

UNIVERSIDADE SANTA CECÍLIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

RAPHAEL ADAMELK BISPO DE OLIVEIRA

**MODELO DE CONTROLE ADAPTATIVO DE EXCITAÇÃO DE GERADOR
SÍNCRONO BASEADO EM LÓGICA PARACONSISTENTE**

SANTOS – SP
2016

RAPHAEL ADAMELK BISPO DE OLIVEIRA

**MODELO DE CONTROLE ADAPTATIVO DE EXCITAÇÃO DE GERADOR
SÍNCRONO BASEADO EM LÓGICA PARACONSISTENTE**

Dissertação apresentada à Universidade Santa Cecília como parte dos requisitos para a obtenção do título de mestre no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, sob a orientação do Prof. Dr. João Inácio da Silva Filho.

SANTOS – SP

2016

Autorizo a reprodução parcial ou total deste trabalho, por qualquer que seja o processo, exclusivamente para fins acadêmicos e científicos.

Oliveira, Raphael Adamelk Bispo.
Modelo de Controle Adaptativo de Excitação de Gerador síncrono Baseado em Lógica Paraconsistente. Raphael Adamelk Bispo de Oliveira. 2016

n.páginas
114 p.

Orientador: Prof. Dr. João Inácio da Silva Filho

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Santa Cecília, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Santos, SP, 2016.

1. Gerador síncrono 2.Lógica Paraconsistente. 3. Lógica Paraconsistente Anotada. 4. Controle preditivo paraconsistente. 5. Controle elétrico de Excitação.

I.Da Silva Filho, João Inácio, orient. II.Titulo: Modelo de Controle Adaptativo de Excitação de Gerador síncrono Baseado em Lógica Paraconsistente

Elaborada pelo SIBi – Sistema Integrado de Bibliotecas – Unisanta

*Aos meus pais, que me deram suporte em toda a jornada.
Aos colegas, professores e funcionários da Universidade, cujo apoio e
dedicação foram indispensáveis à conclusão desta etapa. .*

AGRADECIMENTO

Agradeço aos meus pais pelo cuidado, inesgotável apoio e incentivo, sem os quais seria impossível concluir esta jornada. Aos professores da Universidade, que com seu trabalho e empenho, me conduziu até aqui. Aos demais colaboradores da Instituição, que fazem do servir um lema a ser seguido sempre. Em especial agradeço ao Prof. Dr. João Inácio da Silva Filho, pelo tempo dispensado na orientação e na assistência a este trabalho, sempre disposto a ajudar o quanto possível.

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de Controle Preditivo baseado em Modelo (MPC - *Model Predictive Control*), utilizando a Lógica Paraconsistente Anotada com anotação de dois valores (LPAv2) como ferramenta para buscar o controle de excitação ótimo para o gerador síncrono. Utilizando-se a ferramenta computacional MATLAB®, foi construído uma Rede de Análise Paraconsistente (RAP) composta por algoritmos denominados Nós de Análise Paraconsistente (NAP). A configuração utilizada para o Controle Preditivo é composta de uma Rede de Análise Paraconsistente que consiste em três Nós de Análises Paraconsistentes. Os NAPs 1 e 2 tem as variações de velocidade, e as variações da tensão nos terminais do gerador síncrono como fonte de informações para gerar os graus de evidência para a análise LPA2v. O NAP 3 trata somente das variações de tensão. A partir dos graus de evidência, os NAPs 1 e 2 tratam das contradições do MPC quanto ao controle de tensão e amortecimento das oscilações eletromecânicas, gerando um grau de evidência resultante que controla a alteração dos pesos do mecanismo de auto ajuste do MPC relacionados à velocidade e o torque eletromagnético do gerador. O terceiro NAP tem como graus de evidência para a análise LPA2v, as variações da tensão de terminal do gerador, e gera um grau de evidência resultante responsável pelo ajuste do peso relacionado ao controle da tensão nos terminais do gerador. A estrutura algorítmica da rede se configura um Controlador Paraconsistente Preditivo baseado em Modelo que denominou-se de Modelo CP-LPA2v. A partir dos resultados obtidos com a aplicação do CP-LPA2v, foram feitas comparações de resultados de desempenho com relação aos controles AVR (*Automatic Voltage Regulator*) em conjunto com o PSS (*Power System Stabilizer*) e MPC convencional. Discute-se nesta Dissertação as vantagens e desvantagens do controle CP-LPA2v em relação a estes dois controles clássicos.

Palavras-Chave: Gerador Síncrono. Controle Preditivo. Lógica Paraconsistente. Controle Preditivo Paraconsistente. Controle de Excitação. Estabilidade a Pequenos Sinais.

ABSTRACT

This work presents the development of a MPC (Model Predictive Control), using Paraconsistent Annotated Logic with annotation of two values (PAL2v), as tool to obtain an optimum excitation control for a synchronous generator. Using the computational tool MATLAB®, a Paraconsistent Network Analysis (PNA) consisted of algorithms called Paraconsistent Analysis Nodes (PAN) were conceived. The configuration used in the Predictive Control, is composed by a Paraconsistent Network Analysis, consisting on three Paraconsistent Analysis Nodes. PAN 1 and PAN 2 have the synchronous generator speed and terminal voltage deviation, as source to generate evidence degrees for PAL2v. The PAN 3 deals only with the voltage deviations. From the evidence degrees, PAN 1 and PAN 2, deals with contradictions of the MPC, that are related to the voltage control and the electromechanical oscillations damping, generating a resultant evidence degree that controls the adjustment of the weights of the self-tuning mechanism of the MPC, related to the speed and electromagnetic torque. The third PAN has, as evidence degree for the PAL2v analysis, deviations of the generator terminal voltage. It generates a resultant evidence degree responsible for de adjustment of the weight related to the terminal voltage control. The algorithm structure of the Network consists on a Paraconsistent Model Predictive Controller called in this Dissertation MPC-PAL2v. From the results obtained applying the MPC-PAL2v, comparisons were made with respect of results presented by a combination of AVR (Automatic Voltage Regulator) and a PSS (Power System Stabilizer), and results presented by a conventional MPC. This Dissertation discusses the advantages and disadvantages of the MPC-PAL2v related to the conventional controllers.

Keywords: Synchronous Generator. Predictive Control. Paraconsistent Logic. Excitation Control. Small Signal Stability.

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1 – Análise das Variações de Tensão e Velocidade	47
Tabela 5.2 – Valores dos Pesos.....	48
Tabela 5.3 – Dados do Gerador	53
Tabela 5.4 – Dados do Gerador Síncrono.....	53
Tabela 5.5 – Dados do AVR e PSS.....	53

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Estrutura Genérica de um AVR.....	22
Figura 2.2 – Estrutura Básica de um PSS.....	23
Figura 3.1 – Diagrama de Blocos Simplificado do CPBM	26
Figura 3.2 – Processo de Predição do CPBM.....	28
Figura 4.1 – Distância D no QUPC.....	32
Figura 4.2 – Representação Esquemática de um NAP	34
Figura 4.3 – Representação Esquemática de uma RAP	36
Figura 5.1 – Diagrama de Blocos do Controle de Excitação Preditivo LPA2v.....	38
Figura 5.2 – Diagrama de Blocos do Otimizador LPA2v	45
Figura 5.3 – RAP Para Determinação dos Fatores de Peso	47
Figura 5.4 – Normalização da Velocidade do Rotor Para o NAP 1	48
Figura 5.5 – Normalização da Tensão Para o NAP 1.....	48
Figura 5.6 – Normalização da Velocidade do Rotor Para o NAP 2	49
Figura 5.7 – Normalização da Tensão Para o NAP 2.....	49
Figura 5.8 – Curva de Variação do Fator ρ_{ω}	51
Figura 5.9 – Curva de Variação do Fator ρ_{Te}	51
Figura 5.10 – Curva de Variação do Fator ρ_V	52
Figura 5.11 – Modelo do Sistema Elétrico.....	52
Figura 6.1 – Comparação do Desvio na Velocidade (Inicial) – Caso 1	55
Figura 6.2 – Comparação do Desvio na Velocidade (Final) – Caso 1.....	55

Figura 6.3 – Comparação da Tensão nos Terminais (Inicial) – Caso 1.....	56
Figura 6.4 – Comparação da Tensão nos Terminais (Final) – Caso 1	56
Figura 6.5 – Comparação da Tensão de Campo (Inicial) – Caso 1.....	57
Figura 6.6 – Comparação da Tensão de Campo (Final) – Caso 1	57
Figura 6.7 – Grau de Evidência Resultante Real do NAP 1 (Trecho 1) – Caso 1	58
Figura 6.8 – Grau de Evidência Resultante Real do NAP 1 (Trecho 2) – Caso 1	58
Figura 6.9 – Grau de Evidência Resultante Real do NAP 2 (Inicial) – Caso 1	59
Figura 6.10 – Grau de Evidência Resultante Real do NAP 2 (Final) – Caso 1	59
Figura 6.11 – Grau de Evidência Resultante Real do NAP 3 (Inicial) – Caso 1	60
Figura 6.12 – Grau de Evidência Resultante Real do NAP 3 (Final) – Caso 1.....	60
Figura 6.13 – Fator Referente à Velocidade (Inicial) – Caso 1.....	61
Figura 6.14 – Fator Referente à Velocidade (Final) – Caso 1	61
Figura 6.15 – Fator Referente à Tensão (Inicial) – Caso 1	62
Figura 6.16 – Fator Referente à Tensão (Final) – Caso 1.....	62
Figura 6.17 – Comparação do Desvio na Velocidade – Caso 2.....	63
Figura 6.18 – Comparação da Tensão nos Terminais – Caso 2	63
Figura 6.19 – Comparação da Tensão de Campo – Caso 2.....	64
Figura 6.20 – Grau de Evidência Resultante Real do NAP 1 – Caso 2.....	64
Figura 6.21 – Grau de Evidência Resultante Real do NAP 2 – Caso 2.....	65
Figura 6.22 – Grau de Evidência Resultante Real do NAP 3 – Caso 2.....	66
Figura 6.23 – Fator Referente à Velocidade – Caso 2.....	66
Figura 6.24 – Fator Referente à Tensão – Caso 2.....	67
Figura A.1 – Modelo Típico do Gerador Síncrono.....	72

Figura A.2 – Circuitos Equivalentes do Gerador Síncrono	82
Figura A.3 – Curva de Saturação	83
Figura B.1 – Modelo do Gerador Conectado ao Barramento Infinito.....	84
Figura B.2 – Diagrama Fasorial das Tensões	85
Figura B.3 – Diagrama Fasorial das Tensões e Correntes no Gerador	87
Figura C.1 – Reticulado de Hasse.....	88
Figura C.2 – Reticulado Representado no QUPC	89
Figura C.3 – Segmento de Reta Perfeitamente Definido	90
Figura C.4 – Grau de Contradição	90
Figura C.5 – Segmento de Reta Perfeitamente Indefinido	91
Figura C.6 – Grau de Certeza	92
Figura C.7 – Representação dos Graus de Certeza e Contradição	92
Figura C.8 – QUPC Delimitado em 12 Regiões	93
Figura C.9 – Representação dos Estados no QUPC	94
Figura C.10 – Representação dos Valores Limites no QUPC	95

LISTA DE SÍMBOLOS

P – Proposição P

μ – Grau de Evidência Favorável

λ – Grau de Evidência Favorável

G_{ct} – Grau de Contradição

G_c – Grau de Certeza

V – Verdadeiro

F – Falso

T – Inconsistente

\perp – Paracompleto

$\perp \rightarrow F$ – Paracompleto Tendendo ao Falso

$\perp \rightarrow V$ – Paracompleto Tendendo ao Verdadeiro

$T \rightarrow F$ – Inconsistente Tendendo ao Falso

$T \rightarrow V$ – Inconsistente Tendendo ao Verdadeiro

$QF \rightarrow \perp$ – Quase Falso Tendendo ao Paracompleto

$QV \rightarrow \perp$ – Quase Verdadeiro Tendendo ao Paracompleto

$QF \rightarrow T$ – Quase Falso Tendendo ao Inconsistente

$QV \rightarrow T$ – Quase Verdadeiro Tendendo ao Inconsistente

V_{sccc} – Valor Limite Superior de Controle de Certeza

V_{scct} – Valor Limite Superior do Controle de Contradição

V_{iccc} – Valor Limite Inferior de Controle de Certeza

V_{icct} – Valor Limite Inferior do Controle de Contradição

ϕ – Intervalo de Certeza

G_{cr} – Grau de Certeza Real

μ_{ER} – Grau de Evidência Resultante Real

Δe_{Vt} – Trajetória de Referência da Tensão nos Terminais do Gerador

Δe_{ω_r} – Trajetória de Referência da Velocidade do Rotor

Δe_{Te} – Trajetória de Referência do Torque Eletromagnético

k_{Vt} – Peso Referente à Tensão nos Terminais

k_{ω_r} – Peso Referente à Velocidade do Rotor

k_{Te} – Peso Referente ao Torque Eletromagnético

$\mu_{ER_{Vt}}$ – Grau de Evidência Resultante Real Referente à Tensão nos Terminais

$\mu_{ER_{\omega}}$ – Grau de Evidência Resultante Real Referente à Velocidade do Rotor

ρ_{Vt} – Fator Multiplicador do Peso Referente à Tensão nos Terminais

ρ_{ω_r} – Fator Multiplicador do Peso Referente à Velocidade do Rotor

ρ_{Te} – Fator Multiplicador do Peso Referente ao Torque Eletromagnético

K_A – Ganho do AVR

T_R – Constante de Tempo do AVR

E_{fdmax} – Limite Máximo da Saída da Excitatriz

E_{fdmin} – Limite Mínimo da Saída da Excitatriz

K_{PSS} – Ganho do PSS

T_1 – Constante de Tempo do Compensador do PSS

T_2 – Constante de Tempo do Compensador do PSS

T_Q – Constante de Tempo do Washout do PSS

LISTA DE ABREVIACOES

MPC – *Model Predictive Control*

LPA2v – Lógica Paraconsistente Anotada com Anotação de Dois Valores

QUPC – Quadrado Unitário no Plano Cartesiano

RAP – Rede de Análise Paraconsistente

NAP – N de Análise Paraconsistente

ONS – Operador Nacional do Sistema

SEP – Sistema Elétrico de Potência

AVR – *Automatic Voltage Regulator*

PSD – Processamento de Sinais Digitais

PSS – *Power System Stabilizer*

PID – Controlador Proporcional-Integral-Derivativo

CPMB – Controlador Preditivo Baseado em Modelo

CP-LPA2v – Controlador Preditivo LPA2v

CPC – Controlador Preditivo Convencional

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	18
1.1 JUSTIFICATIVA	19
1.2 OBJETIVO.....	19
1.3 METODOLOGIA.....	20
1.4 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	21
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1 CONTROLADORES ADAPTATIVOS E PREDITIVOS.....	24
2.2 CONTROLE ADAPTATIVO E A LÓGICA PARACONSISTENTE	24
3. CONTROLE PREDITIVO BASEADO EM MODELO	26
3.1 ESPAÇO DE ESTADOS NO TEMPO DISCRETO.....	26
3.2 FUNÇÃO DE CUSTO QUADRÁTICO.....	27
4. REDES DE ANÁLISE PARACONSISTENTE (RAP)	30
5. MATERIAIS E MÉTODOS	37
5.1 MODELAMENTO DO CONTROLE DE EXCITAÇÃO PREDITIVO	37
5.2 MECANISMO DE OTIMIZAÇÃO LPA2v.....	44
5.2.1 RAP de Ajuste de Pesos	46
5.2.2 Mecanismo de Ajuste de Pesos	50
5.3 MODELO DO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA.....	52
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES	54
6.1 VARIAÇÃO DO TORQUE MECÂNICO.....	54
6.2 VARIAÇÃO DA TENSÃO DE REFERÊNCIA.....	62
6.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS	67
7. CONCLUSÃO	68
7.1 TRABALHOS FUTUROS	69
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	70

APÊNDICE A – Modelamento Matemático do Gerador Síncrono	72
APÊNDICE B – Gerador Síncrono Conectado ao Barramento Infinito	84
APÊNDICE C – Lógica Paraconsistente Anotada	88
APÊNDICE D – Script em MATLAB® do Modelo em Estudo.....	96

1. INTRODUÇÃO

As interligações dos sistemas de energia elétrica integram o país através de uma mesma rede, oferecendo flexibilidade na operação do sistema, e assim contribui a confiabilidade na geração e transmissão de energia. O controle e a coordenação das instalações de geração e transmissão de energia elétrica são de responsabilidade do Operador Nacional do Sistema (ONS), que busca viabilizar sempre um melhor aproveitamento da matriz energética.

Com a abertura do mercado brasileiro de energia elétrica aos produtores independentes de energia, ocorreu um aumento da participação de matrizes industriais, comercializando seus excedentes no mercado. Desta forma, criou-se um cenário favorável à construção de unidades de geração com capacidades bem maiores que as conhecidas anteriormente (KAROUI, et al., 2000). Entretanto, a adição de unidades geradoras no sistema é um fator que produz complicações relacionadas a uma maior complexidade na operação e proteção da rede.

Estes fatores devem ser levados em consideração, porque os geradores, além de fornecer potência elétrica à rede, desempenham importante função quanto à manutenção da estabilidade. É necessário que eles atendam a demanda de energia elétrica dos consumidores dentro de uma margem definida de tensão e frequência, bem como serem capazes de suportar eventuais faltas, para assim garantir a qualidade no suprimento de energia.

Segundo Kundur (1994), um Sistema Elétrico de Potência (SEP) está eventualmente sujeito a perturbações que podem causar problemas de estabilidade no sistema elétrico. Há as perturbações de natureza severa, como curtos-circuitos e desligamento intempestivos de linhas de transmissão, as quais devido ao rápido tempo de resposta exigido pelo sistema, somente a máquina elétrica pode ser responsável pela supressão das oscilações decorrentes dela. E há perturbações de pequena escala, como variações de carga e de tensão na rede, que necessitam de controladores eficazes tanto de excitação, quanto de velocidade, para manter o sistema dentro das condições adequadas para sua operação. O controle de

excitação, além de proporcionar o controle da tensão nos terminais do gerador e o controle da potência reativa, tem um papel importante na manutenção da estabilidade a pequenos sinais.

1.1 JUSTIFICATIVA

Quando o SEP sofre mudança de um ponto de operação para outro, a tensão e a velocidade do gerador síncrono por consequência podem entrar em estados oscilatórios em baixa frequência de acordo com Kundur (1994). Um controle de excitação ineficaz pode resultar em sobretensões, as quais podem causar danos severos a equipamentos conectados à rede, ou subtensões que causam, desde mau funcionamento de equipamentos, como também aumento da potência consumida, tendo em vista que essa varia com o quadrado da tensão.

No presente trabalho pretende-se aplicar os conceitos da Lógica Paraconsistente Anotada com anotação de dois valores (LPAv2) para oferecer técnicas de inteligência artificial ao algoritmo de auto ajuste do Controle Preditivo Baseado em Modelo (CPBM), e desta forma atingir um nível ótimo, tanto no controle de tensão quanto no amortecimento de oscilações eletromecânicas de um gerador síncrono. Para isso, utiliza-se das Redes de Análise Paraconsistente para fazer análise das condições do sistema para, através do mecanismo de ajuste de pesos do CPBM, controlar de forma adequada a tensão de campo do gerador.

1.2 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento e análise de um controle de excitação integrando os elementos da LPAv2 em um Controle Preditivo baseado em Modelo de forma a obter:

- Um mecanismo de auto ajuste inteligente ao CPBM clássico;

- Maior eficiência na manutenção da estabilidade do SEP, quando submetido à variações de carga e de tensão.

