessário que o AVR seja um sistema de ação proporcional contínua, ou seja, a ação corretiva deve ser proporcional ao desvio da tensão de saída em relação a um determinado valor de referência, não importando o quão pequeno seja esse desvio (ANDERSON; FOUAD, 1994).

2.3 Estabilizador de Sistema de Potência

A estabilidade de um sistema elétrico de potência pode ser melhorada assim como a sua resposta dinâmica. Essa melhora pode ser conseguida através da correta operação e configuração do sistema. Uma maneira de reduzir o risco de perda de estabilidade pode ser conseguido pela utilização de elementos adicionais ao sistema, que ajudam no desempenho dinâmico do mesmo. Com este objetivo de melhorar a estabilidade de um SEP, são empregados os estabilizadores de sistemas de potência (CALDEIRA, 2009).

Os Estabilizadores de Sistemas de Potência são equipamentos adicionais aos geradores síncronos. Esse dispositivo é representado por uma malha de controle adicional inserida na referência de tensão do AVR, com o objetivo de aumentar o amortecimento das oscilações eletromecânicas nas unidades geradoras (KUNDUR, 1994). Na Figura 4 é possível verificar a adição do PSS no conjunto turbina, gerador e seus controladores.

Figura 4 – Diagrama de bloco das malhas de controle de um sistema de potência.



Fonte: Autor próprio.

Analisando a Figura 4 é possível notar que a tensão gerada pela máquina é controlada regulando a excitação de campo. Conforme a magnitude do campo de excitação aumenta, a tensão gerada e a potência reativa de saída aumentam. Como já foi verificado, o Regulador Automático de Tensão de um gerador síncrono é o responsável pelo controle da tensão terminal e pelo controle da energia reativa gerada. A diferença entre a tensão de saída da máquina e a tensão de referência é verificado pelo AVR e o erro entre essas tensões é compensado pelo controle de excitação.

A aplicação de sistemas de excitação rápidos pode tornar insatisfatório o grau de amortecimento das máquinas após a ocorrência de uma perturbação. Em regime permanente, quando o desvio da velocidade é zero ou aproximadamente zero, o regulador de tensão depende apenas do erro da tensão. Em regime transitório, a velocidade do gerador não é constante e o ângulo do rotor varia, causando oscilações no movimento do rotor. O PSS tem como objetivo utilizar a excitação do gerador para regular as oscilações de potência e, conseqüentemente, aumentar sua estabilidade (NASCIMENTO *et al.*, 2007).

2.3.1 Tipos de Sinais de Entrada do PSS

O PSS é um circuito de avanço de fase, projetado para compensar os atrasos que ocorrem na malha do controle de tensão. Ele opera via regulador de tensão do gerador influenciando seu ponto de ajuste. Como sinal de entrada, este dispositivo pode utilizar qualquer sinal que contenha índices das oscilações eletromecânicas (MACHOWSKI; BIALEK; BUMBY, 2011), tais como:

- Velocidade de rotação do eixo da máquina;
- Frequência terminal;
- Potência ativa.

2.3.1.1 Variação de Velocidade

Como objetivo do PSS é controlar as oscilações do rotor da máquina, a utilização do PSS com o sinal de velocidade do rotor ($w_{r\Delta}$) como entrada é a técnica mais citada na literatura e também a utilizada neste trabalho. Esta técnica têm sido empregada em unidades hidráulicas com sucesso há muito tempo, desde meados da década de 1960.

A utilização desse sinal como entrada para o PSS possui a desvantagem de que o ruído de frequência média e alta, causado pelas oscilações do eixo de torção podem causar interferência na tensão a ser controlada (SOUZA, 2007). Os níveis aceitáveis de ruídos dependem de sua frequência. Para ruídos com frequência inferior a 5 Hz, o nível de ruído deve ser menor que 0,02%, desde que variações significativas na tensão terminal possam ser produzidas por variações em baixa frequência da tensão de campo. Ruídos em baixa frequência não podem ser removidos por filtros elétricos convencionais, a eliminação destes deve ser inerente ao método de medição do sinal de velocidade (CALDEIRA, 2009).

Para os estabilizadores que utilizam esse sinal como entrada, existe uma relação entre o valor do ganho e a fase a ser compensada com o porte do sistema (LARSEN; SWANN, 1981). Quanto maior for o porte do sistema e a carga do gerador, maior será o ganho do PSS. Já se o sistema for de pequeno porte, onde as condições de estabilidade são desfavoráveis, o valor do ganho de estabilizador é menor. Para sistemas de grande porte, o atraso de fase a ser compensado é maior. Como consequência, a malha do estabilizador é menos estável. Estas restrições acabam por limitar o valor máximo do ganho do PSS, seja em um sistema de grande ou de pequeno porte (CALDEIRA, 2009).

2.3.1.2 Frequência Terminal

Este tipo de sinal de entrada do PSS tem sido utilizado para diversas aplicações assim como o sinal de variação de velocidade.

A sensibilidade do sinal de frequência para oscilações do rotor aumenta quando o sistema de transmissão externo está próximo aos limites térmicos. Portanto, o ganho de um estabilizador baseado em frequência deve ser ajustado para obter o melhor desempenho possível quando o sistema está carregado, onde a ação estabilizadora tem maior necessidade (NOGUEIRA, 2008).

Os sinais de frequência são mais sensíveis aos modos de oscilações entre grandes áreas do que aos modos envolvendo unidades individuais ou aqueles modos entre unidades

de uma mesma planta. Sendo assim, com o sinal de frequência como entrada é possível obter uma maior contribuição de amortecimentos para os modos de oscilações entre áreas do que utilizando o sinal de variação de velocidade como entrada para o PSS.

2.3.1.3 Potência Acelerante

Esta configuração é utilizada somente quando a potência mecânica for assumida como constante. Se essa potência variar, por exemplo, devido à ação de um controle secundário de frequência, esta solução poderá produzir oscilações transitórias na tensão e na potência reativa. Estas oscilações não necessariamente são produzidas pelo PSS, uma vez que o mesmo identifica a variação da potência mecânica como uma oscilação de potência a ser amortecida (MACHOWSKI; BIALEK; BUMBY, 2011).

Segundo os estudos realizados por Larsen e Swann (1981), para os PSSs baseados no sinal de potência como entrada, deve-se ter um cuidado especial com a compensação imperfeita da variação da potência mecânica, pois esta pode resultar em um offset de tensão transitória durante rápidas variações da potência mecânica.

A utilização do sinal de potência como entrada para o PSS possui como grande desvantagem o fato de que ele responde à rampas lentas na potência de saída do gerador, ocasionado uma considerável queda da tensão terminal do gerador.

3 Modelagem da Máquina Síncrona

As máquinas síncronas são responsáveis pela grande maioria da energia elétrica gerada no mundo atualmente. São usados tanto na alimentação de grandes sistemas de energia elétrica como em geração distribuída ou mesmo na alimentação de sistemas elétricos isolados. A maioria dos estudos de dinâmica de sistemas de energia elétrica é feito através de simulações matemáticas onde a modelagem do gerador é parte de extrema importância como, por exemplo, no estudo da estabilidade dinâmica do sistema.

Nesse capítulo será abordado o modelo matemático para simulação dinâmica da máquina síncrona. A partir do modelo de sexta ordem desenvolvido através das equações de Park é obtido o modelo linearizado de terceira ordem do sistema máquina conectado a uma barra infinita para projetos de controladores.

3.1 A Máquina Síncrona

A máquina de indução é largamente utilizada para converter energia elétrica em mecânica, enquanto a máquina síncrona é o principal meio de converter energia mecânica em energia elétrica (LANDGRAF, 2014). A máquina síncrona geralmente é formada por um elemento girante, chamado de rotor e por um elemento fixo denominado de estator. O rotor da máquina síncrona contém um enrolamento de campo que é alimentado por corrente contínua e que cria um campo magnético principal na máquina, que também é conhecido como campo magnético de excitação. Esse campo induz uma tensão senoidal nas bobinas presas no estator (enrolamento de armadura), sendo que a frequência dessa tensão induzida é determinada pelo número de polos da máquinas e também pela sua velocidade angular (UMANS, 2014).

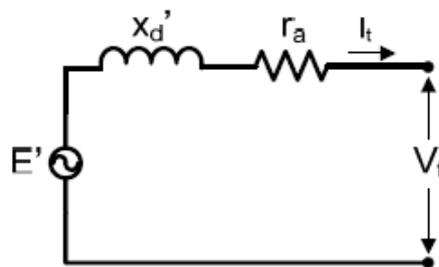
Além dos enrolamentos de campo e armadura, a máquina possui um enrolamento ou conjunto de enrolamento curto-circuitados, que são chamados de enrolamentos amortecedores, cuja a função principal é proporcionar um amortecimento as oscilações resultantes de perturbações nas condições normais de operação (KUNDUR, 1994).

Em máquinas de polos salientes, os enrolamentos amortecedores são dispostos nas face polar do rotor. Na ocorrência de transitórios, as correntes parasitas são induzidas nesses enrolamentos contribuindo para o amortecimento do sistema. A construção laminada da face polar da máquina de polo saliente reduz a magnitude das correntes parasitas (corrente de Foucault) através do ferro do rotor, o que torna desnecessário a modelagem do efeito amortecedor adicional. Para as máquinas de polos lisos, o próprio corpo do rotor oferece caminho para as correntes parasitas, o que possui efeito equivalente aos

enrolamentos amortecedores. Para o projeto de controladores aplicados a máquinas de polos lisos, o efeito das correntes deve ser modelado uma vez que essas produzem um amortecimento natural para o sistema (KUNDUR, 1994).

Quanto a representação da máquina síncrona, a forma mais simples de representar esse modelo em estudo de estabilidade é através de uma fonte de tensão atrás de uma reatância transitória. Na Figura 5 é possível observar o circuito equivalente para este modelo.

Figura 5 – Circuito equivalente de uma máquina síncrona.



Fonte: Autor próprio.

A tensão por trás da reatância síncrona é dada por:

$$E' = V_t + r_a I_t + jx'_d I_t \quad (3.1)$$

Onde:

- E' = Tensão atrás da reatância transitória;
- V_t = Tensão terminal da máquina;
- r_a = Resistência da armadura;
- x'_d = Reatância transitória no eixo direto;
- I_t = Corrente terminal da máquina.

Para modelar uma máquina síncrona é necessário representar o sistema eletromecânico, onde o sistema mecânico produz o torque mecânico fornecido pelos eixos girantes, e o sistema elétrico tem seu desempenho expresso em função de tensões e correntes geradas e fornecidas aos enrolamentos da máquina síncrona.

3.2 Equação de Oscilação da Máquina Síncrona

O deslocamento angular de uma máquina síncrona pode ser representada por uma equação diferencial que descreve o movimento do rotor da máquina. Para determinar essa equação uma série de etapas descrita em Mota (2006) são seguidas.

Da lei de mecânica aplicado em massas girantes é possível obter o torque líquido atuante no rotor:

$$T_l = \alpha I \quad (3.2)$$

Onde:

- T_l = Torque líquido da máquina;
- α = Aceleração angular mecânica;
- I = Momento de inércia.

A relação entre o ângulo elétrico θ_e e o ângulo mecânico θ_m , medido em relação a referência fixa, é dado por:

$$\theta_e = \frac{p}{2}\theta_m \quad (3.3)$$

Onde p é o número de polos da máquina. A frequência em hertz é dada por:

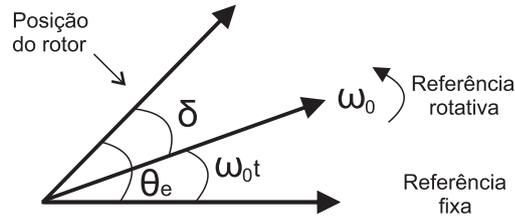
$$f = \frac{p}{2} \left(\frac{rpm}{60} \right) \quad (3.4)$$

Reorganizando as equações (3.3) e (3.4), tem-se:

$$\theta_e = \frac{60f}{rpm} \theta_m \quad (3.5)$$

Para estudo de estabilidade é adequado definir a posição angular com relação a um eixo rotativo do que com um eixo estacionário, vê Figura 6.

Figura 6 – Sistema de referência para medição da posição do rotor.



Fonte: Autor próprio.

Considerando a velocidade nominal ω_0 , como a referência rotativa, o ângulo de torque δ é dada por:

$$\delta = \theta_e - \omega_0 t \quad (3.6)$$

Derivando a equação (3.6), tem-se:

$$\frac{d\delta}{dt} = \frac{d\theta_e}{dt} - \omega_0 \quad (3.7)$$

Derivando a equação (3.7), é obtido a aceleração:

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{d^2\theta_e}{dt^2} \quad (3.8)$$

A equação (3.2), do torque líquido, agora na referência rotativa, transformando o ângulo mecânico em ângulo elétrico é a seguinte:

$$T_l = I \frac{rpm}{60f} \frac{d^2\delta}{dt^2} \quad (3.9)$$

O torque em p.u. é dado pela razão entre o torque líquido e o torque base:

$$T_l(p.u.) = \frac{T_l}{T_{BASE}} = \frac{T_l}{P_{BASE}/w} = \frac{2\pi I (rpm)^2}{f P_{BASE} (60)^2} \frac{d^2\delta}{dt^2} \quad (3.10)$$

A constante de inércia H é definida como a energia cinética em $MW.s$ ou MJ à velocidade nominal, armazenada nas partes girantes por MVA . A constante de inércia pode ser expressada por:

$$H = \frac{E}{P_{BASE}} = \frac{\frac{1}{2} I (w^2)}{P_{BASE}} = \frac{\frac{1}{2} I \left(\frac{2\pi rpm}{60}\right)^2}{P_{BASE}} \quad (3.11)$$

Substituindo a equação (3.11), na equação (3.10), tem-se:

$$T_l = \frac{H}{\pi f} \frac{d^2 \delta}{dt^2} \quad (3.12)$$

O torque líquido atuante no rotor é dado pela diferença entre o torque mecânico e o torque elétrico:

$$T_l = T_m - T_e \quad (3.13)$$

Substituindo a equação (3.13) na equação (3.12), encontra-se a equação de oscilação da máquina síncrona:

$$\frac{d^2 \delta}{dt^2} = \frac{\pi f}{H} (T_m - T_e) \quad (3.14)$$

Quando o torque mecânico é maior que o torque elétrico, a aceleração é positiva. Entretanto, se o torque mecânico for menor que o torque elétrico, a aceleração é negativa e o gerador desacelera. Em regime permanente, os torques são iguais, portanto, a velocidade é constante e a aceleração é nula.

Em p.u. torques e potências são iguais, e a equação de oscilação da máquina síncrona pode-ser escrita, como:

$$\frac{d^2 \delta}{dt^2} = \frac{\pi f}{H} (P_m - P_e) \quad (3.15)$$

3.3 Equação Elétrica da Máquina Síncrona

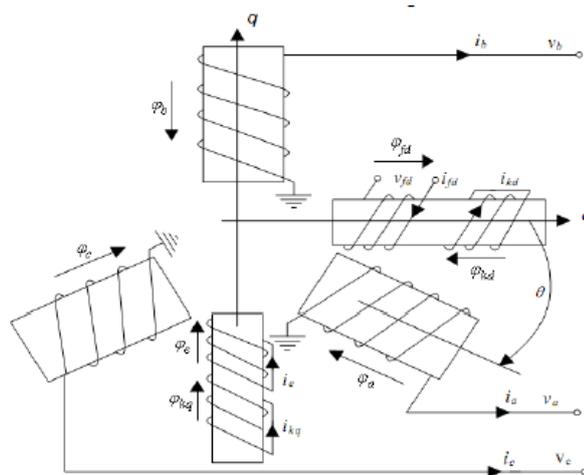
Na análise da máquina síncrona, quando adota-se uma referência girante com o rotor a corrente de armadura e as tensões são transformadas em dois novos conjuntos de variáveis ortogonais. Um desses novos conjuntos está alinhado com o eixo magnético do enrolamento de campo, que é conhecido como eixo direto ou eixo d. O segundo conjunto que está alinhado com o eixo 90° elétricos atrasado em relação ao eixo do enrolamento de campo, é conhecido como eixo em quadratura ou eixo q. A terceira variável é uma corrente estacionária que é proporcional a corrente de sequência zero.

A transformação de variáveis que foi mencionada, é conhecida como transformada de Park ou também chamada de transformada d-q-0. A utilização desta transformada faz com que as equações diferenciais das tensões dos enrolamentos das máquinas passem a ter coeficientes constantes.

Para o modelo desenvolvido nesse trabalho é considerado a máquina funcionando como gerador, com três enrolamentos na armadura e quatro enrolamento no rotor, dois

no eixo direto e dois no eixo em quadratura. No eixo direto, há um enrolamento de campo e um enrolamento amortecedor, enquanto no eixo em quadratura, se localizam dois enrolamentos amortecedores. O segundo enrolamento amortecedor nesse eixo é para incluir o efeito de amortecimento num gerador de polos lisos devido às correntes no ferro do rotor. Na Figura 7 é possível observar o diagrama esquemático do enrolamento da máquina síncrona especificada.

Figura 7 – Diagrama esquemático dos enrolamentos na máquina síncrona.



Fonte: Junior (2012).

3.3.1 Equações do Fluxo Magnético

As equações que retratam as variações das tensões, correntes e fluxos concatenados dos enrolamentos em uma máquina síncrona podem ser representados como função do movimento do rotor baseado na teoria de circuitos magnéticos lineares acoplados¹. Na armadura tem-se:

$$v_a = -R_a i_a + \frac{d}{dt} \varphi_a \quad (3.16)$$

$$v_b = -R_b i_b + \frac{d}{dt} \varphi_b \quad (3.17)$$

$$v_c = -R_c i_c + \frac{d}{dt} \varphi_c \quad (3.18)$$

¹ Para o modelo adotado considerou-se que as correntes que saem da máquina possuem sinais negativos (-) e as que entram na máquina adotam sinais positivos (+).

Enquanto no rotor:

$$v_{fd} = R_{fd}i_{fd} + \frac{d}{dt}\varphi_{fd} \quad (3.19)$$

$$0 = R_e i_e + \frac{d}{dt}\varphi_e \quad (3.20)$$

$$0 = R_{kd}i_{kd} + \frac{d}{dt}\varphi_{kd} \quad (3.21)$$

$$0 = R_{kq}i_{kq} + \frac{d}{dt}\varphi_{kq} \quad (3.22)$$

As equações dos fluxos concatenados podem se dadas por:

$$\begin{bmatrix} \varphi_a \\ \varphi_b \\ \varphi_c \\ \varphi_{fd} \\ \varphi_e \\ \varphi_{kd} \\ \varphi_{kq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -L_{aa} & -L_{ab} & -L_{ac} & L_{afd} & L_{ae} & L_{akd} & L_{akq} \\ -L_{ba} & -L_{bb} & -L_{bc} & L_{bfd} & L_{be} & L_{bkd} & L_{bkq} \\ -L_{ca} & -L_{cb} & -L_{cc} & L_{cfd} & L_{ce} & L_{ckd} & L_{ckq} \\ L_{fda} & L_{fdb} & L_{fdc} & L_{fdfd} & L_{fde} & L_{fdkd} & L_{fdkq} \\ L_{eda} & L_{edb} & L_{edc} & L_{edfd} & L_{ede} & L_{edkd} & L_{edkq} \\ L_{kda} & L_{kdb} & L_{kdc} & L_{kdfd} & L_{kde} & L_{kdkd} & L_{kdkq} \\ L_{kqa} & L_{kqb} & L_{kqc} & L_{kqfd} & L_{kqe} & L_{kqkd} & L_{kqkq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_{fd} \\ i_e \\ i_{kd} \\ i_{kq} \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

Observando a matriz (3.23) é possível verificar que a diagonal principal da matriz indutâncias representa as indutâncias próprias de cada enrolamento, enquanto os restantes das variáveis representam as indutâncias mútuas entre os enrolamentos. A matriz indutância pode ser dividida em quatro submatrizes: $[-L_{estator}]$ que corresponde as indutâncias relacionadas ao estator, $[L_{rotor}]$ que caracteriza as indutância do rotor, e as outras duas $[L_{estator-rotor}] = [L_{rotor-estator}]$ que representa as indutâncias mútuas entre o estator e rotor.

3.3.1.1 Indutâncias como função do estator

As indutâncias da diagonal principal da submatriz de indutância do estator $[-L_{estator}]$, são funções de relações entre o fluxo magnético e a corrente em cada enrolamento. Essas indutância variam em função de θ , devido a consideração que o fluxo do entreferro apresenta distribuição senoidal. Além do fluxo do entreferro, deve-se levar em consideração o efeito do fluxo de dispersão nos enrolamentos da armadura, que não depende da posição do rotor e é representado por uma valor constante na indutância própria de cada enrolamento (KUNDUR, 1994).

Considerando a fase a como de referência e assumindo que os enrolamentos da armadura são idênticos e que $L_s > L_m$, as equações das indutâncias próprias são dadas por:

$$L_{aa} = L_s + L_m \cos 2\theta \quad (3.24)$$

$$L_{bb} = L_s + L_m \cos(2\theta - 120^\circ) \quad (3.25)$$

$$L_{cc} = L_s + L_m \cos(2\theta + 120^\circ) \quad (3.26)$$

As indutância mútuas entre os enrolamentos da armadura, que são dadas pelas indutâncias fora da diagonal principal da submatriz $[-L_{estator}]$, assim como as indutâncias próprias apresentam comportamento senoidal devido à forma construtiva do rotor. Essas são sempre negativas e possui valor máximo quando os polos norte e sul estão equidistantes do centro dos dois enrolamentos considerados (KUNDUR, 1994). Levando em consideração o efeito do fluxo no entreferro e do fluxo de dispersão, tem-se que as indutância mútuas entre os enrolamentos da armadura são dadas por (considerando $|M_s| > L_m$):

$$L_{ab} = L_{ba} = -[M_s + L_m \cos 2(\theta + 30^\circ)] \quad (3.27)$$

$$L_{ac} = L_{ca} = -[M_s + L_m \cos 2(\theta - 210^\circ)] \quad (3.28)$$

$$L_{bc} = L_{cb} = -[M_s + L_m \cos 2(\theta - 90^\circ)] \quad (3.29)$$

3.3.1.2 Indutâncias como função do rotor

As indutâncias relacionadas com o rotor não variam com a posição do mesmo, isso devido a estrutura cilíndrica do estator (KUNDUR, 1994). Essas indutância possuem acoplamento magnético entre os eixos d e q nulo, ou seja, todas os pares de enrolamentos deslocados de 90° são zeros. Logo as indutâncias $L_{fdfd}, L_{fdkd} = L_{kdfd}, L_{ee}, L_{ekq} = L_{kqe}, L_{kdkd}, L_{kqkq}$ são constantes.

3.3.1.3 Indutâncias mútuas entre estator e rotor

As indutâncias mútuas entre o estator e o rotor, que podem ser representadas pelas submatrizes $[L_{estator-rotor}]$ ou $[L_{rotor-estator}]$, variam em função do ângulo θ entre os enrolamentos. Essas indutâncias possuem valores máximos quando o eixo do estator está alinhado com o eixo do rotor e possuem valor nulo quando esses dois eixos estão defasados de 90° .

Adotando a fase a como referência e considerando que a força magnética tenha distribuição senoidal, tem-se que as indutâncias mútuas entre o estator e rotor são:

$$L_{afd} = L_{fda} = M_{fd}\cos\theta \quad (3.30)$$

$$L_{bfd} = L_{fdb} = M_{fd}\cos(\theta - 120^\circ) \quad (3.31)$$

$$L_{cfd} = L_{fdc} = M_{fd}\cos(\theta + 120^\circ) \quad (3.32)$$

$$L_{ae} = L_{ea} = M_e\cos(\theta + 90^\circ) \quad (3.33)$$

$$L_{be} = L_{eb} = M_e\cos(\theta - 30^\circ) \quad (3.34)$$

$$L_{ce} = L_{ec} = M_e\cos(\theta - 150^\circ) \quad (3.35)$$

$$L_{akd} = L_{kda} = M_{kd}\cos\theta \quad (3.36)$$

$$L_{bkd} = L_{kdb} = M_{kd}\cos(\theta - 120^\circ) \quad (3.37)$$

$$L_{ckd} = L_{kdc} = M_{kd}\cos(\theta + 120^\circ) \quad (3.38)$$

$$L_{akq} = L_{kqa} = M_{kq}\cos(\theta + 90^\circ) \quad (3.39)$$

$$L_{bkq} = L_{kqb} = M_{kq}\cos(\theta - 30^\circ) \quad (3.40)$$

$$L_{ckq} = L_{kqc} = M_{kq}\cos(\theta - 150^\circ) \quad (3.41)$$

3.3.1.4 Equação de Park para os fluxos concatenados

Para acabar com a dependência explícita dos parâmetros variáveis no tempo das equações apresentadas, utiliza-se a transformada de Park para obter um conjunto de equações com coeficientes invariantes no tempo. Logo, as variáveis das fases a , b e c , são

substituídas por um novo conjunto de variáveis fictícias segundo o eixo direto e o eixo em quadratura (d, q, 0).

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \bar{T} \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \\ v_0 \end{bmatrix} \quad (3.42)$$

Onde \bar{T} é a matriz transformação de Park e é dada por:

$$\bar{T} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 1 \\ \cos(\theta - 120^\circ) & -\sin(\theta - 120^\circ) & 1 \\ \cos(\theta + 120^\circ) & -\sin(\theta + 120^\circ) & 1 \end{bmatrix} \quad (3.43)$$

e \bar{T}^{-1} é a transformada inversa de Park:

$$\bar{T}^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - 120^\circ) & \cos(\theta + 120^\circ) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - 120^\circ) & -\sin(\theta + 120^\circ) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (3.44)$$

Aplicando a transformada de Park, na equação dos fluxos concatenados, tem-se:

$$\begin{bmatrix} \varphi_d \\ \varphi_q \\ \varphi_0 \end{bmatrix} = \bar{T}^{-1} \begin{bmatrix} -L_{estator} \end{bmatrix} \bar{T} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} + \bar{T}^{-1} \begin{bmatrix} L_{estator-rotor} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{fd} \\ i_e \\ i_{kd} \\ i_{kq} \end{bmatrix} \quad (3.45)$$

$$\begin{bmatrix} \varphi_{fd} \\ \varphi_e \\ \varphi_{kd} \\ \varphi_{kq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{rotor-estator} \end{bmatrix} \bar{T} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{rotor} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{fd} \\ i_e \\ i_{kd} \\ i_{kq} \end{bmatrix} \quad (3.46)$$

Realizando algumas manipulações trigonométricas, são obtidos as seguintes equações:

$$\begin{bmatrix} \varphi_d \\ \varphi_q \\ \varphi_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -L_d i_d + M_{fd} i_{fd} + M_{kd} i_{kd} \\ -L_q i_q + M_e i_e + M_{kq} i_{kq} \\ -L_0 i_0 \end{bmatrix} \quad (3.47)$$

$$\begin{bmatrix} \varphi_{fd} \\ \varphi_e \\ \varphi_{kd} \\ \varphi_{kq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{3}{2}M_{fd} & 0 & 0 & L_{fdfd} & 0 & L_{fdkd} & 0 \\ 0 & -\frac{3}{2}M_e & 0 & 0 & L_{ee} & 0 & L_{ekq} \\ -\frac{3}{2}M_{kd} & 0 & 0 & L_{kdfd} & 0 & L_{kdkd} & 0 \\ 0 & -\frac{3}{2}M_{kq} & 0 & 0 & L_{kqe} & 0 & L_{kqkq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \\ i_{fd} \\ i_e \\ i_{kd} \\ i_{kq} \end{bmatrix} \quad (3.48)$$

Onde: $L_d = L_s + M_s + \frac{3}{2}L_m$ e $L_q = L_s + M_s - \frac{3}{2}L_m$

3.3.2 Equação da Tensão nos Enrolamentos

As Equações de tensão (3.16) a (3.22), podem ser rescritas da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \\ v_{fd} \\ v_e \\ v_{kd} \\ v_{kq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_a & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -R_b & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -R_c & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_{fd} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_e & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_{kd} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_{kq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_{fd} \\ i_e \\ i_{kd} \\ i_{kq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{\varphi}_a \\ \dot{\varphi}_b \\ \dot{\varphi}_c \\ \dot{\varphi}_{fd} \\ \dot{\varphi}_e \\ \dot{\varphi}_{kd} \\ \dot{\varphi}_{kq} \end{bmatrix} \quad (3.49)$$

Utilizando a transformada de Park para equação (3.49):

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \\ v_0 \end{bmatrix} = -\bar{T}^{-1} [R_{estator}] \bar{T} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} + \bar{T}^{-1} \frac{d}{dt} \bar{T} \begin{bmatrix} \varphi_d \\ \varphi_q \\ \varphi_0 \end{bmatrix} \quad (3.50)$$

$$\begin{bmatrix} v_{fd} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = [R_{rotor}] \begin{bmatrix} i_{fd} \\ i_e \\ i_{kd} \\ i_{kq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{\varphi}_{fd} \\ \dot{\varphi}_e \\ \dot{\varphi}_{kd} \\ \dot{\varphi}_{kq} \end{bmatrix} \quad (3.51)$$

Considerando que $R_a = R_b = R_c = R$ e que as correntes na armadura da máquina estão balanceadas $i_0 = \varphi_0 = 0$, realizando algumas manipulações trigonométricas, encontra-

se:

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \\ v_{fd} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -R & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_{fd} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_e & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_{kd} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_{kq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_{fd} \\ i_e \\ i_{kd} \\ i_{kq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{\varphi}_d \\ \dot{\varphi}_q \\ \dot{\varphi}_{fd} \\ \dot{\varphi}_e \\ \dot{\varphi}_{kd} \\ \dot{\varphi}_{kq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\dot{\theta}\varphi_d \\ -\dot{\theta}\varphi_q \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.52)$$

3.3.3 Sistema Por Unidade

Para representação das tensões e fluxos em p.u. adota-se as seguintes premissas:

- Armadura: A corrente base escolhida é o valor de pico da corrente nominal do estator \hat{I} , e para a tensão base adota-se o valor pico da tensão nominal do estator \hat{V} ;
- Rotor: A corrente e a tensão base são expresso por I e V, com o tipo de enrolamento identificado no subíndice;
- Os fluxos bases são obtidos dividindo as tensões bases correspondentes por ω_0 ;
- A potência base é igual em todos os enrolamentos da máquina:

$$\frac{3}{2}\hat{V}\hat{I} = V_{fd}I_{fd} = V_eI_e = V_{kd}I_{kd} = V_{kq}I_{kq}$$

- Mesmo fluxo induzido na linha do entreferro pelas correntes nos diversos enrolamentos da máquina:

$$I_{fd} = \frac{L_{ad}}{M_{fd}}\hat{I}, I_e = \frac{L_{aq}}{M_e}\hat{I}, I_{kd} = \frac{L_{ad}}{M_{kd}}\hat{I}, I_{kq} = \frac{L_{aq}}{M_{kq}}\hat{I}$$

3.3.3.1 Fluxos magnéticos em p.u.

Para representação dos fluxos em p.u., deve-se seguir os seguintes procedimentos:

- Dividir os membros pelo fluxo base;
- No segundo membro das equações, multiplica-se e divide-se cada corrente pela corrente base correspondente;

Para o eixo direto:

$$\frac{\omega_0\varphi_d}{\hat{V}} = -\frac{\omega_0L_d\hat{I}}{\hat{V}}\frac{i_d}{\hat{I}} + \frac{\omega_0M_{fd}I_{fd}}{\hat{V}}\frac{i_{fd}}{I_{fd}} + \frac{\omega_0M_{kd}I_{kd}}{\hat{V}}\frac{i_{kd}}{I_{kd}} \quad (3.53)$$

$$\frac{\omega_0 \varphi_{fd}}{V_{fd}} = -\frac{3\omega_0 M_{fd} \hat{I} i_d}{2 V_{fd} \hat{I}} + \frac{\omega_0 L_{fdfd} I_{fd} i_{fd}}{V_{fd} I_{fd}} + \frac{\omega_0 L_{fdkd} I_{kd} i_{kd}}{V_{fd} I_{kd}} \quad (3.54)$$

$$\frac{\omega_0 \varphi_{kd}}{V_{kd}} = -\frac{3\omega_0 M_{kd} \hat{I} i_d}{2 V_{kd} \hat{I}} + \frac{\omega_0 L_{kdfd} I_{fd} i_{fd}}{V_{kd} I_{fd}} + \frac{\omega_0 L_{kdkd} I_{kd} i_{kd}}{V_{kd} I_{kd}} \quad (3.55)$$

Das Equações acima, é possível definir algumas reatâncias da máquina em p.u. desse sistema:

$$x_d = \omega_0 L_d \frac{\hat{I}}{\hat{V}} \quad (3.56)$$

$$x_{fd} = \omega_0 L_{fdfd} \frac{I_{fd}}{V_{fd}} = \frac{2}{3} \omega_0 L_{fdfd} \frac{L_{ad}^2}{M_{fd}^2} \frac{\hat{I}}{\hat{V}} \quad (3.57)$$

$$x_{kd} = \omega_0 L_{kdkd} \frac{I_{kd}}{V_{kd}} = \frac{2}{3} \omega_0 L_{kdkd} \frac{L_{ad}^2}{M_{kd}^2} \frac{\hat{I}}{\hat{V}} \quad (3.58)$$

$$x_{afd} = \omega_0 M_{fd} \frac{I_{fd}}{\hat{V}} = \frac{3}{2} \omega_0 M_{fd} \frac{\hat{I}}{V_{fd}} = \omega_0 M_{fd} \frac{L_{ad}}{M_{fd}} \frac{\hat{I}}{\hat{V}} = \omega_0 L_{ad} \frac{\hat{I}}{\hat{V}} = x_{ad} \quad (3.59)$$

$$x_{akd} = \omega_0 M_{kd} \frac{I_{kd}}{\hat{V}} = \frac{3}{2} \omega_0 M_{kd} \frac{\hat{I}}{V_{kd}} = \omega_0 M_{kd} \frac{L_{ad}}{M_{kd}} \frac{\hat{I}}{\hat{V}} = \omega_0 L_{ad} \frac{\hat{I}}{\hat{V}} = x_{ad} \quad (3.60)$$

$$x_{fdkd} = \omega_0 L_{fdkd} \frac{I_{kd}}{V_{fd}} = \frac{2}{3} \frac{L_{fdkd} L_{ad}}{M_{fd} M_{kd}} \omega_0 L_{ad} \frac{\hat{I}}{\hat{V}} \quad (3.61)$$

$$x_{afd} = x_{akd} = x_{fdkd} = x_{ad} \quad (3.62)$$

Logo as equações dos fluxos no eixo direto tornam-se:

$$\varphi_d = -x_d i_d + x_{ad} i_{kd} + x_{ad} i_{fd} \quad (3.63)$$

$$\varphi_{fd} = -x_{ad} i_d + x_{ad} i_{kd} + x_{fd} i_{fd} \quad (3.64)$$

$$\varphi_{kd} = -x_{ad} i_d + x_{kd} i_{kd} + x_{ad} i_{fd} \quad (3.65)$$

Para o eixo em quadratura, tem-se:

$$\frac{\omega_0 \varphi_q}{\hat{V}} = -\frac{\omega_0 L_q \hat{I} i_q}{\hat{V} \hat{I}} + \frac{\omega_0 M_e I_e i_e}{\hat{V} I_e} + \frac{\omega_0 M_{kq} I_{kq} i_{kq}}{\hat{V} I_{kq}} \quad (3.66)$$

$$\frac{\omega_0 \varphi_e}{\hat{V}} = -\frac{3\omega_0 M_e \hat{I} i_q}{2 \hat{V} \hat{I}} + \frac{\omega_0 L_{ee} I_e i_e}{\hat{V} I_e} + \frac{\omega_0 L_{ekd} I_{kq} i_{kq}}{\hat{V} I_{kq}} \quad (3.67)$$

$$\frac{\omega_0 \varphi_{kq}}{V_{kq}} = -\frac{3}{2} \frac{\omega_0 M_{kq} \hat{I} i_q}{V_{kq} \hat{I}} + \frac{\omega_0 L_{kqe} I_e i_e}{V_{kq} I_e} + \frac{\omega_0 L_{kqkq} I_{kq} i_{kq}}{V_{kq} I_{kq}} \quad (3.68)$$

As reatâncias em quadraturas são expressas em:

$$x_q = \omega_0 L_q \frac{\hat{I}}{\hat{V}} \quad (3.69)$$

$$x_e = \omega_0 L_{ee} \frac{I_e}{V_e} = \frac{2}{3} \omega_0 L_{ee} \frac{L_{ae}^2 \hat{I}}{M_e^2 \hat{V}} \quad (3.70)$$

$$x_{kq} = \omega_0 L_{kqkq} \frac{I_{kq}}{V_{kq}} = \frac{2}{3} \omega_0 L_{kqkq} \frac{L_{aq}^2 \hat{I}}{M_{kq}^2 \hat{V}} \quad (3.71)$$

$$x_{ae} = x_{akq} = x_{ekq} = x_{aq} \quad (3.72)$$

Logo as equações para os fluxos concatenados no eixo em quadratura são:

$$\varphi_q = -x_q i_q + x_{aq} i_{kq} + x_{aq} i_e \quad (3.73)$$

$$\varphi_e = -x_{aq} i_q + x_{aq} i_{kq} + x_e i_e \quad (3.74)$$

$$\varphi_{kq} = -x_{aq} i_q + x_{kq} i_{kq} + x_{aq} i_e \quad (3.75)$$

Considerando as resistências dos enrolamentos em p.u.

$$r_a = R_a \frac{\hat{I}}{\hat{V}} \quad (3.76)$$

$$r_{fd} = R_{fd} \frac{I_{fd}}{V_{fd}} = \frac{2}{3} R_{fd} \frac{L_{ad}^2 \hat{I}}{M_{fd}^2 \hat{V}} \quad (3.77)$$

$$r_e = R_e \frac{I_e}{V_e} = \frac{2}{3} R_e \frac{L_{ae}^2 \hat{I}}{M_e^2 \hat{V}} \quad (3.78)$$

$$r_{kd} = R_{kd} \frac{I_{kd}}{V_{kd}} = \frac{2}{3} R_{kd} \frac{L_{ad}^2 \hat{I}}{M_{kd}^2 \hat{V}} \quad (3.79)$$

$$r_{kq} = R_{kq} \frac{I_{kq}}{V_{kq}} = \frac{2}{3} R_{kq} \frac{L_{aq}^2 \hat{I}}{M_{kq}^2 \hat{V}} \quad (3.80)$$

As tensões de eixo direto e em quadratura são apresentadas como:

$$v_d = \frac{1}{\omega_0} \dot{\varphi}_d - r_a i_d - \frac{1}{\omega_0} \varphi_q \dot{\theta} \quad (3.81)$$

$$v_{fd} = \frac{1}{\omega_0} \dot{\varphi}_{fd} + r_{fd} i_{fd} \quad (3.82)$$

$$0 = \frac{1}{\omega_0} \dot{\varphi}_{kd} + r_{kd} i_{kd} \quad (3.83)$$

$$v_q = \frac{1}{\omega_0} \dot{\varphi}_q - r_a i_q + \frac{1}{\omega_0} \varphi_d \dot{\theta} \quad (3.84)$$

$$0 = \frac{1}{\omega_0} \dot{\varphi}_e + r_e i_e \quad (3.85)$$

$$0 = \frac{1}{\omega_0} \dot{\varphi}_{kq} + r_{kq} i_{kq} \quad (3.86)$$

3.3.4 Modelagem para Simulação Dinâmica da Máquina Síncrona

Geralmente os modelos de máquinas síncronas, são funções das reatâncias e das constante de tempo da máquina. O modelo que segue será desenvolvido a partir das equações mostrada anteriormente e de parâmetros obtidos através de algumas definições desenvolvidas por Hammons e Winning (1971).

Levando em consideração algumas definições e relações apresentadas por Hammons:

- Reatância transitória de eixo direto:

$$x'_d = x_d - \frac{x_{ad}^2}{x_{fd}} \quad (3.87)$$

- Reatância transitória de eixo em quadratura:

$$x'_q = x_q - \frac{x_{aq}^2}{x_e} \quad (3.88)$$

- Constante de tempo transitória de circuito aberto no eixo direto:

$$T'_{d0} = \frac{x_{fd}}{\omega_0 r_{fd}} \quad (3.89)$$

- Constante de tempo transitória de circuito aberto no eixo em quadratura:

$$T'_{q0} = \frac{x_e}{\omega_0 r_e} \quad (3.90)$$

- Constante de tempo subtransitória de circuito aberto no eixo direto:

$$T''_{d0} = \frac{1}{\omega_0 r_{kd}} \frac{(x_{kd} x_{fd} - x_{ad}^2)}{x_{fd}} \quad (3.91)$$

- Constante de tempo subtransitória de circuito aberto no eixo em quadratura:

$$T''_{q0} = \frac{1}{\omega_0 r_{kq}} \frac{(x_{kq} x_e - x_{aq}^2)}{x_e} \quad (3.92)$$

- Reatância de dispersão da armadura:

$$x_l = x_d - x_{ad} = x_q - x_{aq} \quad (3.93)$$

A partir das Equações (3.87) a (3.93), é possível encontrar as seguintes relações:

$$x'_d - x_l = \frac{x_{ad}}{x_{fd}} (x_{fd} - x_{ad}) \quad (3.94)$$

$$x'_d - x''_d = \frac{x_{ad}^2}{x_{fd}} \frac{(x_{fd} - x_{ad})^2}{(x_{fd} x_{kd} - x_{ad}^2)} \quad (3.95)$$

$$\frac{x''_d - x_l}{x'_d - x_l} = \frac{(x_{kd} - x_{ad}) x_{fd}}{x_{fd} x_{kd} - x_{ad}^2} \quad (3.96)$$

$$1 + \frac{(x'_d - x''_d)(x_d - x'_d)}{(x'_d - x_l)^2} = \frac{x_{fd}}{(x_{fd} x_{kd} - x_{ad}^2)} \quad (3.97)$$

$$1 - \frac{(x'_d - x''_d)}{(x'_d - x_l)} = \frac{x_{fd}(x_{kd} - x_{ad})}{(x_{fd} x_{kd} - x_{ad}^2)} \quad (3.98)$$

3.3.4.1 Equação para variação do fluxo no campo principal da máquina

Tendo que a equação de tensão de campo é dado por:

$$\frac{r_{fd}}{x_{ad}} E_{fd} = \frac{1}{\omega_0} \dot{\varphi}_{fd} + r_{fd} i_{fd} \quad (3.99)$$

A tensão interna fictícia na armadura proporcional ao fluxo concatenado no campo, é definida da seguinte forma:

$$e'_q = \frac{\omega_0 M_{fd}}{L_{fd}} \varphi_{fd} \quad (3.100)$$

Para expressar e'_q em p.u., dividir ambos os membros por \hat{V} (tensão base da armadura) e multiplica e divide o segundo membro por V_{fd} (tensão base do campo), obtém-se:

$$\frac{e'_q}{\hat{V}} = \frac{M_{fd} V_{fd} \omega_0 \varphi_{fd}}{\hat{V} L_{fd} V_{fd}} \quad (3.101)$$

Multiplicando e dividindo o segundo membro por $\omega_0 I_{fd}$, na equação (3.101), onde I_{fd} é a corrente base do campo, tem-se:

$$\frac{e'_q}{\hat{V}} = \frac{\omega_0 I_{fd} M_{fd} V_{fd} \omega_0 \varphi_{fd}}{\omega_0 I_{fd} \hat{V} L_{fd} V_{fd}} = \frac{\omega_0 M_{fd} I_{fd} / \hat{V}}{\omega_0 L_{fd} I_{fd} / V_{fd}} \frac{\omega_0 \varphi_{fd}}{V_{fd}} \quad (3.102)$$

Utilizando a relação entre as Equações (3.59) e (3.102), a equação (3.100) em p.u. do sistema, torna-se:

$$e'_q = \frac{x_{ad}}{x_{fd}} \varphi_{fd} \quad (3.103)$$

Utilizando a equação (3.89):

$$T'_{d0} = \frac{x_{fd}}{\omega_0 r_{fd}} \quad (3.104)$$

Nomeando $x_{ad} i_{fd}$ de E_I (tensão proporcional à corrente de campo), a equação (3.99) de variação do campo principal da máquina, é igual a:

$$\dot{e}'_q = \frac{1}{T'_{d0}} (E_{fd} - E_I) \quad (3.105)$$

3.3.4.2 Equação para variação do fluxo no circuito do ferro no eixo em quadratura

Dada a equação de tensão no eixo em quadratura:

$$0 = \frac{1}{\omega_0} \dot{\varphi}_e + r_e i_e \quad (3.106)$$

De maneira similar a equação (3.103), a tensão proporcional ao fluxo concatenado no circuito do ferro em p.u. do sistema adotado é dada por:

$$e'_d = \frac{x_{aq}}{x_e} \varphi_e \quad (3.107)$$

Considerando a equação (3.90):

$$T'_{q0} = \frac{x_e}{\omega_0 r_e} \quad (3.108)$$

Nomeando $x_{aq}i_e$ de E_{Iq} (tensão proporcional à corrente do circuito do ferro no eixo em quadratura), se obtém a equação para a variação do fluxo no circuito do ferro no eixo em quadratura.

$$\dot{e}'_d = \frac{1}{T'_{d0}}(-E_{Iq}) \quad (3.109)$$

3.3.4.3 Equações para a variação do fluxo no enrolamento amortecedor do eixo direito e do eixo em quadratura

Da equação de tensão no eixo direito, é possível obter:

$$0 = \frac{1}{\omega_0}\dot{\varphi}_{kd} + r_{kd}i_{kd} \quad (3.110)$$

A corrente i_{kd} , é dada por:

$$i_{kd} = \frac{-x_{ad}\varphi_{fd} + x_{fd}\varphi_{kd}}{x_{fd}x_{kd} - x_{ad}^2} + \frac{x_{fd}x_{ad} - x_{ad}^2}{x_{fd}x_{kd} - x_{ad}^2}i_d \quad (3.111)$$

Substituindo a expressão de φ_{fd} da equação (3.103), na equação (3.111), obtem-se:

$$i_{kd} = \frac{-e'_q x_{fd} + x_{fd}\varphi_{kd}}{x_{fd}x_{kd} - x_{ad}^2} + \frac{x_{fd}x_{ad} - x_{ad}^2}{x_{fd}x_{kd} - x_{ad}^2}i_d = \frac{-e'_q + \varphi_{kd} + x_{ad}/x_{fd}(x_{fd} - x_{ad})i_d}{(x_{fd}x_{kd} - x_{ad}^2)/x_{fd}} \quad (3.112)$$

Fazendo o uso da relação $x'_d - x_l = \frac{x_{ad}}{x_{fd}}(x_{fd} - x_{ad})$, a equação (3.112), torna-se:

$$i_{kd} = \frac{\varphi_{kd} - e'_q + (x'_d - x_l)i_d}{(x_{fd}x_{kd} - x_{ad}^2)/x_{fd}} \quad (3.113)$$

Utilizando a relação:

$$\frac{(x'_d - x_l)^2}{x'_d - x''_d} = \frac{(x_{fd}x_{kd} - x_{ad}^2)}{x_{fd}} \quad (3.114)$$

Substituindo a equação (3.114) na equação (3.113), produz:

$$i_{kd} = \frac{(x'_d - x''_d)}{(x'_d - x_l)^2}[\varphi_{kd} - e'_q + (x'_d - x_l)i_d] \quad (3.115)$$

Fazendo o uso da Equação (3.115) na Equação (3.110), é obtido:

$$\dot{\varphi}_{kd} = -\omega_0 r_{kd} \frac{(x'_d - x''_d)}{(x'_d - x_l)^2}[\varphi_{kd} - e'_q + (x'_d - x_l)i_d] \quad (3.116)$$

Combinando a equação (3.114) com a definição de T''_{d0} , tem-se:

$$T''_{d0} = \frac{1}{\omega_0 r_{kd}} \frac{(x_{kd} x_{fd} - x_{ad}^2)}{x_{fd}} = \frac{1}{\omega_0 r_{kd}} \frac{(x'_d - x_l)^2}{(x'_d - x''_d)} \quad (3.117)$$

Substituindo T''_{d0} na equação (3.116), $\dot{\varphi}_{kd}$ torna-se:

$$\dot{\varphi}_{kd} = -\frac{1}{T''_{d0}} [\varphi_{kd} - e'_q + (x'_d - x_l) i_d] \quad (3.118)$$

De maneira análoga à obtenção da equação para a variação do fluxo no enrolamento amortecedor do eixo direto, para o eixo em quadratura tem-se a seguinte equação:

$$\dot{\varphi}_{kq} = -\frac{1}{T''_{q0}} [\varphi_{kq} - e'_d + (x'_q - x_l) i_q] \quad (3.119)$$

3.3.4.4 Expressão para as componentes da tensão interna E''

A grande vantagem desse modelo é que a tensão interna de uma máquina pode ser calculada como função dos fluxos já calculados. Neste seção será desenvolvido essa expressão.

Sendo:

$$e''_q = \frac{(x_{ad} x_{kd} - x_{ad}^2) \varphi_{fd} + (x_{ad} x_{fd} - x_{ad}^2) \varphi_{kd}}{x_{fd} x_{kd} - x_{ad}^2} \quad (3.120)$$

Da equação (3.103), tem-se:

$$e'_q = \frac{x_{ad}}{x_{fd}} \varphi_{fd} \quad (3.121)$$

Substituindo a equação (3.103) na (3.120), obtêm-se:

$$e''_q = \frac{(x_{kd} - x_{ad}) x_{fd} e'_q + (x_{ad} x_{fd} - x_{ad}^2) \varphi_{kd}}{x_{fd} x_{kd} - x_{ad}^2} \quad (3.122)$$

Considerando:

$$\frac{x''_d - x_l}{x'_d - x_l} = \frac{(x_{kd} - x_{ad}) x_{fd}}{x_{fd} x_{kd} - x_{ad}^2} \quad (3.123)$$

Substituindo na equação (3.122):

$$e''_q = \frac{x''_d - x_l}{x'_d - x_l} e'_q + \varphi_{kd} \left(1 - \frac{x''_d - x_l}{x'_d - x_l}\right) = \varphi_{kd} + \left(\frac{x''_d - x_l}{x'_d - x_l}\right) (e'_q - \varphi_{kd}) \quad (3.124)$$

Similarmente, a expressão de e_d'' é dada por:

$$e_d'' = -\varphi_{kq} - \left(\frac{x_q'' - x_l}{x_q' - x_l} \right) (e_d' - \varphi_{kq}) \quad (3.125)$$

3.3.4.5 Expressão para tensão proporcional à corrente de campo

Sendo que:

$$E_I = x_{ad} i_{fd} \quad (3.126)$$

Substituindo a expressão de i_{fd} na equação (3.126), obtêm-se:

$$E_I = x_{ad} \left[\frac{x_{fd} \varphi_{fd} - x_{ad} \varphi_{kd}}{x_{fd} x_{kd} - x_{ad}^2} + \frac{x_{kd} x_{ad} - x_{ad}^2}{x_{fd} x_{kd} - x_{ad}^2} i_d \right] \quad (3.127)$$

Substituindo a expressão de φ_{fd} da equação (3.103):

$$E_I = x_{ad} \left[\frac{x_{kd} x_{fd} / x_{ad} e_q' - x_{ad} \varphi_{kd}}{x_{fd} x_{kd} - x_{ad}^2} + \frac{x_{kd} x_{ad} - x_{ad}^2}{x_{fd} x_{kd} - x_{ad}^2} i_d \right] \quad (3.128)$$

Reorganizando,

$$E_I = e_q' \frac{x_{kd} x_{fd}}{x_{fd} x_{kd} - x_{ad}^2} - \varphi_{kd} \frac{x_{ad}^2}{x_{fd} x_{kd} - x_{ad}^2} + \frac{x_{kd} x_{ad}^2 - x_{ad}^3}{x_{fd} x_{kd} - x_{ad}^2} i_d \quad (3.129)$$

Para o termo e_q' , tensão interna atrás da reatância transitória no eixo em quadratura, utiliza-se a relação:

$$1 + \frac{(x_d' - x_d'')(x_d - x_d')}{(x_d' - x_l)^2} = \frac{x_{fd}}{(x_{fd} x_{kd} - x_{ad}^2)} \quad (3.130)$$

Para o termo em φ_{kd} , são utilizadas as seguintes relações:

$$x_d' - x_l = \frac{x_{ad}}{x_{fd}} (x_{fd} - x_{ad}) \quad (3.131)$$

$$x_d' - x_d'' = \frac{x_{ad}^2 (x_{fd} - x_{ad})^2}{x_{fd} (x_{fd} x_{kd} - x_{ad}^2)} \quad (3.132)$$

Resultando na seguinte expressão:

$$\frac{x_{ad}^2}{x_{fd} x_{kd} - x_{ad}^2} = \frac{(x_d - x_d'')(x_d - x_d')}{(x_d' - x_l)} \quad (3.133)$$

Já para o termo em i_d , tem as seguintes expressões:

$$1 - \frac{(x'_d - x''_d)}{(x'_d - x_l)} = \frac{x_{fd}(x_{kd} - x_{ad})}{(x_{fd}x_{kd} - x_{ad}^2)} \quad (3.134)$$

$$(x_d - x'_d) = \frac{x_{ad}^2}{x_{fd}} \quad (3.135)$$

Realizando algumas operações, é obtido a equação (3.136):

$$\frac{x_{kd}x_{ad}^2 - x_{ad}^3}{x_{fd}x_{kd} - x_{ad}^2} = x_d - x'_d - \frac{(x_d - x''_d)}{(x'_d - x_l)}(x_d - x'_d) \quad (3.136)$$

Portanto a expressão para tensão proporcional à corrente de campo, é dada por:

$$E_I = e'_q \left[1 + \frac{(x'_d - x''_d)(x_d - x'_d)}{(x'_d - x_l)^2} \right] + i_d \left[(x_d - x'_d) - \frac{(x'_d - x''_d)(x_d - x'_d)}{x'_d - x_l} \right] - \varphi_{kd} \left[\frac{(x'_d - x''_d)(x_d - x'_d)}{(x'_d - x_l)^2} \right] \quad (3.137)$$

De forma organizada:

$$E_I = e'_q + (x_d - x'_d)i_d - \frac{(x'_d - x''_d)(x_d - x'_d)}{(x'_d - x_l)^2} [\varphi_{kd} - e'_q + (x'_d - x_l)i_d] \quad (3.138)$$

Substituindo terceiro termo da equação pela (3.115) de i_{kd} :

$$E_I = e'_q + (x_d - x'_d)(i_d - i_{kd}) \quad (3.139)$$

De maneira análoga a expressão para a tensão proporcional à corrente de circuito do ferro no eixo em quadratura (E_{Iq}), é dada por:

$$E_{Iq} = e'_d + (x_q - x'_q)i_q - \frac{(x'_q - x''_q)(x_q - x'_q)}{(x'_q - x_l)^2} E_{Ikq} \quad (3.140)$$

3.4 Modelo de 6ª Ordem Para Simulação Dinâmica da Máquina Síncrona

O modelo de 6ª para simulação dinâmica de uma máquina síncrona representa fielmente o funcionamento desta. Esse modelo é bastante utilizado pelas empresas de energia para simulação do comportamento dinâmico dos sistemas de potência. O conjunto de equações descrita abaixo representam esse modelo:

1. Equação de oscilação da máquina síncrona:

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{\pi f}{H} (P_m - P_e) \quad (3.141)$$

2. Equação para a variação do fluxo no campo principal da máquina:

$$\dot{e}'_q = \frac{1}{T'_{d0}}(E_{fd} - E_I) \quad (3.142)$$

3. Equação para a variação do fluxo no circuito do ferro no eixo em quadratura:

$$\dot{e}'_d = \frac{1}{T'_{d0}}(E_{Iq}) \quad (3.143)$$

4. Equação para a variação do fluxo no enrolamento amortecedor do eixo direto:

$$\dot{\varphi}_{kd} = -\frac{1}{T''_{d0}}[\varphi_{kd} - e'_q + (x'_d - x_l)i_d] \quad (3.144)$$

5. Equação para a variação do fluxo no enrolamento amortecedor do eixo em quadratura:

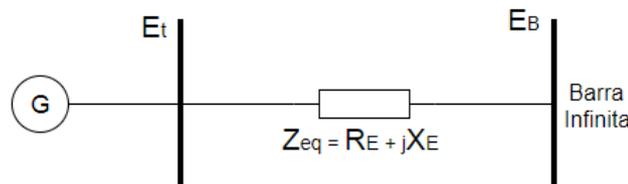
$$\dot{\varphi}_{kq} = -\frac{1}{T''_{q0}}[\varphi_{kq} - e'_d + (x'_q - x_l)i_q] \quad (3.145)$$

3.5 Modelo de 3^a ordem para as Máquinas Síncronas

O modelo de 6^a ordem pode ser representado por um modelo mais simples, onde considera-se apenas o enrolamento de armadura e o de campo. Esse modelo que considera apenas a equação de oscilação da máquina (3.141) e a equação da variação do fluxo do campo principal da máquina (3.142) e é chamado de modelo 3^a ordem (MOTA, 2006).

DeMello e Concordia (1969) utilizaram bastante o modelo linearizado de 3^a ordem para máquina síncrona. Esse modelo é usado para uma máquina ligada a uma barra infinita através de uma impedância equivalente, como se pode observar na Figura 8.

Figura 8 – Máquina ligada a uma barra infinita através de uma reatância.



Fonte: Autor próprio.

Um sistema cuja potência é bem maior que a da máquina que está ligada, pode-se considerar que a dinâmica associada à máquina não causará variações na tensão e frequência da barra E_B . Uma barra cuja frequência e tensão permanecem constantes

independentemente da potência que o sistema gera ou absorve ou das perturbações aplicadas é conhecida como barra infinita (KUNDUR, 1994).