Para a análise do comportamento do método de controle baseado na LPA2v, desenvolve-se um algoritmo no MATLAB®, a partir do modelo matemático das máquinas síncronas, a fim de expressar as variações dinâmicas do gerador síncrono, frente às variações de tensão e velocidade provocadas por pequenas perturbações aplicadas ao SEP. Serão analisados dois casos particulares para a avaliação do desempenho do controlador desenvolvido. São eles:

- Variação de 5% da potência mecânica do gerador;
- Variação de 2% na tensão de referência nos terminais do gerador.

1.3 METODOLOGIA

Através do estudo do modelamento matemático da máquina síncrona em Kundur (1994), é possível estabelecer relações entre o controle de excitação e o seu efeito nas variações do torque elétrico e, portanto, sua importância no amortecimento de oscilações eletromecânicas causadas por variações de tensão e carga no gerador síncrono.

Como método de controle, busca-se a associação das técnicas de controle digital e o modelo matemático do sistema físico no tempo discreto (BAO-CANG, 2010), representado neste trabalho pelo gerador síncrono, dando origem a um controle de excitação preditivo.

A partir da concepção do CPBM para a excitação de um gerador síncrono, estuda-se o método de aplicação da LPA2v de maneira que, sejam extraídas as contradições apresentadas entre a malha de controle responsável pelo amortecimento das oscilações eletromecânicas, e a malha

de controle responsável pela manutenção tensão nos terminais do gerador síncrono.

1.4 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Esta Dissertação está organizada da seguinte forma: O capítulo 1, contém uma introdução ao cenário do setor elétrico, uma rápida demonstração da aplicação dos sistemas de controle de excitação de geradores síncronos, uma justificativa para a escolha do tema, objetivo e organização do trabalho. No capítulo 2 apresenta-se uma revisão bibliográfica sobre o controle de excitação. O capítulo 3 apresenta a descrição do CPBM- do Controle Preditivo baseado em Modelo. O capítulo 4 traz a descrição dos algoritmos da RAP – Redes de Análises Paraconsistentes e do NAP – Nó de Análise Paraconsistente. No capítulo 5 descreve-se o modelo utilizado no estudo, os parâmetros inseridos no modelos e o algoritmo Paraconsistente de controle do mecanismo de auto ajuste. No capítulo 6 são apresentados e discutidos os resultados das simulações para variação de 5% da potência mecânica do gerador e variação de 2% na tensão de referência nos terminais do gerador. No capítulo 7 desenvolve-se a conclusão, destacam-se observações relevantes do trabalho e apresentam-se propostas para trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A função básica de um sistema de excitação é alimentar o enrolamento de campo do gerador síncrono. O controle de excitação faz o ajuste da tensão e amortece as oscilações eletromecânicas controlando a tensão do circuito de campo.

Uma perturbação severa, como por exemplo, um curto-circuito trifásico próximo aos terminais do gerador pode causar um afundamento de tensão significativo. Durante a falta, o fluxo de potência para o sistema é interrompido bruscamente, e o gerador é acelerado pela potência mecânica. A proteção normalmente irá operar para eliminar a falta e então o gerador irá se reconectar à rede. Esse processo pode gerar oscilações pós-falta causada pela energia armazenada no rotor, adquirida durante a perturbação. Os enrolamentos amortecedores do rotor do gerador podem ser usados para amortecer essas oscilações. Porém, aumentar os enrolamentos amortecedores do gerador aumenta seu custo. Diante disso o controle de excitação fornece um amortecimento efetivo e com custo menor.

Os AVR's (*Automatic Voltage Regulators*) são sistemas de controle usados nos excitadores dos geradores síncronos, e compõem a parte de controle do sistema como um todo (SUELIO, 2000). Sua função fundamental é manter a geração de potência reativa e a tensão terminal de saída do gerador em níveis pré-estabelecidos em normas. O equipamento substitui o processo antigo, com ajustes manuais do reostato de campo da máquina. A figura 2.1 mostra a estrutura genérica deste tipo de dispositivo.

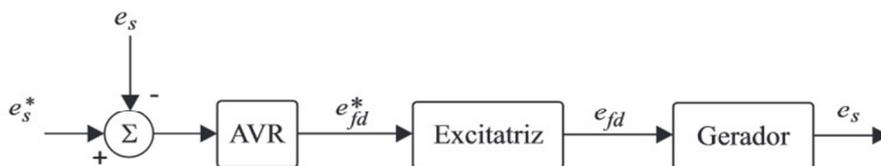


Figura 2.1 - Estrutura Genérica de um AVR. (Adaptado: KUNDUR, 1994).

Durante uma falta, esse tipo de regulador normalmente, aumenta a tensão de campo, para recuperar a tensão nos terminais da máquina para seu valor anterior à

ocorrência da falta. Esse processo de recuperação impõe um efeito negativo ao amortecimento das oscilações pós falta, pois o torque oscilatório que causa as oscilações aumenta relativamente ao aumento da tensão nos terminais. Com a adição do PSS (*Power System Stabilizer*) ao AVR, pode-se eliminar qualquer efeito negativo ao amortecimento das oscilações pós-falta. No entanto, a combinação destes dois controles pode gerar inconvenientes (ROGERS, 2000). O AVR e o PSS são normalmente projetados separadamente. O AVR é desenvolvido para atender requisitos para regulação de tensão e o PSS é projetado para amortecer oscilações. A coordenação dos dois objetivos podem apresentar problemas quando há mudança nas condições operacionais do sistema. A estrutura básica do PSS é vista na figura 2.2.

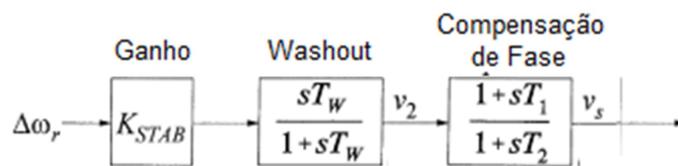


Figura 2.2 – Estrutura Básica do PSS. (Adaptado: KUNDUR, 1994).

Com os avanços tecnológicos na área de processamento de sinais digitais (PSD), controladores digitais estão ganhando cada vez mais espaço, e substituindo os controladores analógicos. Comparados com os controladores analógicos, os controladores baseados em PSD possuem desempenho absolutamente superior, em termos de precisão e confiabilidade.

Uma variedade de técnicas modernas tem sido propostas para controladores de excitação como exemplo têm-se os controladores adaptativos, controladores baseados na lógica *Fuzzy*, controladores baseados em Redes Neurais e Inteligência Artificial.

Um controle ótimo linear, utilizado para controle de excitação, foi desenvolvido por Yu et al. (1972) para minimizar as variações de estado do sistema. Para que trabalhasse com desvios de tensão e velocidade o foco foi em formular uma função de custo. Minimizando-se a função de custo, obteve-se um controle otimizado. Comparado aos PSS, os blocos de compensação não foram necessários, e uma ampla banda de frequências pôde ser obtida no trabalho desenvolvido por Yu et al.

(1983). No entanto, por basear-se em um ponto de operação específico, esse controlador não apresentou bom desempenho quando submetido a grandes variações do ponto de operação do sistema.

2.1 CONTROLADORES ADAPTATIVOS e PREDITIVOS

O controlador adaptativo tem a característica de modificar seu desempenho em resposta a mudanças dinâmicas do sistema controlado. Normalmente, os parâmetros dos controladores convencionais, como por exemplo, ganho, avanço-atraso e ganhos PID, são determinados *off-line*, para um ponto de operação nominal. No entanto, quando o ponto de operação muda, há uma deterioração no desempenho do controlador. Os controles adaptativos podem mudar seus parâmetros de acordo com o novo ponto de operação, de acordo com regras pré-programadas. Porém dependendo da quantidade de instruções, e do *hardware* do controlador o processamento pode não atender a velocidade requerida pelo o sistema controlado (MAO et al., 1992).

O AVR e o PSS convencionais, por seres controladores com realimentação, dependem de estados passados para tomar ações de controle. No entanto, os controladores preditivos consideram tanto os estados passados, quando estimativas de estados futuros, dado um horizonte finito de tempo em que estas estimativas apresentem o mínimo de incertezas possíveis. Com isso obtém-se um controlador de excitação capaz de, em um horizonte de predição de um passo, definir um valor otimizado para a tensão de campo (JIN, 2005). Porém, necessita-se de uma estratégia para que as variáveis das matrizes de custos a função de custos quadrática, de forma a extrair um melhor desempenho deste método de controle.

2.2 CONTROLE ADAPTATIVO E A LÓGICA PARACONSISTENTE

Técnicas pioneiras como a de redes neurais artificiais têm sido usadas em aplicações aos sistemas elétricos de potência. Alguns estudos de controladores de

excitação baseados em redes neurais artificiais mostram que podem apresentar bom desempenho para diferentes pontos de operação, porém possuem algoritmos complexos e demandam muito tempo e capacidade de processamento para treinamento das redes neurais (ZHANG et al., 1993).

Dado a ampla gama de estudos e a grande relevância dos sistemas de controle de excitação não clássicos, optou-se pela escolha do tema e por seu aprimoramento utilizando-se técnica de controle adaptativo, porém aplicando-se a Lógica Paraconsistente Anotada com anotação de dois valores – LPAv2, que já se apresentou como uma lógica adequada em aplicações na área de sistemas elétricos de potência e em outras abordagens como do robô Emmy (DA SILVA FILHO, 1999).

No caso de sistemas elétricos de potência, desenvolveu-se um algoritmo baseado em LPA2v que através valores da carga do sistema elétrico extraídos de um banco de dados, realiza a previsão do perfil de carga futura do sistema (FERRARA et al., 2011). Em outro trabalho abordou-se a aplicação da Lógica Paraconsistente num sistema de supervisão de distribuição de energia elétrica onde foi proposta uma Lógica Paraconsistente Anotada de quatro valores (LPA4v) aplicada em sistema de raciocínio baseado em casos para o restabelecimento de subestações elétricas (MARTINS, 2003).

3. CONTROLE PREDITIVO BASEADO EM MODELO

O Controle Preditivo Baseado em Modelo (CPBM) é um conjunto de algoritmos no qual se utiliza do modelo matemático da planta, ou seja, o sistema físico que se pretende controlar, para prever seu comportamento futuro. Baseado na predição da evolução dos valores de saída da planta procura-se um valor ótimo para a variável manipulada (BAO-CANG, 2010), levando-se em conta a minimização da função de custo quadrático. Um diagrama blocos simplificado do fluxo dos sinais no CPBM é ilustrado na figura 3.1.

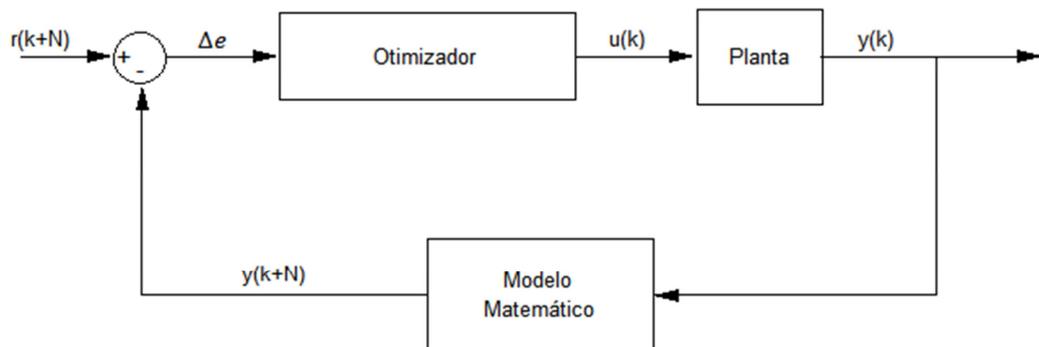


Figura 3.1 – Diagrama de Blocos Simplificado do CPBM. (Adaptado: BAO-CANG, 2010).

3.1 ESPAÇO DE ESTADOS NO TEMPO DISCRETO

As equações de espaço de estados geralmente utilizadas para o modelamento matemático de um sistema físico variável no tempo podem ser descritas como:

$$\begin{aligned} \frac{dx(t)}{dt} &= A_t x(t) + B_t u(t) \\ y(t) &= Cx(t) \end{aligned} \quad (3.1)$$

Onde, t é o tempo, $x(t)$ é o vetor de estado do sistema, $u(t)$ é a variável de entrada (variável manipulada), $y(t)$ é o vetor da saída, A_t é a matriz de estado, B_t é a matriz relacionada à entrada e C é a matriz da saída.

Tomando-se um intervalo Δt de amostragem, é possível definir um valor $k = 1, 2, 3 \dots N$ denominado passo, tal que $k = t/\Delta t$, portanto tornando o sistema discreto no tempo. Através da Equação das Diferenças (3.2), que é a derivada da variável de estado com relação ao tempo, obtém-se o conjunto das Equações de Estado no Tempo Discreto Simplificadas:

$$\frac{dx(k)}{dt} = \frac{x(k+1) - x(k)}{\Delta t} \quad (3.2)$$

$$x(k + 1) = Ax(k) + Bu(k + 1)$$

$$y(k) = Cx(k)$$

$$y(k + 1) = Cx(k + 1) \quad (3.3)$$

Onde, $A = A_t \Delta t - I$ e $B = B_t \Delta t$. A matriz identidade é representada por I .

No conjunto de equações (3.3) observar-se que, as variáveis em $k + 1$, correspondem ao estado futuro, dado as condições do sistema no presente.

3.2 FUNÇÃO DE CUSTO QUADRÁTICO

No CPMB, como pode se observa na figura 3.2, efetua em um instante de tempo t a medição da variável da saída da planta $y(k)$ e através do modelo matemático do sistema físico estudado, faz uma predição $y(k + 1)$, e através desta e da referência r , em um horizonte de predição N , calcula-se valores futuros para a variável manipulada minimizando-se uma equação denominada função de custo quadrático.

A formulação da função de custo quadrático utilizada nesta pesquisa, somente envolve a predição do sinal de controle a um passo à frente, ou seja, considera-se o horizonte de predição $N = 1$.

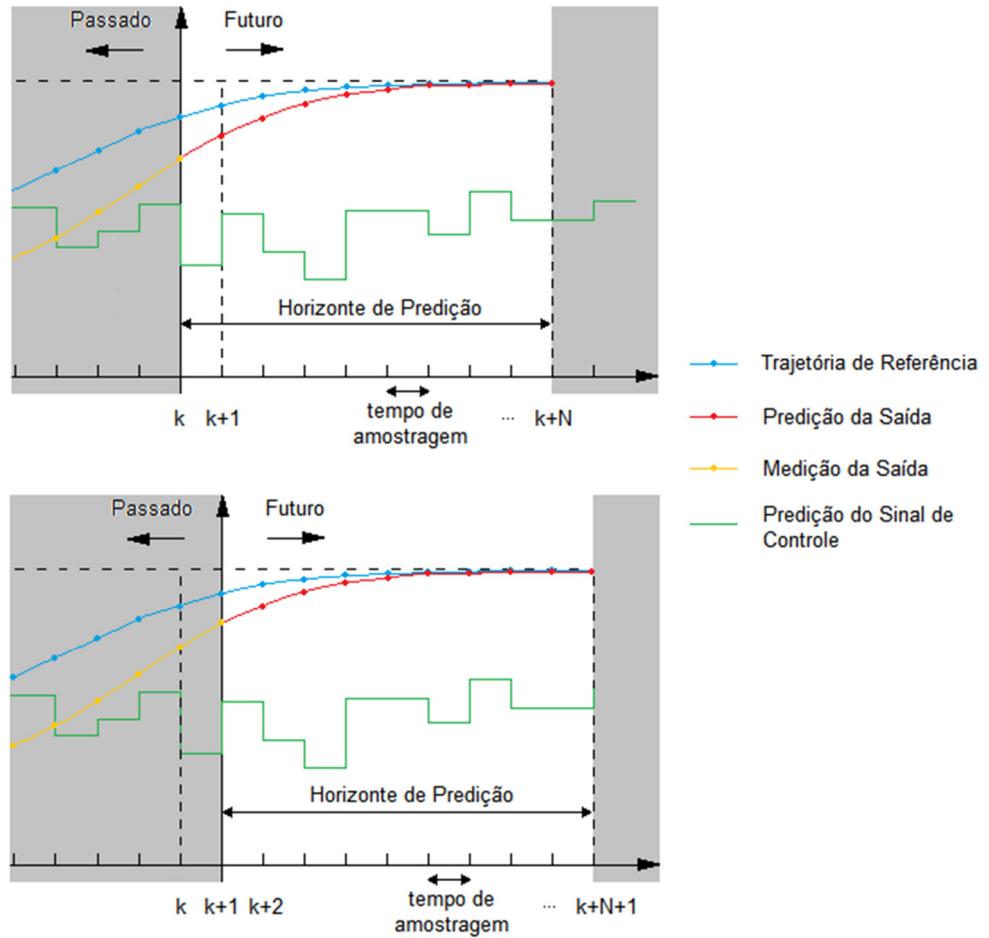


Figura 3.2 – Processo de Predição do CPBM. (Adaptado: BAO-CANG, 2010).

A função de custo quadrático é representada da seguinte forma:

$$J = [r - y(k + 1)]^T Q [r - y(k + 1)] + \Delta u^T R \Delta u \quad (3.4)$$

Onde, $\Delta u = u(k + 1) - u(k)$, as matrizes Q e R são denominadas matrizes peso ou de custo, e são utilizadas para determinar graus de importância a determinadas entradas e saídas.

$$y(k + 1) = CAx(k) + CBu(k) + CB\Delta u \quad (3.5)$$

Substituindo a equação (2.97) em (2.96) obtém-se:

$$J = E^T Q E - 2(CB)^T \Delta u^T Q E + \Delta u^T [(CB)^T Q CB + R] \Delta u$$

Aplicando-se a minimização da função J , ou seja:

$$\frac{\partial J}{\partial \Delta u} = 0 \quad (3.6)$$

Conclui-se que:

$$\Delta u = \frac{(CB)^T Q E}{[(CB)^T Q CB + R]} \quad (3.7)$$

A matriz Q é uma matriz positiva definida relacionada aos estados e R é uma matriz positiva semi-definida relacionada à entrada. As matrizes Q e R são normalmente diagonais com elementos positivos em sua diagonal.

4. REDES DE ANÁLISE PARACONSISTENTE (RAP)

As teorias baseadas na lógica racional, como as lógicas como as paraconsistentes, não ignora as contradições, ao invés disso, extrai delas as informações importantes para a tomada de decisão. A Lógica Paraconsistente Anotada com anotação de dois valores - LPA2v é uma das lógicas não clássicas mais adequadas para o raciocínio com dados que podem trazer informações inconsistentes. Nas referencias bibliográficas e no Apêndice C estão informações mais detalhadas sobre a LPA2v.

Os Nós de Análise Paraconsistente (NAPs) são algoritmos obtidos através dos conceitos da LPA2v para tomada de decisões frente à sinais contraditórios. O conjunto de NAPs forma uma Rede de Análise Paraconsistente (RAP) (DA SILVA FILHO, 1999).

O NAP é alimentado por duas fontes de informação cujos sinais estão na forma de Graus de Evidência a respeito de uma determinada proposição, da seguinte forma:

- $\mu_1 \Rightarrow$ Sinal da Fonte de Informação 1;
- $\mu_2 \Rightarrow$ Sinal da Fonte de Informação 2.

A fórmula proposicional da LPA2v é dada por $P_{(\mu,\lambda)}$ onde:

- $\mu \Rightarrow$ Grau de Evidência Favorável à Proposição P;
- $\lambda \Rightarrow$ Grau de Evidência Desfavorável à Proposição P.

O Grau de Evidência Desfavorável (λ) é calculado pelo complemento do Grau de Evidência Favorável da fonte de informação 2:

$$\lambda = 1 - \mu_2 \quad (4.1)$$

Quando ambos o Grau de Evidência Favorável e Desfavorável na entrada do NAP apresentam o valor de $1/2$, implica que não possuem evidências suficientes para afirmar ou não uma determinada proposição. Portanto, há duas possibilidades em questão:

- Baixo nível de evidências para afirmar ou negar a proposição;

- Evidências com alto nível de inconsistência.