O sistema máquina barra infinita é representado pelas constantes K_1 a K_6 resultado da linearização das equações para um ponto de operação (DEMELLO; CONCORDIA, 1969), conforme se descreve a seguir:

1. Variação do torque elétrico para uma mudança no ângulo do rotor, com fluxo concatenado no eixo direto constante

$$K_1 = \left. \frac{T_{e\Delta}}{\delta_\Delta} \right|_{e'_q = \text{constante}} \quad (3.146)$$

$$K_1 = K_x E_B \left\{ V_{xo} R_E \sin \delta_0 + (x'_d + X_E) \cos \delta_0 + I_{q0} (x_q - x'_d) [(x_q + X_E) \sin \delta_0 - R_E \cos \delta_0] \right\} \quad (3.147)$$

Com:

$$K_x = \frac{1}{[R_E^2 + (x_q + X_E)(x'_d + X_E)]} \quad (3.148)$$

2. Variação do torque elétrico para uma variação do fluxo concatenado no eixo direto, com ângulo do rotor δ constante:

$$K_2 = \left. \frac{T_{e\Delta}}{e'_{q\Delta}} \right|_{\delta = \text{constante}} \quad (3.149)$$

$$K_2 = K_x \left\{ R_E V_{xo} + I_{q0} [R_E^2 + (x_q + X_E)^2] \right\} \quad (3.150)$$

3. Fator de impedância:

$$K_3 = \frac{1}{[1 + K_x (x_d - x'_d)(x_q + X_E)]} \quad (3.151)$$

4. O efeito desmagnetizador de uma variação do ângulo do rotor, com tensão de campo constante:

$$K_4 = \left. \frac{1}{K_3} \frac{e'_{q\Delta}}{\delta_\Delta} \right|_{E_{fd} = \text{constante}} \quad (3.152)$$

$$K_4 = E_B K_x (x_d + x'_d) [(x_q + X_E) \sin \delta_\Delta - R_E \cos \delta_0] \quad (3.153)$$

5. Variação da tensão terminal para uma variação do ângulo do rotor, com fluxo concatenado no eixo direto constante:

$$K_5 = \left. \frac{E_{t\Delta}}{\delta_\Delta} \right|_{e'_q = \text{constante}} \quad (3.154)$$

$$K_5 = (K_x E_B / E_{t0}) \left\{ x'_d v_{q0} [R_E \cos \delta_0 - (x_q + R_E) \sin \delta_0] \right\} \quad (3.155)$$

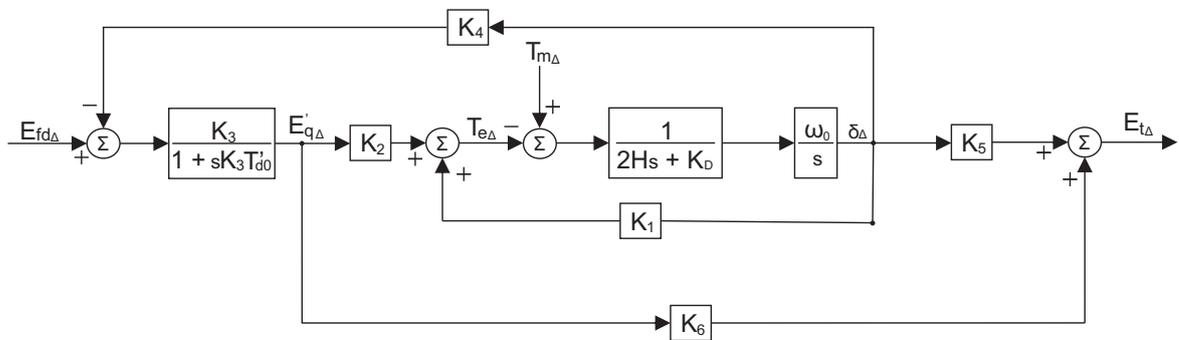
6. Variação da tensão terminal com a variação de e'_q , para ângulo do rotor constante:

$$K_6 = \left. \frac{E_{t\Delta}}{e'_{q\Delta}} \right|_{\delta = \text{constante}} \quad (3.156)$$

$$K_6 = (v_{q0} / E_{t0}) [1 - K_x x'_d (x_q + R_E)] - K_x x_q R_E (v_{d0} / E_{t0}) \quad (3.157)$$

Na Figura 9, é possível observar o diagrama de blocos utilizados para representar o modelo de 3ª ordem linearizado do sistema máquina barra infinita. Esse modelo foi bastante utilizado por DeMello e Concordia (1969) e é válido para o estudo de pequenas perturbações em torno de um ponto de operação.

Figura 9 – Diagrama de blocos do modelo linearizado SMIB.



Fonte: Kundur (1994) - Adaptado.

4 Sistema de Excitação

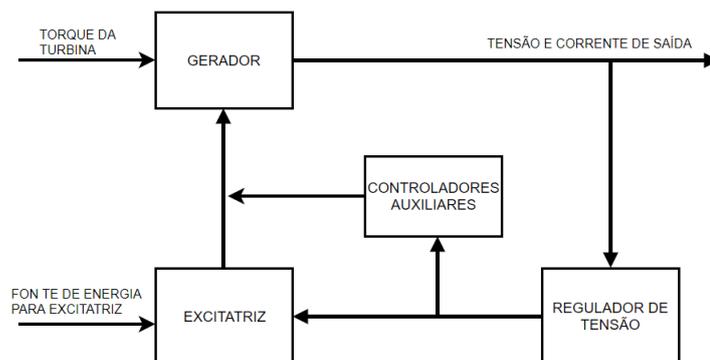
Este capítulo apresenta as principais características do sistema de excitação para geradores síncronos, destacando a análise do comportamento dinâmico e a modelagem matemática usada em simulações de estabilidade a pequenos sinais.

4.1 Introdução

O objetivo de qualquer sistema de excitação é fornecer alimentação em corrente contínua ao enrolamento de campo do gerador. Além disso, o sistema de excitação fornece controle e proteção necessários para que seja possível obter um comportamento funcional e estável do gerador síncrono e dos sistemas elétricos de energia aos quais se encontra interligado.

Como principais funções de controle, o sistema de excitação apresenta: regulação da tensão, da potência reativa gerada e o aumento da estabilidade do sistema. Enquanto a proteção do sistema de excitação tem como principal função a garantia de que os limites de capacidade do sistema não sejam ultrapassados (KUNDUR, 1994). Na Figura 10 é possível verificar o diagrama de blocos com a configuração física de um sistema de excitação típico.

Figura 10 – Configuração física dos componentes do sistema de excitação.



Fonte: Autoria própria.

No início os sistemas de excitação utilizavam o controle manual para manter a tensão do gerador e a potência reativa nos limites desejados. Quando estes foram automatizados, se apresentaram muito lento, cumprindo basicamente o papel de alerta do operador. Em 1920, utilizou-se pela primeira vez os reguladores de tensão de resposta rápida, com o intuito de melhorar o tempo de resposta de controle. No início da década de 1960, os sistemas de excitação começaram a utilizar sinais estabilizadores auxiliares, em adição ao

sinal de erro da tensão terminal, para controlar a tensão de campo e prevenir oscilações no sistema (KUNDUR, 1994). Os sistemas de excitação atuais são bastantes robustos e capazes de proporcionar resposta instantânea a variações na tensão terminal dos geradores síncronos.

4.2 Tipos de Excitação

Os sistemas de excitação podem ser classificados de acordo com o tipo de fonte de energia utilizada para excitação. Utilizando esse princípio, esses são divididos em: sistema de excitação em corrente contínua (CC), corrente alternada (CA) e estáticos.

Os primeiros sistemas de excitação utilizavam geradores de corrente contínua para sua alimentação. Com o surgimento de retificadores de potência robusto, uma nova classe de sistema de excitação nasceu e esses sistemas utilizavam máquinas CA para alimentar a excitação principal do gerador. Normalmente, a excitação é acionada através do próprio eixo do gerador, a sua saída em corrente alternada é retificada por diodos (excitatriz não-controlada) ou tiristores (excitatriz controlada) para produzir a corrente contínua necessária para o campo do gerador. Para esse sistema, os reguladores de tensão atuam controlando o campo da excitatriz que controla a tensão de saída do sistema de excitação, sobretudo em excitatrizes com retificadores a diodos ou a tiristores, onde proporciona uma maior velocidade de controle, tendo em vista que o ângulo de disparo pode ser ajustado muito rapidamente (ANDERSON; FOUAD, 1994).

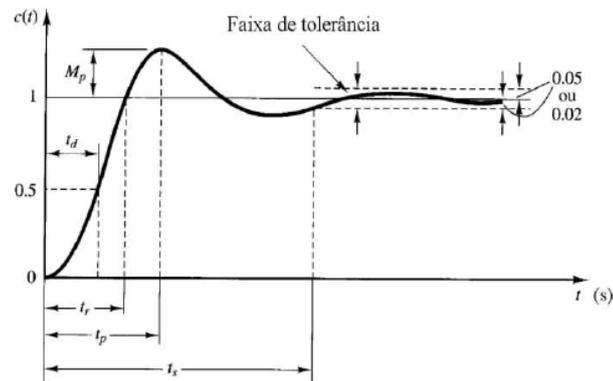
Os sistemas de excitação estáticos fornecem a corrente de excitação diretamente ao enrolamento de campo do gerador através de anéis coletores. A fonte de potência dos retificadores é obtida nos terminais do gerador ou pelo barramento auxiliar, através de um transformador abaixador, que ajusta o nível de tensão adequado para o sistema. Esse mecanismo apresenta como vantagem, a redução do tempo de resposta na regulação, pois esse sistema atua diretamente no enrolamento de campo do gerador síncrono, reduzindo, desta forma, o comprimento total da unidade por supressão das excitatrizes. Em contrapartida, esses sistemas apresentam um inconveniente decorrente do facto do fluxo de corrente ser controlado por impulsos dos semicondutores de potência, os quais introduzem deformações na corrente, o que provoca distorção da tensão gerada pelo alternador (MARQUES, 2011).

4.3 Desempenho do Sistema de Excitação para Pequenos Sinais

O desempenho dinâmico de um sistema pode ser classificado em duas classes: para grandes sinais e para pequenos sinais. O desempenho para grandes sinais apresenta não linearidades significantes, enquanto, o desempenho para pequenos sinais a resposta se apresenta de maneira efetivamente linear.

As medidas de desempenho do comportamento do sistema proporciona um meio de avaliar a resposta do controle de excitação. Utilizando a teoria de sistema de controle é possível expressar o desempenho de um sistema para pequenos sinais, através dos indicadores encontrados pela resposta do sistema, seja ela no tempo ou na frequência. A Figura 11 representa o comportamento da resposta típica de um sistema de controle de excitação de uma das variáveis do sistema para uma entrada ao degrau.

Figura 11 – Resposta do sistema de controle de excitação para uma entrada ao degrau.



Fonte: Ogata (2003) - Adaptado.

Segundo Ogata (2003), observando a Figura 11 é possível definir algumas especificações:

1. Tempo de atraso (t_d): Trata-se do tempo necessário para que a resposta alcance metade do seu valor inicial pela primeira vez;
2. Tempo de subida (t_r): é o tempo necessário para que a resposta passe de 10 a 90%, para sistema de segunda ordem subamortecido, o tempo de subida pode ser considerado de 0 a 100%;
3. Tempo de pico (t_p): é o tempo necessário para e a resposta atinja o primeiro pico do sobressinal;
4. Máximo sobressinal (M_p): é o valor máximo de pico da curva de resposta, medido a partir da unidade.
5. Tempo de acomodação (t_s): é o tempo necessário para que a curva da resposta alcance valores na faixa de 2% ou 5% em torno do seu valor de final.

As especificações dos requisitos para avaliação do desempenho em sistema de controle de excitação de geradores síncronos para resposta no tempo são dados principalmente pelas especificações de: tempo de subida (t_r), máximo sobre-sinal (M_p) e tempo de acomodação (t_s) (ANDERSON; FOUAD, 1994).

4.4 Modelagem do Sistema de Excitação IEEE ST1C

Para fins de análise, neste trabalho considera-se o modelo do IEEE ST1C (substituto do IEEE ST1A), que representa um sistema de excitação estático que é alimentado pelo transformador conectado aos terminais do gerador. Neste modelo o regulador atua diretamente no enrolamento de campo da máquina síncrona principal e a retificação de campo é realizado por retificadores estáticos controlados. A Figura 12 ilustra o diagrama de bloco que representa esse modelo.

O sinal de erro V_{err} ($V_{err} = V_{ref} + V_s + V_{SCLsum} - V_c$) é adicionado a subtração entre os sinais V_{UEL}, V_{OEL} e V_F , o sinal resultante passa pelo limitador V_{imax} e V_{imin} , e depois vai para os circuitos seletores *HV gate* e *LV gate*, podendo sofrer atuação do limitador do erro da tensão (V_{UEL}) ou assumir o valor do sinal da entrada do regulador de tensão (V_{SCL}). Posteriormente, o sinal passa pelo *Lead-Lag* cujo o sinal de saída vai para o regulador de tensão. O sinal de saída do regulador de tensão V_A , limitado por V_{Amax} e V_{Amin} é adicionado a subtração entre V_s e a função que representa o limite nominal da ponte retificadora. O valor atual da corrente de excitação I_{FD} é comparado com o valor de corrente máximo I_{LR} que a ponte retificadora pode suportar, durante certo período de tempo e passa pela constante que a ponte retificadora pode suportar K_{LR} , que representa o ganho proporcional do limitador rápido de teto de corrente de excitação.

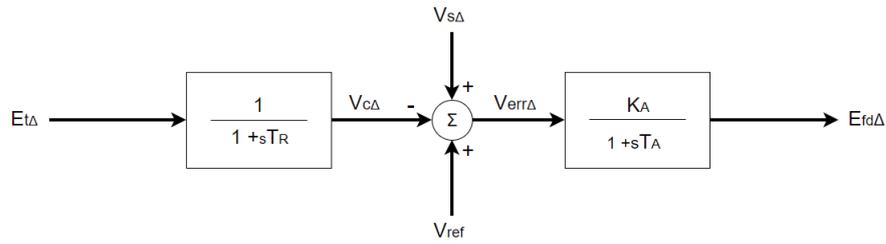
Após passar por esta operação, o sinal do regulador pode sofrer atuação do limitador subexcitação V_{UEL} (dependendo de tipo de regulador utilizado) e também do limitador de sobreexcitação V_{OEL} . Logo depois, o sinal passar pelos limitadores de tensão de excitação V_{Rmax} e V_{Rmin} , os quais são proporcionais à tensão terminal da máquina síncrona, E_t . Esta limitação final também contempla a parcela referente ao chaveamento dos elementos da ponte retificadora K_c . Por fim, a nova tensão de excitação para o campo da máquina síncrona é gerada, representada por E_{FD} .

Considerando que quando o modelo ST1C é submetido à perturbações próximas ao seu ponto de operação nominal, a saturação as funções limitadoras e as proteções podem ser desconsideradas. Além disso, o sistema apresenta um bom desempenho para pequenas frequências, o que possibilita a desconsideração da retroalimentação. Isso implica que:

- T_B, T_C, T_{B1} e T_{C1} não são usados;
- $V_{imax}, V_{imin}, V_{Rmax}$, e V_{Rmin} são desconsiderados;
- HV Gate e LV Gate não são utilizadas;

A Figura 13 apresenta a representação em diagramas de blocos do modelo ST1C simplificado, utilizado para estudo de estabilidade a pequenos sinais, com a presença do sensor de terminal de tensão do gerador.

Figura 13 – Diagrama de bloco do modelo ST1C simplificado e sensor de tensão.

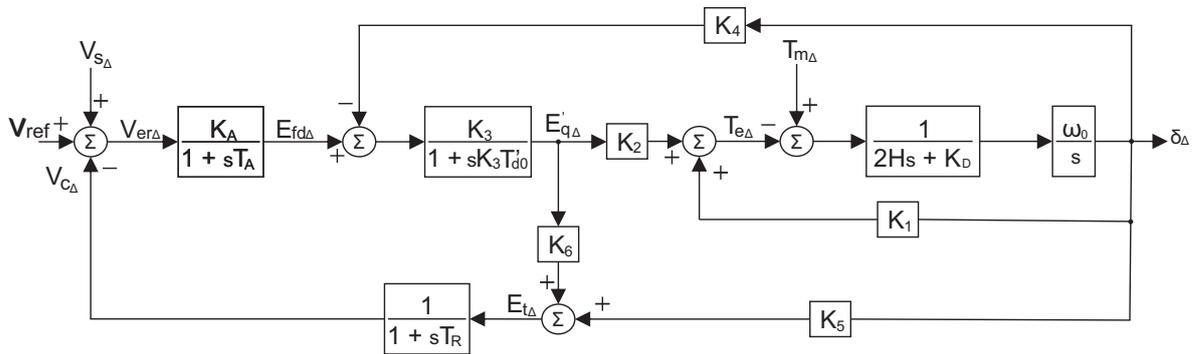


Fonte: Autor próprio.

4.5 Efeitos do Sistema de Excitação na Estabilidade Dinâmica

Unindo o modelo linearizado do sistema máquina de 3ª ordem ligado a uma barra infinita, ilustrado na Figura 9 com o a representação do modelo ST1C simplificado com sensor de tensão e adicionando o Regulador Automático de Tensão (*AVR – Automatic Voltage Regulator*), chega-se ao modelo de diagrama de bloco observado na Figura 14.

Figura 14 – Diagrama de bloco do modelo linearizado SMIB incluindo o AVR.



Fonte: Kundur (1994) - Adaptado.

Observando a Figura 14, é possível observar a influência do AVR, que é representado através da seguinte função de transferência:

$$E_{fd\Delta} = \frac{K_A}{1 + sT_A} V_{err\Delta} \tag{4.1}$$

O AVR é responsável pela manutenção da tensão terminal dentro de limites aceitáveis, pelo controle da geração de potência reativa e distribuição da potência reativa entre unidades geradoras em paralelo. Além disso, esse dispositivo garante a estabilidade para os geradores na ocorrência de um distúrbio. O regulador verifica a tensão terminal, compara com a tensão de referência e dá origem a um sinal de erro. Se a tensão terminal

for maior que a tensão de referência, o erro é negativo e o objetivo do regulador é reduzi-la. Caso contrário, se a tensão terminal for menor que a de referência, o erro é positivo e a função do regulador, nesta situação, é atuar no sentido de aumentar a tensão terminal (SOUZA, 2007).

A utilização de reguladores de tensão rápidos tem trazidos melhorias para estabilidade transitória em sistemas de potência, onde é permitido que este opere com um maior carregamento nas linhas de transmissão. Isso é possível devido a ação rápida do regulador de tensão que restabelece o nível de tensão do gerador, diminuindo um possível desequilíbrio entre a geração e a carga (MOTA, 2006). Porém, em certas condições a utilização desse regulador pode trazer consequências para o sistema, podendo levar até a perda de estabilidade.

No diagrama de blocos da Figura 14, pode-se verificar que o torque elétrico de um gerador síncrono é dado por:

$$T_{e\Delta} = K_1\delta_\Delta + K_2E'_{q\Delta} \quad (4.2)$$

Observando o diagrama de blocos e realizando algumas manipulações é possível encontrar a função de transferência entre o torque elétrico e o ângulo de torque, neste caso:

$$\frac{T_{e\Delta}}{\delta_\Delta} = K_1 - \frac{K_2K_3(K_AK_5 + K_4 + sT_AK_4)}{1 + K_AK_3K_6 + s^2K_3T'_{d0}T_A + s(T_A + K_3T'_{d0})} \quad (4.3)$$

Realizando uma análise na equação (4.3), nota-se que o efeito do termo K_AK_5 no numerador é muito maior que os dos termos K_4 e sT_AK_4 . Então essa equação pode ser simplificada:

$$\frac{T_{e\Delta}}{\delta_\Delta} = K_1 - \frac{K_2K_3K_AK_5}{1 + K_AK_3K_6 + s^2K_3T'_{d0}T_A + s(T_A + K_3T'_{d0})} \quad (4.4)$$

Substituindo s por jw , e considerando para frequência baixas, normalmente encontradas em sistemas de potência, a equação (4.3) pode ser aproximada por:

$$\frac{T_{e\Delta}}{\delta_\Delta} = \left(K_1 - \frac{K_2K_3K_AK_5}{1 + K_AK_3K_6} \right) + jw \left(K_2K_3K_AK_5 \frac{K_3T'_{d0} + T_A}{(1 + K_3K_AK_6)^2} \right) \quad (4.5)$$

A parte real equação (4.5) é conhecido como torque de sincronização (T_s) uma componente de torque elétrico em fase com o ângulo de torque. O T_s é responsável pela manutenção de sincronismo entre a máquina e o sistema. A parte imaginária, se refere

a uma componente de torque em fase com a velocidade da máquina e é conhecida como torque de amortecimento T_a , responsável pelo amortecimento do sistema (MOTA, 2006).

$$\Delta T_s = \left(K_1 - \frac{K_2 K_3 K_A K_5}{1 + K_A K_3 K_6} \right) \delta_\Delta \quad (4.6)$$

$$\Delta T_a = \left(K_2 K_3 K_A K_5 \frac{K_3 T'_{d0} + T_A}{(1 + K_3 K_A K_6)^2} \right) \delta_\Delta \quad (4.7)$$

Para condições de cargas leves e médias, o valor da constante K_5 na equação (4.6) é positivo, porém o valor da constante K_1 para essas condições é bem alto, fazendo com que o torque sincronizante seja positivo.

Para as condições de cargas pesadas o valor de K_5 é negativo, e o torque sincronizante continua positivo, porém o torque de amortecimento é negativo e o problema de estabilidade se agrava para altos valores de K_A .

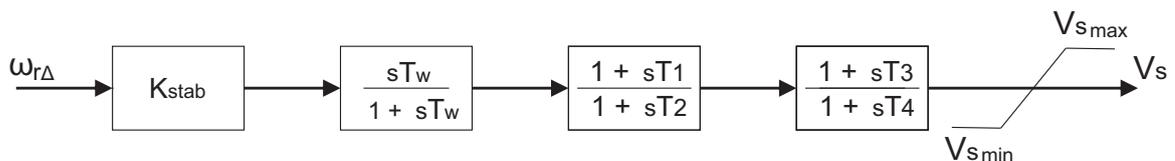
No intuito de resolver esse problema é introduzido um sinal estabilizante na referência dos reguladores automáticos de tensão dos geradores, com o objetivo de proporcionar que o torque de amortecimento seja positivo. O dispositivo pelo qual esse sinal é gerado é conhecido como estabilizador de sistema de potência (*PSS – Power System Stabilizers*).

4.6 Modelagem dos Estabilizadores de Sistemas de Potência

O Estabilizador de Sistema de Potência é um elemento, ou grupo de elementos, que fornece uma entrada adicional ao regulador de tensão para melhorar o desempenho dinâmico do sistema de potência. A finalidade do estabilizador é utilizar a excitação do gerador para aumentar o amortecimento das oscilações eletromecânicas de unidades geradoras com a introdução de uma componente extra de torque de amortecimento.

Os PSSs têm sido utilizados há algumas décadas para melhorar a estabilidade oscilatória dos sistemas de potência e melhorar a capacidade de transmissão de potência da rede sob condições de ligações fracas e alto carregamento. Na Figura 15 é possível verificar o diagrama de bloco da estrutura de controle do PSS clássico.

Figura 15 – Diagrama de bloco para o Estabilizador de Sistema Potência Clássico.



Fonte: Autor próprio.

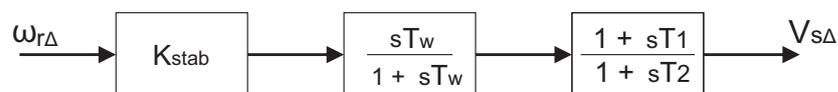
O primeiro bloco representa o ganho K_{stab} do PSS, e é um fator muito importante para o amortecimento das oscilações eletromecânicas, onde determina a quantidade de amortecimento introduzida pelo PSS. Tem-se que o amortecimento aumenta com o ganho até um certo limite, após esse valor limite o aumento do ganho pode diminuir o amortecimento.

O segundo bloco é um filtro passa-alto (*washout*), que tem como função eliminar as componentes DC do sinal de entrada, permitindo assim o PSS que responda apenas a variação de tensão. O valor da constante de tempo (T_w) do filtro deve ser escolhida de forma a não interferir na faixa de frequência dos modos de oscilação que o PSS vai atuar (KUNDUR, 1994).

Para conseguir uma melhoraria no torque de amortecimento, o PSS aplica na referência do regulador de tensão um sinal em fase com a velocidade. Porém, quando o sinal chega ao torque da máquina, seu ângulo é modificado pela característica de atraso introduzida pelo sistema. Para resolver esse problema é utilizado o circuito de avanço e atraso (*lead-lag*) que é formado pelo terceiro e quarto bloco e realiza a compensação da fase para que o sinal continue em fase com a velocidade. O número de blocos *lead-lag* necessários depende do sistema e do método de sintonia escolhido para ajuste do PSS. No final do processo, o sinal de saída do PSS (V_s), ainda pode sofrer ação do limitador (V_{smax} e V_{smin}).

Neste trabalho considerou-se a representação do Estabilizador de Sistema de Potência através do seu modelo simples, onde é formado apenas pelo bloco do ganho, o filtro passa-alto (*washout*) e o circuito de avanço de fase. Na Figura 16 observa-se o diagrama de bloco para o PSS simples.

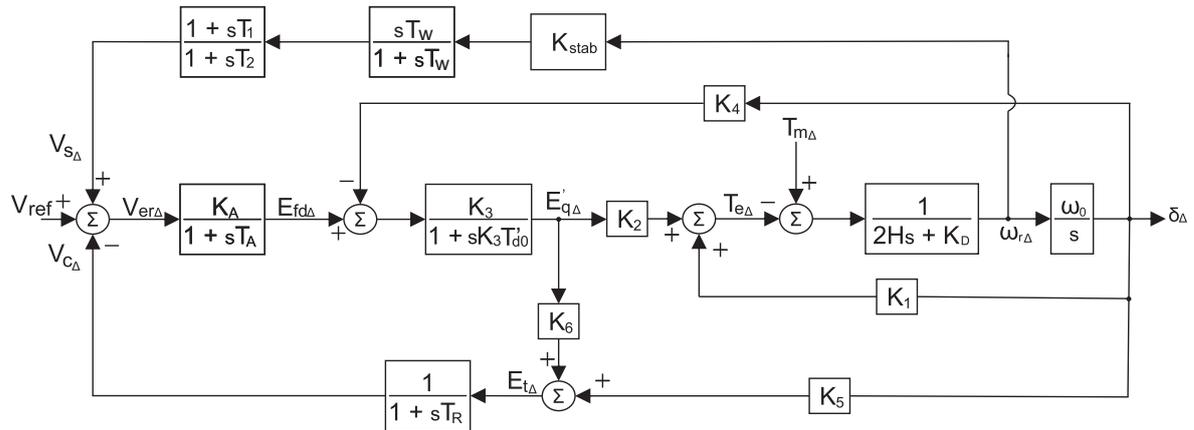
Figura 16 – Diagrama de bloco para o Estabilizador de Sistema Potência Simples.



Fonte: Autor próprio.

Incluindo o efeito do estabilizador de sistema de potência simples no diagrama de blocos representado na Figura 14, é obtido o modelo completo do sistema linearizado máquina barra infinita utilizado para o estudo de estabilidade dinâmica.

Figura 17 – Diagrama de bloco do modelo linearizado SMIB incluindo o AVR e PSS.



Fonte: Kundur (1994) - Adaptado.

Como observado na Figura 17, nesse capítulo foi possível realizar a representação do modelo de 3ª ordem do sistema máquina barra infinita incluindo o AVR e PSS. Esse modelo é utilizado neste trabalho para o estudo de estabilidade para pequenos sinais, onde se analisar o comportamento do sistema quando submetido a pequenas perturbações.

5 Otimização por Enxame de Partículas

No início da década de 1990, diversos trabalhos envolvendo o comportamento social e cognitivos de animais foram desenvolvidos. Estes trabalhos tiveram como finalidade desenvolver um algoritmo de busca da solução ótima de problemas matemáticos complexos. Desta maneira, o algoritmo de Otimização por Enxame de Partículas, em inglês *Particle Swarm Optimization* (PSO) (KENNEDY; EBERHART, 1995), foi criado.

Os estudos ligados ao comportamento social e cognitivo de grupos de animais mencionados mostraram que existe uma vantagem competitiva para sobrevivência de um determinado indivíduo caso o mesmo compartilhe conhecimento com seus semelhantes. Grande parte das espécies de pássaros, por exemplo, procuram alimento voando em bando. Este comportamento leva à conclusão de que a informação não é restrita a um único indivíduo, mas sim pertencente a todo o bando (EL-ZONKOLY, 2006).