No âmbito da Análise Paraconsistente, determina-se um intervalo em que o Grau de Certeza, dado o Grau de Contradição, pode variar entre um valor máximo de verdade (G_{cmaxV}) e um valor máximo de falsidade (G_{cmaxF}), denominado Intervalo de Certeza (φ), que indica o valor máximo que se pode afirmar ou não uma proposição, e é calculado pela equação (4.2).

$$\varphi = 1 - |G_{ct}| \quad (4.2)$$

Sendo assim os valores máximos de verdade e de falsidade são:

$$G_{cmaxV} = +\varphi \quad G_{cmaxF} = -\varphi$$

A partir disto, o Grau de Certeza Resultante (G_{cr}) terá a indicação do quão poderá ser reforçado em suas evidências para aumentar a certeza da proposição P. O Grau de Certeza resultante é:

$$G_{cr} = \begin{cases} G_c \\ (\pm)\varphi \end{cases}$$

O Intervalo de certeza informa qual será o Grau de Certeza máximo negativo que se obtém diminuindo-se a afirmação da Evidência Favorável e aumentando-se a negação da Evidência Desfavorável levando o resultado se aproximar da Falsidade e qual será o Grau de Certeza máximo positivo que se obtém aumentando-se a afirmação da Evidência Favorável e diminuindo-se a negação da Evidência Desfavorável levando o resultado se aproximar do Verdadeiro. O sinal do Intervalo de Certeza vai indicar se o seu valor absoluto foi originado por um Grau de Contradição positivo tendendo a Inconsistente ou de um Grau de Contradição negativo tendendo a Paracompleto.

O Grau de Certeza Real representa o Grau de Certeza livre de efeito de contradição e para isso no processo de análise é subtraído do seu valor relativo um valor que se considera como o causado pelo efeito das inconsistências nas informações.

A distância D , como se observa na figura 4.1, é o segmento de reta que vai do ponto máximo Grau de Certeza correspondente ao estado de Verdade até o ponto (G_c, G_{ct}) no reticulado é calculada pela equação (4.2):

$$D = \sqrt{(1 - |G_c|)^2 + G_{ct}^2} \quad (4.2)$$

Sendo assim, o Grau de Certeza Real (G_{cr}) é obtido através da distância D e das seguintes condições:

Se $G_c > 0$:

$$G_{cr} = (1 - D) \quad (4.3)$$

Se $G_c < 0$:

$$G_{cr} = (D - 1) \quad (4.4)$$

Portanto, o Grau de Evidência Real é dado por:

$$\mu_{er} = \frac{G_{cr} + 1}{2} \quad (4.5)$$

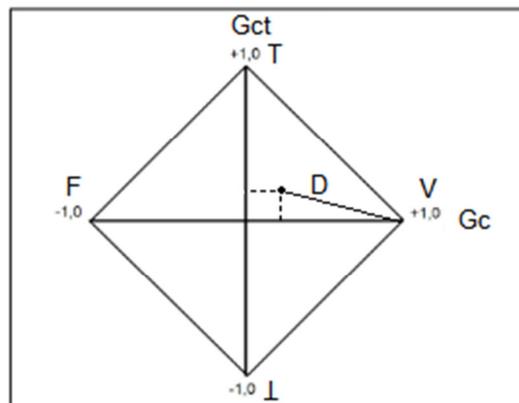


Figura 4.1 – Distância D no QUPC.
(Fonte: DA SILVA FILHO, 1999).

A partir do desenvolvimento teórico dos conjuntos de equações que regem o NAP, Da Silva Filho et. al. (1999) obteve um algoritmo que através de duas fontes de informação baseadas em Graus de Evidência, realiza a filtragem das contradições e gera um Grau de Evidência Resultante. O algoritmo é apresentado da seguinte forma:

Entre com os valores dos Graus de Evidência.

μ */ Grau de Evidência Favorável $0 \leq \mu \leq 1$

λ */ Grau de Evidência Desfavorável $0 \leq \lambda \leq 1$

Calcule o Grau de Certeza.

$$G_c = \mu - \lambda$$

Calcule o Grau de Contradição.

$$G_{ct} = \mu + \lambda - 1$$

Calcule o Intervalo de Evidência.

$$\varphi = 1 - |G_{ct}|$$

Calcule a Distância D.

$$D = \sqrt{(1 - |G_c|)^2 + G_{ct}^2}$$

Calcule o Grau de Certeza Real.

$$\text{Se } G_c > 0, G_{cr} = (1 - D)$$

$$\text{Se } G_c < 0, G_{cr} = (D - 1)$$

Determine o Sinal de Saída.

$$\text{Se } \varphi \leq 0.25 \text{ ou } D > 1$$

$S_1 = 0.5$ e $S_2 = (\pm)\varphi$:Indefinido. Vá para o fim.

Senão, vá para o próximo item.

Calcule o Grau de Evidência Resultante Real.

$$\mu_{er} = \frac{G_{cr} + 1}{2}$$

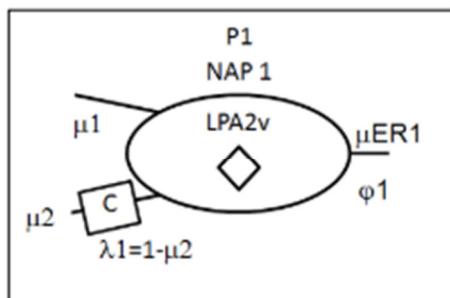


Figura 4.2 – Representação Esquemática de um NAP.
(Fonte: DA SILVA FILHO, 2006).

Dada a análise realizada em torno do NAP, é necessário ainda apresentar mais um elemento para completar este estudo. A Rede de Análise Paraconsistente (RAP). A RAP é integração de dois ou mais NAPs, onde em cada nó é efetuado a análise de uma única proposição. No último Nó da Rede há uma proposição objeto P_o , e, para se chegar até ela, se faz necessária a análise das proposições em cada nó. Assim para obter valores suficientes para tomada de decisão sobre a proposição objeto, o resultado da análise paraconsistente produzido em cada NAP é combinado com os resultados dos outros NAPs, levando a determinado Grau de Certeza à Proposição-objeto, que é o objetivo da análise resultante da RAP. Sendo assim, as combinações dos NAPs em uma RAP devem considerar seguintes aspectos:

- As proposições analisadas em cada NAP podem ser logicamente combinadas através de Graus de Certeza reais resultantes com diferentes interligações;
- Os valores dos Graus de Certeza reais resultantes e os Intervalos de Certeza Reais provindos dos NAPs de diferentes proposições poderão utilizar-se de conectivos AND e disjunção OR ou algebricamente (soma, subtração) conforme topologia da RAP;
- Os valores dos Graus de Certeza reais resultantes poderão ser transformados por meio de normalização em valores entre 0 e 1 no intervalo real e assim considerados como Graus de Evidência de outras proposições que estão sendo analisados por outros diferentes NAPs.

Assim conforme os estes estudos a precisão nas respostas e dos tipos de fontes de informações disponíveis consideradas relevantes para a tomada de decisão, pode-se configurar uma RAP interligando-se seus NAPs de várias maneiras. Sabe-se que cada NAP é capaz de receber n valores de Graus de Evidência, e esses são considerados como entradas que representam evidências favoráveis ou desfavoráveis. Assim, numa configuração básica a análise preliminar no NAP produz um valor de Grau de Certeza Real G_{CR} e um Intervalo de Certeza $\varphi(\pm)$ referente a uma única proposição. Portanto, uma RAP deve ser modelada de tal forma que os vários valores de Graus de Evidência a respeito de determinada proposição analisados pelo NAP produzirão um único valor de Evidência, o qual irá entrar na análise posterior como um valor de Grau de Evidência Favorável ou, através de uma complementação, ser considerado um valor de Grau de Evidência Desfavorável. Com a normalização para o Grau de Evidência Resultante Real os valores dos sinais ficam com os seus valores dentro do intervalo real fechado entre zero e um, permitindo assim que numa RAP as saídas sejam utilizadas como Graus de Evidência para outras proposições subsequentes. Diferentes topologias podem ser formadas para RAP de decisão, cada qual de acordo com a finalidade de projeto que se queira. A figura 4.3 mostra como exemplo uma RAP simples com três NAPs. Nesta RAP tem-se o NAP 1 que analisa através de μ_1 e λ_1 a proposição P_1 com o Intervalo de Certeza φ_1 e o resultado é o Grau de Evidência Resultante Real μ_{ER1} . O NAP 2 que analisa através de μ_3 e λ_2 a proposição P_2 com o intervalo de certeza φ_2 e o resultado é o Grau de Evidência Resultante Real μ_{ER2} . Para o NAP 3 o Grau de Evidência Favorável é a saída do Grau de Evidência Resultante Real do NAP 1 ($\mu_5 = \mu_{ER1}$) e o Grau de Evidência Desfavorável é o complemento do Grau de Evidência Resultante Real do NAP 2 ($\lambda_3 = \mu_{ER2}$). O NAP 3 tem a proposição objeto da RAP, com o Intervalo de Certeza φ_3 e a saída resultante é o Grau de Evidência Resultante Real μ_{ER3} , que é a saída resultante da RAP.

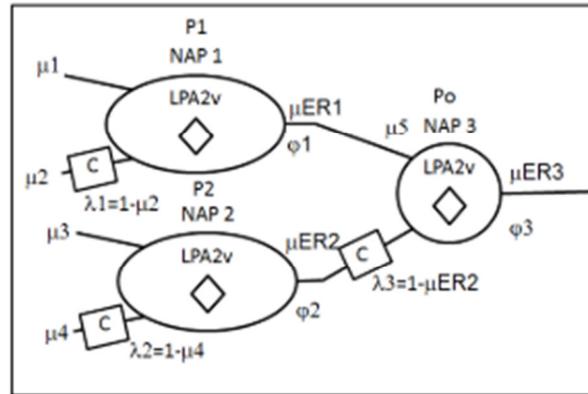


Figura 4.3 – Representação Esquemática de uma RAP.
 (Fonte: DA SILVA FILHO, 2006)

5. MATERIAIS E MÉTODOS

Com base nos estudos do CPBM e da LPA, foi desenvolvido o modelamento matemático de um Controlador Preditivo LPA2v (CP-LPA2v). O objetivo deste controle é, não só regular a tensão nos terminais do gerador, mas também fornecer um torque amortecimento a oscilações provocadas por perturbações no sistema elétrico. O modelo proposto nesta dissertação utiliza o *software* MATLAB® R2012b, como ferramenta para o desenvolvimento e estudo do algoritmo de controle.

5.1 MODELAMENTO DO CONTROLE DE EXCITAÇÃO PREDITIVO

O CP-LPA2v como pontuado anteriormente deve cumprir dois papéis: regulação da tensão nos terminais do gerador e amortecimento da oscilação eletromecânica diretamente relacionada às variações de velocidade do rotor. Essas duas premissas podem ser descritas matematicamente através do vetor de saída da formulação de espaço de estados.

$$y(k) = \begin{bmatrix} \omega_r(k) \\ V_t(k) \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

Onde $y(k)$ é o vetor saída do gerador síncrono, V_t é tensão nos terminais do gerador e a velocidade do rotor é representada por ω_r .

No aspecto da análise dinâmica do gerados síncrono, as variáveis de estado representadas pela matriz x vista no Apêndice B, são: a velocidade do rotor ω_r , o ângulo de potência δ , e o fluxo de campo Ψ_{fd} . Portanto é possível descreve-se a dinâmica do gerador síncrono através das equações diferencias a partir destas variáveis de estado.

$$\frac{d\delta}{dt}(k) = \omega_0 \Delta\omega_r(k) \quad (5.2)$$

$$\frac{d\omega_r}{dx}(k) = \frac{1}{2H}(T_m(k) - T_e(k)) \quad (5.3)$$

$$\frac{d\Psi_{fd}}{dt}(k) = \omega_0 \Delta e_{fd}(k) \quad (5.4)$$

Onde T_m é o torque mecânico, T_e é o torque eletromagnético e H é a constante de inércia e Δe_{fd} é a variação da tensão aplicada ao circuito de campo. Portanto, o estado do sistema pode ser descrito em qualquer instante ou passo k pela matriz:

$$x(k) = \begin{bmatrix} \delta(k) \\ \omega_r(k) \\ \Psi_{fd}(k) \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

A seleção das variáveis para se alcançar o desempenho ótimo na regulação da tensão nos terminais do gerador e do amortecimento de oscilações eletromecânicas são: torque eletromagnético T_e , tensão nos terminais do gerador V_t e velocidade do rotor ω_r . Essas variáveis, na representação do CPBM, geram através das saídas $y(k+1)$ previstas pelo modelo do gerador síncrono e dos valores de referência, as trajetórias de referência que são processadas no algoritmo de otimização LPA2v, como mostra a figura 5.1.

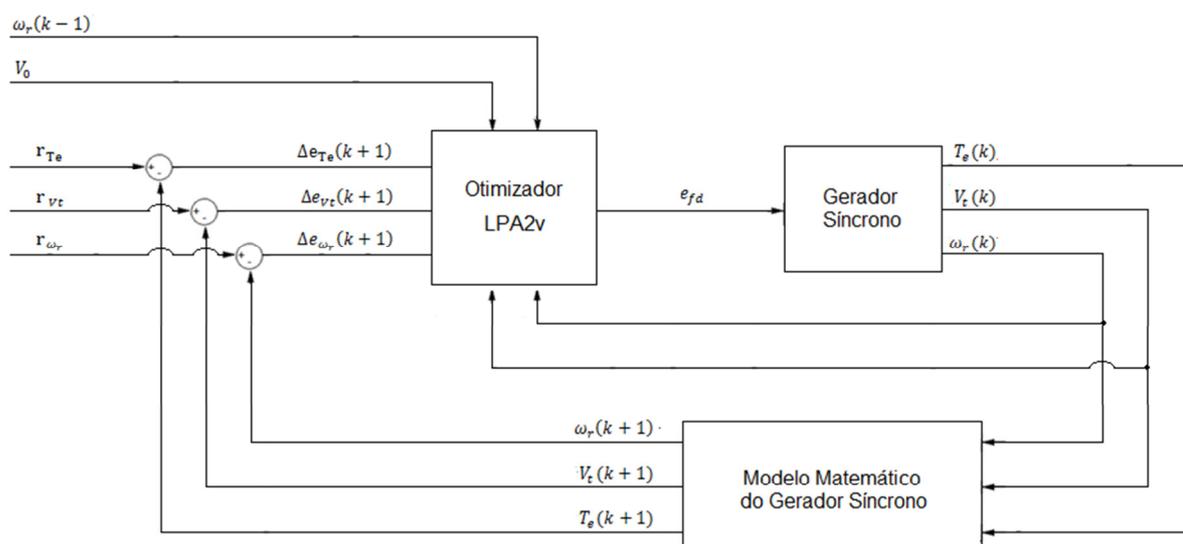


Figura 5.1 – Diagrama de Blocos do Controlador de Excitação Preditivo LPA2v.

No controle das variações da tensão nos terminais do gerador utiliza-se a variável Δe_{V_t} , que é expressa através da diferença entre o desvio de tensão

no passo k e o desvio previsto no passo $k + 1$, como se observa na equação (5.6).

$$\Delta e_{V_t}(k + 1) = \Delta V_t(k) - \Delta V_t(k + 1) \quad (5.6)$$

O desvio de tensão no passo k é determinado a partir do *set-point* da tensão V_0 e a tensão no passo k , denominada $V_t(k)$, nos terminais do gerador.

Partindo para a característica de amortecimento de oscilações eletromecânicas, há duas variáveis que participam dessa função, são elas: Δe_{ω_r} que está relacionada à velocidade do rotor e Δe_{T_e} relacionada com o torque eletromagnético. Essas duas variáveis são expressas pelas equações (5.7) e (5.8) respectivamente.

$$\Delta e_{\omega_r}(k + 1) = \Delta \omega_r(k + 1) - \frac{1}{2H} \Delta t \Delta T_e(k + 1) \quad (5.7)$$

$$\Delta e_{T_e}(k + 1) = T_m - T_e(k) - \Delta T_e(k + 1) \quad (5.8)$$

Onde $\Delta \omega_r(k + 1)$ é o valor da predição do modelo do desvio de velocidade do gerador e $\Delta T_e(k + 1)$ é a predição do modelo do desvio do torque eletromagnético.

Escrevendo as correntes de eixo-d e eixo-q em termos das variações de posição angular e de fluxo de campo, tem-se que:

$$\Delta i_d(k + 1) = m_1 \Delta \delta(k) + m_2 \Delta \Psi_{fd}(k) \quad (5.9)$$

$$\Delta i_q(k + 1) = n_1 \Delta \delta(k) + n_2 \Delta \Psi_{fd}(k) \quad (5.10)$$

Onde m_1 , m_2 , n_1 e n_2 são:

$$m_1 = \frac{E_B(X_{Tq} \sin \delta - R_a \cos \delta)}{D} \quad (5.11)$$

$$m_2 = \frac{X_{Tq}}{D} \frac{L_{ads}}{(L_{ads} + L_{fd})} \quad (5.12)$$

$$n_1 = \frac{E_B(R_a \sin \delta + X_{Td} \cos \delta)}{D} \quad (5.13)$$

$$n_2 = \frac{R_a}{D} \frac{L_{ads}}{(L_{ads} + L_{fd})} \quad (5.14)$$

$$D = R_a^2 + X_{Tq} X_{Td} \quad (5.15)$$

$$X_{Tq} = X_E + X''_{qs} \quad (5.16)$$

$$X_{Td} = X_E + X''_{ds} \quad (5.17)$$

Os fluxos incrementais mútuos são:

$$\Delta\Psi_{ad}(k+1) = \left(\frac{1}{L_{fd}} - m_2\right) L'_{ads} \Delta\Psi_{fd}(k) - m_1 L'_{ads} \Delta\delta(k) \quad (5.18)$$

$$\Delta\Psi_{ad}(k+1) = -n_2 L_{aqs} \Delta\Psi_{fd}(k) - n_1 L_{aqs} \Delta\delta(k) \quad (5.19)$$

Sendo o torque eletromagnético:

$$\Delta T_e(k+1) = \Psi_{ad0} \Delta i_q(k+1) + i_{q0} \Delta\Psi_{ad}(k+1) - \Psi_{aq0} \Delta i_d(k+1) - i_{d0} \Delta\Psi_{aq}(k+1)$$

Então, o valor do torque eletromagnético $\Delta T_e(k+1)$ em termos das variáveis de estado:

$$\Delta T_e(k+1) = K_1 \Delta\delta(k) + K_2 \Delta\Psi_{fd}(k) \quad (5.20)$$

Onde K_1 e K_2 são:

$$K_1 = n_1 (\Psi_{ad0} + L_{aqs} i_{d0}) - m_1 (\Psi_{aq0} + L'_{ads} i_{q0}) \quad (5.21)$$

$$K_2 = n_2 (\Psi_{ad0} + L_{aqs} i_{d0}) - m_2 (\Psi_{aq0} + L'_{ads} i_{q0}) + \frac{L'_{ads}}{L_{fd}} i_{q0} \quad (5.22)$$

Aplicando-se um pequeno incremento à tensão nos terminais do gerador:

$$(V_{t0} + \Delta V_t)^2 = (e_{d0} + \Delta e_d)^2 + (e_{q0} + \Delta e_q)^2$$

Eliminando-se os termos de segunda ordem:

$$V_{t0} \Delta V_t(k+1) = e_{d0} \Delta e_d(k+1) + e_{q0} \Delta e_q(k+1)$$

Portanto a variação na tensão nos terminais pode ser expressa em termos das tensões de eixo-d e eixo-q:

$$\Delta V_t(k+1) = \frac{e_{d0}}{V_{t0}} \Delta e_d(k+1) + \frac{e_{q0}}{V_{t0}} \Delta e_q(k+1) \quad (5.23)$$

Escrevendo as variações das tensões de eixo-d e eixo-q a partir das variações das correntes e fluxo de campo:

$$\Delta e_d(k+1) = -R_a \Delta i_d(k+1) + L_l \Delta i_q(k+1) - \Delta \Psi_{aq}(k+1) \quad (5.24)$$

$$\Delta e_q(k+1) = -R_a \Delta i_q(k+1) - L_l \Delta i_d(k+1) + \Delta \Psi_{ad}(k+1) \quad (5.25)$$

Sendo assim, se pode expressar a variação da tensão V_t , a partir das variáveis de estado $\Delta \delta(k)$ e $\Delta \Psi_{fd}(k)$:

$$\Delta V_t(k+1) = K_3 \Delta \delta(k) + K_4 \Delta \Psi_{fd}(k) \quad (5.26)$$

Onde:

$$K_3 = \frac{e_{d0}}{V_{t0}} (L_l n_1 + L_{aqs} n_1 - R_a m_1) - \frac{e_{q0}}{V_{t0}} (L_l m_1 + L'_{ads} m_1 + R_a n_1) \quad (5.27)$$

$$K_4 = \frac{e_{d0}}{V_{t0}} (L_l n_2 + L_{aqs} n_2 - R_a m_2) - \frac{e_{q0}}{V_{t0}} \left(L_l m_2 + L'_{ads} \left(m_2 - \frac{1}{L_{fd}} \right) + R_a n_2 \right) \quad (5.28)$$

A partir da equação torque eletromagnético expresso em termos da perturbação na velocidade do rotor é expresso na forma:

$$T_e(k) = T_m - \frac{2H}{\Delta t} (\Delta \omega(k) - \Delta \omega(k-1)) \quad (5.29)$$

Onde:

$$\Delta \omega(k) = \frac{(\Delta \omega(k+1) + \Delta \omega(k-1))}{2}$$

$$\Delta \omega(k+1) = 2\Delta \omega(k) - \Delta \omega(k-1) \quad (5.30)$$

$$\frac{d\Delta \omega}{dt} = \frac{(\Delta \omega(k) - \Delta \omega(k-1))}{\Delta t} \quad (5.31)$$

Formulando as variáveis de estado em função da tensão nos terminais do gerado, da velocidade do rotor e tensão aplicada ao circuito de campo:

$$\Delta \delta(k) = \omega_0 \Delta t \Delta \omega_r(k) \quad (5.32)$$

$$\Delta\omega_r(k) = \omega_r(k) - \omega_0 \quad (5.33)$$

$$\Delta\Psi_{fd}(k) = \omega_0\Delta t\Delta e_{fd}(k) \quad (5.34)$$

Agora, dado as formulações realizadas é possível expressar as equações das trajetórias de referência (5.6), (5.7) e (5.8) através de grandezas mensuráveis do gerador síncrono. Para a trajetória de referência relacionada à tensão nos terminais:

$$\Delta e_{V_t}(k+1) = \Delta V_t(k) - K_3\Delta\delta(k) - K_4\Delta\Psi_{fd}(k)$$

$$\Delta e_{V_t}(k+1) = (-K_3\omega_0\Delta t)\Delta\omega_r(k) + \Delta V_t(k) + (-K_4\omega_0\Delta t)\Delta e_{fd}(k) \quad (5.35)$$

Para a trajetória de referência relacionada à velocidade do gerador síncrono:

$$\Delta e_{\omega_r}(k+1) = 2\Delta\omega(k) - \Delta\omega(k-1) - \frac{\Delta t}{2H} (K_1\Delta\delta(k) + K_2\Delta\Psi_{fd}(k))$$

$$\Delta e_{\omega_r}(k+1) = (-1)\Delta\omega(k-1) + \left(2 - \frac{K_1\omega_0\Delta t^2}{2H}\right)\Delta\omega_r(k) + \left(-\frac{K_2\omega_0\Delta t^2}{2H}\right)\Delta e_{fd}(k) \quad (5.36)$$

Para a trajetória de referência relacionada ao torque eletromagnético do gerador:

$$\Delta e_{T_e}(k+1) = -\frac{2H}{\Delta t}\Delta\omega(k-1) + \frac{2H}{\Delta t}\Delta\omega(k) - K_1\Delta\delta(k) - K_2\Delta\Psi_{fd}(k)$$

$$\Delta e_{T_e}(k+1) = \left(-\frac{2H}{\Delta t}\right)\Delta\omega(k-1) + \left(\frac{2H}{\Delta t} - K_1\omega_0\Delta t\right)\Delta\omega(k) + (-K_2\omega_0\Delta t)\Delta e_{fd}(k) \quad (5.37)$$

Portanto, para a trajetória de referência em sua forma matricial é:

$$\Delta e(k+1) = A_1\Delta\omega(k-1) + A_2\Delta\omega(k) + A_3\Delta V_t(k) + E_2\Delta e_{fd}(k) \quad (5.38)$$

As matrizes multiplicadoras utilizadas na simplificação são:

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \\ -\frac{2H}{\Delta t} \end{bmatrix} \quad (5.39)$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} -K_3\omega_0\Delta t \\ 2 - \frac{K_1\omega_0\Delta t^2}{2H} \\ \frac{2H}{\Delta t} - K_1\omega_0\Delta t \end{bmatrix} \quad (5.40)$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5.41)$$

$$E_2 = \begin{bmatrix} -K_4\omega_0\Delta t \\ -\frac{K_2\omega_0\Delta t^2}{2H} \\ -K_2\omega_0\Delta t \end{bmatrix} \quad (5.42)$$

De forma a reduzir ainda mais a equação (5.38) pode-se reduzir os três primeiros termos em somente um: anteriormente:

$$E_1 = A_1\Delta\omega(k-1) + A_2\Delta\omega_r(k) + A_3\Delta V_t(k) \quad (5.43)$$

$$\Delta e(k+1) = E_1 + E_2\Delta e_{fd}(k) \quad (5.44)$$

Como visto no capítulo 3, equação (3.4), a função de custo quadrática é representada por:

$$J = \Delta e^T Q \Delta e + \Delta e_{fd}^T R \Delta e_{fd}$$

$$J = (E_1 + E_2\Delta e_{fd})^T Q (E_1 + E_2\Delta e_{fd}) + \Delta e_{fd}^T R \Delta e_{fd}$$

$$J = E_1^T Q E_1 + (E_1^T Q E_2 + E_2^T Q E_1)\Delta e_{fd} + (E_2^T Q E_2 + R)\Delta e_{fd}^2 \quad (5.45)$$

A minimização da função custo implica que:

$$\frac{dJ}{du} = 0$$

Portanto:

$$(E_1^T Q E_2 + E_2^T Q E_1) + 2(E_2^T Q E_2 + R)\Delta e_{fd} = 0$$

$$\Delta e_{fd} = -\frac{(E_1^T Q E_2 + E_2^T Q E_1)}{2(E_2^T Q E_2 + R)} \quad (5.46)$$

5.2 MECANISMO DE OTIMIZAÇÃO LPA2v

O sistema de otimização mostrado na figura 5.1, chamado de bloco Otimizador LPA2v, é descrito matematicamente pela equação 5.46, onde a LPA2v está inserida na matriz Q. A matriz Q representa os pesos, ou também chamados de custos, aplicados as variáveis controladas: velocidade do gerador, tensão nos terminais e torque eletromagnético. Estes pesos ajustam o grau de importância de cada estado do sistema. Os pesos da matriz Q podem ser fixos ou variáveis. O objetivo desta pesquisa é estudar o desempenho dos pesos variáveis, aplicando o algoritmo da LPA2v para orientar a mudança destes de modo a alcançar o melhor desempenho do controlador. Portanto, deve-se entender primeiramente a influência dos pesos na variável manipulada Δe_{fd} e, como as variáveis controladas, velocidade, tensão e torque, respondem a essas alterações.

A dinâmica do sistema elétrico de potência responde de acordo com as condições de carregamento, de modo que para condições de grande despacho de carga as variações de velocidade são proporcionalmente grandes, quando que para baixos valores de carregamento as variações de velocidade são menores. A aceleração do rotor, derivada da velocidade, responde a diferença entre torque mecânico e torque eletromagnético. O torque eletromagnético em si é relacionado à tensão nos terminais, corrente e a velocidade do rotor. Quando se objetiva o controle destas duas variáveis através da tensão aplicada ao circuito de campo, há ocasiões onde a resposta é conflitante, e, por exemplo, a manutenção da tensão nos terminais dentro de uma banda desejável pode influenciar negativamente no amortecimento das oscilações eletromecânicas. Assim como, pode ocorrer de o ajuste da tensão de campo pode beneficiar o amortecimento das oscilações eletromecânicas e levar a tensão nos terminais do gerador a valores não toleráveis.

Em um gerador síncrono, na ocorrência de uma diminuição no despacho de potência, por exemplo, o torque mecânico aplicado pela máquina primária diminui, e o torque elétrico, nesse instante, está em seu

valor inicial. Portanto, o torque mecânico evolui para valores menores que o torque elétrico causando, de acordo com a equação de balanço da máquina síncrona, uma desaceleração do rotor. Com isso, a tensão nos terminais do gerador tende a diminuir. Para se elevar o valor da tensão levando-a ao valor *set-point*, é necessário aumentar o fluxo de campo, e, portanto, a tensão de campo. O torque elétrico, no entanto, estando maior do que o torque mecânico há a necessidade de diminuição do fluxo no entreferro, e, portanto, a diminuição da tensão de campo para que se anulem as variações de velocidade e leve o gerador à estabilidade. Isso demonstra que há um interesse contraditório entre a malha de controle de tensão e a malha de amortecimento de oscilações eletromecânicas.

Ainda seguindo a situação da análise anterior, durante as oscilações de velocidade e tensão, se o torque elétrico atinge valores inferiores ao torque mecânico em um intervalo de tempo enquanto a tensão ainda permanece em valores inferiores ao definido pela referência do controlador, nos dois casos, necessita-se o aumento da tensão de campo e, portanto, estes interesses estão em concordância.

Analisando-se as situações descritas anteriormente, o CPBM através da matriz de custos deve ajustar os valores dos pesos referentes à cada uma das variáveis de acordo com o seu grau de desvio. Porém deve-se estabelecer um critério para esses ajustes de pesos. Nesta dissertação utiliza-se a análise LPA2v, através dos NAPs, para estabelecer os critérios de ajuste de pesos para otimizar ambos o controle da tensão e o amortecimento de oscilações eletromecânicas.

O bloco Otimizador LPA2v, como pode ser visto na figura 5.2, é constituído de uma RAP que faz a análise dos valores normalizados da velocidade do gerador e da tensão.

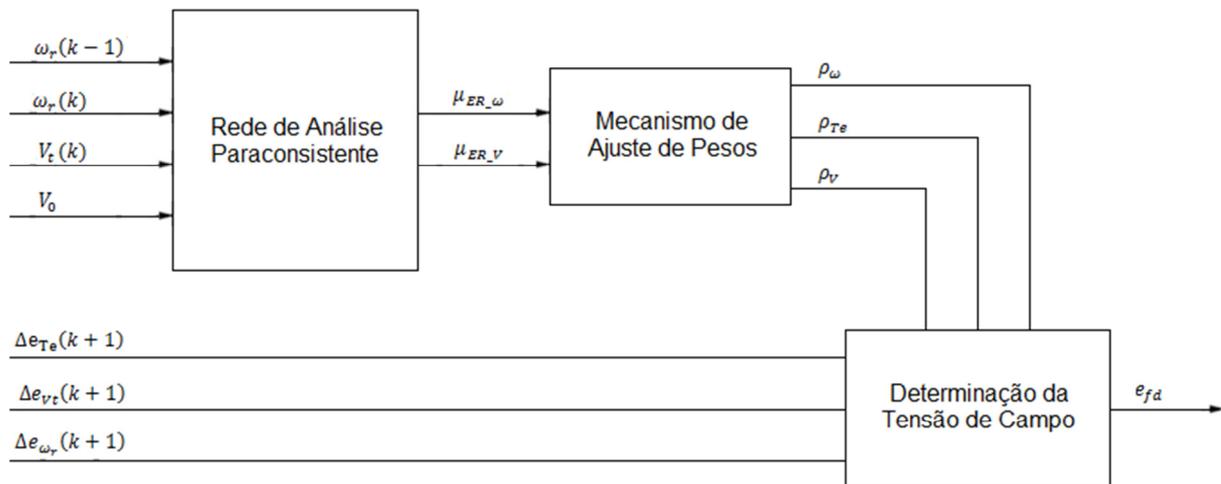


Figura 5.2 – Diagrama de Blocos do Otimizador LPA2v.

O primeiro bloco do Otimizador LPA2v é a RAP, onde entra o valor das velocidade atual $\omega_r(k)$, a velocidade no instante anterior, $\omega_r(k - 1)$, a tensão nos terminais do gerador no instante atual $V_t(k)$ e a tensão de referência V_0 . A partir destas variáveis a RAP define o Grau de Evidência Real μ_{ER_ω} , que representa a evidência da necessidade de aumento ou diminuição de e_{fd} para satisfazer tanto o controle de tensão quando o amortecimento de oscilações eletromecânicas, e o Grau de Evidência Real μ_{ER_V} , representa a necessidade do controle da tensão. No bloco Mecanismo de Ajuste de Pesos, através dos Graus de Evidência é decidido como modificar os pesos a fim de atingir o controle ótimo. Como saída deste bloco está k_ω , que representa o peso referente ao ajuste da velocidade, k_V que é o peso referente à tensão, e k_{Te} que é o peso referente ao torque eletromagnético. A determinação da tensão de campo através da equação 5.46, se obtém efetivamente a variação na tensão de campo para atingir os valores necessários das variáveis controladas.

5.2.1 RAP de Ajuste de Pesos

A RAP para ajuste de pesos possui em sua entrada uma etapa de normalização onde as variáveis $\omega_r(k)$, $\omega_r(k - 1)$ e $V_t(k)$ são transformadas

em Graus de Evidência. A estrutura da RAP é mostrada na figura 5.3. Na tabela 5.1 consta a análise da variação da tensão de campo de acordo com as condições de variação da velocidade e da tensão nos terminais do gerador. Portanto observam-se dois pontos de contradição: quando há aceleração do rotor e a tensão esta acima da tensão desejada V_0 , e quando há desaceleração do rotor e a tensão esta abaixo do valor desejado V_0 . A função de cada NAP está descrita abaixo:

- NAP 1 \Rightarrow Análise da condição de aumento de e_{fd} ;
- NAP 2 \Rightarrow Análise da condição de diminuição de e_{fd} ;
- NAP 3 \Rightarrow Análise da variação de k_V ;

	Sinal	Condição	Valor de e_{fd}
$\Delta\omega_r$	Positivo	Aceleração	Aumenta
ΔV_t	Positivo	Sobretensão	Diminui
$\Delta\omega_r$	Positivo	Aceleração	Aumenta
ΔV_t	Negativo	Subtensão	Aumenta
$\Delta\omega_r$	Negativo	Desaceleração	Diminui
ΔV_t	Negativo	Subtensão	Aumenta
$\Delta\omega_r$	Negativo	Desaceleração	Diminui
ΔV_t	Positivo	Sobretensão	Diminui

Tabela 5.1 – Análise das Variações de Tensão e Velocidade.

Após a análise feita pelos NAPs 1 e 2, os Graus de Evidência Resultantes μ_{ER1} e μ_{ER2} , que correspondem respectivamente à necessidade de aumento de e_{fd} e à necessidade de diminuição de e_{fd} , passam por um bloco chamado de Desnormalização, que é um comparador que decide qual Grau de Evidência Resultante que será dominante para a atuação do Mecanismo de Ajuste de Pesos. A saída do bloco Desnormalização é composta pelo Grau de Evidência dominante e por um bit que, se na condição um, sinaliza para o Mecanismo de Ajuste que o Grau de Evidência Resultante Real considerado será o do NAP 1, e caso contrário o do NAP 2. Quanto ao NAP 3, o Grau de evidência Resultante é entregue diretamente ao Mecanismo de Ajuste.

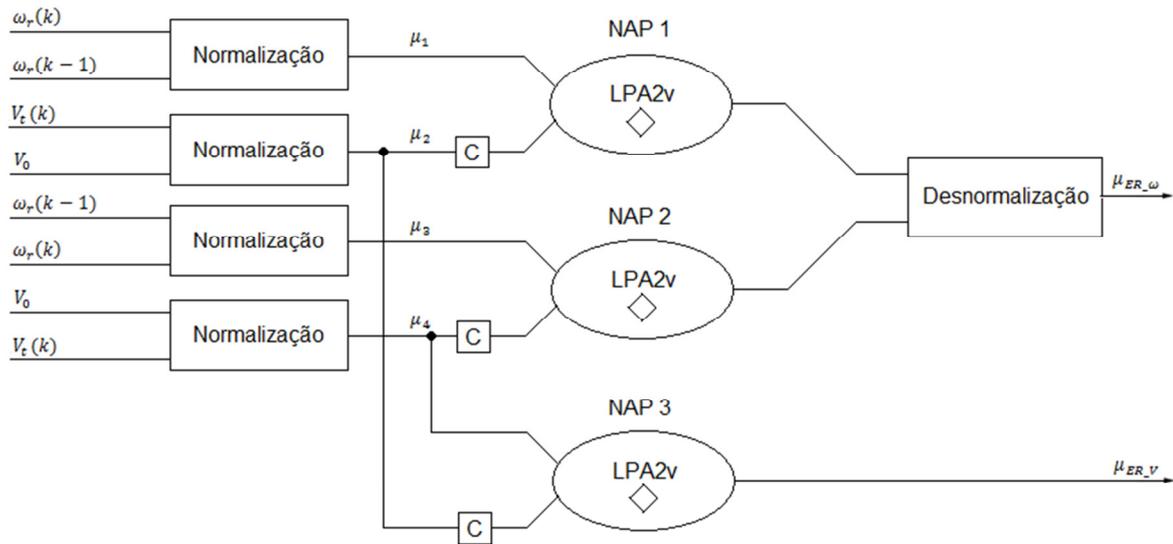


Figura 5.3 – RAP Para Determinação dos Fatores de Pesos.

A primeira normalização para o NAP 1, é feita considerando uma condição de aceleração acima do valor desejado:

$$\left\{ \begin{array}{ll} \mu_1 = 0 & , \text{ se } [\omega_r(k) - \omega_r(k-1)] \leq 0 \\ \mu_1 = \frac{[\omega_r(k) - \omega_r(k-1)]}{20,41 \times 10^{-9}} & , \text{ se } 0 < [\omega_r(k) - \omega_r(k-1)] \leq 20,41 \times 10^{-9} \\ \mu_1 = 1 & , \text{ se } [\omega_r(k) - \omega_r(k-1)] > 20,41 \times 10^{-9} \end{array} \right.$$

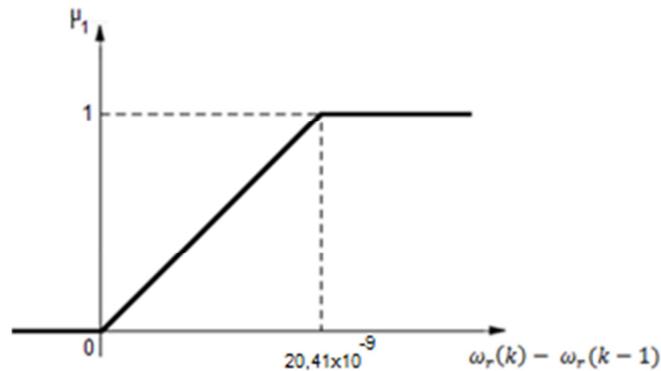


Figura 5.4 – Normalização da Velocidade do Rotor Para o NAP 1.