Analisando o comportamento social e cognitivo dos seres humanos é possível verificar que o seu processo de aprendizagem não é definido somente por suas próprias experiências ao longo da vida mas também pelo conhecimento adquirido com as experiências de outros indivíduos. Através de uma avaliação de quanto bem ou mal sucedida foi a experiência realizada, de acordo com padrões estabelecidos pelos próprios indivíduos, é que são traçados caminhos em busca de uma evolução individual. A medida que ocorre essa troca de experiência entre as pessoas, acontece uma certa tendência de convergência para um processo ótimo.

Este capítulo introduz os conceitos relacionados ao comportamento social e cognitivo do algoritmo de otimização por enxame de partículas, bem como, uma nova proposta de modificação no algoritmo do PSO para aplicação em sistemas elétricos de potência.

5.1 Princípio Básico

Por trás do PSO existe uma teoria sócio-cognitiva muito simples, onde cada indivíduo de uma população possui sua própria experiência e é capaz de estimar a qualidade dessa experiência. Como os indivíduos são sociais, eles também possuem conhecimentos sobre como seus vizinhos comportam-se. Esses dois tipos de informação correspondem à aprendizagem individual (cognitiva) e à transmissão cultural (social). Portanto, a probabilidade de que um determinado indivíduo tome uma certa decisão será uma função de seu desempenho no passado e do desempenho de alguns de seus vizinhos.

Já Kennedy, Eberhart e Shi (2001) resumiram o processo de adaptação cultural em três princípios básicos:

- Avaliar – os indivíduos possuem a capacidade de sentir o ambiente de forma a estimar seu próprio comportamento;
- Comparar – os indivíduos usam uns aos outros como referência comparativa;
- Imitar – a imitação é central em organizações sociais humanas e é importante para a aquisição e manutenção das habilidades mentais.

O PSO é baseado em uma população de indivíduos capazes de interagir entre si e com o meio ambiente, assim como as outras abordagens de inteligência coletiva. Com base nas propriedades de autoavaliação, comparação e imitação, os indivíduos são capazes de lidar com um número de possíveis situações que o ambiente lhes apresenta. Os comportamentos globais serão, portanto, resultados emergentes dessas interações (SERAPIAO, 2009).

Devido à sua implementação ser simples, sua robustez e versatilidade, o número de aplicações do PSO tem crescido em diversos tipos de problemas, incluindo em sistemas elétricos, apesar de ainda predominarem nesta área outras meta-heurísticas que surgiram há mais tempo, como algoritmos genéticos. Contudo, o uso de PSO mostra-se muito promissor pelas qualidades descritas, motivo pelo qual justifica-se o interesse em utilizá-lo neste trabalho.

5.2 Versão do PSO Clássico

A técnica de otimização por enxame de partículas é um método metaheurístico de programação evolutiva baseado no conceito de inteligência coletiva. O método foi desenvolvido originalmente pelo sociólogo James Kennedy em conjunto com o engenheiro eletricitista Russell Eberhart, baseando-se no comportamento social de grupos de pássaros e peixes. O algoritmo utiliza o conceito de interação social para a resolução de problemas fazendo uso de parâmetros sociais e cognitivos para a tomada de decisão (KENNEDY; EBERHART, 1995).

O PSO, diferentemente das técnicas metaheurísticas que surgiram para tratar problemas de otimização combinatórios, foi utilizada para uso em problemas de otimização não linear, com variáveis contínuas. Variações do PSO para aplicações em problemas de otimização combinatórios com variáveis discretas também têm sido sugeridas, para tratar uma grande gama de problemas. Uma versão de PSO misto para tratamento de problemas com variáveis contínuas e discretas foi proposta por Yoshida *et al.* (2000) com resultados promissores. Porém, não é o foco desta trabalho.

Para realizar a otimização de uma função objetivo, o PSO utiliza um enxame de partículas, em que cada partícula representa uma candidata a possível solução. Cada partícula do PSO equivale a um indivíduo em um algoritmo evolucionário. Essas partículas se movem em um espaço de busca de alta dimensionalidade. Buscando por boas soluções usa-se uma combinação de atração para a melhor solução encontrada até o momento pela própria partícula; e de uma atração para a melhor solução encontrada até o momento pela vizinhança da partícula. Esta é definida como o conjunto de partículas com as quais ela é capaz de se comunicar. No PSO, cada partícula i do enxame S tem uma posição x_i , que consiste de um vetor de n dimensões cujos componentes que representam os parâmetros da função objetivo, uma velocidade v_i , uma posição referente a melhor posição pessoal p_{best} , que representa a melhor posição encontrada pela partícula até o momento, e também do termo g_{best} , que refere-se a melhor posição encontrada pelo enxame até o momento.

No início do algoritmo do PSO, as partículas do enxame são inicializadas em posições aleatórias no espaço de busca segundo uma distribuição uniforme de probabilidade, assim como ocorre em muitos algoritmos evolucionários. Em seguida, a posição $x_i(t)$ de cada partícula i na iteração t é modificada por uma velocidade estocástica $v_i(t)$ que depende da distância que a partícula está da sua melhor solução conhecida e da distância para melhor solução conhecida dentro de sua vizinhança. Cada partícula $i \in S$ se movimenta em cada dimensão $d \in 1, 2, 3, \dots, n$ do espaço de busca em um instante discreto de tempo t , segundo as equações (5.1) e (5.2):

$$v_{id}(t+1) = v_{id}(t) + c_1 r_1 [p_{best}(t) - x_{id}(t)] + c_2 r_2 [g_{best}(t) - x_{id}(t)] \quad (5.1)$$

$$x_{id}(t+1) = x_{id}(t) + v_{id}(t+1) \quad (5.2)$$

Onde:

- i representa o número da partícula;
- d representa o número da dimensão;
- t é a iteração atual;
- c_1 e c_2 são fatores de aprendizagem cognitivo e social, respectivamente;
- r_1 e r_2 são números aleatórios entre 0 e 1.

O vetor velocidade é o responsável por guiar o processo de otimização, e para isso ele utiliza tanto o conhecimento adquirido individualmente pela partícula quanto o conhecimento adquirido pela partícula a partir da comunicação com sua vizinhança.

O termo $c_1 r_1 [p_{best}(t) - x_{id}(t)]$ da equação de atualização da velocidade é a componente cognitiva e representa a experiência da partícula. Essa componente é a responsável pela tendência que a partícula tem de voltar para a melhor solução encontrada por ela no passado. O termo $c_2 r_2 [g_{best}(t) - x_{id}(t)]$, por sua vez, é conhecido como a componente social da equação de velocidade, e representa o conhecimento coletivo do enxame, sendo a responsável por atrair cada partícula para a melhor solução encontrada por alguma partícula de sua vizinhança.

Como pode-se observar na equação (5.1), o vetor velocidade consiste basicamente de uma soma vetorial das componentes cognitiva e social com a inércia da partícula. A inércia (velocidade anterior da partícula) funciona como uma memória da direção da velocidade anterior da partícula. Esse termo é importante pois ele evita que a partícula sofra alterações bruscas na direção de sua velocidade. Desta forma, se a partícula se movimentava em direção a uma boa região, essa direção não é completamente modificada em virtude da descoberta de um novo líder social. A componente cognitiva é importante pois ela atrai a partícula na direção da melhor posição encontrada por ela desde o início da busca. Com isso, espera-se que a partícula encontre uma boa posição que possivelmente esteja próximo do seu líder cognitivo atual. A componente social, por sua vez, é a principal componente na equação da velocidade das partículas, pois é por meio dela que as partículas compartilham informação a respeito das melhores posições encontradas por elas desde o início do processo de busca.

Inicialmente as posições das partículas, velocidades e os líderes cognitivos são inicializadas. Normalmente, as posições das partículas e as velocidades são inicializadas segundo uma distribuição uniforme, respeitando os limites superior $x_{max,d}$ e inferior $x_{min,d}$, para todas as dimensões. Os líderes cognitivos são inicializados com as posições iniciais das partículas. Em seguida, enquanto o critério de parada não é atingido é realizada as seguintes etapas. Primeiramente, os líderes cognitivos das partículas são atualizados. Depois, o líder social dos enxames é determinado. Por fim, a velocidade e a posição de cada partícula são atualizadas.

A eficácia do algoritmo do PSO depende de um bom balanceamento entre exploração e exploração. A exploração (conhecida também como busca global) é definido na capacidade de um algoritmo de busca de explorar diferentes regiões no espaço de busca com a finalidade de encontrar um bom ótimo. Já exploração (também conhecida como busca local) consiste na capacidade do algoritmo de concentrar a busca em torno de uma região promissora do espaço de busca (ENGELBRECHT, 2007). Em outras palavras, na exploração o algoritmo realiza uma busca “grosseira” por todo espaço de busca atrás de uma região que, possivelmente, possa conter a solução ótima do problema. Na fase de exploração, por outro lado, o algoritmo se concentra na região promissora e realiza uma busca mais “fina” nessa região a fim de encontrar a solução ótima do problema. No PSO, o balanceamento entre

exploração e exploração é tratado pela equação de velocidade (FIGUEIREDO, 2013).

No algoritmo do PSO introduzido por Kennedy e Eberhart, foi notado que as velocidades das partículas alcançavam rapidamente valores muito altos, principalmente as partículas que se encontram longe do seus líderes social e cognitivo. Essas fronteiras eram ultrapassadas devido as mudanças acentuada na velocidade, provocadas pelos componentes cognitivas e sociais. Para resolver este problema, passou-se a limitar a velocidade em um valor máximo. Logo quando o valor da velocidade de uma partícula em uma dimensão d exceda o valor denotado com $V_{max,d}$, a nova velocidade dessa partícula é definida como $V_{max,d}$. Sendo assim, a velocidade de cada partícula i para cada dimensão d é ajustada, antes de modificar a posição da partícula, usando a equação (5.3):

$$v_{id}(t+1) = \begin{cases} v_{id}'(t+1), & \text{se } v_{id}'(t+1) < V_{max,d} \\ V_{max,d}, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (5.3)$$

É importante ressaltar que a utilização da velocidade máxima não garante que as partículas escapem dos limites do espaço busca. Para resolver este problema a utilização da seguinte estratégia é necessária. Caso uma partícula i ultrapasse os limites do espaço busca da dimensão d , utiliza-se a equação (5.4).

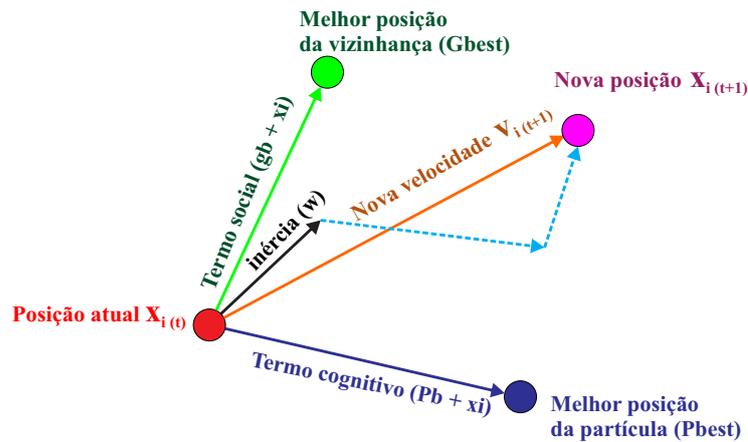
$$x_{id}(t) = \begin{cases} x_{max,d} & \text{se } x_{id}'(t) > x_{max,d} \\ x_{min,d} & \text{se } x_{id}'(t) < x_{min,d} \end{cases} \quad (5.4)$$

Uma maneira de permitir um melhor balanceamento entre a exploração e exploração foi estudada por Shi e Eberhart (1998) que introduziram um termo denominado peso de inércia w na equação de velocidade do PSO. O termo w controla a contribuição da velocidade anterior da partícula em sua velocidade atual. Desse modo, a equação da velocidade do PSO com o adição de w é dado pela equação (5.5):

$$v_{id}(t+1) = wv_{id}(t) + c_1r_1(p_{(id)best}(t) - x_{id}(t)) + c_2r_2(g_{(id)best}(t) - x_{id}(t)) \quad (5.5)$$

Um exemplo que representa o movimento de um partícula de acordo com a equação da velocidade (5.5), é apresentando na Figura 18.

Figura 18 – Movimento da partícula de acordo com a equação da velocidade.



Fonte: Autor próprio.

5.2.1 Ajuste dos Parâmetros do PSO Clássico

5.2.1.1 Ajuste da velocidade

O passo da velocidade deve ser ajustado de maneira que a partícula não consiga se expandir em ciclos cada vez maiores, levando-a ao infinito. Logo, para resolver esse problema limita-se a velocidade em um valor V_{max} .

O parâmetro V_{max} tem como principais objetivos prevenir a instabilidade e limitar a área de exploração das partículas no espaço do problema. Quanto a escolha do seu valor depende do conhecimento sobre o problema. Por exemplo, se para escapar de um mínimo local o valor de V_{max} precise ser maior do que o ajustado para o algoritmo, a busca pelo ótimo falhará (KENNEDY; EBERHART; SHI, 2001).

5.2.1.2 Constante de aceleração

As constantes de aceleração c_1 e c_2 que aparecem nas equações de atualização de velocidade do PSO, controlam a influência que os componentes cognitivo e social exercem sobre a velocidade da partícula. Há vários esquemas utilizados, dentre pré-fixação dos valores a ajuste adaptativo.

Um alto valor das constantes de aceleração facilita uma busca global, porém a trajetória da partícula torna-se mais oscilatória e o seu deslocamento passa a ser limitado por V_{max} . Um baixo valor das constantes de aceleração implica em uma trajetória mais longa da partícula em busca do ponto ótimo.

A variação da trajetória da partícula é importante para melhorar as características de convergência do algoritmo. Assim, é comum utilizar uma ponderação aleatória para as variáveis c_1 e c_2 , fazendo com que a equação da velocidade seja reescrita na forma da

equação (5.5), sendo r_1 e r_2 números aleatórios escolhidos no intervalo $[0, 1]$ (JUNIOR, 2012).

5.2.1.3 Fator de Inércia

O fator de inércia (w) tem um grande influência na performance do PSO. A escolha desse fator é de muita importância para convergência do algoritmo e também para um balanceamento entre a exploração e a exploração. Para valor de $w \geq 1$, a velocidade das partículas aumentam com o tempo e o sistema pode divergir. Enquanto para valores de $w < 1$, as velocidades das partículas diminuem com o tempo, podendo chegar a zero (ENGELBRECHT, 2007). O valor adequado para w , assim como a velocidade máxima, é dependente do problema.

Shi e Eberhart (1998) introduziram uma nova estratégia para lidar com a dificuldade para a seleção adequada do parâmetro w . Eles observaram que o processo de otimização apresenta um bom desempenho com o termo de inércia utilizando decaimento linear, tendo um valor de peso de inércia alto no início da execução e decrescendo linearmente para um valor pequeno durante o processo de otimização, o PSO terá, inicialmente, uma capacidade maior de pesquisa global, e obterá uma maior eficiência de busca local ao aproximar-se do fim do processo. Cientes dessas características, Kennedy, Eberhart e Shi (2001) sugerem o peso de inércia monotonicamente decrescente. Essa nova estratégia é uma função decrescente entre os valores 0,9 e 0,4. Tendo isso em vista, pode-se estabelecer uma relação entre o fator de inércia e o número de iterações, conforme mostra a equação (5.6):

$$w = w_{max} - \frac{w_{max} - w_{min}}{iter_{max}} iter \quad (5.6)$$

Onde w_{max} é o valor do fator de inércia inicial; w_{min} é o valor do fator de inércia final; $iter_{max}$ é o número máximo de iterações e $iter$ é a iteração atual.

5.3 Modificações no PSO

Como já definido, o algoritmo de otimização por enxame de partícula é uma técnica de otimização computacional, motivado pelo comportamento social dos indivíduos. De acordo com a cooperação entre os indivíduos, a otimização pode proporcionar diversos benefícios e encontrar soluções de maneira eficiente.

Para problemas não lineares, o algoritmo do PSO pode se torna deficiente na busca da melhor solução, devido ao elevado número de soluções ótimas locais que o problema pode possuir. Um ótimo local geralmente não é a solução desejada. Caso o algoritmo convirja para um ótimo local distante da solução ótima, o desempenho do algoritmo pode estar

comprometido. Logo a convergência prematura para soluções que podem comprometer o desempenho vêm sendo uma tarefa bastante explorada por pesquisadores (JIAO; LIAN; GU, 2008; YANG *et al.*, 2007).

Com o intuito de resolver o problema de convergência prematura, divergência no processo de otimização ou também para melhorar a velocidade de convergência e precisão, muitos trabalhos com modificações no PSO foram realizadas. Alguns dos mais representativos são: fator da inércia (w) (SHI; EBERHART, 1998); fator de constrição (x), que é um fator de amortecimento baseado nos parâmetros cognitivos (c_1) e social (c_2), para limitar a velocidade da partícula (CLERC, 1999; EBERHART; SHI, 2000); o algoritmo *Evolutionary Particle Swarm Optimization* (EPSO), que é o uso de distribuição gaussiana dos parâmetros de fator de inércia (w), fator cognitivo (c_1), fator social (c_2) (MIRANDA; FONSECA, 2002); o fator de inércia variando de acordo com *Momentum* dinâmico (HENDTLASS, 2009); o algoritmo do *Global Particle Swarm Optimization* (GPSO) (JAMIAN *et al.*, 2014), que modifica a equação de velocidade do PSO com a adição de um terceiro termo.

Outra maneira de melhorar o desempenho do PSO, é através da utilização do modelo de hibridização do algoritmo original. O trabalho realizado por LVBJERG, RASMUSSEN e KRINK (2001), com inspiração nos algoritmos genéticos tratam uma nova forma de reprodução entre os indivíduos do enxame. Outra ideia reproduzida neste trabalho é o conceito de subpopulações, em que é realizada a divisão das partículas em várias subpopulações, para tentar manter a diversidade e dessa forma, tentar fugir da convergência para mínimos locais. Além do algoritmo genético, outros modelos híbridos estão sendo utilizados em conjunto com o PSO, como: redes neurais (BASHIR; EL-HAWARY, 2009), sistemas nebulosos (JUANG; WANG, 2009), evolução diferencial (WICKRAMASINGHE; LI, 2008), *clustering* (PEI; HUA; HAN, 2008) e Busca Tabu (HADJI; BABES, 2016).

Todas essas variações no algoritmo PSO mostraram-se eficientes, melhorando em vários casos, o resultado obtido no processo de otimização em comparação ao algoritmo clássico do PSO.

Este trabalho propõem modificações com relação ao controle do fator de inércia no algoritmo do PSO clássico. A primeira proposta é uma modificação desenvolvida por Silveira *et al.* (2009), onde a variável de controle do fator de inércia passará a apresentar uma forma oscilatória. A outra modificação é uma nova proposta para o cálculo do fator de inércia, onde este passará a conter uma forma de uma onda oscilatória com decaimento exponencial (ODE). As mudanças sugeridas no cálculo do fator de inércia tem como principais objetivos, a melhora do desempenho do sistema através das soluções encontradas e assegurar a qualidade do algoritmo do PSO proposto quanto a sua repetibilidade, ou seja, melhorar a taxa de convergência do algoritmo proposto.

5.3.1 Fator de Inércia Oscilatório

O fator de inércia possui características que são remanescente do parâmetro de temperatura no *Simulated Annealing* (EBERHART; SHI, 1998). No PSO, ele foi introduzido a fim de balancear a pesquisa local e global. Um alto peso de inércia facilita uma busca global, enquanto um baixo peso de inércia favorece a busca local.

Como já introduzido, o processo de otimização possui um bom desempenho quando o fator de inércia apresenta decaimento linear. Shi e Eberhart (1998) observaram que o PSO pode necessitar de uma pesquisa global no final de uma execução dada a estagnação em um mínimo local, ao se utilizar um fator de inércia linearmente decrescente. Essa capacidade é ainda mais necessária, caso o problema a ser resolvida seja muito complexo ou não-linear. Portanto, em alguns casos, o PSO pode não convergir para um ponto de ótimo global.

Observando essa deficiência, Silveira *et al.* (2009), estudou uma nova forma de trabalhar com o fator de inércia. Em testes iniciais, ele observou que para valores de $w > 1$, as partículas começam a se espalharem pelo espaço busca. Para esse caso, a velocidade do instante anterior passa a ter uma maior influência no deslocamento atual da partícula. Isso ocorre devido a nova velocidade ser maior (terá maior importância) que a velocidade anterior, fazendo com que as partículas ganhem energia (aumentem a velocidade) e se afastem do ponto onde estavam.

A proposta elaborada por Silveira *et al.* (2009), apresenta uma nova forma para o cálculo do fator de inércia, que não apresentará mais uma forma de decaimento linear, esse se comportará de forma oscilante durante todo o processo de otimização, baseando-se em uma função com comportamento ondulatório. A função cosseno foi escolhida para desempenhar esse comportamento não monotônico, sendo assim, o cálculo do fator de inércia pode ser calculado através da equação (5.9):

$$m = \frac{(w_{max} - w_{min})}{2} \quad (5.7)$$

$$s = (m + w_{min}) \quad (5.8)$$

$$w = \left[\cos \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot it}{ciclos} \right) \times m \right] + s \quad (5.9)$$

no qual it representa a iteração atual; $ciclos$ corresponde ao número de iterações necessária para completar o período; m é um multiplicador responsável por calcular a metade da altura da função para os valores de w utilizados; s é o deslocamento da função, através dele é possível deslocar função w no eixo y do plano cartesiano, o que não seria possível, se utilizada somente a fórmula original do cosseno.

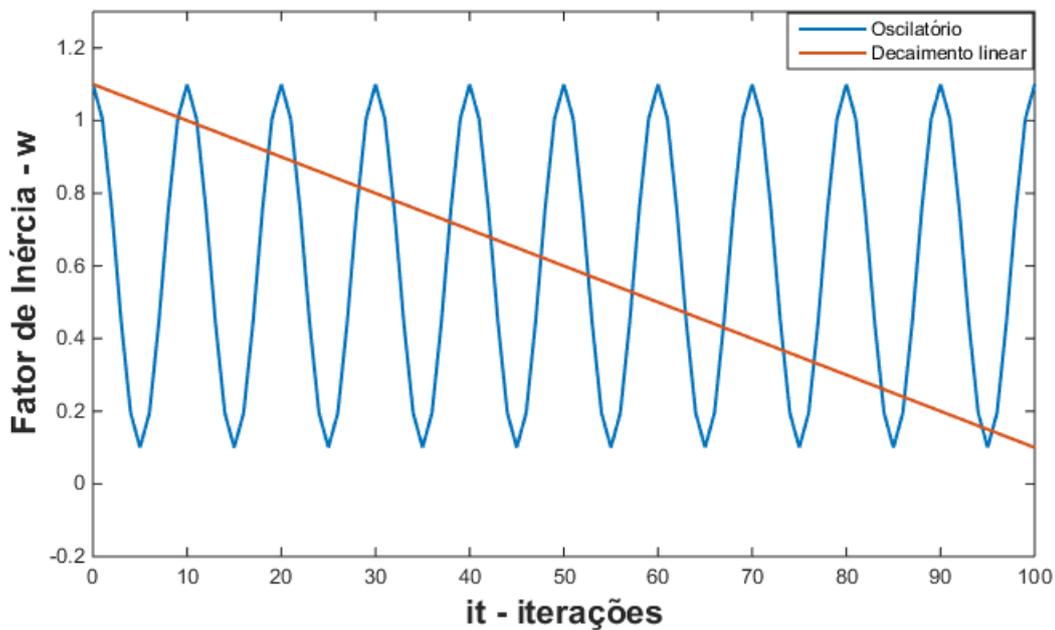
Devido o fator de inércia assumir comportamento não monotônico, a otimização acontece da seguinte forma: quando o peso de inércia do PSO se reduz, tendendo ao seu valor mínimo, as partículas perdem energia, se estabilizando em torno de um ponto de mínimo. Se este peso de inercia recebe valores maiores que 1, a tendência é que a velocidade da partícula no instante anterior possua maior importância, podendo causar um espalhamento do enxame. Se o peso de inércia atingir novamente valores menores, a tendência será o enxame se aproximar novamente, efetuando uma busca em torno de um mínimo local. Este mínimo, não será necessariamente igual ao primeiro. Portanto, o espalhamento do enxame pode ajudar o processo do PSO a fugir de mínimos locais, pois propicia uma busca global em um momento no qual seria menos provável encontrar outra melhor solução. Com isso, o fator de inércia w pode atuar na diversificação e intensificação do PSO. O número de oscilações da função que controla a inércia ao longo do PSO e o número de tentativas de fugas de mínimos locais, já que a cada vez que w for igual ao limite superior, o enxame pode se espalhar (SILVEIRA *et al.*, 2009).

Essa modificação proposta atua somente na alteração de controle do fator de inércia, que passa a oscilar de acordo com a equação (5.9), todo o restante da estrutura do PSO clássico é mantido.

Uma característica observada durante a utilização do PSO com controle de fator de inércia é com relação ao parâmetro que define o número de ciclos não monotônicos ao longo da otimização. A utilização de muitas iterações para completar um ciclo não monotônico não resulta em um bom desempenho do algoritmo, pois a otimização se torna demorada, em vista do elevado número de iterações para o espalhamento das partículas. A utilização de poucas iterações para completar um ciclo não monotônico também não resulta em um bom desempenho do algoritmo, o que se deve à rápida convergência do termo de inércia. Uma convergência muito rápida para o valor mínimo da inércia pode fazer com que o mínimo local encontrado se torne, muitas vezes, o melhor ponto social e cognitivo das partículas. Se a maioria das partículas tiver essa característica na primeira redução do termo de inércia, a probabilidade de encontrar soluções mais favoráveis será reduzida, pois as partículas se espalharão somente a partir desse melhor ponto, fazendo com que o processo de otimização não seja tão diversificado como no PSO padrão, fato que pode comprometer o resultado (SILVEIRA *et al.*, 2009).

Na Figura 19 é possível observar a variação do valor do fator de inércia segundo as configurações apresentados, tanto para o modelo clássico com decaimento linear, quanto para o modelo com controle de inércia da partícula através de oscilações não monotônicas.

Figura 19 – Valor do fator de inércia com a função oscilatória.



Fonte: Autor próprio.

5.4 Proposta do PSO com Fator de Inércia Oscilatório com Decremento Exponencial

A proposta desenvolvida neste trabalho não modifica a estrutura do algoritmo e está relacionada com alteração na forma de controle do fator de inércia. Essa proposta é baseada em um novo formato para a função de controle do fator de inércia que apresentará uma forma de uma função oscilatória com decremento exponencial (ODE).

Essa nova modificação tem como objetivo juntar os conceitos de Shi e Eberhart (1998) (o processo de otimização apresenta um bom desempenho com w na forma de decaimento) e Silveira *et al.* (2009) (utilização de uma função oscilatória com o objetivo de fazer com que as partículas ganhem energia e consigam evitar pontos de máximos ou mínimos locais) para definir uma nova forma de controle para w .

Tendo em mente esses conceitos a nova proposta elaborada utilizou a função cosseno para assumir o comportamento oscilatório, assim como em Silveira *et al.* (2009) e para realizar o decremento empregou a função exponencial decrescente devido a sua simplicidade. Nas equações (5.10) a (5.13) é possível observar as novas expressões utilizada para o cálculo do fator de inércia:

$$m = \frac{(w_{max} - w_{min})}{2} \quad (5.10)$$

$$s = (m + w_{min}) \quad (5.11)$$

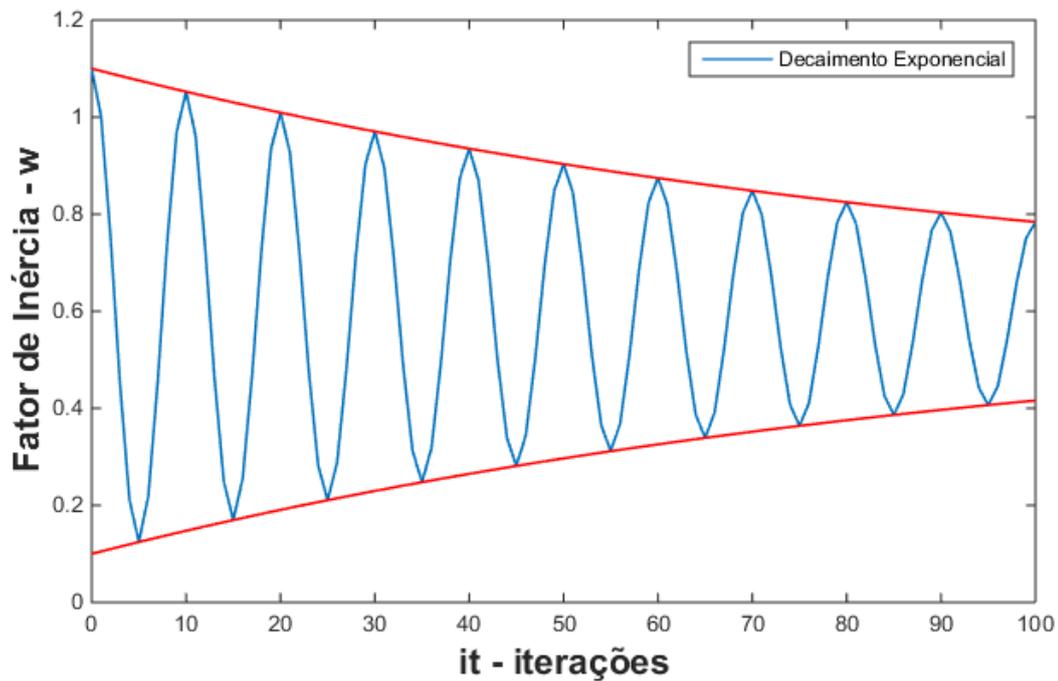
$$port = e^{\frac{it}{it_{max}}} \quad (5.12)$$

$$w = \left[\cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot it}{\text{ciclos}}\right) \times m \times port \right] + s \quad (5.13)$$

Observando as equação (5.13) é possível notar que a nova expressão para o cálculo de w segue a acréscimo da variável $port$, que é calculado através da equação (5.12). Essa variável é responsável pelo decaimento da função cossenoidal e como foi abordado ela é representado por função exponencial decrescente. As outras variáveis seguem o mesmo conceito apresentado na seção anterior.