A segunda normalização para o NAP 1 é feita considerando o desvio máximo de 5% da tensão nos terminais do gerador acima da tensão desejada:

$$\left\{ \begin{array}{ll} \mu_2 = 1 & , \text{ se } [V_t - V_0] \leq 0 \\ \mu_2 = \frac{0,05 - [V_t - V_0]}{0,05} & , \text{ se } 0 < [V_t - V_0] \leq 0,05 \\ \mu_2 = 0 & , \text{ se } [V_t - V_0] > 0,05 \end{array} \right.$$



Figura 5.5 – Normalização da Tensão Para o NAP 1.

A primeira normalização para o NAP 2, é feita considerando uma condição de desaceleração com valor máximo de tolerância de $20,41 \times 10^{-9}$ abaixo do valor desejado:

$$\left\{ \begin{array}{l} \mu_3 = 0 \\ \mu_3 = \frac{[\omega_r(k-1) - \omega_r(k)]}{20,41 \times 10^{-9}} \\ \mu_3 = 1 \end{array} \right. \begin{array}{l} , se [\omega_r(k-1) - \omega_r(k)] \leq 0 \\ , se 0 < [\omega_r(k-1) - \omega_r(k)] \leq 20,41 \times 10^{-9} \\ , se [\omega_r(k-1) - \omega_r(k)] > 20,41 \times 10^{-9} \end{array}$$

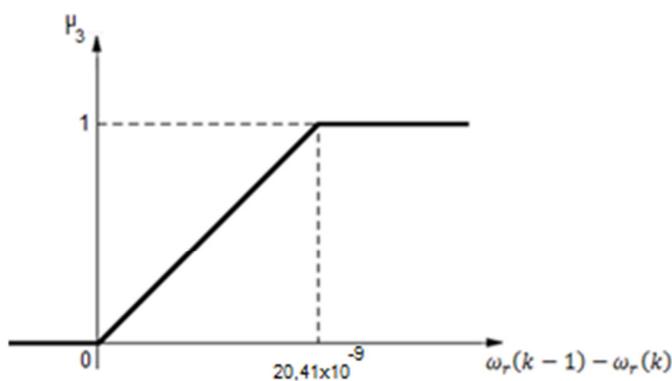


Figura 5.6 – Normalização da Velocidade do Rotor Para o NAP 2.

A segunda normalização para o NAP 2 é feita considerando o desvio máximo de 5% da tensão nos terminais do gerador acima da tensão desejada:

$$\left\{ \begin{array}{l} \mu_4 = 1 \\ \mu_4 = \frac{0,05 - [V_0 - V_t]}{0,05} \\ \mu_4 = 0 \end{array} \right. \begin{array}{l} , se [V_0 - V_t] \leq 0 \\ , se 0 < [V_0 - V_t] \leq 0,05 \\ , se [V_0 - V_t] > 0,05 \end{array}$$

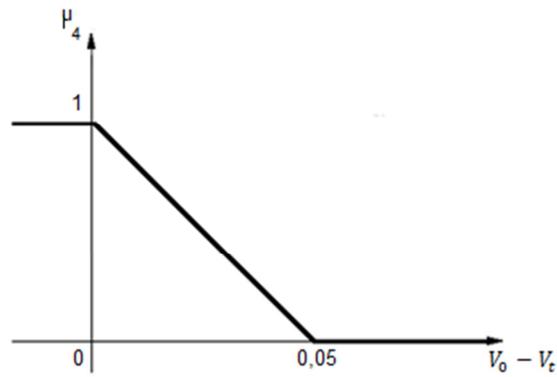


Figura 5.7 – Normalização da Tensão Para o NAP 2.

As entrada para o NAP 3, como se pode observar, é simplesmente μ_2 e μ_4 . Sua saída é aplicada diretamente ao Mecanismo de Ajuste de Pesos.

5.2.2 Mecanismo de Ajuste de Pesos

O mecanismo de pesos funciona como um catalisador para resposta do controlador. Quanto maior o peso, mais rápida será a resposta do controlador, quanto menor o peso, mais lenta será a resposta. O algoritmo do Mecanismo de Ajuste de Peso toma como base os valores iniciais apresentados na tabela 5.2 baseados em Jin (2005). A partir dos Graus de Evidência Resultante fornecidos pela RAP calculam-se os fatores multiplicadores ρ_ω , ρ_V e ρ_{Te} , os quais alteram respectivamente os pesos k_ω , k_V e k_{Te} .

Pesos	
k_ω	8
k_V	1
k_{Te}	0,05

Tabela 5.2 – Valores dos Pesos.

Sabendo-se que μ_{ER_ω} varia no intervalo $[0,1]$, para os pesos k_ω e k_{Te} , quando a saída do bloco Desnormalização fornece bit de valor zero ou um, e os fatores multiplicadores variam de acordo com a equação (5.47), a qual está representada pelas retas das figuras 5.8 e 5.9.

$$\rho_{\omega} = \rho_{Te} = 2\mu_{ER_{\omega}} + 1 \quad (5.47)$$

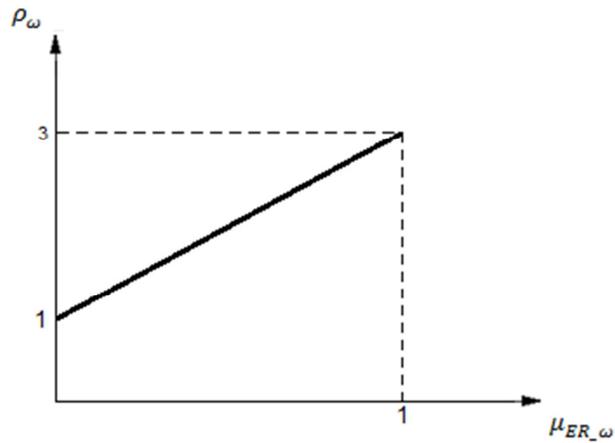


Figura 5.8 – Curva de Variação do Fator ρ_{ω} .

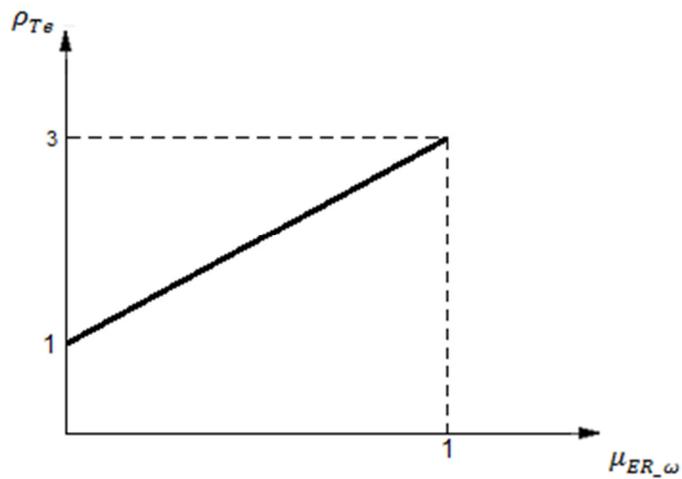


Figura 5.9 – Curva de Variação do Fator ρ_{Te} .

As figuras 3.8 e 3.9 representam as curvas de variação dos fatores dos pesos referentes à velocidade e ao torque eletromagnético.

O fator multiplicador do peso referente à tensão ρ_V é expresso pela equação (5.48) e sua reta é representada na figura 5.10, tendo em vista que o valor do Grau de Evidência Resultante μ_{ER_V} referente à tensão está dentro do intervalo $[0, 1]$.

$$\rho_V = -\mu_{ER_V} + 2 \quad (5.48)$$

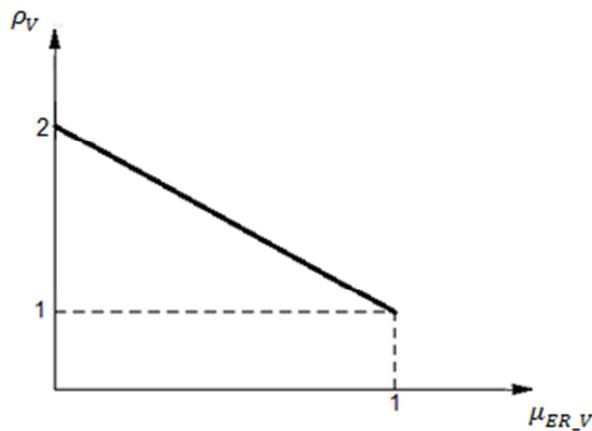


Figura 5.10 – Curva de Variação do Fator ρ_V .

Definidos os pesos e os fatores, é possível expressar a matriz Q em sua forma completa:

$$Q = \begin{bmatrix} \rho_\omega k_\omega & 0 & 0 \\ 0 & \rho_V k_V & 0 \\ 0 & 0 & \rho_{T_e} k_{T_e} \end{bmatrix} \quad (5.49)$$

5.3 MODELO DO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA

O modelo do sistema elétrico de potência utilizado nas simulações pode ser visto na figura 5.11. O gerador síncrono é conectado através de um transformador elevador de tensão a duas linhas de transmissão paralelas que, no outro extremo, estão conectadas ao barramento infinito. Os dados do gerador síncrono estão na tabela 5.3, e as reatâncias do transformador e das linhas de estão na tabela 5.4. Na tabela 5.5 estão os parâmetros do AVR e do PSS.

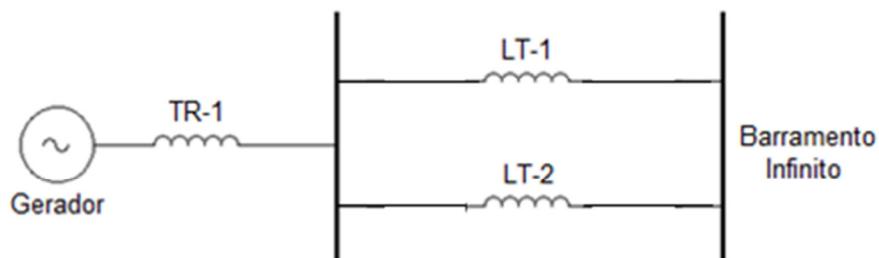


Figura 5.11 – Modelo do Sistema Elétrico

VALORES NOMINAIS		PARÂMETROS				SATURAÇÃO	
Potência Nominal	555 MVA	X_d	1,81 pu	X_l	0,15 pu	A_{sat}	0,031
Tensão Nominal	24 kV	X_q	1,76 pu	R_a	0,003 pu	B_{sat}	6,93
Frequência	60 Hz	X'_d	0,30 pu	T'_{d0}	8,00 s	Ψ_{T1}	0,80
N° de Polos	2	X'_q	0,65 pu	T'_{q0}	1,00 s		
Cte de Inércia	3,5 MWs/MVA	X''_d	0,23 pu	T''_{d0}	0,03 s		
Cte de Amortecimento	0	X''_q	0,25 pu	T''_{q0}	0,07 s		

Tabela 5.3 – Dados do Gerador.

PARÂMETROS DO SISTEMA ELÉTRICO	
X_{TR}	0,15
X_{LT1}	0,5
X_{LT2}	0,93

Tabela 5.4 – Dados do Sistema Elétrico.

AVR		PSS	
K_A	200,0	K_{PSS}	9,5
T_R	0,015s	T_Q	1,41
$E_{fdmáx}$	7,0	T_1	0,154
$E_{fdmín}$	6,4	T_2	0,033

Tabela 5.5 – Dados dos Controladores.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise desenvolvida nesta dissertação envolve o estudo de quatro casos, onde perturbações são aplicadas ao modelo desenvolvido, e compara-se o resultado do Controlador Preditivo LPA2v (CP-LPA 2v) com o controlador tipo AVR em conjunto com o estabilizador de sistema de potência (PSS) e também com o Controlador Preditivo Convencional (CPC), no qual seus Fatores de Peso pré-determinados. Analisam-se as variações na velocidade, da tensão nos terminais do gerador síncrono e da tensão aplicada ao circuito de campo. Para o CP-LPA2v, analisam-se as variações dos Graus de Evidência Resultantes Reais na saída dos NAPs e as variações nos Fatores de Peso. Os casos estudados são:

- Cenário 1: Variação de 5% no torque mecânico aplicado ao gerador síncrono.
- Cenário 2: Variação de 2% na tensão de referência nos terminais do gerador síncrono.

É importante frisar que, no caso da variação do torque, cenário 1, são apresentados dois instantes para cada variável estudada, pois o torque é variado através de uma rampa, portanto, há dois momentos significativos: o momento em que começa o processo de decréscimo do valor do torque mecânico e o momento em que atinge o seu valor final.

6.1 VARIAÇÃO DO TORQUE MECÂNICO

No instante 10s o gerador síncrono começa a sofrer um decréscimo no torque mecânico de 0,018 pu/min, que, em valores nominais do gerador equivale a 10 MW/min. Isso causa um desequilíbrio inicial entre torque mecânico e torque elétrico, e o rotor da máquina começam a desacelerar. O resultado da simulação mostra, na figura 6.1, o instante em que o processo de redução do torque mecânico começa, e a figura 6.2 mostra o momento em que o valor do torque mecânico atinge o seu valor final de -5% de seu valor inicial. No instante inicial o desvio na velocidade, os

controladores CP-LPA2v e CPC apresentaram desempenho melhor que o AVR+PSS quanto aos valores de pico das oscilações e a rapidez no amortecimento das oscilações. Verifica-se que os controladores CP-LPA2v e o CPC atingem um valor praticamente constante após 12s, porém a velocidade se apresenta com valor menor que o nominal, enquanto que o controlador AVR+PSS tende a uma acomodação com velocidade menor que os outros dois. O desempenho do CP-LPA2v amortece a oscilação eletromecânica mais rapidamente em comparação com o CPC. Na figura 6.2, em 160,4s o torque mecânico atinge o valor final e o torque elétrico ainda continua o decréscimo causando o rotor à acelerar. Sendo assim, sua velocidade aumenta, atingindo a estabilidade em 162s para o CP-LPA2v, 162,25s para o CPC e 163s para o AVR+PSS.

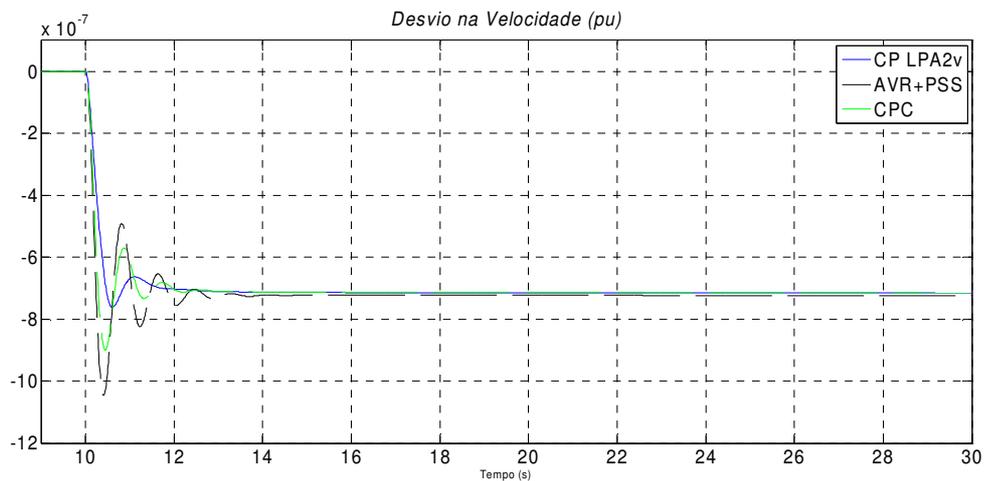


Figura 6.1 – Comparação do Desvio na Velocidade (Inicial) – Caso 1.

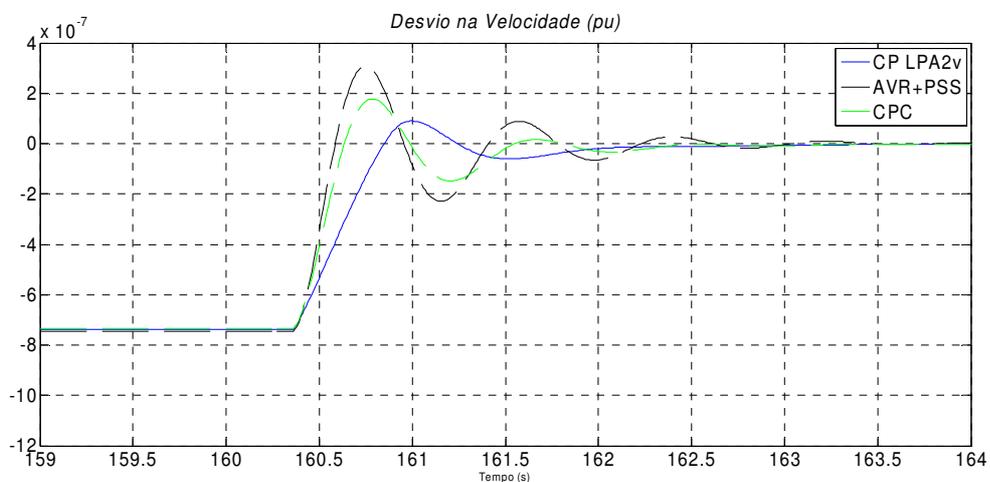


Figura 6.2 – Comparação do Desvio na Velocidade (Final) – Caso 1.

No caso do desempenho da tensão nos terminais do gerador, mostrado nas figuras 6.3 e 6.4, quando o gerador síncrono inicia a descendência do torque mecânico, a tensão nos terminais do gerador sofre um decréscimo e começa uma rampa de ascendência. O controlador CPC começa sua subida em um valor acima do CP-LPA2v, e o controlador AVR+PSS possui um coeficiente angular de subida maior que os outros dois controladores. Quando o torque mecânico atinge seu valor final, com o aumento da velocidade do rotor, a tensão tende a subir em um pequeno degrau e se estabiliza dentro da banda de 5% de variação determinada pelos controladores, com o valor para CP-LPA2v um pouco acima do valor de acomodação para o CPC e abaixo do valor para o AVR+PSS.

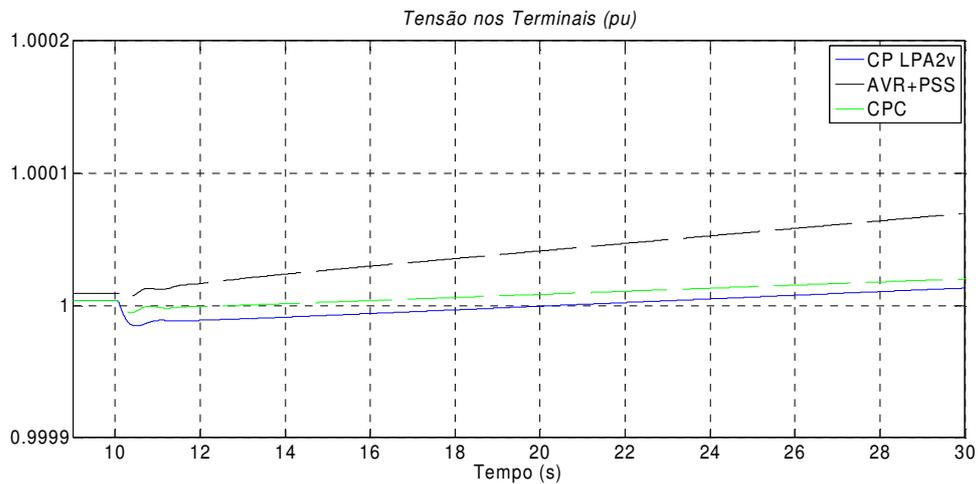


Figura 6.3 – Comparação da Tensão nos Terminais (Inicial) – Caso 1.