O objetivo de realizar essa modificação é proporcionar uma melhor confiabilidade nas simulações do algoritmo, fornecendo uma nova possibilidade de conseguir encontrar a solução ótima para o problema. Inicialmente essa proposta utiliza o mesmo princípio utilizado por Silveira *et al.* (2009), o fator de inércia se apresenta no formato oscilatório de modo a fazer com que as partículas entre no processo de ganho (espalhamento das partículas) e perda de energia (estabelecimento das partículas em torno de um ponto de mínimo ou máximo local), porém esse processo pode não proporcionar o ajuste fino requerido para o problema ou também pode fazer com que as partículas possuam saltos largos para os valores de w e não consigam explorar da melhor forma o espaço de busca das variáveis a serem determinadas. Tendo isso em vista, realizou-se uma modificação no cálculo do fator de inércia, de maneira que este também apresentasse um decaimento de forma a proporcionar um melhor ajuste fino e que também consiga explorar de forma mais ampla o espaço de busca das variáveis. Na Figura (20) é possível verificar a variação do fator de inércia de acordo com a modificação proposta.

Figura 20 – Valor do fator de inércia com a função oscilatória com decaimento exponencial.



Fonte: Autor próprio.

5.5 Algoritmo para o PSO Proposto

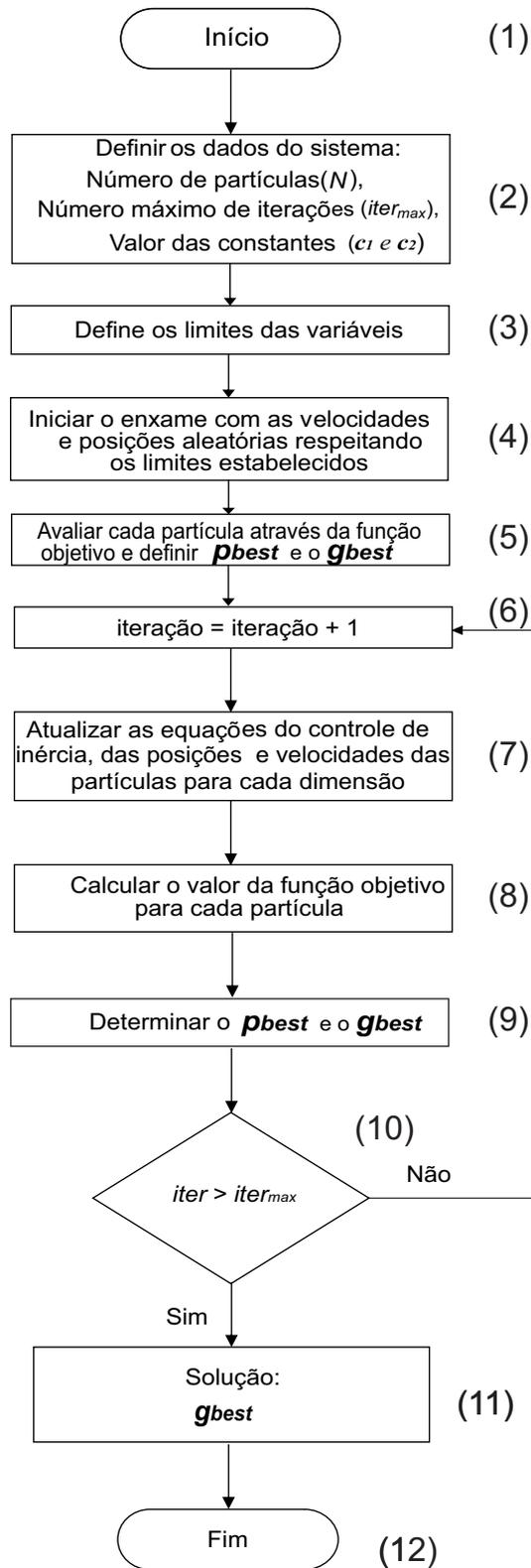
De acordo com as modificações propostas é possível definir um algoritmo que represente as mudanças do controle do fator de inércia através da função oscilatória como o da função oscilatória com decremento exponencial. A única mudança que ocorre nas duas formas de cálculo está na equação de w , onde dependendo do tipo de controle do fator de inércia pode ser utilizada a equação (5.9) ou (5.13). O algoritmo que representa o funcionamento desses métodos é definido da seguinte maneira:

1. Início
2. Determine o número de partículas da população (N) e o número máximo de iterações $iter_{max}$ e os valores dos parâmetros de aprendizagem (c_1 e c_2);
3. Defina os limites máximos e mínimos das variáveis a serem determinadas;
4. Inicialmente inicializa aleatoriamente a posição (x_i) e a velocidade (v_i) das partícula para cada variável, respeitando os limites estabelecidos para (x_i) e (v_i);
5. De início o p_{best_i} será igual ao valor gerado aleatoriamente para cada partícula, já o g_{best} será o melhor valor entre as partículas. Lembrando que cada variável possui os seus p_{best_i} e o seu g_{best} ;

6. $iter = iter + 1$;
7. Atualiza o coeficiente de inércia w usando as equações (5.7) a (5.9) para o controle do fator de inércia através da função oscilatória ou as equações (5.10) a (5.13) para a função ODE. A velocidade e a posição também são calculadas utilizando a equação (5.5) e (5.2), respectivamente;
8. Calcula o valor da função objetivo para cada partícula (FO_i);
9. Defina o novo p_{best_i} e g_{best}
Se o valor de $FO_i > p_{best_i}$
 $p_{best_i} = FO_i$
Se o valor de $p_{best_i} > g_{best}$
 $g_{best} = p_{best_i}$;
10. Verifique os critérios de parada. Caso sejam satisfeitos, vá para o passo 11. Se não, volte o passo 6;
11. Solução do algoritmo, g_{best} ;
12. Fim.

De acordo com o algoritmo descrito é possível desenvolver o fluxograma ilustrado na Figura 21, afim de facilitar o entendimento do método proposto.

Figura 21 – Fluxograma do PSO proposto.



Fonte: Autor próprio.

6 Sintonia do AVR e PSS utilizando PSO

O crescimento constante do SEP, elevou o nível da representação da modelagem e do projeto de controladores relacionados ao sistema de excitação de geradores síncronos. Nesse cenário, a sintonia simultânea dos parâmetros do Regulador Automático de Tensão e do Estabilizador de Sistema de Potência ganha destaque, tendo em conta que o projeto ótimo desses dispositivos proporciona um maior eficiência na regulação de tensão e no amortecimento de oscilações no geradores síncronos.

As técnicas convencionais para projeto dos dispositivos AVR e PSS, são baseadas em simplificações das equações linearizadas apresentadas nos capítulos 3 e 4 deste trabalho, e são utilizadas para determinar um conjunto de parâmetros para operação do gerador sob determinada condição de configuração e carregamento do sistema. Na prática, os parâmetros determinados ainda precisam ser validados através de simulações não-lineares, buscando um ajuste mais eficiente em termos de regulação de tensão e amortecimento das oscilações. O tratamento linear do problema de sintonia do AVR e PSS abre oportunidade para a utilização de novas técnicas de otimização não-lineares, com destaque para o Algoritmo de Otimização por Enxame de Partículas.

Neste capítulo será realizado a aplicação das modificações proposta na técnica do PSO, para determinação dos parâmetros ótimos do AVR e PSS associados ao controle da excitação de um gerador síncrono para um sistema máquina barra infinita e para o sistema de 9 barras do Anderson. Após a obtenção dos parâmetros para os controladores, é realizado uma análise comparativa entre o desempenho do algoritmo entre as modificações propostas com o algoritmo do PSO clássico e também com as técnicas convencionais de sintonia.

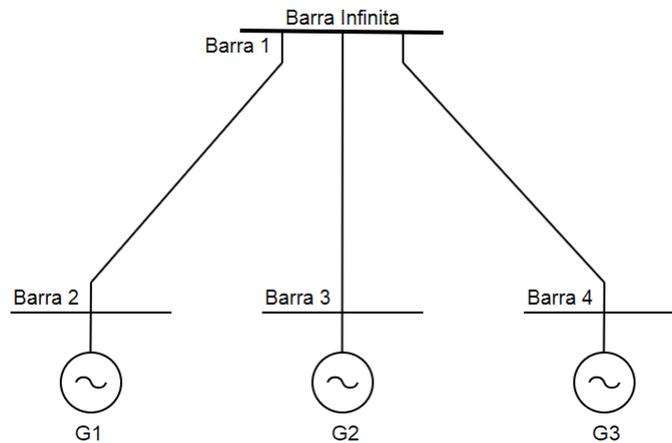
6.1 Sistema Máquina Barra Infinita

O sistema adotado para esse estudo é uma planta de geração termoelétrica da Central Geradora Termoelétrica Fortaleza S/A, localizada no município de São Gonçalo do Amarante, Ceará. Esse sistema é considerado um produtor independente de energia, sendo capaz de fornecer 346.630 kW de potência ao sistema interligado nacional e é composto de duas turbinas a gás ($G1$ e $G2$) de 131,6 MVA e uma turbina a vapor ($G3$) de 144,6 MVA.

O sistema elétrico ao qual a usina termoelétrica está ligado possui uma dimensão muito maior que a usina termoelétrica. Devido a essa diferença é possível realizar uma representação simplificada do sistema com três barras geradoras conectados a uma barra infinita, conforme observado na Figura 22. As três barras geradoras são do tipo PV - barras

de geração, onde são especificadas a potência gerada e a tensão na barra. Essas barras representam os dois geradores das turbinas a gás (G_1 e G_2) e um gerador da turbina a vapor (G_3). A barra infinita foi utilizada como barra de referência. Na barra infinita são especificados a tensão e o ângulo.

Figura 22 – Representação do sistema.



Fonte: Autor próprio.

A simulação do fluxo de carga foi realizada através do software DIGSILIENT (DIGital SIMulation of Eletrical Networks) *PowerFactory* considerando o estado de operação dos geradores sob condições. O resultado da simulação encontra-se na Tabela 1, onde destaca-se os valores obtidos em negrito.

Tabela 1 – Resultado do fluxo de carga.

Barra	Tensão		Geração	
	Módulo (p.u.)	fase (graus)	Pg (MW)	Qg (MVar)
1	1.012	-12.0	-299.4	106.0
2	0.993	-5.4	100.1	-19.7
3	0.992	-5.4	99.5	-20.5
4	0.982	-5.0	103.1	-28.4

Fonte – Autor própria.

Observando a Figura 22, verifica-se que é possível representar o sistema em estudo em três circuitos isolados, onde cada circuito é representado por uma gerador ligado ao barramento infinito através de uma impedância equivalente. Essa representação é possível devido a proximidade que cada gerador guarda em relação ao resto do sistema, onde qualquer dinâmica associada a cada máquina seja absorvida pelo barramento infinito (ANDERSON; FOUAD, 1994).

A valor da impedância equivalente de Thévenin (Z_E) para linha de transmissão que liga o gerador síncrono a barra infinita, é calculada com base nos valores da Tabela 1, considerando adoção dos seguintes valores bases para a tensão e potência: 13,8 kV e 100 MVA. Os cálculos desses parâmetros juntamente com os das constante do modelo de 3º ordem ligado a uma barra infinita (K_1 a K_6) podem ser encontrados com detalhes no trabalho de Junior (2012). Na Tabela 2 é possível observar os valores referente a esses parâmetros para o sistema em estudo.

Tabela 2 – Impedância equivalente e constantes do modelo de 3ª ordem ligado a um SMIB.

Linha	R_E (p.u.)	X_E (p.u.)	K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	K_6
Barra 2-1	0,0101	0,1134	3,3165	3,7932	0,1681	4,5846	0,0959	0,2581
Barra 3-1	0,0102	0,1139	3,3135	3,7935	0,1683	4,5851	0,0955	0,2571
Barra 4-1	0,0102	0,1147	2,8304	3,2925	0,1994	3,8918	0,0299	0,1786

Fonte – Autor própria.

6.1.1 Sistema Sem Controle

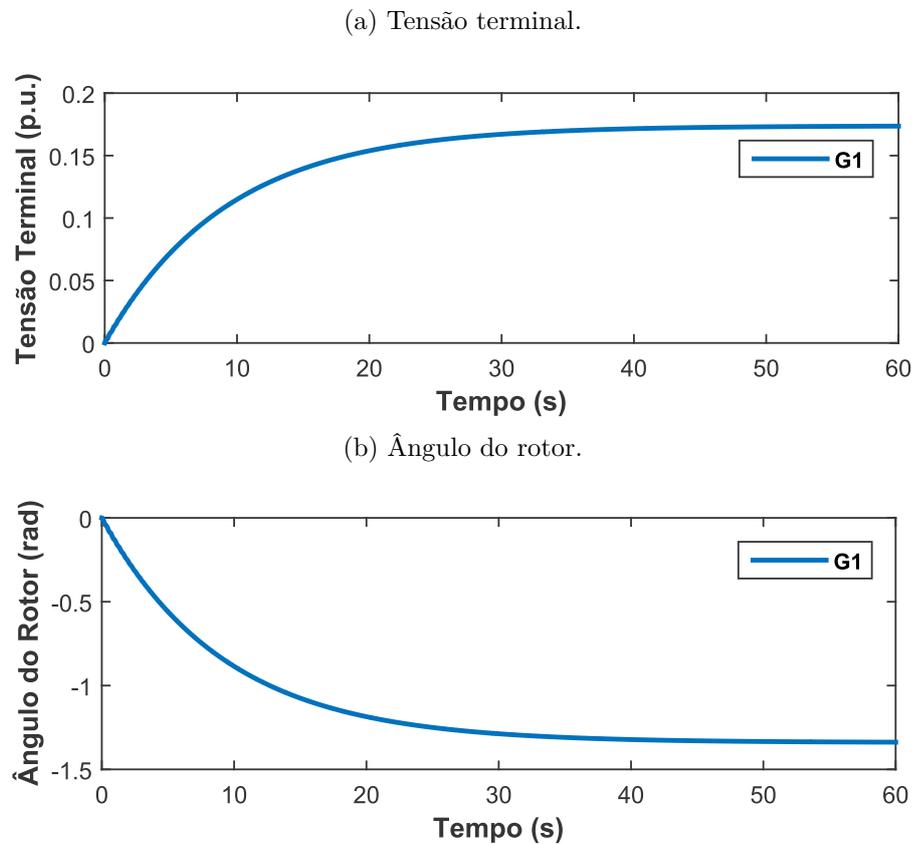
O desempenho dinâmico de cada unidade geradora, pode ser verificada através do diagrama de bloco representado na Figura 17. Onde, os valores das constantes K_1 a K_6 , podem ser encontrados na Tabela 2 e os dados técnicos dos geradores a gás e a vapor são dados no Anexo (A). A análise do comportamento temporal da tensão terminal e das oscilações eletromecânicas sofridas no rotor de cada máquina é verificada para uma variação tipo degrau unitário na tensão de referência V_{ref} .

Para o efeito de verificação do método proposto, considerou-se para estudo apenas o sistema formado pelo gerador a gás (G_1) barra infinita, como ilustrado na Figura 8. Como já destacado, essa simplificação é válida devido as característica do sistema de estudo.

Assim como em Junior (2012) para este trabalho considerou desprezível a variação no torque mecânico, as constante de amortecimento K_D assume um valor de 2 p.u., e o sensor de tensão possui uma constante de tempo $T_R = 0,02$ s.

Para simulação do sistema sem controle (sem o efeito do AVR e PSS), adota-se a Figura 17, com $K_{est} = 0$, $K_A = 1$ e $T_A = 0$. Na simulação utilizou-se a ferramenta Simulink do Matlab®. A resposta no tempo para a tensão terminal e ângulo do rotor para o sistema sem controle pode ser verificada na Figura 23.

Figura 23 – Resposta do sistema sem controle para uma entrada degrau unitário na tensão de referência.



Fonte: Autor próprio.

Examinando a resposta do sistema não-controlado, pode-se verificar que a tensão de saída do gerador G_1 apresenta elevado tempo de resposta e um alto erro em regime permanente (referência o sinal de tensão terminal de 1 p.u.), como verificado na Figura 23a. Com base nisso, a variação do ângulo do rotor em relação a referência rotativa também apresenta um elevado tempo de resposta, como pode ser visto na Figura 23b. Devido a essas causas é impraticável a utilização de geradores síncronos sem controle, tendo em vista que a demora para a regulação de tensão e a incapacidade do sistema de seguir uma entrada de referência podem levar o sistema a perda de estabilidade.

6.1.2 Projeto Convencional

6.1.2.1 Projeto Convencional do AVR

Para resolver o problema do sistema sem controle, é adicionado o Regulador Automático de Tensão ao sistema de controle de excitação do gerador síncrono. O AVR é responsável por responder a variação de tensão, reduzindo o tempo de resposta do sistema e controlando a tensão dentro do limite aceitável. A sua função de transferência pode ser

observada na equação (4.1), onde o ganho do amplificador K_A é responsável pela redução do tempo de resposta do sistema e a constante de tempo T_A está relacionada com o atraso proporcionado pela ponte conversora do sistema de excitação.

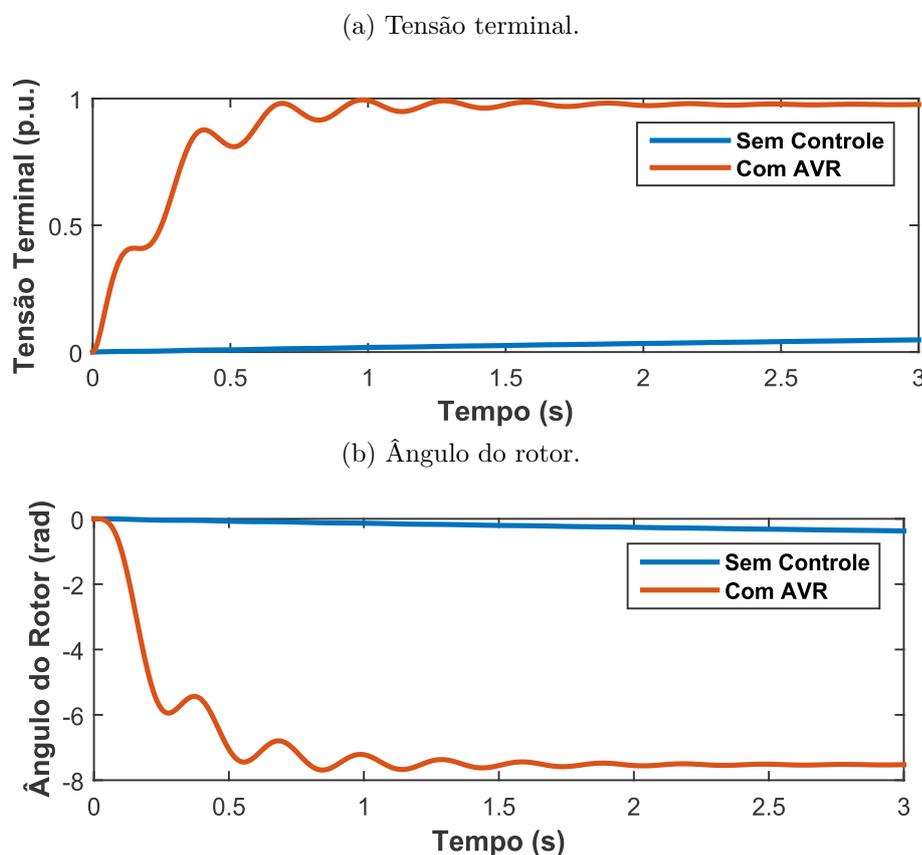
Anderson e Fouad (1994) desenvolveram uma metodologia para aproximar o valor do ganho K_A do AVR para operação do sistema a vazio. Para isso, considerou-se que para o sistema sem carga a tensão terminal E_t equivale à tensão E'_q . Sendo assim, qualquer variação na tensão terminal da máquina segue o comportamento da tensão de campo E_{fd} com um atraso de tempo T'_{d0} (JUNIOR, 2012).

Através da consideração mencionada e de uma série de simplificações é possível obter uma equação para determinação de um valor aproximado para o ganho do AVR, que possa proporcionar um bom rendimento do sistema.

$$K_A = \frac{T'_{d0}}{2T_A} \quad (6.1)$$

Assim como no trabalho de Junior (2012) foi escolhido um valor de $K_A = 197,25$ e $T_A = 0,02$. Na Figura 24 é possível observar a resposta do sistema com AVR para um degrau unitário na tensão de referência.

Figura 24 – Resposta do sistema com AVR para uma entrada degrau unitário na tensão de referência.



Fonte: Autor próprio.

Verifica-se na Figura 24, que a utilização do AVR resultou em uma resposta melhorada para a regulação de tensão da máquina e variação angular do rotor, possuindo um menor tempo de resposta e reduzindo o erro em regime permanente em comparação ao sistema não controlado. Porém, apesar de apresentar um bom resultado a inserção do AVR no sistema, considerando a sua utilização com altos valores de ganhos, pode tornar insatisfatório o grau de amortecimento das máquinas após a ocorrência de uma perturbação, sobretudo em condições de carga pesada (MOTA, 2006). Para resolver esse problema é adicionado o Estabilizador de Sistema de Potência ao sistema.

6.1.2.2 Projeto Convencional do PSS

O Estabilizador de Sistema de Potência fornece um sinal de controle adicional na referência do regulador de tensão, gerado a partir do sinal de velocidade do rotor da máquina, onde proporciona um torque positivo capaz de restituir o torque de amortecimento perdido. O PSS tem como principal função adicionar amortecimento às oscilações do rotor da máquina.

O projeto desse dispositivo pode ser realizado através de técnicas convencionais de sintonia de PSS, que se baseiam em determinar o ângulo de atraso do sistema máquina excitação a ser compensado, calculados na frequência dominante do sistema (MOTA, 2006).

Neste trabalho será utilizado os valores dos parâmetros do PSS determinados no trabalho Junior (2012), onde foi empregado a técnica convencional descrita em Mota (2006) para o projeto desses parâmetros. Na Tabela 3 é verificado os valores dos parâmetros do PSS usado.

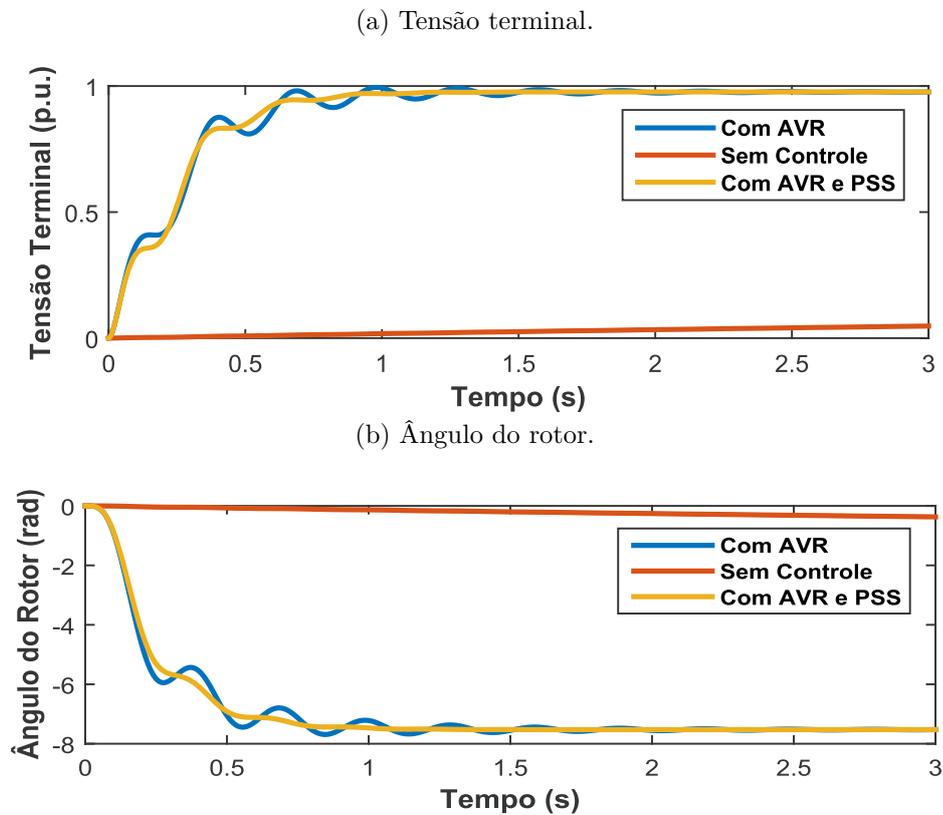
Tabela 3 – Parâmetros do PSS encontrados através do método clássico.

Método	Variável	Valor
Clássico	K_{stab}	0,2 p.u.
	T_w	1,0 s
	T_1	0,7262 s
	T_2	0,0051 s

Fonte – Autor própria.

Para simulação do sistema na presença dos dispositivos AVR e PSS, Figura 25, utiliza-se os valores encontrados da Tabela 3 para o estabilizador, enquanto os valores do AVR são considerados os encontrados através do projeto clássico.

Figura 25 – Resposta do sistema com AVR e PSS para uma entrada degrau unitário na tensão de referência.



Fonte: Autor próprio.

Para uma melhor análise do desempenho do sistema com o AVR e PSS, foi elaborada a Tabela 4, com os principais indicadores relacionados à resposta temporal para o sistema sem controle, sistema com AVR e sistema com AVR e PSS.

Tabela 4 – Análise comparativa entre os indicadores da resposta temporal do sistema.

Variável	Indicador	Sis. sem controle	Sis. com AVR	Sis. com AVR e PSS
Tensão terminal	t_r	20,29 s	0,59 s	0,46 s
	t_s	36,19 s	1,20 s	0,76 s
	E_{ss}	82,63 %	2,35 %	2,35 %
	M_p	0,00 %	1,71 %	0,00 %
Ângulo do rotor	t_r	20,29 s	0,42 s	0,37 s
	t_s	36,19 s	1,35 s	0,74 s
	M_p	0,00 %	2,15 %	0,00 %

Fonte – Autor própria.

Analisando a Tabela 4, verifica-se que a resposta do sistema com o AVR e PSS reduziu o comportamento oscilatório no início para a tensão terminal. Além de proporcionar uma menor porcentagem de sobressinal (M_p) e uma redução no tempo de subida (t_r) e de acomodação do sistema (t_s).

6.1.3 Projeto Utilizando PSO Clássico

As técnicas descritas na seção (6.1.2), foram realizados utilizando procedimentos para sintonia dos dispositivos baseados na técnica clássica, onde considerou-se várias simplificações, visando reduzir a complexabilidade do sistema. Cabe salientar, que o projeto desses controladores devem operar em plantas reais com elevado grau de não linearidade.

Nesse contexto, se destacam as técnicas não lineares para sintonia de controladores, principalmente os métodos baseados em algoritmos evolutivos, onde proporcionam um ajuste ótimo para os parâmetros dos controladores sem a necessidade de adotar medidas simplificadoras para o projeto. O Algoritmo de Otimização de Enxame de Partículas (PSO), tem apresentado resultados satisfatório para a sintonia coordenada dos parâmetros do AVR e PSS, proporcionando um melhor incremento na estabilidade do sistema de potência, bem como uma maior velocidade da resposta a perturbações, especialmente as relacionada com variação na tensão terminal da máquina.

Para a implementação da técnica de PSO para a sintonia dos parâmetros ótimos do AVR e PSS, fez-se uso dos resultados do estudo realizado por Junior (2012). Nesse trabalho, os parâmetros a serem otimizados foram selecionados de acordo com a influência no regulagem de tensão (K_A do AVR) e no amortecimento das oscilações (K_{stab} , T_1 , T_3 para o PSS). Os demais parâmetros do sistema são considerados os valores calculados através do método clássico.