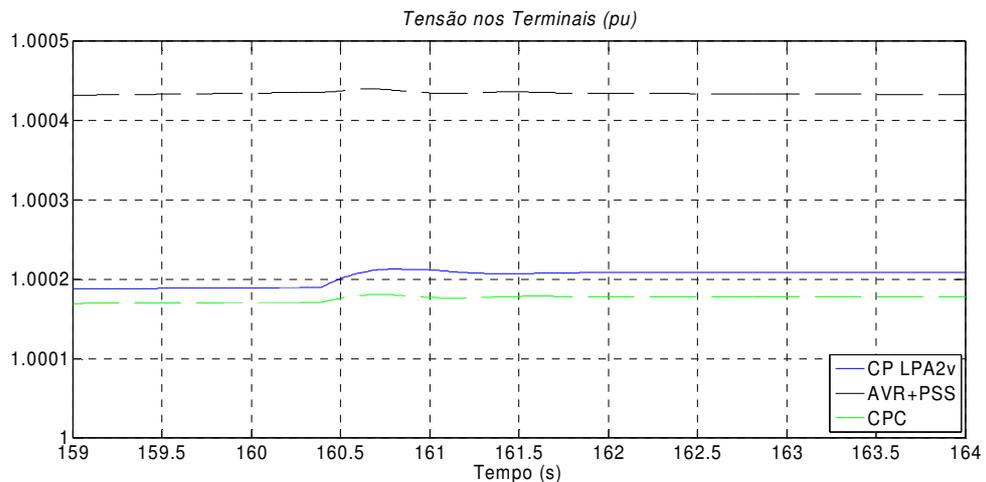


Figura 6.4 – Comparação da Tensão nos Terminais (Final) – Caso 1.

A tensão aplicada ao circuito de campo, na figura 6.5 e 6.6, começa com valor de 2,5 pu e, a partir do começo do processo de variação do torque mecânico, começa uma rampa de descida com taxa de variação igual para os três controladores. Após o torque mecânico atingir o seu valor final, a tensão de campo para o controlador AVR+PSS atinge um valor de 2,4155 pu, o CP-LPA2v atinge um valor bem próximo ao do CPC, de aproximadamente 2,4150 pu.

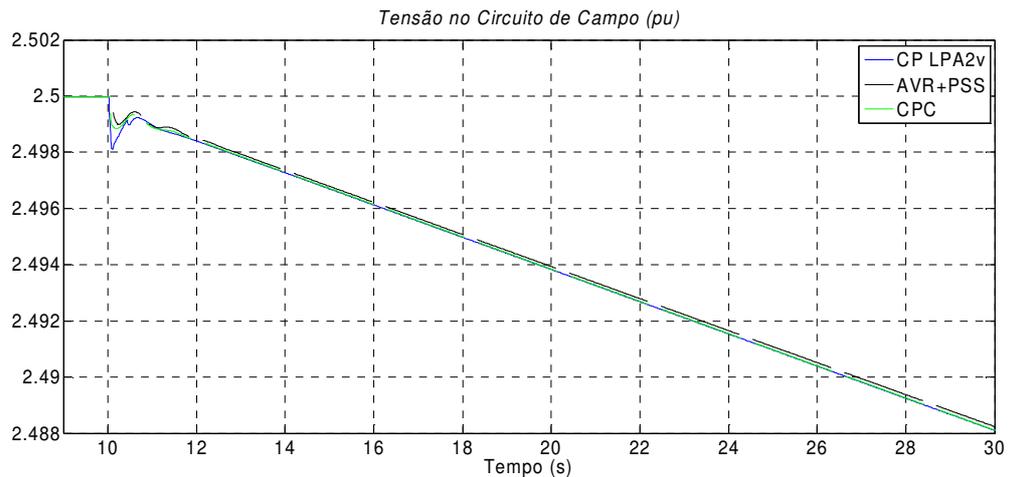


Figura 6.5 – Comparação da Tensão de Campo (Inicial) – Caso 1.

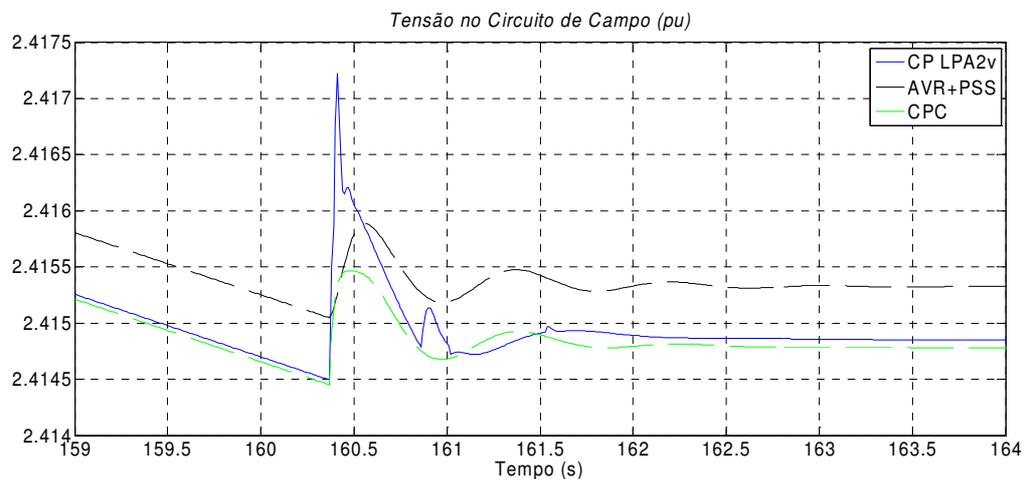


Figura 6.6 – Comparação da Tensão de Campo (Inicial) – Caso 1.

Após o início da variação no torque mecânico para um valor menor do que o do torque elétrico, o rotor sofre desaceleração, portanto, o Grau de Evidência μ_1 permanece constante assim como o grau de evidência μ_2 , mantendo o grau de

Evidência Resultante do NAP 1 constante. Quando o valor da velocidade atinge um mínimo e o rotor começa a acelerar novamente, o valor de μ_1 começa a aumentar enquanto o valor de μ_2 continua a permanecer constante, causando o valor do NAP 1, figura 6.7, a sofrer uma depressão acompanhando a variação da velocidade e voltando ao valor de 0,7. Após o torque mecânico atingir seu valor final, a maquina subitamente acelera em direção à velocidade nominal causando um aumento no valor do NAP 1, figura 6.8, e acompanha as pequenas oscilações de velocidade posteriores alcançando finalmente um valor estável de 0,7.

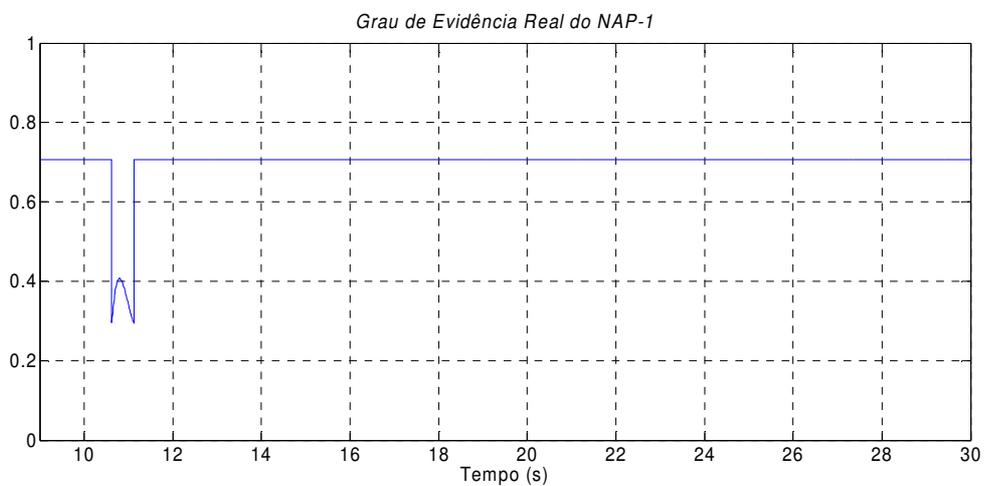


Figura 6.7 – Grau de Evidência Resultante Real do NAP 1 (Inicial) – Caso 1.

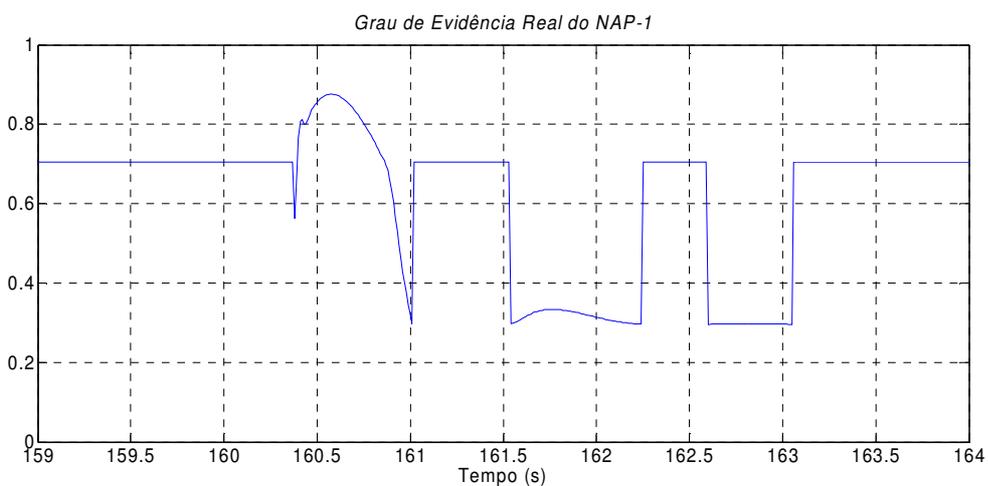


Figura 6.8 – Grau de Evidência Resultante Real do NAP 1 (Final) – Caso 1.

No NAP 2, o Grau de Evidência Resultante Real inicialmente sofre um aumento no seu valor devido a desaceleração do gerador aumentar o valor de μ_3 e μ_4 apresentar um valor constante próximo a um. Quando a máquina inicia uma aceleração após atingir um mínimo, o valor do NAP 2 diminui bruscamente, e depois acompanha mais uma oscilação na velocidade até atingir um valor estável em 0,3, quando as oscilações tendem a cessar.

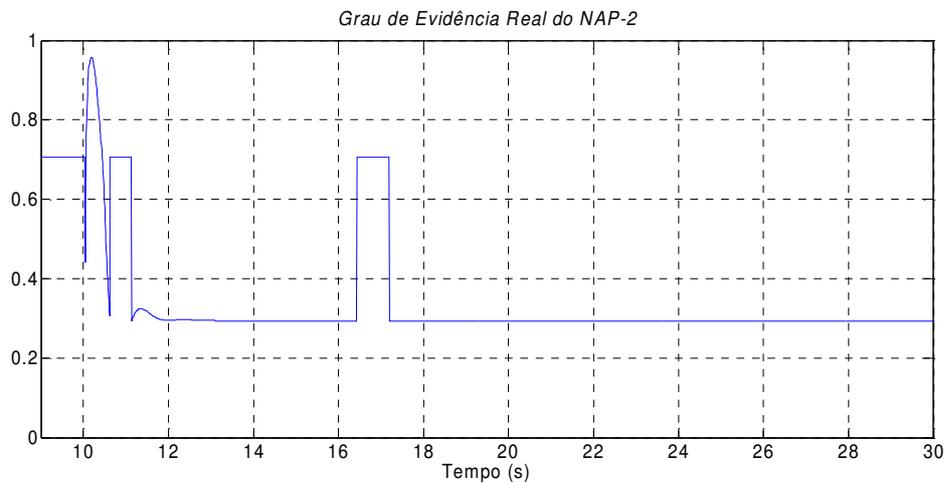


Figura 6.9 – Grau de Evidência Resultante Real do NAP 2 (Inicial) – Caso 1.

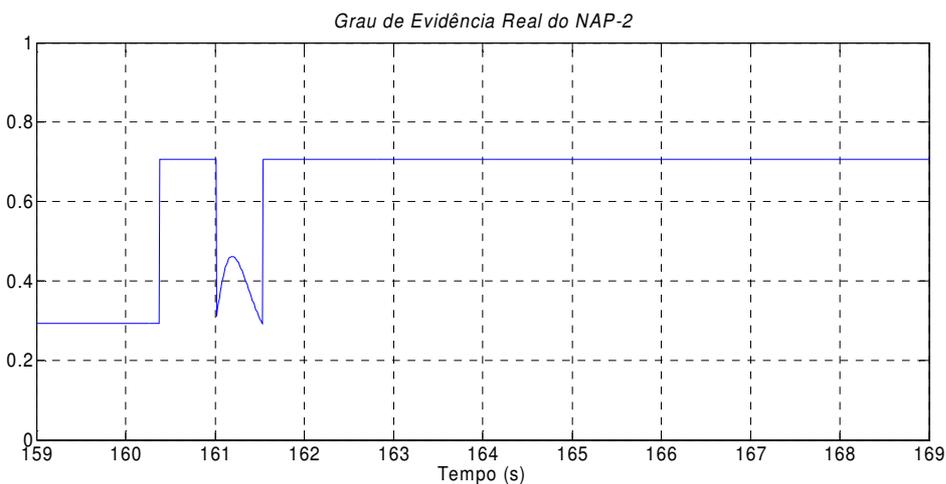


Figura 6.10 – Grau de Evidência Resultante Real do NAP 2 (Final) – Caso 1.

No NAP 3, figuras 6.11 e 6.12, o Grau de Evidência Resultante Real sofre queda em seu valor após a queda no valor do torque mecânico, pois a tensão nos

terminais do gerador decresce, então μ_2 permanece em um e μ_4 decresce. Então a tensão atinge o valor de 0,9998 e quando cresce novamente leva a saída do NAP 3 à valores próximos de 1 até onde a tensão passa por 1 pu e continua crescendo, e, portanto, o valor de μ_2 começa a decrescer levando o valor do Grau de Evidência Resultante do NAP 3 ao decréscimo também. Quando o torque mecânico atinge o valor final, a tensão nos terminais do gerador está acima de 1 pu e sofre um pequeno acréscimo com a aceleração do rotor, levando o valor de μ_2 a decrescer ainda mais seguindo a forma de onda da variação da tensão e fazendo com que o valor do NAP 3 também diminua e se estabilize em 0,9972.

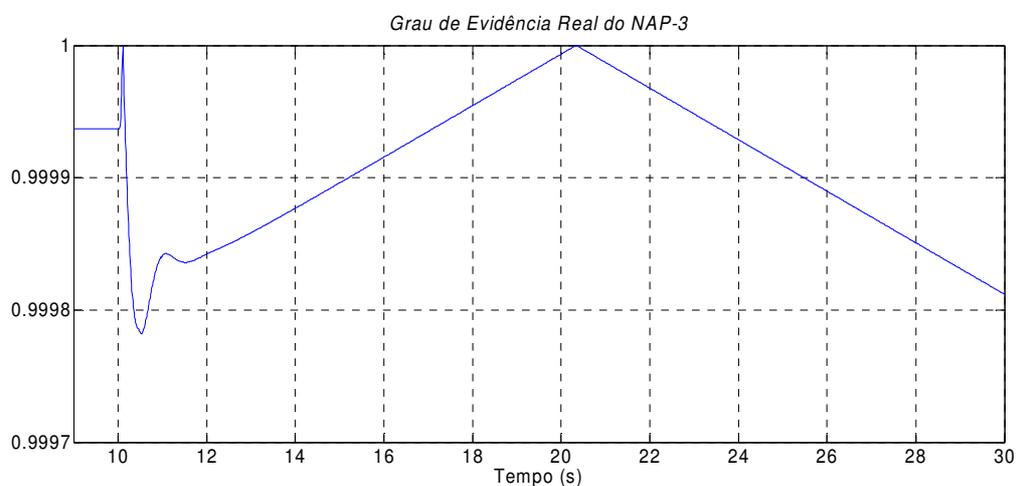


Figura 6.11 – Grau de Evidência Resultante Real do NAP 3 (Inicial) – Caso 1.

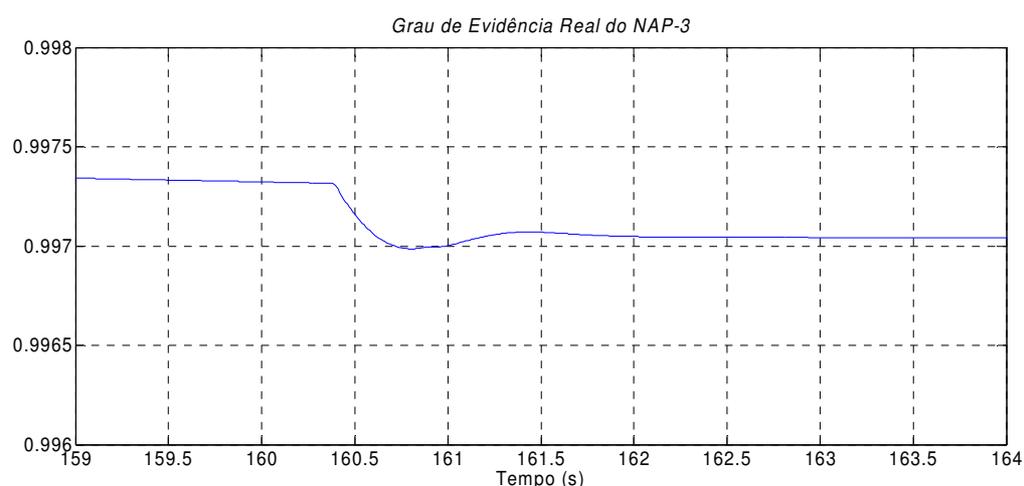


Figura 6.12 – Grau de Evidência Resultante Real do NAP 3 (Inicial) – Caso 1.

Na figura 6.13 e 6.14, o valor do fator do peso referente à velocidade, acompanha o crescimento do NAP 2 inicialmente e se acomoda, e após o torque mecânico atingir o seu valor final acompanha o NAP 1, pois neste instante a máquina sofre uma súbita aceleração.

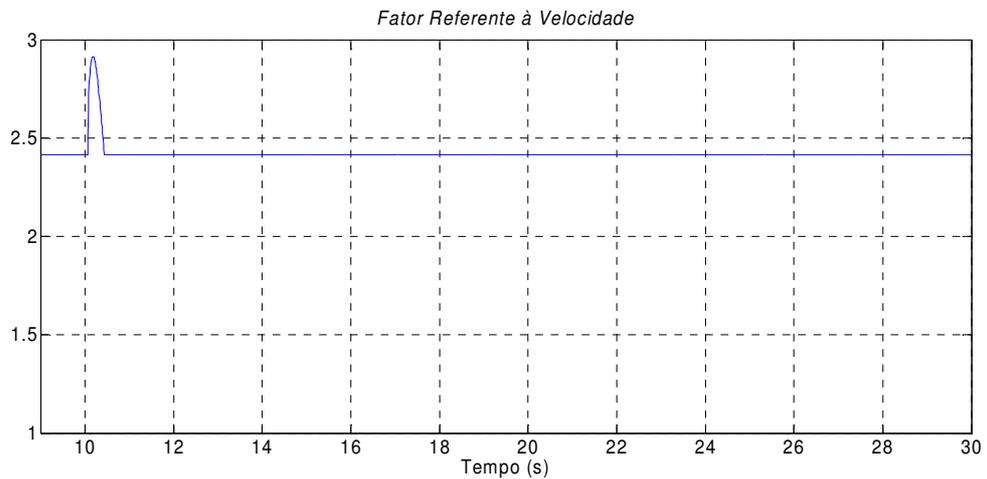


Figura 6.13 – Fator Referente à Velocidade (Inicial) – Caso 1.