Assim como nas seções anteriores, o desempenho do algoritmo foi analisado através do comportamento da tensão terminal e do ângulo do rotor da máquina, considerando a sua resposta temporal para variação de um degrau na tensão de referência. Como forma de verificar o desempenho do PSO, utilizou-se a função objetivo (FO) desenvolvida por Gaing (2004). Essa função relaciona os principais indicadores da resposta temporal através da equação (6.2):

$$FO = \frac{1}{(1 - e^{-\beta})(M_p + E_{SS}) + e^{-\beta}(t_s - t_r)} \quad (6.2)$$

Junior (2012) considerou os seguintes dados para implementação do algoritmo:

- A população é formada por 20 partículas;
- As constantes de aceleração assumem o valor de $c_1 = c_2 = 2$;
- As variáveis são limitadas em:

$$[1 \ 0, 1 \ 1 \ 0, 0001] \leq [K_A \ K_{stab} \ T_1 \ T_2] \leq [400 \ 2 \ 3 \ 0, 5] \quad (6.3)$$

- O fator de inércia é calculado através da equação (5.6), variando de 0,9 a 0,4;

- A velocidade é limitada em 15% da amplitude máxima de variação para cada parâmetro.
- O fator β igual à 0,005.

Na Tabela 5, verifica-se os valores dos parâmetros encontrados por Junior (2012) através da utilização do algoritmo do PSO clássico:

Tabela 5 – Parâmetros do AVR e PSS determinados utilizando o PSO clássico.

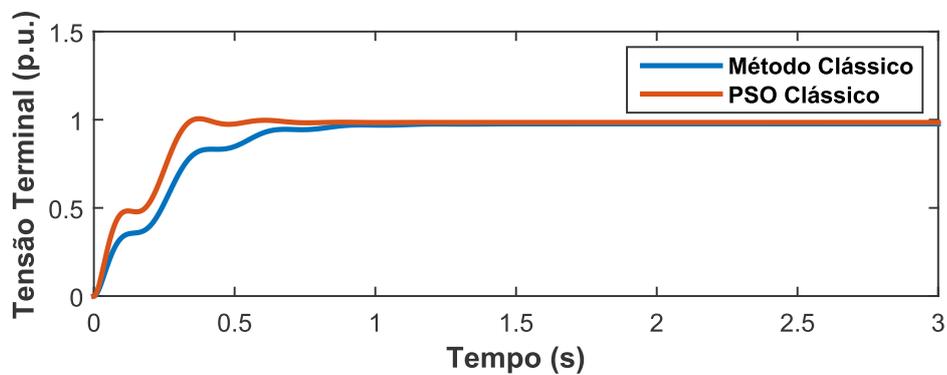
Parâmetro	Valor
K_A	307,1723 p.u.
K_{stab}	0,100 p.u.
T_1	1,1158 s
T_2	0,0001 s

Fonte – Autor própria.

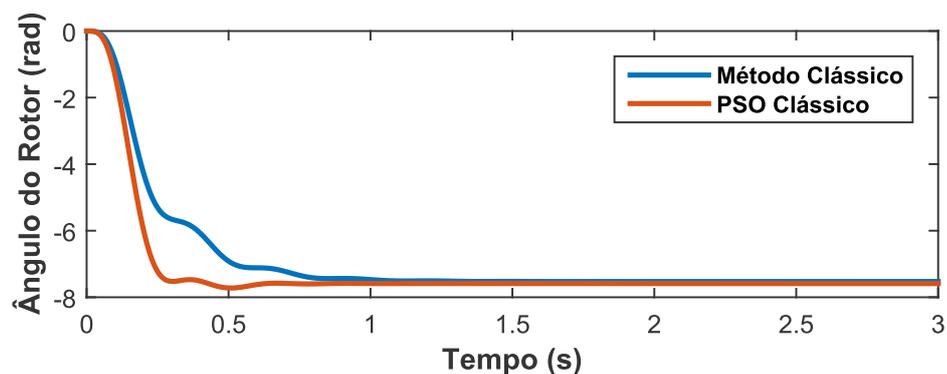
A Figura 26 apresenta o desempenho dinâmico da tensão terminal e do ângulo do rotor, para os geradores associados à Turbina a Gás 1:

Figura 26 – Resposta do sistema para os parâmetros do AVR e PSS determinados pelo PSO clássico.

(a) Tensão terminal.



(b) Ângulo do rotor.



Fonte: Autor próprio.

De acordo com a Figura 26, pode-se verificar através da análise comparativa da resposta temporal, que o PSO clássico obteve melhores ajustes para os parâmetros do AVR e PSS em relação ao método clássico, possibilitando uma redução no tempo de subida e acomodação do sinal, porém mantendo o erro em regime e o máximo sobre-sinal dentro dos limites aceitáveis para o sistema. A Tabela 6 apresenta os principais indicadores da resposta temporal para sintonia dos parâmetros do AVR e PSS pelo PSO.

Tabela 6 – Indicadores da resposta temporal do sistema com AVR e PSS ajustados pelo PSO clássico.

Variável	Indicador	Valor
Tensão terminal	t_r	0,27 s
	t_s	0,38 s
	E_{SS}	1,52 %
	M_p	2,13 %
Ângulo do rotor	t_r	0,15 s
	t_s	0,27 s
	M_p	1,76 %

Fonte – Autor própria.

6.1.4 Projeto Utilizando PSO com Fator de Inércia Oscilatório

Como pode-se observar por meio da Tabela 6, a técnica de otimização por enxame de partícula para sintonia simultânea dos parâmetros do AVR e PSS apresentam resultados satisfatório apesar da alta não linearidade dos sistemas elétricos de potência. Porém, esses resultados são passíveis de melhora tanto na questão da taxa de convergência quanto em relação a determinação dos melhores valores globais dos parâmetros.

Com intuito de melhorar o desempenho do algoritmo do PSO para regulagem de tensão no gerador e amortecimento de oscilações na máquina síncrona, este trabalho propõem modificação no cálculo do fator de inércia na técnica clássica do PSO.

Assim como no trabalho realizado por Junior (2012), os parâmetros selecionados a serem otimizados foram: K_A para o AVR e K_{stab} , T_1 e T_2 para o PSS. A análise da eficiência do método proposto foi verificada da resposta do sistema para uma entrada ao degrau unitário na tensão de referência.

A função objetivo utilizada no método proposto é dada pela equação (6.2), onde o fator β balanceia os critérios M_p e E_{SS} com os tempos t_r e t_s . Um valor de $\beta = 0,7$ equilibra esses critérios. Para esse estudo adotou-se um valor $\beta = 0,005$, o que significa que os critérios M_p e E_{SS} possuem um maior peso no desempenho do sistema que os tempos t_r e t_s .

A qualidade dos parâmetros é definida pela maximização da função de desempenho apresentada na equação (6.2), essa é conseguida com a redução de M_p e E_{SS} e com a menor

diferença entre os tempos t_r e t_s . No entanto, a função objetivo analisa o desempenho da partícula sob a ótica de uma única curva de resposta temporal por vez, seja da tensão terminal ou do ângulo do rotor. Neste caso utilizou-se a curva da tensão terminal, devido a mesma apresentar todos os critérios de desempenho bem definidos. Uma vez que para a resposta angular do rotor, o valor do erro em regime permanente (E_{SS}) não é considerado, isso não impede a sua utilização.

Os limites das constantes de aceleração foram ajustados através das simulações digitais do algoritmo. Os valores escolhidos foram os que apresentaram o melhor desempenho e assumem os seguintes valores: $c_1 = 0.5$ e $c_2 = 1.5$.

O PSO atua modificando a posição da partícula para uma região cada vez mais próximo do ponto ótimo. Essa modificação é influenciada pela melhor posição que a partícula já atingiu, mas também, pela melhor posição que as partículas de sua vizinhança já atingiram. Logo, o tamanho da vizinhança, ou seja, o número de partículas tem influência direta no desempenho do algoritmo. Uma menor quantidade de partículas pode evitar problema de mínimos locais, porém para uma convergência mais rápida do algoritmo é preferível a adoção de um número maior de vizinhos. Para o sistema em estudo adotou-se uma vizinhança global, na qual cada uma das 100 partículas se influenciam mutuamente.

O deslocamento das partículas é realizado pela variação do termo da velocidade, onde é função da melhor posição encontrada pela partícula e a posição atual desta, bem como pela a diferença entre a melhor posição da vizinhança e a posição atual da partícula.

No entanto, a velocidade pode se expandir em ciclos cada vez maiores, eventualmente se aproximando do infinito. Uma forma de resolver esse problema é limitando a velocidade das partículas em um valor (V_{max}). No trabalho proposto o valor de (V_{max}) é dado por 15% da amplitude máxima de variação para cada termo da partícula.

A posição dos parâmetros também deve ser limitada, já que durante a evolução do PSO é possível que apresente valores que tornem o sistema instável. A fim de contornar esse problema limita-se os parâmetros em valores que garantem a estabilidade. A faixa de limite adotada no estudo caso é a mesma apresentada na equação (6.3).

6.1.4.1 Fator de inércia oscilatório

A modificação sugerida por Silveira *et al.* (2009) faz com que o fator de inércia se comporte de modo oscilatório e não mais como um decaimento linear. Esse novo comportamento tem como objetivo proporcionar um maior espalhamento das partículas, fazendo com que ocorra a fuga de pontos de mínimos ou máximos locais.

O controle do fator de inércia proposto se comportará como a função cosseno, sendo o seu limite superior 1, 5 e o inferior igual a 0, 1. As suas variáveis m e s , que são calculados pelas equações (5.7) e (5.8) respectivamente, são iguais a 0, 8 e 0, 9. Para implementação

do algoritmo do PSO com controle do fator de inércia, segue os seguintes passos:

- 1º passo: São gerados de maneira aleatória a velocidade e a posição das partículas, respeitando os limites estabelecidos para as variáveis. Logo em seguida é feita uma avaliação de cada partícula através da função objetivo, onde na primeira iteração os valores de p_{best} são os calculados nessa iteração e o valor de g_{best} é o melhor valor entre os p_{best} ;
- 2º passo: É calculado o fator de inércia de acordo com o método proposto, através das equações (5.7) à (5.9). A velocidade de cada partícula é determinada pela equação (5.5), respeitando o limite máximo, com intuito de manter as variáveis dentro dos limites estabelecidos;
- 3º passo: Atualiza-se a posição de cada partícula, de acordo com a equação (5.2), e verifica-se os limites das variáveis atualizadas, de maneira a segurar que estas estejam dentro dos limites permitidos;
- 4º passo: É analisado o desempenho para cada partícula, através da sua avaliação pela função objetivo, dado pela equação (6.2). O desempenho da partícula é comparado com o seu histórico individual, caso apresente-se melhor esta passará a ser o novo p_{best} , o melhor entre esses valores é determinado como o g_{best} ;
- 5º passo: Verifica-se se o limite de iterações foi atingido, caso contrário retorna-se para o 2º passo;
- 6º passo: Final do processo, o número de iterações máximas foi atingido e o valor da solução é dado pelo g_{best} de cada parâmetro.

Uma observação importante em relação a implementação da modificação proposta está relacionado com o número de iterações necessárias para completar o ciclo não monotônico. Tendo isso em vista, foi verificado que com o número de iterações por ciclo igual a 10 o sistema apresentava um bom funcionamento. Na Tabela 7 é possível verificar o desempenho do PSO com fator de inércia oscilatório. Para uma melhor análise realizou-se 100 simulações da proposta do algoritmo com fator de inércia oscilatório.

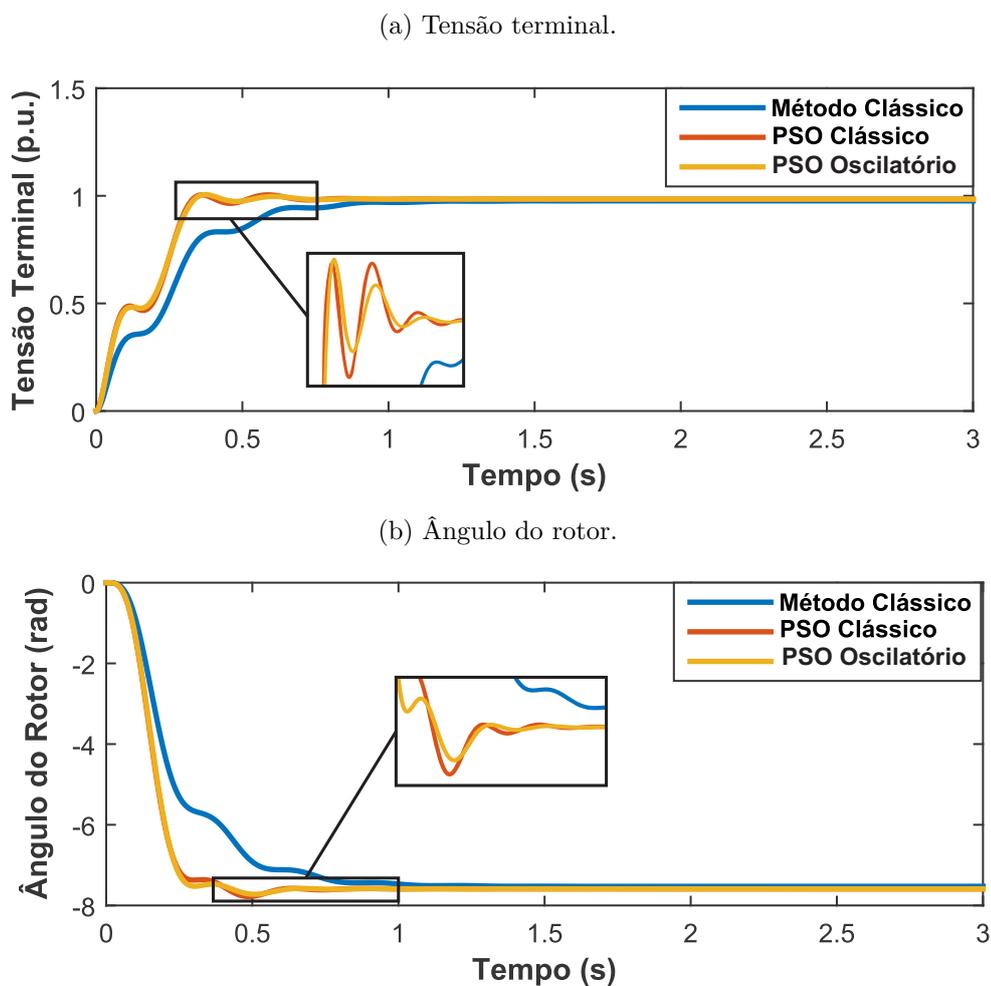
Tabela 7 – Parâmetros do AVR e PSS determinados pelo PSO com fator de inércia oscilatório.

Melhor solução				Função objetivo			
K_A	K_{stab}	T_1	T_2	Média	DP	Maior	Menor
306,7507	0,1127	1,0000	0,0112	14,1221	0,9626	14,3856	10,0931

Fonte – Autor própria.

A Figura 27 apresenta o desempenho dinâmico da tensão terminal e do ângulo do rotor para o sistema simulado com os parâmetros determinados através do método clássico, PSO clássico e com a modificação do fator de inércia oscilatório no algoritmo do PSO clássico.

Figura 27 – Resposta do sistema para os parâmetros do AVR e PSS determinados pelo PSO com fator de inércia oscilatório.



Fonte: Autor próprio.

É possível verificar que as técnicas de PSO obtiveram melhores respostas tanto para a tensão terminal quanto para o ângulo do rotor, isso acontece devido ao método clássico utilizar equações que são baseadas em linearização do sistema para determinação dos parâmetros do AVR e PSS. Com relação a comparação entre o PSO clássico e o PSO com fator de inércia oscilatório, se tem que esse último apresenta um melhor desempenho como se pode observar no campo Maior da Função Objetivo encontrada na Tabela 7, ainda que esse diferença não seja tão perceptível na Figura 27. Porém além de conseguir melhorar o desempenho do sistema a outra vantagem desse método esta relacionada com a qualidade das soluções encontradas nas simulações, tendo em vista que a Média e o Desvio Padrão (DP) apresentaram bons resultados.

A Tabela 8 apresenta os principais índices da resposta temporal do sistema para o PSO com fator de inércia oscilatório.

Tabela 8 – Indicadores da resposta temporal do sistema com AVR e PSS ajustados pelo PSO com fator de inércia oscilatório.

Variável	Indicador	Valor
Tensão terminal	t_r	0,26 s
	t_s	0,32 s
	E_{SS}	1,52 %
	M_p	1,95 %
Ângulo do rotor	t_r	0,15 s
	t_s	0,26 s
	M_p	1,51 %

Fonte – Autor própria.

6.1.5 Proposta do PSO com fator de inércia ODE

Como analisado na Tabela 7, a modificação do fator de inércia oscilatório no PSO clássico proporcionou um melhor desempenho do sistema. Porém, uma questão que é passível de melhora está relacionada com a taxa de convergência das simulações. Em sistemas com alto grau de não-linearidade a convergência entre as simulações são quase impossíveis, mesmo com a utilização de técnicas não-lineares.

A proposta desenvolvida neste trabalho é baseada na apresentação da forma do fator de inércia através de uma função oscilatória com decaimento exponencial (ODE). O objetivo dessa proposta é conseguir melhorar a taxa de convergência das simulações e ser capaz de determinar os valores ótimos dos parâmetros. Para isso, essa proposta utiliza os conceitos apresentados para o PSO com controle de inércia oscilatório, mas com a mudança de que a função do fator de inércia vai apresentar uma forma de decaimento exponencial ao longo da simulação, o que possibilita uma melhor exploração do espaço de busca e um ajuste mais fino dos valores dos parâmetros.

O algoritmo do PSO proposto utilizou os mesmos valores das variáveis declaradas no PSO com controle de inércia oscilatório:

- Limite superior do fator de inércia igual a 1,5 e o inferior igual a 0,1;
- As variáveis m e s são calculadas através das equações (5.10) e (5.11) e são iguais a 0,8 e 0,9;
- O número de iteração por ciclo é igual a 10.

Com relação a implementação do método, tem-se que ele segue os mesmo seis passos descritos para o PSO com fator de inércia oscilatório, a única mudança ocorre nas

equações utilizadas para o cálculo do fator de inércia no 2º passo. Essas são substituídas pelas equações (5.10) a (5.13), que são responsáveis pelo novo modo do cálculo de w .

Para analisar o desempenho da técnica proposta executou-se o algoritmo proposto 100 vezes. Na Tabela 9 é possível verificar uma análise entre o PSO clássico desenvolvido por Junior (2012), o PSO com fator de inércia oscilatório e o PSO com fator de inércia oscilatório com decaimento exponencial.

Tabela 9 – Parâmetros determinados por diferentes métodos do PSO.

Método PSO	Melhor solução					Função objetivo		
	K_A	K_{stab}	T_1	T_2	DP	Média	Maior	Menor
Clássico	307,1723	0,1	1,1158	0,0001	-	-	7,5259	-
Fator de inércia oscilatório	306,7507	0,1127	1,0000	0,0112	0,9626	14,1221	14,3856	10,0931
Fator de inércia ODE	306,3193	0,1076	1,0473	0,0115	0,1415	14,3204	14,3859	13,9918

Fonte – Autor própria.

Percebe-se na Tabela 9, que a realização do método PSO com fator de inércia com decaimento exponencial cumpriu com os objetivos, tendo em vista que proporcionou um melhor desempenho para o sistema, isso pode ser verificado através da análise do maior valor encontrado pela a função objetivo. Porém, o grande benefício desse método esta relacionado com a melhora na taxa de convergência das simulações como observado através do menor valor de Desvio Padrão (DP) e pelo maior valor da Média das simulações, que se aproxima do Maior valor encontrado nas simulações. Também é possível verificar que o PSO com decaimento exponencial apresentou praticamente o mesmo desempenho que o PSO oscilatório com relação a melhor solução encontrada durante as simulações, logo é possível concluir que o gráfico da resposta do sistema para uma entrada ao degrau na tensão de referência apresentada na Figura 27, também representa a performance deste método.

Para uma melhor análise do desempenho dos métodos realizados, a Tabela 10 apresenta os principais indicadores relacionados à resposta temporal do sistema controlado com AVR e PSS.

Tabela 10 – Análise comparativa entre os índices de desempenho por diferentes métodos.

Método	Tensão terminal				Ângulo do rotor		
	t_r	t_s	E_{ss}	M_p	t_r	t_s	M_p
Método Clássico	0,46 s	0,76 s	2,35 s	0,0 %	0,37 s	0,74 s	0,0 %
PSO Clássico	0,27 s	0,38 s	1,52 %	2,13 %	0,15 s	0,27 s	1,76 %
PSO fator de inércia ODE	0,26 s	0,32 s	1,52 %	1,95 %	0,15 s	0,26 s	1,51 %

Fonte – Autor própria.

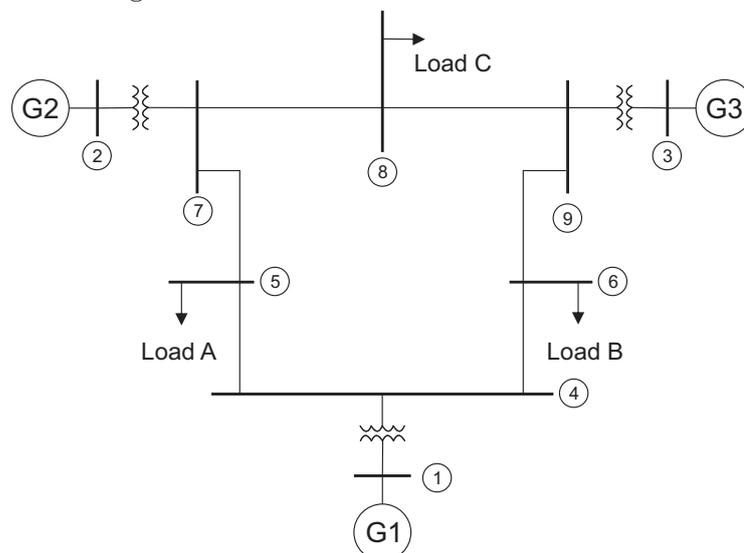
Percebe-se, pela análise comparativa da resposta temporal ao degrau de tensão na referência, que o PSO com as modificações proposta obteve melhores ajustes para o AVR e PSS em relação à técnica clássica do PSO, proporcionando redução na acomodação do sinal, porém mantendo o erro em regime e o máximo sobre-sinal dentro dos limites aceitáveis para o sistema.

Outra observação importante a respeito da eficiência da técnica proposta está relacionada com a convergência das simulações. Como os sistemas elétrico de potência apresentam com alto grau de não linearidade, as técnicas de otimização por muitas vezes acabam por não conseguirem apresentar o mesmo resultado, o que dificulta a eficácia e o desempenho do método, enquanto o método proposto proporcionou uma solução para problema com a utilização do PSO com controle do fator de inércia ODE, além de proporcionar uma melhor resposta de sintonia dos parâmetros quando comparada com o PSO básico e método clássico.

6.2 Sistema 9 Barras Anderson

Objetivando a investigação do desempenho dos algoritmos de PSO utilizados nas subseções 6.1.3 a 6.1.5 para a sintonia simultânea do AVR e PSS em um sistema multimáquinas, utilizou-se o sistema 9 barras 3 geradores que pode ser verificado na Figura 28 e encontrado no Anderson e Fouad (1994).

Figura 28 – Sistema 9 Barras do Anderson.

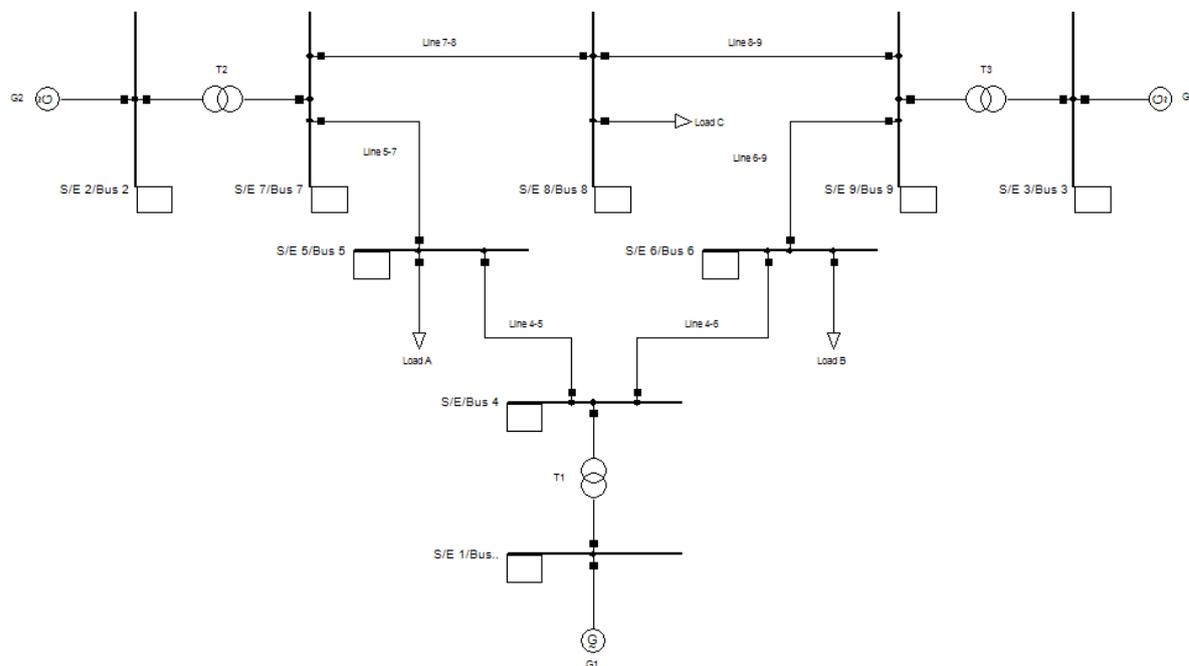


Fonte: Anderson e Fouad (1994) - Adaptado.

Para simulação do sistema foi utilizado o *software* DlgSILIENT *PowerFactory*[®], enquanto os algoritmos foram programados utilizando a ferramenta DPL (*DIgSILIENT*

Programming Language). A Figura 29 ilustra o diagrama do sistema no software, onde os valores dos componentes do sistema encontra-se no Anexo B.

Figura 29 – Sistema 9 Barras do Anderson no *PowerFactory*.



Fonte: Autor próprio.

Uma questão que deve-se levar em consideração a respeito da representação do sistema no *software PowerFactory* está relacionada com o modelo utilizado para representação da máquina síncrona. Dentre as alternativas, o software possibilita a representação *Standard*, onde leva em consideração a máquina possuindo dois enrolamentos no eixo direto, um de campo e outro enrolamento amortecedor. Para o eixo em quadratura, se situam dois enrolamentos amortecedores. As equações descritas na Seção 3.4 descrevem o funcionamento dessa representação.

Quanto aos controladores AVR e PSS utilizou os modelos: AVR-IEET1 e PSS Convencional, que estão disponíveis na biblioteca do *software* e realizou as devidas considerações de forma que o suas representações possuíssem os mesmos funcionamentos dos modelos apresentados nas Figuras 13 e 16. O próprio *PowerFactory* é capaz de adicionar os controladores AVR e PSS, onde internamente ele consegue realizar as associações entre esses equipamentos e o gerador síncrono.

6.2.1 PSO Clássico

As principais mudanças que ocorrem no projeto do AVR e PSS utilizando a técnica de Otimização por Enxame de Partículas em um sistema multimáquinas, está relacionado

com o aumento do número de variáveis a serem determinadas e com relação a nova função objetivo utilizada.

Segundo Abido (2001), o método de fator de participação mostra que os geradores G2 e G3 são locais ótimos para instalação dos PSSs. Logo, os G2 e G3 são equipados com AVRs e PSSs e os parâmetros a serem determinados são: K_i para o AVR e K_{stab_i} , T_{1_i} e T_{2_i} para o PSS, onde $i = 2, 3$ e representa o número do gerador associado.

Com relação a nova função objetivo tem-se que o conceito desenvolvido por Gaing (2004) para análise de somente uma curva por vez é estendido para a situação que necessita observar os desempenhos das várias curvas ao mesmo momento. Sendo assim a nova expressão é dada pela soma entre as funções objetivos (FO_i), onde cada FO_i é calculada pela equação (6.2) e analisa o desempenho do gerador i , através da sua resposta temporal da tensão terminal:

$$FO_m = FO_1 + FO_2 + FO_3 + \dots + FO_i \quad (6.4)$$

Como constatado na equação (6.4), a nova função objetivo consegue analisar o desempenho do sistema por completo, tendo em vista que é levado em consideração o efeito do desempenho da função objetivo da resposta de cada gerador do sistema. Sendo assim, é possível determinar de modo simultâneo os parâmetros do AVR e PSS de cada gerador que vai fornecer o melhor desempenho do sistema.

Uma observação importante em relação a nova função objetivo está relacionado com os parâmetros determinados pelo AVR e PSS para cada gerador. Esses valores podem não ser os que fornecem o desempenho máximo para a resposta daquele gerador, isso por que os parâmetros que lhe fornecem esse desempenho podem prejudicar a respostas de outros geradores do sistema fazendo com que o desempenho do sistema por completo piore, ou seja, pode acontecer que os valores determinados pelo PSO não sejam os parâmetros que fornecem a melhor resposta para aquele gerador (maior FO_i) mas que forneça o melhor valor para o sistema (maior FO_m).