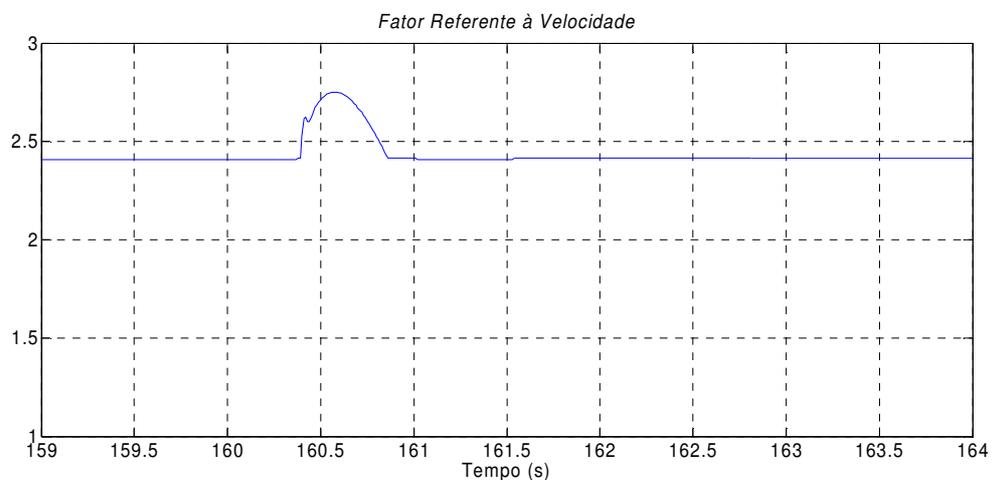


Figura 6.14 – Fator Referente à Velocidade (Final) – Caso 1.

O valor do fator do peso referente à tensão, na figura 6.15 e 6.16, pode-se notar claramente que acompanha o comportamento da saída do NAP 3, pois somente dele depende, porém, o acompanha de forma inversa. Quando há um aumento do valor do NAP 3, percebe-se que o fator de peso relacionado à tensão tende a diminuir, e igualmente acontece na situação inversa pois o valor do Grau de Evidência Resultante Real do NAP 3 satisfaz a proposição de a tensão estar dentro do valor desejado.

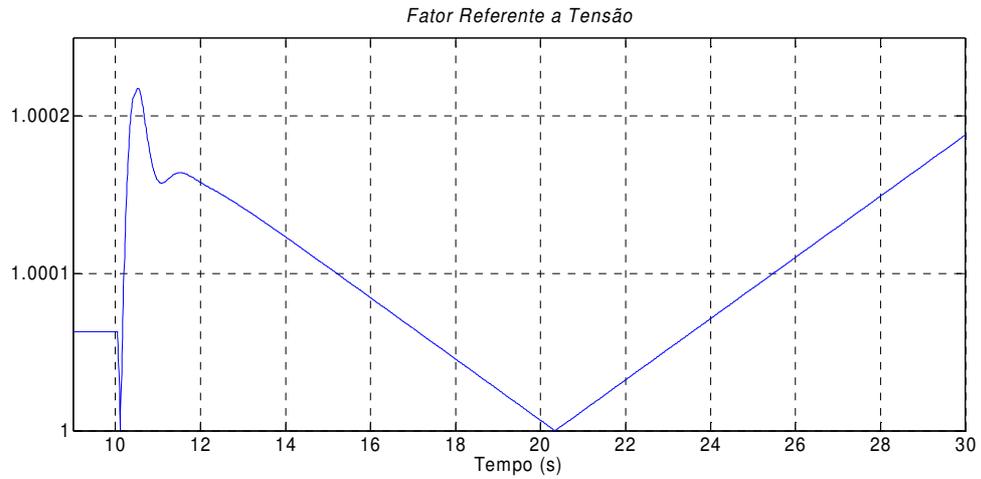


Figura 6.15 – Fator Referente à Tensão (Inicial) – Caso 1.

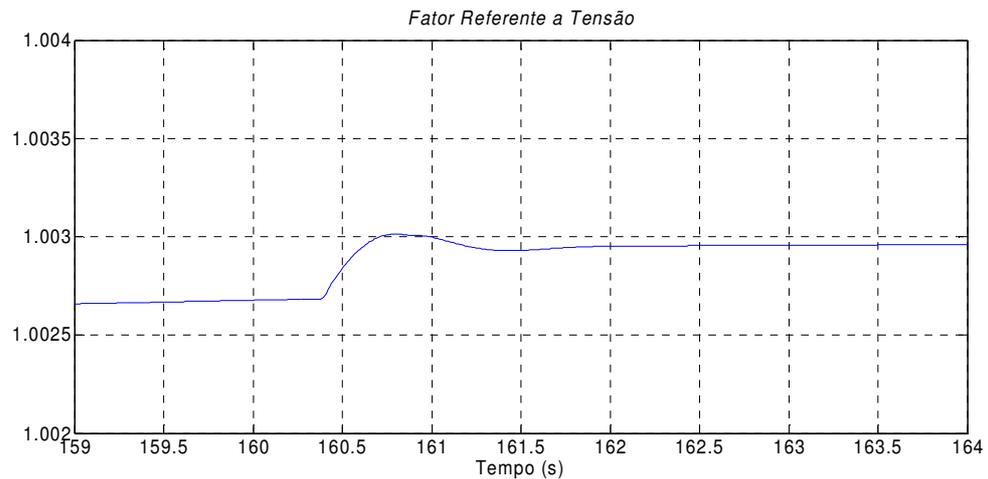


Figura 6.16 – Fator Referente à Tensão (Final) – Caso 1.

6.2 VARIAÇÃO DA TENSÃO DE REFERÊNCIA

Um decremento de 2% da tensão de referencia no barramento do gerador é realizado. Observa-se na figura 6.17, que para o desvio na velocidade, os controladores CP-LPA2v e CPC apresentaram desempenho melhor que o AVR+PSS quanto ao amortecimento da oscilação. Verifica-se que o CPC atinge a estabilidade após 12s, enquanto que o controlador CP-LPA2v se aproxima com maior rapidez ao valor desejado.

Quanto ao desempenho da tensão nos terminais do gerador, mostrado na figura 6.18, até o instante 10,3s, o controlador AVR+PSS possui uma resposta mais eficaz no ajuste da tensão do que os controladores CP-LPA2v e o CPC, enquanto o controlador CPC caminha mais rapidamente para 0,98 pu do que o CP-LPA2v no instante inicial. Após 10,6s, onde o CP-LPA2v cruza 0,98 pu, observa-se um desempenho melhor do que o dos controladores AVR+PSS e CPC na regulação da tensão.

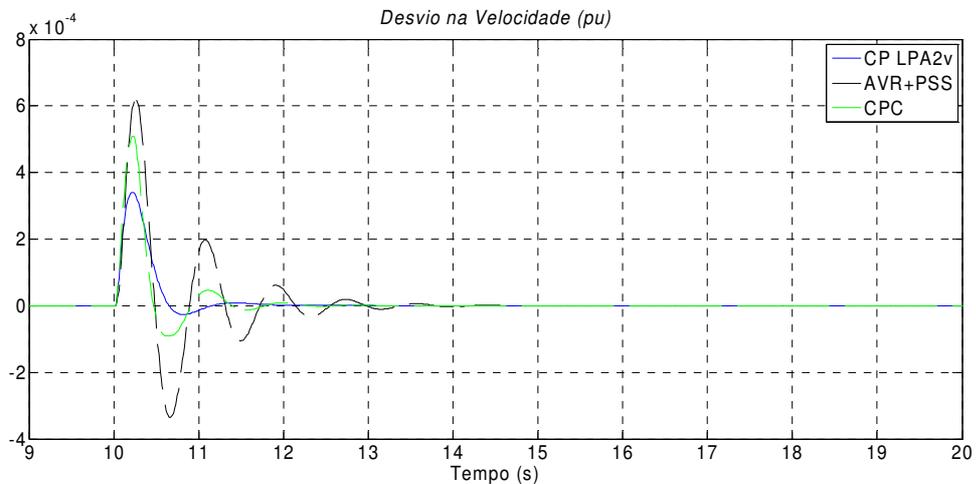


Figura 6.17 – Comparação do Desvio na Velocidade – Caso 2.

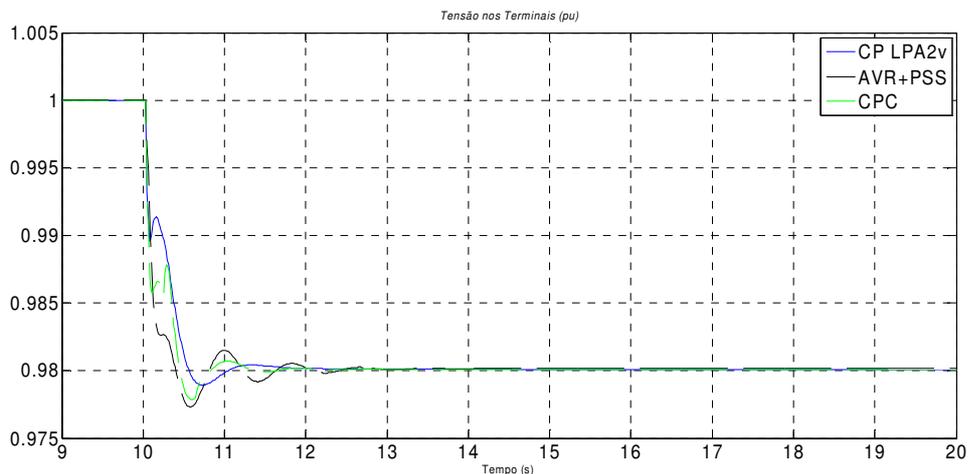


Figura 6.18 – Comparação da Tensão nos Terminais – Caso 2.

A tensão aplicada ao circuito de campo, na figura 6.19, nos controladores CP-LPA2v e CPC, atingem o valor de -6 pu igualmente no instante em que a tensão nos terminais sofre a perturbação. Porém, o controlador CP-LPA2v rapidamente leva a tensão de campo a um valor de 4 pu, fazendo com que a tensão nos terminais do

gerador tenha um valor de pico durante a sua curva de decréscimo. Então o controlador leva a tensão de campo suavemente ao seu valor final estabilizando-se em 2,5 pu.

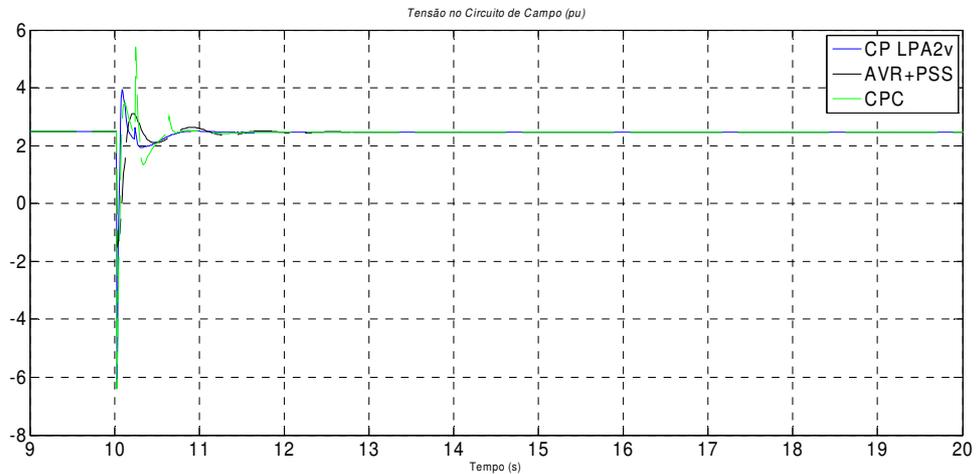


Figura 6.19 – Comparação da Tensão de Campo – Caso 2.

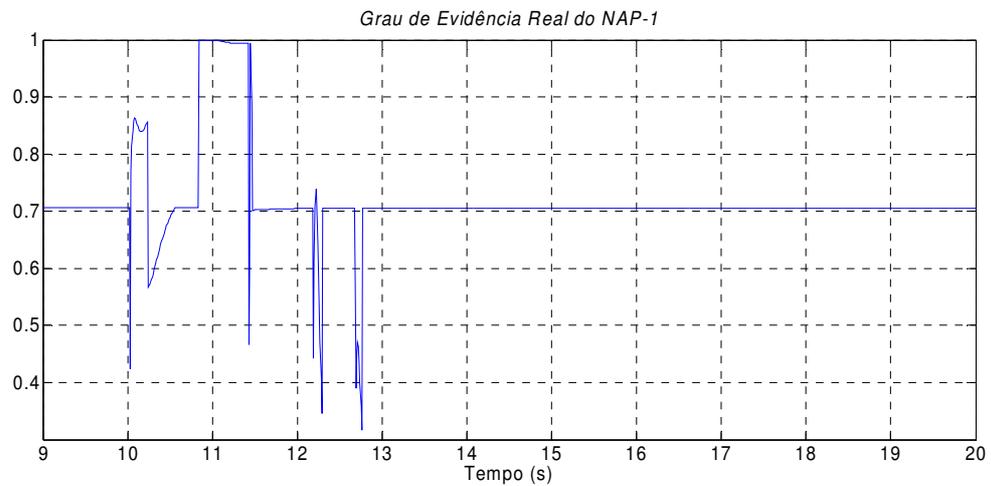


Figura 6.20 – Grau de Evidência Resultante Real do NAP 1 – Caso 2.

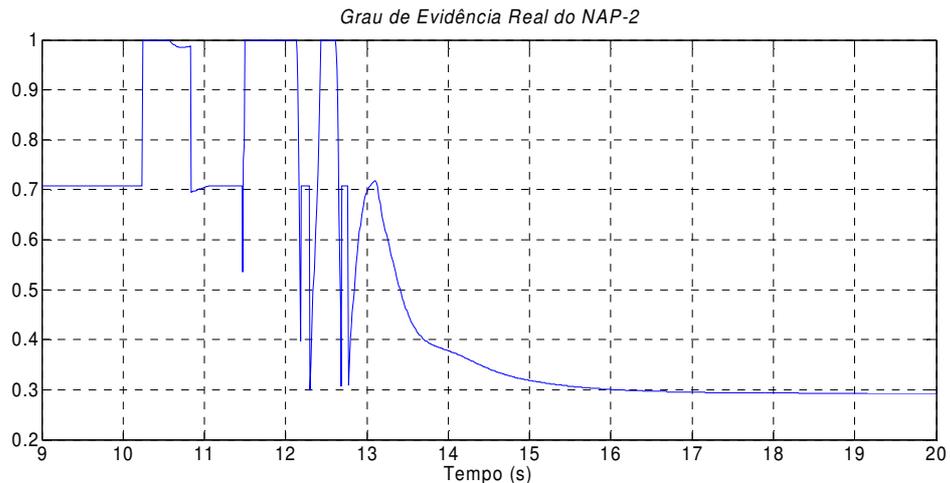


Figura 6.21 – Grau de Evidência Resultante Real do NAP 2 - Caso 2.

Com o decremento de 2% na tensão dos terminais do gerador o valor do Grau de Evidência μ_2 tende a decrescer rapidamente, e devido a aceleração do gerador, μ_1 tende a aumentar enquanto que μ_3 permanece em zero. Isso faz com que Grau de Evidência Resultante Real do NAP 1 aumente e comece a assumir o papel no ajuste do fator referente a velocidade. Em 10,25s a máquina começa a desacelerar, e a tensão caminha para o valor de 0,98 pu, portanto o Grau de Evidência Resultante Real do NAP 1 decresce enquanto o do NAP 2 cresce e toma a frente assumindo o controle do fator do peso relacionado à velocidade até 11,4s. O gerador então, em 11,5s começa a desacelerar em direção a velocidade nominal e faz com que o NAP 2 assuma o papel de controlar o peso relacionado à velocidade. Após 13s o NAP 1 assume pois o valor da velocidade se acomoda ligeiramente acima do valor de equilíbrio desejado.

O Grau de Evidência Resultante Real do NAP 3, sofre queda em seu valor após a queda no valor de referência da tensão, pois μ_2 decresce e μ_4 permanece em um. Conforme a tensão se aproxima do valor de 0,98 o valor da saída do NAP 3 tende a estabilização.

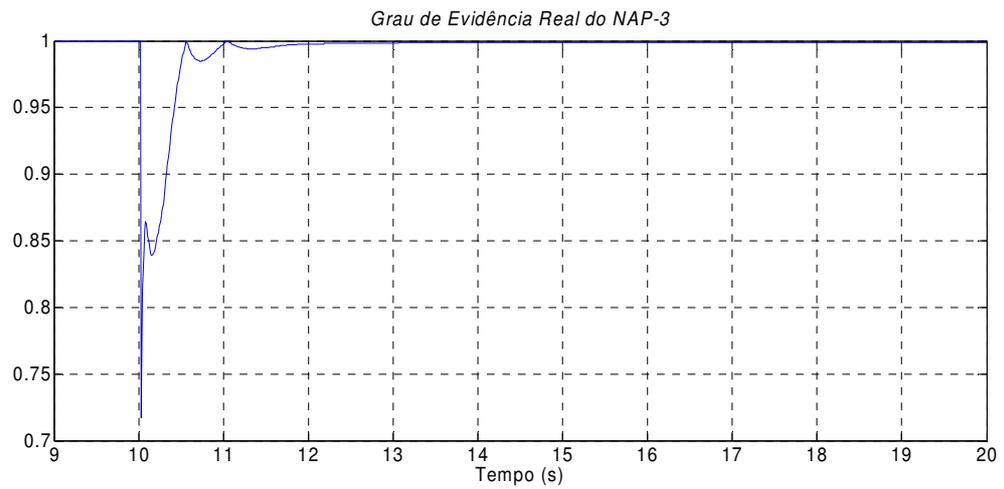


Figura 6.22 – Grau de Evidência Resultante Real do NAP 3 – Caso 2

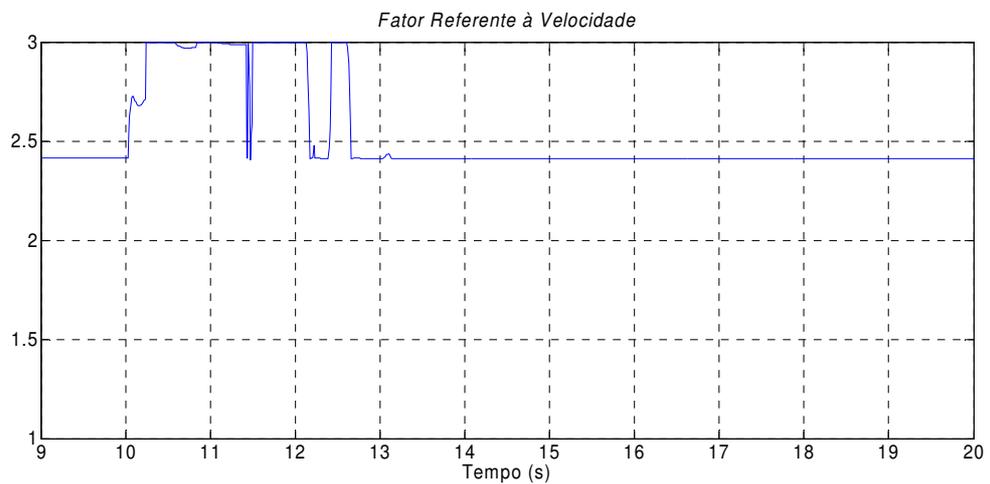


Figura 6.23 – Fator Referente à Velocidade – Caso 2.

Na figura 6.23, o valor do fator do peso referente à velocidade tende a 2,41 quando o sistema tende à estabilização.

O valor do fator do peso referente à tensão comporta de forma inversa ao valor de saída do NAP 3, como se observa na figura 6.24.