Para a implementação do algoritmo PSO clássico utilizou-se os seguintes dados:

- Número de iterações é igual a 100;
- A população é formada por 100 partículas;
- As constantes de aceleração assumem o valor de $c_1 = 0,5$ e $c_2 = 1,5$;
- As variáveis são limitadas em:

$$[1 \ 0,1 \ 0,6 \ 0,005] \leq [K_{A_i} \ K_{stab_i} \ T_{1_i} \ T_{2_i}] \leq [400 \ 50 \ 1 \ 0,05] \quad (6.5)$$

- O fator de inércia é calculado através da equação (5.6), variando de 1,5 a 0,01;

- A velocidade é limitada em 50% da amplitude máxima de variação para cada parâmetro.
- O fator β igual à 0,005.

Para este trabalho consideram-se que os valores das constantes de tempo do AVR e do sensor de tensão iguais a $T_A = T_R = 0,2s$ e o valor da constante do *washout* $T_W = 5s$ para os geradores G2 e G3.

Os passos descritos na subseção 6.1.3 são os mesmos utilizados para implementação do sistema. Porém, a função objetivo que verifica o desempenho do sistema é calculada pela equação (6.4), onde é dada pela soma da função objetivo da resposta temporal da tensão terminal dos geradores G2 e G3.

Para análise do sistema é aplicado uma falta trifásica no final da linha de transmissão 5-7, ou seja, praticamente na barra 7. A falta ocorre no tempo de 1 s e tem duração de 0,1 s, após esse tempo ela é extinta sem alteração na configuração do sistema. Para verificar o comportamento do sistema será observado o ângulo do rotor e a tensão terminal nos Geradores G2 e G3, o G1 é considerado como o de referência. Na Tabela 11 é possível conferir os valores dos parâmetros determinados pelo o PSO clássico:

Tabela 11 – Parâmetros do AVR e PSS determinados utilizando o PSO clássico.

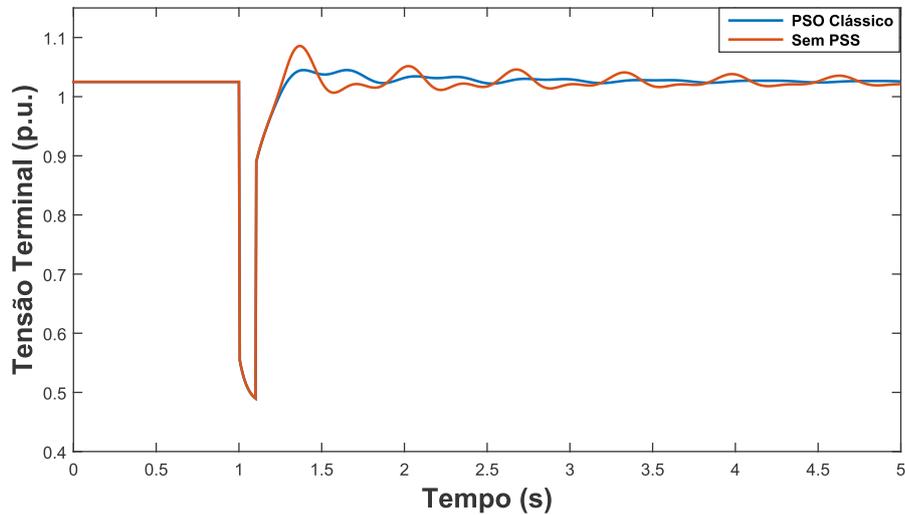
Parâmetro	Gerador 2	Gerador 3
K_A	37,2850	400
K_{stab}	1,2197	1
T_1	1	1
T_2	0,0356	0,0261

Fonte – Autor própria.

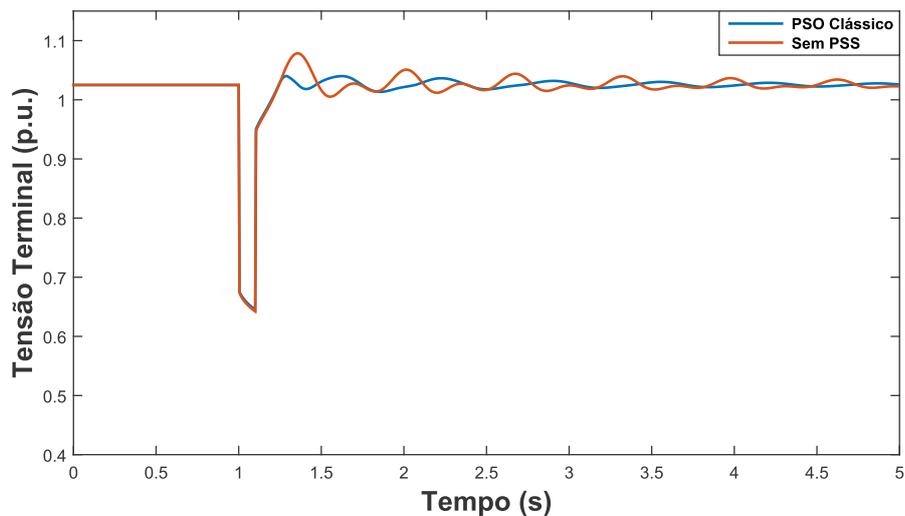
Nas Figuras 30 e 31 são ilustrados as respostas da tensão terminal e do ângulo do rotor dos geradores G2 e G3 para a falta trifásica na barra 7 utilizando os valores determinado pelo PSO clássico apresentados na Tabela 11 e também do sistema somente com regulador automático de tensão cujos os valores podem ser encontrados em Abido (2001) e são iguais a $K_{A_2} = K_{A_3} = 100$ e $T_{A_2} = T_{A_3} = 0,02s$. Optou-se pela comparação do sistema somente com AVR devido a dificuldade em encontrar na literatura um estudo para determinação simultânea dos parâmetros do AVR e PSS no sistema 9 barras do Anderson.

Figura 30 – Resposta da tensão terminal dos geradores G2 e G3 para os parâmetros do AVR e PSS determinados pelo PSO clássico.

(a) Tensão terminal do gerador 2.



(b) Tensão terminal do gerador 3.

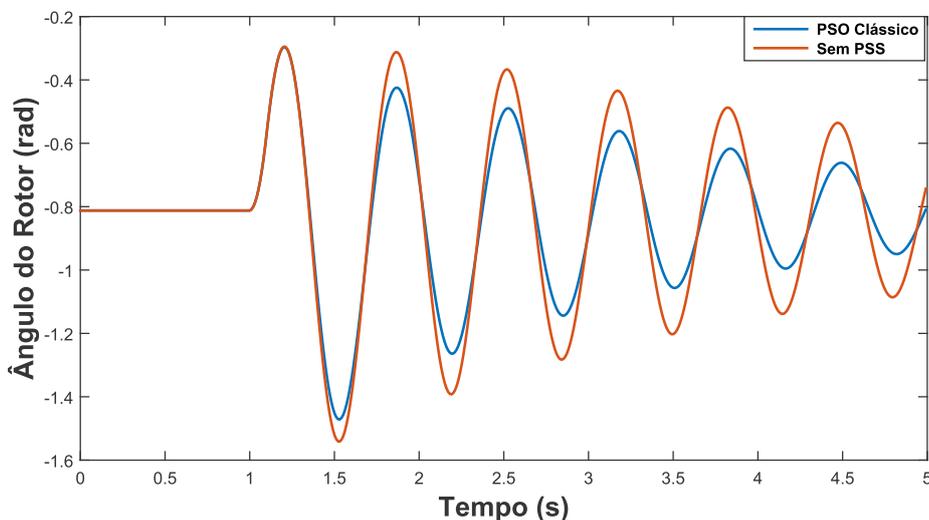


Fonte: Autor próprio.

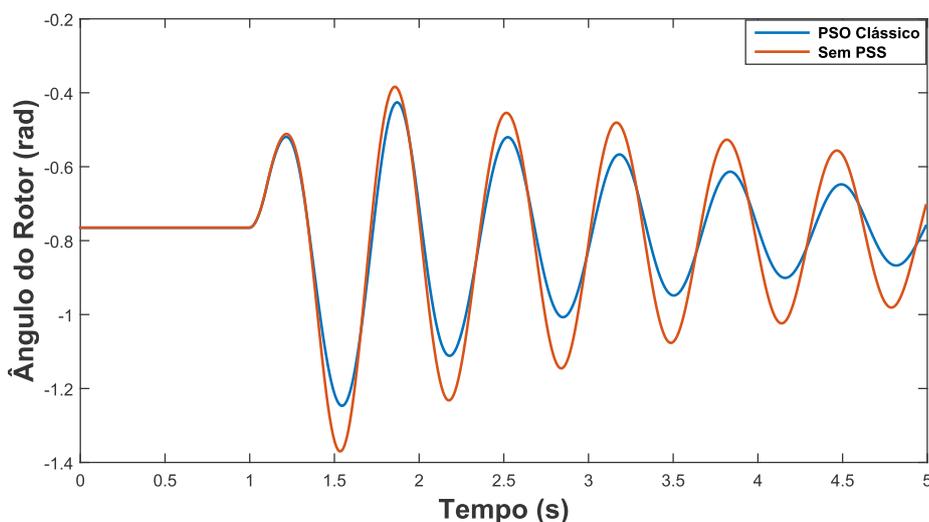
Como verificado nas Figuras 30a e 30b as respostas da tensão terminal para G2 e G3 com os parâmetros determinados pelo PSO clássico apresentam um melhor desempenho que do sistema somente com o AVR. Esta melhora proporciona uma acomodação mais rápida da tensão terminal junto com um maior amortecimento das oscilações das respostas dos geradores.

Figura 31 – Resposta do Ângulo do rotor dos geradores G2 e G3 para os parâmetros do AVR e PSS determinados pelo PSO clássico.

(a) Ângulo do rotor do gerador 2.



(b) Ângulo do rotor do gerador 3.



Fonte: Autor próprio.

Nas Figuras 31a e 31b observa-se que os parâmetros determinados pelo PSO clássico provocaram um maior amortecimento nas oscilações das respostas do ângulo do rotor do gerador G2 e G3. Esse amortecimento não é provocado apenas pela adição do PSS mas também pelo bom desempenho dos parâmetros determinados pelo PSO clássico.

Com relação às simulações realizadas foi verificado o desempenho do sistema para 100 execuções do algoritmo do PSO clássico. A Tabela 12 mostra os principais índices com relação à qualidade das simulações.

Tabela 12 – Análise da convergência da execução do algoritmo do PSO clássico.

Método	Função Objetivo			
	Maior	Menor	Média	DP
PSO Clássico	14,1578	12,0357	13,9374	0,69

Fonte – Autor própria.

6.2.2 PSO com Fator de Inércia Oscilatório

Apesar dos valores determinados pelo PSO Clássico apresentarem um bom desempenho como observado nas Figuras 30 e 31 quando se refere a repetibilidade das soluções encontradas, o algoritmo é passível de melhora como verificado através dos valores da média e desvio padrão fornecidos na Tabela 12. Tendo isso em vista será implementada a técnica de Otimização por Enxame de Partículas com fator de inércia oscilatório desenvolvida por Silveira *et al.* (2009) que tem como objetivo melhorar a qualidade dos parâmetros encontrados nas simulações.

Para implementação do algoritmo do PSO com fator de inércia oscilatório foram seguidos os mesmos procedimentos adotados na subseção anterior, a única mudança que ocorre está relacionado com o cálculo do fator de inércia onde apresentara uma forma oscilatória e seu valor é calculado pela equação (5.9).

O algoritmo do PSO com controle de inercia oscilatório obteve como melhor resposta para uma falta trifásica na barra 7 os valores dos parâmetros do AVR e PSS para os geradores G2 e G3 apresentados na Tabela 13:

Tabela 13 – Parâmetros do AVR e PSS determinados utilizando o PSO com fator de inércia oscilatório.

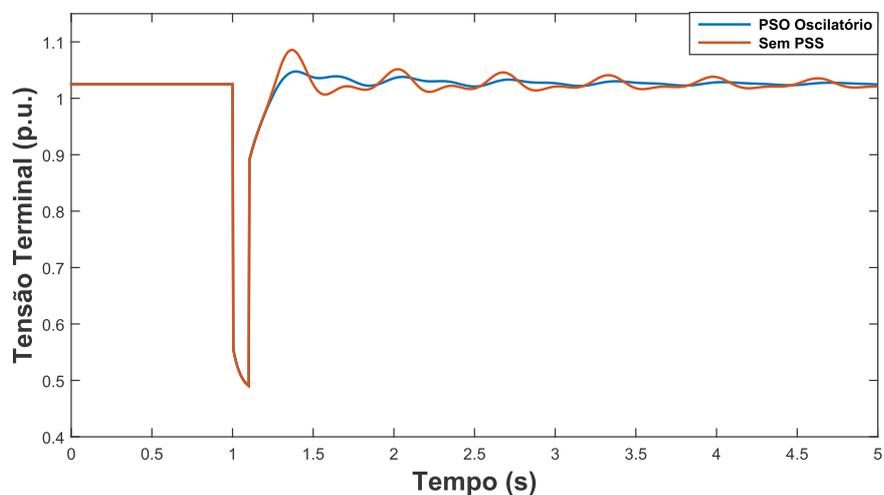
Parâmetro	Gerador 2	Gerador 3
K_A	39,7467	400
K_{stab}	49,1465	1
T_1	0,0868	1
T_2	0,0489	0,0305

Fonte – Autor própria.

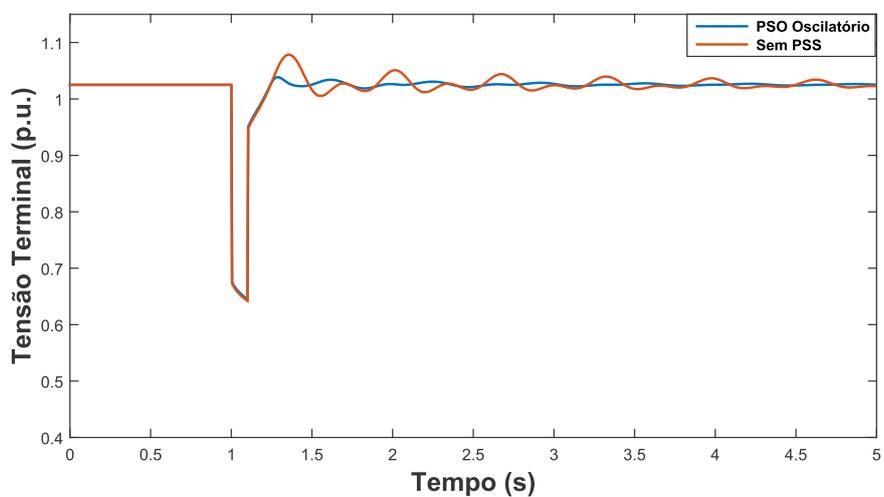
Nas Figuras 32 e 33 verifica-se as respostas da tensão terminal e do ângulo do rotor para os geradores G2 e G3 com os valores dos parâmetros obtidos na Tabela 13.

Figura 32 – Resposta da tensão terminal dos geradores G2 e G3 para os parâmetros do AVR e PSS determinados pelo PSO com fator de inércia oscilatório.

(a) Tensão terminal do gerador 2.



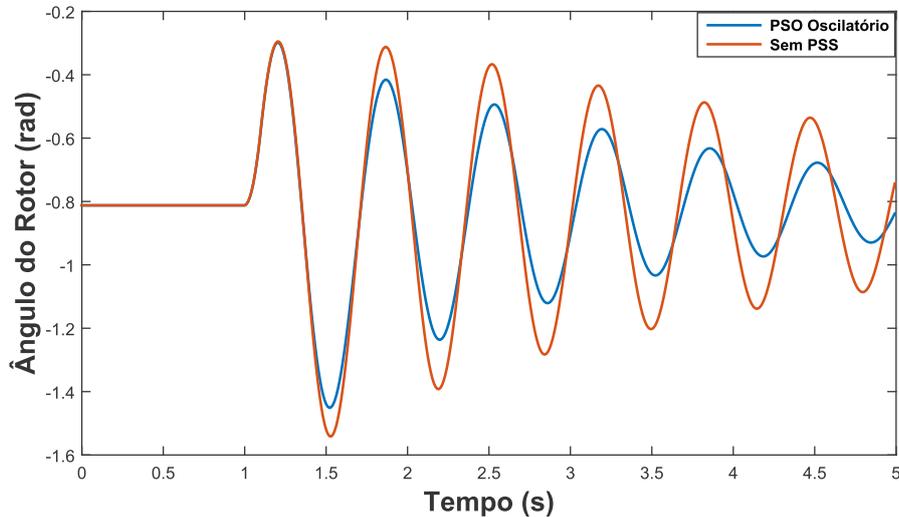
(b) Tensão terminal do gerador 3.



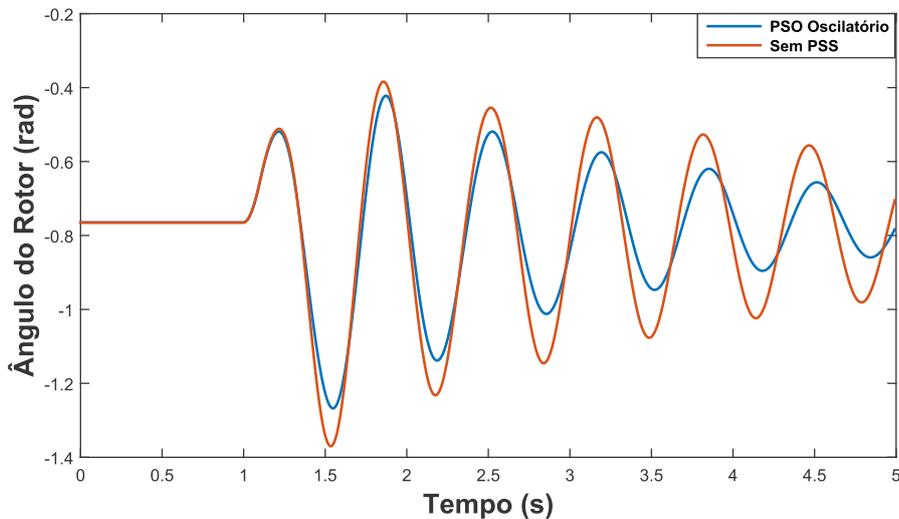
Fonte: Autor próprio.

Figura 33 – Resposta do Ângulo do rotor dos geradores G2 e G3 para os parâmetros do AVR e PSS determinados pelo PSO com fator de inércia oscilatório.

(a) Ângulo do rotor do gerador 2.



(b) Ângulo do rotor do gerador 3.



Fonte: Autor próprio.

Como observado nas Figuras 32 e 33 tanto as respostas da tensão terminal como a do ângulo do rotor apresentam uma melhor desempenho por meio do PSO com fator de inércia oscilatório. As tensões terminais de G2 e G3 determinados por esse método demonstram um maior amortecimento em sua resposta junto com uma estabilização mais rápida desses sinais. Para as respostas dos ângulos dos rotores de G2 e G3 também é notado um maior amortecimento das oscilações proporcionados pelo bom desempenho dos ajustes dos parâmetros. A Tabela 14 exhibe os parâmetros relacionados a qualidades das simulações para 100 execuções da técnica do PSO com fator de inércia oscilatório.

Tabela 14 – Análise da convergência da execução do algoritmo do PSO com fator de inércia oscilatório.

Método	Função Objetivo			
	Maior	Menor	Média	DP
PSO com fator de inércia oscilatório	14,5754	13,7565	14,1358	0,48

Fonte – Autor própria.

A modificação do fator de inércia oscilatório provocou um maior espalhamento nas partículas do enxame fazendo com estas ganhem energia, o que resulta em um número maior de tentativas de fugas de pontos de máximos locais fazendo com que ocorra uma melhora na qualidade das soluções encontradas. Essa melhoria pode ser verificado através dos valores de média e desvio padrão obtidos na Tabela 14.

6.2.3 Proposta do PSO com Fator de Inércia ODE

Assim como verificado para o sistema máquina barra infinito a modificação no fator de inércia PSO clássico possibilitou uma melhora no desempenho do sistema e na qualidade das simulações. Porém, a sintonia dos parâmetros do AVR e PSS ainda são susceptível de aperfeiçoamento do desempenho. Para conseguir esse benefício será realizada a implementação da técnica elaborada neste trabalho, onde o PSO apresenta um fator de inércia oscilatório com decaimento exponencial (ODE).

Através da utilização da técnica proposta é possível observar a sua performance para um sistema maior com vários geradores, barras e cargas o que também possibilita a sua validação para esses sistemas. A implementação da proposta seguiu os mesmos passos e dados utilizados para o técnica de PSO clássico. A mudança que ocorre esta relacionado com o fator de inércia onde passara a exibir uma forma oscilatória com decaimento exponencial e será calculada pela equação (5.13).

A Tabela 15 exhibe os valores dos parâmetros para o melhor desempenho da resposta determinado pela técnica proposta para uma falta trifásica na barra 7.

Tabela 15 – Parâmetros do AVR e PSS determinados utilizando o PSO com fator de inércia ODE.

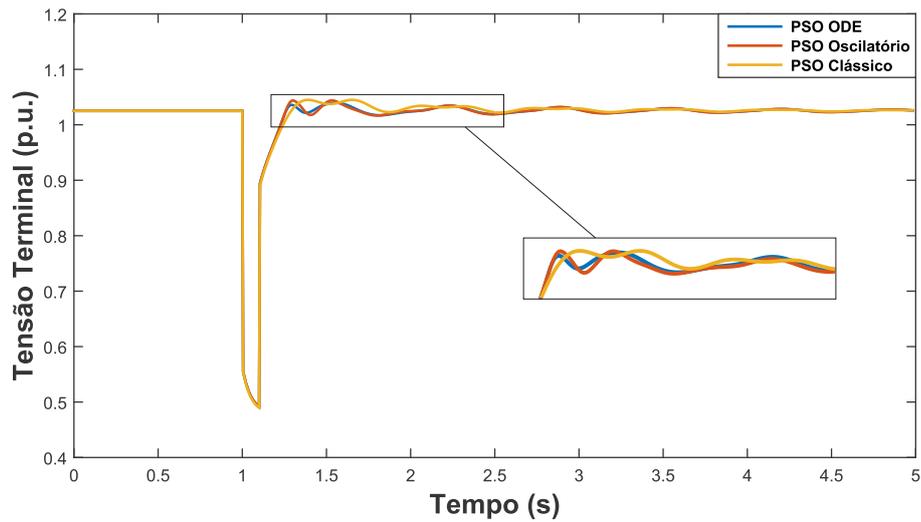
Parâmetro	Gerador 2	Gerador 3
K_A	400	34,7706
K_{stab}	1	50
T_1	0,6001	1
T_2	0,005	0,047

Fonte – Autor própria.

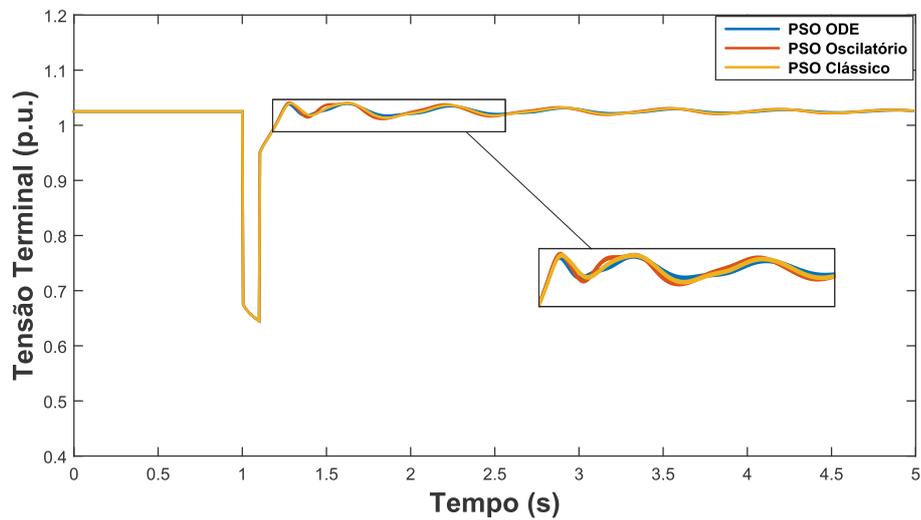
Nas Figuras 34 e 35 ilustram as curvas da respostas da tensão terminal e do ângulo do rotor para os G2 e G3 para diferentes tipos da técnica de Otimização por Enxame de Partícula.

Figura 34 – Resposta da tensão terminal dos geradores G2 e G3 para os parâmetros do AVR e PSS determinados pelo PSO com fator de inércia ODE.

(a) Tensão terminal do gerador 2.



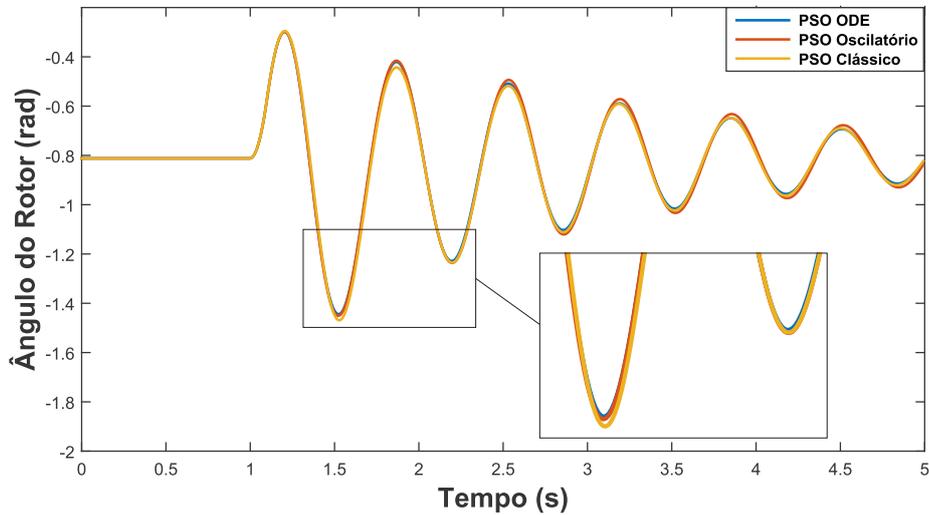
(b) Tensão terminal do gerador 3.



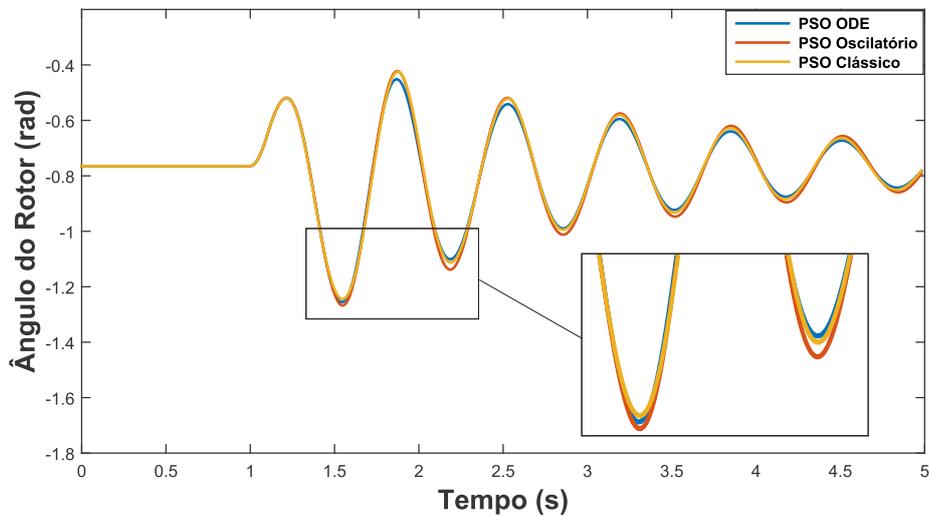
Fonte: Autor próprio.

Figura 35 – Resposta do Ângulo do rotor dos geradores G2 e G3 para os parâmetros do AVR e PSS determinados pelo PSO com fator de inércia ODE.

(a) Ângulo do rotor do gerador 2.



(b) Ângulo do rotor do gerador 3.



Fonte: Autor próprio.

Para uma melhor análise do desempenho das respostas dos métodos simulados para o sistema de 9 barras do Anderson, a Tabela 16 evidencia os principais indicadores da resposta temporal do sistema.

Tabela 16 – Análise comparativa entre os índices de desempenho por diferentes tipos de algoritmos do PSO.

Método PSO	Gerador	Tensão terminal				Ângulo do rotor			
		$t_r(s)$	$t_s(s)$	$E_{ss} (%)$	$M_p (5)$	$t_r(s)$	$t_s(s)$	$E_{ss} (%)$	$M_p (%)$
Clássico	G2	1,1417	1,2517	2,5856	4,4956	-	-	0,2460	228,1
Fator de inércia oscilatório		1,1517	1,2517	3,0245	4,3509	-	-	0,4267	226,3
Fator de inércia ODE		1,1416	1,2417	2,5890	3,9360	-	-	0,0802	225,7
Clássico	G3	1,1050	1,2117	2,3702	4,0054	-	-	1,7328	200,0
Fator de inércia oscilatório		1,1050	1,2117	2,3655	4,0567	-	-	2,6681	203,3
Fator de inércia ODE		1,1050	1,2117	2,6455	3,9099	-	-	1,6100	201,8

Fonte – Autor própria.

Através da análise comparativa das respostas temporais para uma falta trifásica na barra 7, percebe-se que o método do PSO com fator de inércia ODE apresentou uma pequena melhoria com respeito aos índices de sobressinal (M_p), tempo de resposta (t_r), tempo de acomodação (t_s) para tensão terminal de G2. Com relação a G3, tem-se que esse método mostrou um índice de M_p melhor, porém o seu valor de E_{ss} é o pior valor entre os métodos, o que equilibra o seu desempenho para esse gerador em comparação aos outros métodos. A combinação entre o desempenho da resposta nos dois geradores forneceu um maior valor para a função objetivo do método proposto como nota-se na Tabela 17.

Observa-se que as resposta do ângulo do rotor para os diferentes métodos de PSO não apresentam valores para os índices t_r e t_s , isso ocorre devido o formato de sua resposta que impossibilita esses cálculos. Enquanto, para o índice M_p o método proposto obteve um menor valor para G2, já para G3 o PSO clássico apresenta uma pequena melhora em relação a esse índice, porém ao longo da resposta nota-se que o método com fator de inércia ODE possui uma rápida melhora no amortecimento das oscilações fornecendo um menor valor de erro em regime permanente.

Uma observação em relação a análise para a resposta do ângulo do rotor é que na comparação realizada surgiu a presença do índice E_{ss} , isso aconteceu devido a resposta apresenta um valor de referência para essa variável, que é dado por seu valor antes da ocorrência da falta.

Para verificar o desempenho dos algoritmos com relação a convergência das execuções a Tabela 17 demonstra uma análise comparativa entre os métodos de PSO simulados no estudo de caso do sistema 9 barras do Anderson.

Tabela 17 – Análise da convergência da execução com diferentes tipos de algoritmos do PSO.

Método PSO	Função Objetivo			
	Maior	Menor	Média	DP
Clássico	14,1578	12,0357	13,9374	0,69
Fator de inércia oscilatório	14,5754	13,7565	14,1358	0,48
Fator de inércia ODE	14,7762	14,0978	14,5941	0,12

Fonte – Autor própria.

Percebe-se na Tabela 17 que o método proposto apresentou um melhor desempenho que o clássico e também que o do PSO com fator de inércia oscilatório, isso fica evidente através da observação do Maior valor encontrado da Função Objetivo na Tabela. Porém, a grande contribuição deste método está relacionado com a qualidade dos valores determinados na execuções do método proposto, isso pode ser notado através do menor valor de Desvio Padrão e do maior valor da Média encontradas para o conjunto de execuções de simulações realizadas. Logo, esse benefício quantifica a qualidade do método onde é possível possuir uma maior confiança nos parâmetros a serem determinados tendo em vista que a resposta a ser determinada apresenta um bom desempenho sem possuir grande variância entre suas simulações.

7 Conclusões

7.1 Conclusões

Neste trabalho foi proposto uma nova modificação no algoritmo do PSO clássico para projeto simultâneo dos parâmetros do AVR e PSS que estão associados ao controle de tensão e estabilidade de geradores síncronos. A método proposto tem como objetivo proporcionar uma melhor qualidade na busca do ponto ótimo para sintonia dos parâmetros assim como a melhoria da taxa de convergência das simulações.

Através da análise do ângulo do rotor e da tensão terminal para o sistema máquina barra infinito e no o sistema 9 barras do Anderson é possível concluir que o método proposto conseguiu apresentar uma melhor performance tanto em relação ao desempenho dos valores determinados como na questão da taxa de convergências das simulações. No SMIB, o método proposto apresentou um melhor desempenho em relação ao método clássico e o PSO clássico, porém quando comparando com o PSO com fator de inércia oscilatório o grande benefício esta relacionado com a melhora das características de convergência das simulações. Para o sistema 9 barras do Anderson, o PSO com fator de inércia ODE mostrou uma ligeira melhora na regulagem da tensão e no amortecimento das oscilações dos geradores G2 e G3, além de apresentar um menor desvio padrão e uma maior média entre as simulações.

O método proposto mostrou robustez tendo em vista que o seu desempenho foi notado para diferentes tipos de falta e também verificado tanto para um sistema SMIB como para sistema de maior porte onde apresentou um bom desempenho.

De acordo com os resultados obtidos, conclui-se que a proposta desenvolvida com fator de inércia ODE foi capaz de otimizar e melhorar a taxa de convergência das simulações, proporcionando um menor desvio padrão e um maior valor da média. Esses benefícios quantificam a qualidade e a confiabilidade desse método para a sintonia simultânea dos parâmetros do AVR e PSS aplicados ao sistema de excitação dos geradores em um sistema máquina barra infinita e para sistema 9 barras do Anderson, atendendo plenamente ao objetivo proposto neste trabalho.

7.2 Trabalhos Futuros

Como sugestão para trabalhos futuros:

- Utilização de outro algoritmo para comparação dos resultados obtidos;

- Aplicação em sistemas com maior dimensão, aumentar o número de parâmetros a serem descobertos;
- Estudo da melhoria da convergência entre simulações através de novas formas para o cálculo do fator de inércia;

Referências

- ABIDO, M. A. Particle swarm optimization for multimachine power system stabilizer design. In: IEEE. *Power Engineering Society Summer Meeting, 2001*. [S.l.], 2001. v. 3, p. 1346–1351. Citado 3 vezes nas páginas 27, 106 e 107.
- ANDERSON, P. M.; FOUAD, A. A. *Power System Control and Stability*. [S.l.]: Iowa: Iowa State University Press, 1994. Citado 8 vezes nas páginas 26, 31, 36, 65, 66, 90, 93 e 104.
- AWED-BADEEB, O. M. Damping of electromechanical modes using power system stabilizers (pss) case: Electrical yemeni network. *JOURNAL OF ELECTRICAL ENGINEERING-BRATISLAVA*, v. 57, n. 5, p. 291–295, 2006. Citado na página 26.
- BA-MUQABEL, A. A.; ABIDO, M. A. Review of conventional power system stabilizer design methods. *GCC Conference, 206 IEEE*, IEEE, p. 1–7, 2006. Citado na página 36.
- BASHIR, Z. A.; EL-HAWARY, M. E. Applying wavelets to short-termload forecasting using pso-based neural networks. *IEEE Transactions on Power Systems*, IEEE, v. 24, n. 1, p. 20–27, 2009. Citado na página 81.
- BRETAS, N. G.; ALBERTO, L. F. C. *Estabilidade transitória em sistema eletroenergéticos*. [S.l.]: EESC/USP, 2000. Citado na página 31.
- CALDEIRA, N. S. *Aplicação de Estabilizadores de Sistema de Potência em Reguladores de Velocidades e Turbinas*. Dissertação (Trabalho de Conclusão de Curso), 2009. Citado 2 vezes nas páginas 36 e 38.
- CARDOSO, M. A. *Metodologia para Projeto de Controladores de Amortecimento para Sistemas Elétricos de Potência*. Dissertação (Trabalho de Conclusão de Curso) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2011. Citado na página 24.
- CHATURVEDI D. K., K. P. K. Performance of a generalized neuron-based pss in a multimachine power system. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, IEEE, v. 19, n. 3, p. 625–632, 2004. Citado na página 26.
- CLERC, M. The swarm and the queen: towards a deterministic and adaptive particle swarm optimization. In: IEEE. *Evolutionary Computation, 1999. CEC 99. Proceedings of the 1999 Congress on*. [S.l.], 1999. v. 3, p. 1951–1957. Citado na página 81.
- DAS, T. K.; VENAYAMOORTHY, G. K. Optimal design of power system stabilizers using a small population based pso. *IEEE PES GENERAL MEETING*, IEEE Power and Energy Society, 2006. Citado na página 27.
- DEMELLO, F. P.; CONCORDIA, C. Concepts of synchronous machine stability as affected by excitation control. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Citeseer, PAS-88, n. 4, p. 316–329, 1969. Citado 4 vezes nas páginas 26, 61, 62 e 63.
- DEMELLO, F. P.; LASKOWSKI, T. F. Concepts of power system dynamic stability. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, IEEE, PAS-94, n. 3, p. 827–833, 1975. Citado na página 26.

- DO-BOMFIM, A. L. B.; TARANTO, G. N.; FALCAO, D. M. Simultaneous tuning of power system damping controllers using genetic algorithms. *IEEE Transactions on Power Systems*, IEEE, v. 15, n. 1, p. 163–169, 2000. Citado na página 27.
- EBERHART, R. C.; SHI, Y. Comparison between genetic algorithms and particle swarm optimization. In: SPRINGER. *International conference on evolutionary programming*. [S.l.], 1998. p. 611–616. Citado na página 82.
- EBERHART, R. C.; SHI, Y. Comparing inertia weights and constriction factors in particle swarm optimization. In: IEEE. *Evolutionary Computation, 2000. Proceedings of the 2000 Congress on*. [S.l.], 2000. v. 1, p. 84–88. Citado na página 81.
- EL-ZONKOLY, A. M. Optimal tuning of power systems stabilizers and avr gains using particle swarm optimization. *Expert Systems with Applications*, Elsevier, v. 31, n. 3, p. 551–557, 2006. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 74.
- ENGELBRECHT, A. P. *Computational Intelligence: An Introduction*. [S.l.]: John Wiley and Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, England, 2007. Citado 2 vezes nas páginas 77 e 80.
- FALEHI, A. D.; ROSTAMI, M.; MEHRJADI, H. Transient stability analysis of power system by coordinated pss-avr design based on pso technique. *Engineering, Scientific Research Publishing*, v. 3, n. 05, p. 478, 2011. Citado na página 27.
- FIGUEIREDO, E. M. do N. *Algoritmo Baseado em Enxame de Partículas para Otimização de Problemas com Muitos Objetivos*. Dissertação (Trabalho de Conclusão de Curso) — Universidade Federal de Pernambuco, 2013. Citado na página 78.
- GAING, Z. L. A particle swarm optimization approach for optimum design of pid controller in avr system. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, IEEE, v. 19, n. 2, p. 384–391, 2004. Citado 4 vezes nas páginas 25, 27, 96 e 106.
- HADJI, H. E.; BABES, M. Integrating tabu search in particle swarm optimization for the frequency assignment problem. *China Communications*, IEEE, v. 13, n. 3, p. 137–155, 2016. Citado na página 81.
- HAMMONS, T.; WINNING, D. Comparisons of synchronous-machine models in the study of the transient behaviour of electrical power systems. In: IET. *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*. [S.l.], 1971. v. 118, n. 10, p. 1442–1458. Citado na página 54.
- HEFFRON, W. G.; PHILLIPS, R. A. Effect of modern amplidyne voltage regulator on underexcited operation of large turbine generators. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems*, IEEE, v. 71, n. 1, p. 692–697, 1952. Citado na página 26.
- HENDTLASS, T. Particle swarm optimisation and high dimensional problem spaces. In: IEEE. *Evolutionary Computation, 2009. CEC'09. IEEE Congress on*. [S.l.], 2009. p. 1988–1994. Citado na página 81.
- JAMIAN, J. *et al.* Global particle swarm optimization for high dimension numerical functions analysis. *Journal of Applied Mathematics*, Hindawi, 2014. Citado na página 81.

- JIAO, B.; LIAN, Z.; GU, X. A dynamic inertia weight particle swarm optimization algorithm. *Chaos, Solitons & Fractals*, Elsevier, v. 37, n. 3, p. 698–705, 2008. Citado na página 81.
- JUANG, C.; WANG, C. A self-generating fuzzy system with ant and particle swarm cooperative optimization. *Expert Systems with Applications*, Elsevier, v. 36, n. 3, p. 5362–5370, 2009. Citado na página 81.
- JUNIOR, J. N. R. S. Projeto de estabilizadores de usinas termoeletricas a ciclo combinado. *Congresso Brasileiro de Eficiência Energética*, Associação Brasileira de Eficiência Energética, v. 2, 2007. Citado na página 24.
- JUNIOR, J. N. R. S. *Sintonia Ótima de Regulador Automático de Tensão e Estabilizador de Sistema de Potência Utilizando Algoritmo de Otimização por Enxame de Partículas*. Dissertação (Trabalho de Conclusão de Curso) — Universidade Federal do Ceará, 2012. Citado 10 vezes nas páginas 28, 45, 80, 91, 93, 94, 96, 97, 98 e 103.
- KAHOULI, A. *et al.* A genetic algorithm pss and avr controller for electrical power system stability. In: IEEE. *2009 6th International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices*. [S.l.], 2009. p. 1–6. Citado na página 28.
- KENNEDY, J.; EBERHART, R. C. Particle swarm optimization. In *Proceedings of the 1995 IEEE International Conference on Neural Networks*, IEEE, v. 4, n. 1, p. 1942–1948, 1995. Citado 3 vezes nas páginas 25, 74 e 75.
- KENNEDY, J.; EBERHART, R. C.; SHI, Y. Swarm intelligence. *San Francisco: Morgan Kaufmann/Academic Press*, Elsevier, 2001. Citado 3 vezes nas páginas 75, 79 e 80.
- KHEZRI, R.; BEVRANI, H. Avr and pss coordinated based fuzzy approach for transient stability enhancement. In: IEEE. *2015 23rd Iranian Conference on Electrical Engineering*. [S.l.], 2015. p. 1659–1664. Citado na página 28.
- KHEZRI, R.; BEVRANI, H. Stability enhancement in multi-machine power systems by fuzzy-based coordinated avr-pss. *International Journal of Energy Optimization and Engineering (IJEEO)*, IGI Global, v. 4, n. 2, p. 36–50, 2015. Citado na página 28.
- KUNDUR, P. *Power system stability and control*. [S.l.]: McGraw-hill New York, 1994. v. 7. Citado 15 vezes nas páginas 24, 26, 35, 37, 40, 41, 46, 47, 62, 63, 64, 65, 69, 72 e 73.
- KUNDUR, P. *et al.* Definition and classification of power system stability. *IEEE transactions on Power Systems*, IEEE, v. 19, n. 2, p. 1387–1401, 2004. Citado 4 vezes nas páginas 31, 32, 33 e 34.
- LANDGRAF, T. G. *Análise e Estimção de Parâmetros de Geradores Síncronos via Análise de Sensibilidade de Trajetória*. Dissertação (Trabalho de Conclusão de Curso) — Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2014. Citado na página 40.
- LARSEN, E. V.; SWANN, D. A. Applying power system stabilizers. parts i, ii and iii. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-100, n. 6, p. 3017–3034, 1981. Citado 3 vezes nas páginas 26, 38 e 39.

- LVBJERG, M.; RASMUSSEN, T.; KRINK, T. Hybrid particle swarm optimiser with breeding and subpopulations. In: MORGAN KAUFMANN PUBLISHERS INC. *Proceedings of the 3rd Annual Conference on Genetic and Evolutionary Computation*. [S.l.], 2001. p. 469–476. Citado na página 81.
- MACHOWSKI, J.; BIALEK, J.; BUMBY, J. *Power system dynamics: stability and control*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 37 e 39.
- MANUABA, I. *et al.* Coordinated tuning of pid-based pss and avr using bacterial foraging-psotvac-de algorithm. *Control and Intelligent Systems*, v. 43, n. 3, 2015. Citado na página 28.
- MANUABA, I. *et al.* Coordination of pid based power system stabilizer and avr using combination bacterial foraging technique—particle swarm optimization. In: IEEE. *2011 Fourth International Conference on Modeling, Simulation and Applied Optimization*. [S.l.], 2011. p. 1–7. Citado na página 28.
- MARQUES, V. E. L. *Ajuste de parâmetros para modelos típicos de sistemas de excitação, recorrendo à resposta em frequência do modelo*. Dissertação (Trabalho de Conclusão de Curso) — Faculdade de Engenharia da Universidade de Porto, 2011. Citado na página 65.
- MIRANDA, V.; FONSECA, N. EPSO—evolutionary particle swarm optimization, a new algorithm with applications in power systems. *Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002: Asia Pacific. IEEE/PES*, IEEE, v. 2, p. 745–750, 2002. Citado na página 81.
- MOHANTY, A.; BEHERA, R.; PANIGRAHI, B. Fuzzified philip_heffron model power system stabilizer for improvisation of voltage stability. In: IEEE. *2016 International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT)*. [S.l.], 2016. p. 1932–1935. Citado na página 28.
- MOTA, W. S. *Simulação de Transitórios Eletromecânicos em Sistemas de Potência*. [S.l.]: Campina Grande: Epgraf, 2006. Citado 10 vezes nas páginas 24, 26, 32, 34, 35, 42, 61, 70, 71 e 94.
- NASCIMENTO, J. A. *et al.* Modelagem dos parâmetros dos estabilizadores de sistema de potência de uma termelétrica a ciclo combinado. *Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica*, Anais do IV Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica, 2007. Citado na página 37.
- NETO, C. M. d. S. *Estabilizador de Sistema de Potência para Máquinas Síncronas de Polos Salientes Utilizando a Transformada Wavelet*. Dissertação (Trabalho de Conclusão de Curso) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2013. Citado na página 36.
- NOGUEIRA, F. G. *Desenvolvimento de um Estabilizador de Sistema de Potência Via Malha de Velocidade Aplicada à uma Unidade da UTE de Santana*. Dissertação (Trabalho de Conclusão de Curso) — Universidade Federal do Pará, 2008. Citado na página 38.
- OGATA, K. *Engenharia de Controle Moderno*. [S.l.]: 4. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2003. Citado na página 66.
- OLIVEIRA, R. V. *Projeto de controladores de amortecimento para sistemas elétricos de potência*. Dissertação (Trabalho de Conclusão de Curso) — Escola de Engenharia de São Carlos, 2006. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 28.

- ONG, C. M. *Dynamic simulation of electric machinery: using MATLAB/SIMULINK*. [S.l.]: Prentice hall PTR Upper Saddle River, New Jersey, 1998. v. 5. Citado na página 26.
- PEI, Z.; HUA, X.; HAN, J. The clustering algorithm based on particle swarm optimization algorithm. In: IEEE. *Intelligent Computation Technology and Automation (ICICTA), 2008 International Conference on*. [S.l.], 2008. v. 1, p. 148–151. Citado na página 81.
- REPORT, I. C. 421.5-2016 - iee recommended practice for excitation system models for power system stability studies. *IEEE Transactions on power apparatus and systems*, IEEE, p. 1–194, 2016. Citado na página 68.
- ROSSI, C. H. *Metodologia de projeto de controladores de amortecimento para posicionamento parcial de polos de modelos multimáquinas de sistemas de potência*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2012. Citado na página 26.
- SANTOS, F. M. P. *Algoritmo Enxame de Partícula Evolutivo para o problema de coordenação de réles de sobrecorrente direcionais em sistemas elétricos de potência*. Dissertação (Trabalho de Conclusão de Curso) — Universidade Federal de São Carlos, 2013. Citado na página 25.
- SAUER, P. W.; PAI, M. A. *Power System Dynamics and Stability*. [S.l.]: New Jersey: Prentice Hall, 1998. Citado na página 26.
- SELVABALA, B.; DEVARAJ, D. Co-ordinated design of avr-pss using multi objective genetic algorithm. In: SPRINGER. *International Conference on Swarm, Evolutionary, and Memetic Computing*. [S.l.], 2010. p. 481–493. Citado na página 28.
- SELVABALA, B.; DEVARAJ, D. Co-ordinated tuning of avr-pss using differential evolution algorithm. In: IEEE. *2010 Conference Proceedings IPEC*. [S.l.], 2010. p. 439–444. Citado na página 28.
- SERAPIAO, A. B. d. S. Fundamentos de otimização por inteligência de enxames: uma visão geral. *Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automatica*, SciELO Brasil, v. 20, n. 3, p. 271–304, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 75.
- SHI, Y.; EBERHART, R. A modified particle swarm optimizer. In: IEEE. *Evolutionary Computation Proceedings, 1998. IEEE World Congress on Computational Intelligence., The 1998 IEEE International Conference on*. [S.l.], 1998. p. 69–73. Citado 5 vezes nas páginas 78, 80, 81, 82 e 84.
- SILVEIRA, T. *et al.* Controle de inércia não monotônico na otimização por enxame de partículas. *Scientia*, v. 20, n. 2, p. 69–82, 2009. Citado 7 vezes nas páginas 81, 82, 83, 84, 85, 99 e 110.
- SOUZA, F. M. F. de. *Projeto de estabilizadores de sistemas de potência de usinas termelétricas a ciclo combinado*. Dissertação (Trabalho de Conclusão de Curso) — Universidade Federal do Ceará, 2007. Citado 4 vezes nas páginas 24, 26, 38 e 70.
- STEINMETZ, C. P. Power control and stability of electric generating stations. *AIEE Transactions*, v. 39, p. 1215–1287, 1920. Citado na página 26.

- UMANS, S. D. *Máquinas Elétricas de Fitzgerald e Kingsley-7*. [S.l.]: AMGH Editora, 2014. Citado na página 40.
- USMAN, J. *et al.* Coordinated avr-pss for transient stability using modified particle swarm optimization. *Jurnal Teknologi*, v. 67, n. 3, 2014. Citado na página 28.
- WICKRAMASINGHE, U.; LI, X. Choosing leaders for multi-objective pso algorithms using differential evolution. In: SPRINGER. *Asia-Pacific Conference on Simulated Evolution and Learning*. [S.l.], 2008. p. 249–258. Citado na página 81.
- YANG, X. *et al.* A modified particle swarm optimizer with dynamic adaptation. *Applied Mathematics and Computation 189 (2007) 1205–1213*, Elsevier, v. 189, n. 2, p. 1205–1213, 2007. Citado na página 81.
- YOSHIDA, H. *et al.* A particle swarm optimization for reactive power and voltage control considering voltage security assessment. *IEEE Trans Power Systems*, IEEE, v. 15, n. 4, p. 1232–1239, 2000. Citado na página 75.
- YU, Y. *Electric Power Systems Dynamics*. [S.l.]: New York: Academic Press, 1983. Citado na página 26.

Anexos

ANEXO A – Dados técnicos do SMIB.

A.1 Gerador a Gás (G1 e G2)

Tabela 18 – Dados técnicos do gerador a gás de 131,6 MVA.

Dados	Sím.	Valor	Un
Saída nominal	S_n	131,6	MVA
Potência nominal	P_n	111,9	MW
Tensão terminal nominal	U_n	13,8	kV
Fator de potência nominal	$\cos\varphi_n$	0,85	-
Frequência	f	60	Hz
Velocidade Nominal	n_n	3.600	rpm
Reatância síncrona no eixo direto	x_d	1,81	p.u.
Reatância transitória no eixo direto	x'_d	0,18	p.u.
Reatância subtransitória no eixo direto	x''_d	0,14	p.u.
Reatância síncrona no eixo em quadratura	x_q	1,68	p.u.
Reatância transitória no eixo em quadratura	x'_q	0,3	p.u.
Reatância subtransitória no eixo em quadratura	x''_q	0,15	p.u.
Reatância de dispersão	x_l	0,12	p.u.
Const. de tempo transitória em circuito aberto no eixo direto	T'_{d0}	7,89	s
Const. de tempo transitória em curto circuito no eixo direto	T'_d	0,8	s
Const. de tempo subtransitória em circuito aberto no eixo direto	T''_{d0}	0,018	s
Const. de tempo subtransitória em curto circuito no eixo direto	T''_d	0,014	s
Const. de tempo transitória em circuito aberto no eixo em quadratura	T'_{q0}	0,76	s
Const. de tempo transitória em curto circuito no eixo em quadratura	T'_q	0,14	s
Const. de tempo subtransitória em circuito aberto no eixo em quadratura	T''_{q0}	0,027	s
Const. de tempo subtransitória em curto circuito no eixo em quadratura	T''_q	0,014	s
Constante de inércia	H	1,57	s

Fonte – Autor própria.

A.2 Gerador a Vapor (G3)

Tabela 19 – Dados técnicos do gerador a vapor de 144,6 MVA.

Dados	Sím.	Valor	Un
Saída nominal	S_n	144,6	MVA
Potência nominal	P_n	122,1	MW
Tensão terminal nominal	U_n	13,8	kV
Fator de potência nominal	$\cos\varphi_n$	0,85	-
Frequência	f	60	Hz
Velocidade Nominal	n_n	3.600	rpm
Reatância síncrona no eixo direto	x_d	2,02	p.u.
Reatância transitória no eixo direto	x'_d	0,27	p.u.
Reatância subtransitória no eixo direto	x''_d	0,20	p.u.
Reatância síncrona no eixo em quadratura	x_q	1,92	p.u.
Reatância transitória no eixo em quadratura	x'_q	0,46	p.u.
Reatância subtransitória no eixo em quadratura	x''_q	0,22	p.u.
Reatância de dispersão	x_l	0,14	p.u.
Const. de tempo transitória em circuito aberto no eixo direto	T'_{d0}	7,8	s
Const. de tempo transitória em curto circuito no eixo direto	T'_d	0,9	s
Const. de tempo subtransitória em circuito aberto no eixo direto	T''_{d0}	0,04	s
Const. de tempo subtransitória em curto circuito no eixo direto	T''_d	0,03	s
Const. de tempo transitória em circuito aberto no eixo em quadratura	T'_{q0}	2,5	s
Const. de tempo transitória em curto circuito no eixo em quadratura	T'_q	0,6	s
Const. de tempo subtransitória em circuito aberto no eixo em quadratura	T''_{q0}	0,15	s
Const. de tempo subtransitória em curto circuito no eixo em quadratura	T''_q	0,07	s
Constante de inércia	H	1,78	s

Fonte – Autor própria.

ANEXO B – Dados técnicos do sistema 9 barras do Anderson.

Esse Anexo apresenta os dados utilizados para a simulação do sistema 9 barras do Anderson, foi considerado os seguintes valores bases para a tensão e potência: $V_{base} = 230$ kV e $P_{base} = 100$ MVA.

B.1 Dados dos Geradores

Tabela 20 – Dados dos geradores.

Dados	Gerador 1	Gerador 2	Gerador 3
Potência Aparente Nominal (MVA)	247,5	192,0	128,0
Tensão Nominal (kV)	16,5	18,0	13,8
Fator de Potência ($\cos\varphi_n$)	1	0,85	0,85
Reatância síncrona no eixo direto (p.u.)	0,1460	0,8958	1,3125
Reatância transitória no eixo direto (p.u.)	0,0608	0,1198	0,1813
Reatância subtransitória no eixo direto (p.u.)	0,05	0,1000	0,1800
Reatância síncrona no eixo em quadratura (p.u.)	0,0969	0,8958	0,2500
Reatância transitória no eixo em quadratura (p.u.)	0,0969	0,1969	0,0742
Reatância subtransitória no eixo em quadratura (p.u.)	0,09	0,1000	0,2000
Cons. de tempo transitória em circuito aberto no eixo direto (s)	8,96	6,00	5,89
Cons. de tempo subtransitória de circuito aberto no eixo direto. (s)	0,00	0,075	0,075
Cons. de tempo transitória de circuito aberto no eixo em quadratura (s)	0,0152	0,535	0,6
Const. de tempo subtransitória de circuito aberto no eixo em quadratura (s)	0,024225	0,075	0,075
Reatância de dispersão (p.u.)	0,0336	0,0521	0,0742
Constante de inércia (MW s)	2364	640	301

Fonte – Autor própria.

B.2 Dados das Linhas de Transmissão

Tabela 21 – Dados das linhas de transmissão.

Da Barra	Para Barra	Resistência (p.u.)	Reatância (p.u.)	Susceptância (p.u.)
1	4	0,00000	0,05760	0,00000
2	7	0,00000	0,06250	0,00000
3	9	0,00000	0,05860	0,00000
4	5	0,01000	0,08500	0,17600
4	6	0,01700	0,09200	0,15800
5	7	0,03200	0,16100	0,30600
6	9	0,03900	0,17000	0,35800
7	8	0,00850	0,07200	0,14900
8	9	0,01190	0,10080	0,20900

Fonte – Autor própria.

B.3 Dados dos Barramentos

Tabela 22 – Dados dos barramentos do sistema.

Número da Barra	Tensão Final (p.u.)	Carga (MW)	Carga (MVar)	Geração (MW)	Geração (Mvar)	Tensão Nominal (KV)
1	1,04	0	0	0	0	16,5
2	1,025	0	0	163	0	18,0
3	1,025	0	0	85	0	13,8
4	1	0	0	0	0	230
5	1	125	50	0	0	230
6	1	90	30	0	0	230
7	1	0	0	0	0	230
8	1	100	35	0	0	230
9	1	0	0	0	0	230

Fonte – Autor própria.

B.4 Dados dos Transformadores

Tabela 23 – Dados dos transformadores do sistema.

Transformador	Da Barra	Para Barra	Tensão HV (kV)	Tensão LV (kV)	Reatância (p.u.)
T1	1	4	230	16,5	0,0576
T2	2	7	230	18,0	0,0625
T3	3	9	230	13,8	0,0586

Fonte – Autor própria.