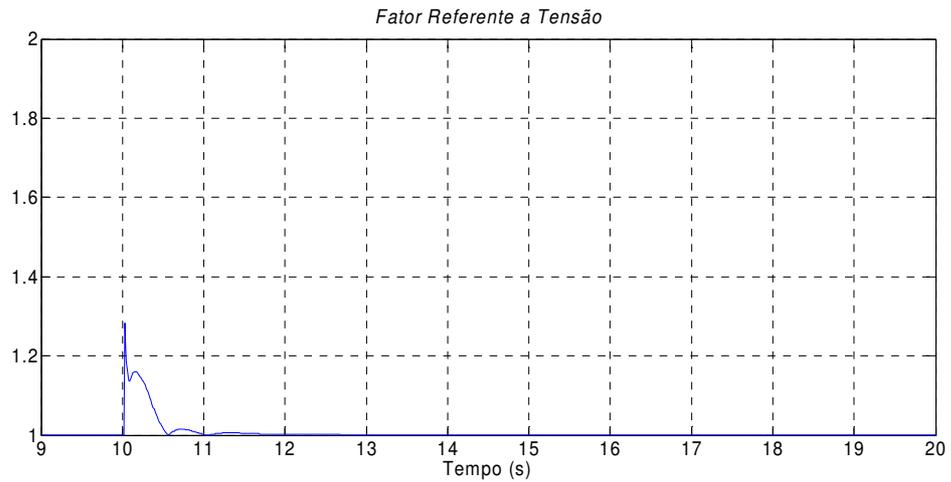


Figura 6.24 – Fator Referente à Tensão – Caso 2.

6.3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em comparação com o modelo CPMB convencional e o conjunto AVR e PSS, o controlador baseado na Lógica Paraconsistente se mostrou bastante eficaz, controlando a tensão, e amortecendo a oscilação eletromecânica em poucos ciclos em todos os casos estudados, validando assim, o método utilizado pela Rede de Análise Paraconsistente no controle da estabilidade do gerador síncrono.

7. CONCLUSÃO

Este trabalho mostrou com sucesso uma aplicação da LPA2v no tema da estabilidade a pequenos sinais de sistemas elétricos de potência. Utilizando o *software* MATLAB®, foi possível construir uma RAP para analisar as contradições referentes aos ajustes do algoritmo do CPBM clássico. Na pesquisa foram considerados os conceitos clássicos para o controle de estabilidade de tensão e velocidade de um gerador síncrono conectado ao barramento infinito, e aplicando a técnica de PSD analisou-se o modelo clássico na perspectiva do tempo discreto.

Destaca-se neste trabalho que com a utilização do CP-LPA2v pode-se amenizar um problema de controle que indica ações contraditórias impostas ao modelo tradicional CPBM para o controle da excitação do gerador síncrono. O conflito aparece quando há uma situação onde o torque eletromagnético é menor que o torque mecânico. Esta condição causa a aceleração do rotor de acordo com a equação dinâmica do gerador síncrono, e a ação do controle de excitação tem como finalidade causar uma elevação na tensão de excitação a fim de suprimir a oscilação eletromecânica, ao passo que se a tensão nos terminais estiver acima do valor de *set-point*, a ação do controlador seria diminuir a tensão. O mesmo acontece no caso do torque eletromagnético possuir um valor acima do torque mecânico, e a tensão nos terminais abaixo do valor desejado. Para eliminar este conflito aplicou-se através dos conceitos da LPA2v dois NAPs cuja saída passa por um algoritmo que analisa os dois Graus de Evidência Resultantes Reais e efetivamente realiza a tomada de decisão.

A partir da simulação computacional do modelo proposto no *software* MATLAB®, verificou-se que o CP-LPA2v efetivamente apresentou um resultado superior ao controle clássico do AVR em conjunto com o PSS em todos os casos estudados. Com relação ao CPC convencional, o qual apresenta ajuste dos pesos em patamares constantes, o CP-LPA2v se mostrou também superior devido a sua característica de ajuste variável em um espaço contínuo de valores com limites pré-determinados. O método de aplicação da LPA2v pretendido, se comportou de forma concisa na forma de acrescentar sinais adicionais para quando necessário o

amortecimento das oscilações eletromecânicas sem prejudicar, no entanto, o controle da tensão.

A aplicação da LPA2v na estabilidade à pequenos sinais de sistemas de potência se mostrou muito promissora, e este trabalho abre caminho para outras abordagens da Lógica Paraconsistente neste assunto.

7.1 TRABALHOS FUTUROS

Como recomendação para trabalhos futuros acerca do modelo do CP-LPA2v propõe-se:

- A implementação do algoritmo apresentado em um controlador digital e a realização de testes do CP-LPA2v em um gerador síncrono real;
- O desenvolvimento de um controlador preditivo paraconsistente para controlar a velocidade de um gerador através do controle de injeção de combustível em uma turbina a gás em conjunto com o controle de excitação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BAO-CANG, D., **Modern Predictive Control**, Boca Raton, CRC Press, 2010.

DA SILVA FILHO, J. I., ABE, J. M., **Redes Neurais Artificiais Paraconsistentes**, São Paulo, Arte Ciência, 1999.

DA SILVA FILHO, J.I., “**Métodos de Aplicações da Lógica Paraconsistente Anotada de Anotação com dois valores LPA2v com construção de Algoritmo e Implementação de Circuitos Eletrônicos**”, Tese (Doutorado), EPUSP, São Paulo, 1999.

FERRARA, L. F. P., CAMARGO, J. M., ROCCO, A., LAMBERT-TORRES, G., DA SILVA FILHO, J. I., “**Para-Previsor LPA2v: Um Sistema Computacional Previsor de Perfil de Cargas em Sistemas Elétricos de Potência construído com os Fundamentos da Lógica Paraconsistente Anotada**”, Seleção Documental – Ed. Paralogike – Santos – SP Brasil, Mar. 2011, p. 11-17.

IEEE Digital Excitation Applications Task Force, “**Digital Excitation Technology - A Review of Features, Functions and Benefits**”, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 12, No.3, September 1997.

IEEE Std 1159-1995, IEEE **Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality**, 1995, p. 1-9.

JIN, Q., “**Synchronous Generator Excitation Control Based On Model Predictive Control**”, Msc. Thesis, Ryerson University, Canada, 2005.

KAROUI, K., et al. **Dynamic Behaviour of Industrial Power Systems with Cogeneration**. Conferencia Sobre a Indústria de Fornecimento de Energia Elétrica CEPSI 2000 - Manila, Filipinas. Outubro, 2000.

LAW, K. T., HILL, D. J., GODFREY, N. R., “**Robust Controller Structure for Coordinated Power System Voltage regulator and Stabilizer Design**”, IEEE Transactions on Control Systems Technology, Volume: 2, Issue: 3 , Sept. 1994, p. 220-232.

KUNDUR, P. **Power System Stability and Control**. Electric Power Research Institute. : McGraw-Hill, Power System Engineering Series, 1994.

MAO, C., FAN, J., MALIK, O. P., HOPE, G. S., “**Studies of real-time adaptive optimal excitation controller and adaptive optimal power system stabilizer**”, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol.7, Issue: 3, Sept. 1992, p. 598-605.

MARTINS, H. G.; “**A Lógica Paraconsistente Anotada de Quatro Valores – LPA4v Aplicada em Sistema de Raciocínio Baseado em Casos para o Restabelecimento de Subestações Elétricas**”. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Itajubá. Departamento de Engenharia Elétrica, 2003.

PADIYAR, K. R., **Power System Dynamics – Stability And Control**, Singapore, John Wiley, 1996.

ROGERS, G., **Power System Oscillations**, Kluwer Academic Publishers, 2000, p. 28-50.

SUELIO, F. C., “**Regulador Automático de Tensão Robusto Utilizando Técnicas de Controle Adaptativo**”. Disponível em: <http://repositorio.ufrn.br:8080/jspui/bitstream/1/10816/1/SuelioFC_DISSERT.pdf>. Acesso em: 16 jul 2016.

YU, Y. N., **Electric Power System Dynamics**, Academic Press, 1983, p. 95-137.

YU, Y. N., MOUSSA, H. A. M., “**Optimal Stabilization of Multi-machine Systems**”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, May/June 1972, p. 1174-1182.

ZHANG, Y., CHEN, G. P., MALIK, O. P., HOPE, G. S., “**A multi-input power system stabilizer based on artificial neural networks**”, WESCANEX 93. Communications, Computers and Power in the Modern Environment Conference Proceedings, IEEE, 17-18 May 1993, p. 240-246.

APÊNDICE A – Modelamento Matemático do Gerador Síncrono

Para aplicação neste trabalho o modelo do gerador síncrono utilizado consiste em um enrolamento trifásico no estator, um enrolamento de campo, um enrolamento amortecedor no eixo direto e dois enrolamentos amortecedores no eixo em quadratura.

Gerador Síncrono

Como convencionalmente é expresso, o eixo magnético do enrolamento de campo é definido com o eixo direto do rotor (eixo-d), e o outro eixo posicionado a 90° elétricos do eixo magnético do enrolamento de campo é definido como eixo de quadratura (eixo-q). Na Figura A.1 representa-se esquematicamente o modelo do circuito desenvolvido nesta seção. No estator há um enrolamento trifásico “abc” em três eixos distantes entre si em 120° no espaço. No rotor são representados quatro enrolamentos sendo dois no eixo-d e dois no eixo-q. No eixo-d dispõe-se um enrolamento de campo e um enrolamento amortecedor, e no eixo-q, dois enrolamentos amortecedores. Baseando-se na Figura A.1 é possível estabelecer a seguinte relação entre os fluxos:

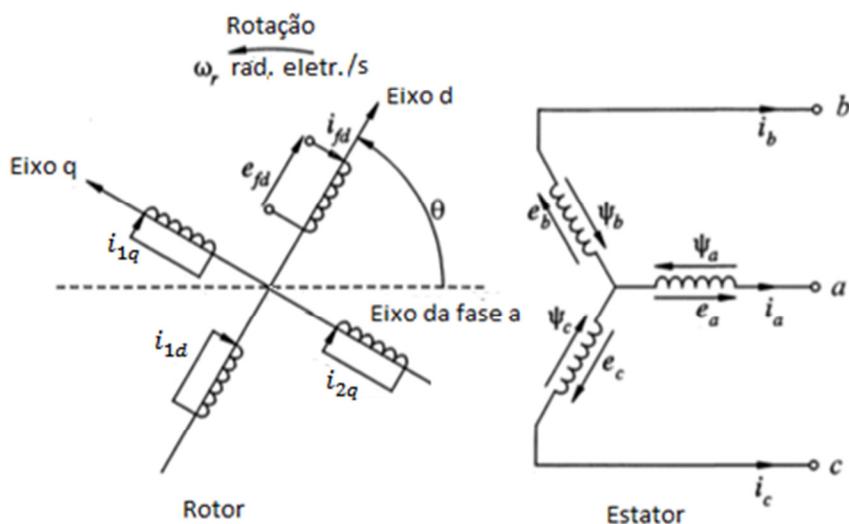


Figura A.1 – Modelo Típico do Gerador Síncrono. (Fonte: PADIYAR, 1996).

Representando matricialmente a equação dos enlaces de fluxo em função das correntes no rotor e no estator tem-se que:

$$\begin{bmatrix} \Psi_s \\ \Psi_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{ss} & L_{sr} \\ L_{rs} & L_{rr} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} i_s \\ i_r \end{bmatrix} \quad (\text{A.1})$$

A transposta do vetor enlace de fluxo do estado é Ψ_s^T e a transposta do vetor enlace de fluxo do rotor é Ψ_r^T .

$$\Psi_s^T = [\Psi_a \ \Psi_b \ \Psi_c] \quad (\text{A.2})$$

$$\Psi_r^T = [\Psi_{fd} \ \Psi_{1d} \ \Psi_{1q} \ \Psi_{2q}] \quad (\text{A.3})$$

No vetor enlace de fluxo referente ao rotor observa-se a presença dos termos relacionados aos enrolamentos amortecedores de eixo-d e eixo-q. Assim como feito com os enlaces de fluxo, se expressa as correntes referentes aos circuitos do rotor e estator em forma vetorial.

$$i_s^T = [i_a \ i_b \ i_c] \quad (\text{A.4})$$

$$i_r^T = [i_{fd} \ i_{1d} \ i_{1q} \ i_{2q}] \quad (\text{A.5})$$

Na equação (A.6), as indutâncias próprias dos enrolamentos do estator formam uma matriz 3x3, e, os termos que a compõem são divididos em termos que são próprios aos enrolamentos como, l_{aa} , l_{bb} , l_{cc} e termos mútuos entre enrolamentos. O termo que representa a indutância mútua entre os enrolamentos A e B, por exemplo, é l_{ab} , assim como entre os enrolamentos A e C é o termo l_{ac} e assim por diante. Estes termos e as suas respectivas reflexões l_{ba} e l_{ca} são iguais.

$$L_{ss} = \begin{bmatrix} l_{aa} & l_{ab} & l_{ac} \\ l_{ba} & l_{bb} & l_{bc} \\ l_{ca} & l_{cb} & l_{cc} \end{bmatrix} \quad (\text{A.6})$$

As indutâncias próprias dos enrolamentos localizados no estado possuem dois termos. O primeiro termo, L_{aa0} , é constante, o segundo varia com o ângulo elétrico θ que representa o ângulo entre o eixo magnético da fase e o eixo magnético do circuito de campo. Os eixos dos enrolamentos são defasados no espaço em 120° , portanto os argumentos dos cossenos das equações (A.7), (A.8) e (A.9) aparecem adicionados ou subtraídos de $2\pi/3$.

$$l_{aa} = L_{aa0} + L_{aa2} \cos 2\theta \quad (\text{A.7})$$

$$l_{bb} = L_{aa0} + L_{aa2} \cos \left(2\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \quad (\text{A.8})$$

$$l_{cc} = L_{aa0} + L_{aa2} \cos \left(2\theta - \frac{2\pi}{3} \right) \quad (\text{A.9})$$

O ângulo elétrico é obtido através do ângulo mecânico do rotor θ_m e do número de polos por fase p_f da máquina síncrona de acordo com a equação (A.10).

$$\theta = \frac{p_f}{2} \theta_m \quad (\text{A.10})$$

As indutâncias mútuas entre enrolamentos do estator são expressas através das equações (A.11), (A.12) e (A.13).

$$l_{ab} = l_{ba} = -L_{ab0} + L_{ab2} \cos \left(2\theta - \frac{2\pi}{3} \right) \quad (\text{A.11})$$

$$l_{ac} = l_{ca} = -L_{ab0} + L_{ab2} \cos \left(2\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \quad (\text{A.12})$$

$$l_{bc} = l_{cb} = -L_{ab0} + L_{ab2} \cos 2\theta \quad (\text{A.13})$$

Ainda da equação A.1, as indutâncias mútuas entre os enrolamentos do estator e rotor formam uma matriz 3x4, onde envolvem os três enrolamentos do estator e os quatro enrolamentos presentes no rotor, ou seja, o enrolamento de campo e amortecedor no eixo-d e os dois enrolamentos amortecedores do eixo-q. Estas indutâncias mútuas também são variáveis do ângulo θ .

$$L_{sr} = \begin{bmatrix} L_{afd} * \cos \theta & L_{a1d} \cos \theta & -L_{a1q} \sin \theta & -L_{a2q} \sin \theta \\ L_{afd} \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & L_{a1d} \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & -L_{a1q} \sin \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & -L_{a2q} \sin \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) \\ L_{afd} \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) & L_{a1d} \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) & -L_{a1q} \sin \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) & -L_{a2q} \sin \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \end{bmatrix} \quad (\text{A.14})$$

A matriz L_{rs} é simplesmente a transposta de L_{sr} como pode ser visto na equação (A.15).

$$L_{rs} = \begin{bmatrix} L_{afd} \cos \theta & L_{afd} \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & L_{afd} \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \\ L_{a1d} \cos \theta & L_{a1d} \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & L_{a1d} \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \\ -L_{a1q} \sin \theta & -L_{a1q} \sin \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & -L_{a1q} \sin \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \\ -L_{a2q} \sin \theta & -L_{a2q} \sin \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & -L_{a2q} \sin \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \end{bmatrix} \quad (\text{A.15})$$

O termo L_{afd} é o valor máximo da indutância entre o enrolamento da fase A e o enrolamento de campo, L_{a1d} é o valor máximo da indutância entre o enrolamento da fase A e o enrolamento amortecedor do eixo-d, L_{a1q} é o valor máximo da indutância entre o enrolamento da fase A e o enrolamento amortecedor do eixo-q, o mesmo para L_{a2q} . Consideram-se os termos referentes às fases B e C iguais aos da fase A.

A matriz que representa as indutâncias próprias aos circuitos do rotor é uma matriz estática, ou seja, não varia com o ângulo θ e não possui termos cruzados entre eixo-d e eixo-q. Isso quer dizer que não é considerada indutância mútua entre estes eixos, somente entre enrolamentos do mesmo eixo.

$$L_{rr} = \begin{bmatrix} L_{ffd} & L_{f1d} & 0 & 0 \\ L_{f1d} & L_{11d} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L_{11q} & L_{12q} \\ 0 & 0 & L_{12q} & L_{22q} \end{bmatrix} \quad (\text{A.16})$$

O termo L_{ffd} , representa a indutância própria do enrolamento de campo, L_{11d} , L_{11q} e L_{22q} são as indutâncias próprias dos enrolamentos amortecedores do eixo-d e eixo-q respectivamente, L_{f1d} é a indutância mutua entre os enrolamentos de campo e o enrolamento amortecedor, ambos do eixo-d, e L_{12q} é a indutância mutua entre os dois enrolamentos amortecedores do eixo-q.

As tensões do gerador podem ser representadas na forma matricial através dos vetores, tensão referente ao estator (equação (A.18)) e tensão referente ao rotor (equação (A.19)). Observa-se que as tensões dos enrolamentos amortecedores nos dois eixos são igualmente zero, pois os enrolamentos amortecedores são curto circuitados.

$$\begin{bmatrix} e_s \\ e_r \end{bmatrix} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_s \\ \Psi_r \end{bmatrix} + R \begin{bmatrix} -i_s \\ i_r \end{bmatrix} \quad (\text{A.17})$$

$$e_s^T = [e_a \ e_b \ e_c] \quad (\text{A.18})$$

$$e_r^T = [e_{fd} \ 0 \ 0 \ 0] \quad (\text{A.19})$$

A matriz das resistências dos enrolamentos de fase e enrolamentos do rotor pode ser representada na forma:

$$R = \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_a & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_a & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_{fd} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_{1d} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_{1q} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_{2q} \end{bmatrix} \quad (A.20)$$

As indutâncias L_{ss} e L_{sr} vistas anteriormente variam com a posição do rotor θ tornando difícil computacionalmente os cálculos do modelo trifásico. Para diminuir este esforço computacional aplica-se a transformação dq0, onde o modelo do gerador pode ser representado a partir de um referencial rotativo.

Transformação de Park

Para simplificação computacional, da equação (A.21), as correntes e tensões do estator poder ser transformadas em dois conjuntos variáveis ortogonais. Um conjunto alinhado com o eixo direto e outro conjunto alinhado ao eixo em quadratura a 90° do eixo direto. Essa transformação é de referencial é conhecida como transformação de Park ou transformação dq0 (PADIYAR, 1996).

$$C_p = \sqrt{\frac{2}{3}} * \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin \theta & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (A.21)$$

$$C_p^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (A.22)$$

Os coeficientes que multiplicam as matrizes são escolhidos de forma fazer com que as equações do gerador sejam invariantes com relação à potência tanto para as variáveis 'abc' quanto as variáveis 'dq0'. Esse recurso facilita o modelo por unidade do gerador. As matrizes apresentadas tem a função de transformar as

variáveis, enlace se fluxo, tensões, e correntes no estator, em variáveis dq0. Aplicando-se a transformada à equação (A.1):

$$\begin{bmatrix} C_p^{-1} & 0 \\ 0^T & U \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Psi_{dq0} \\ \Psi_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{ss} & L_{sr} \\ L_{rs} & L_{rr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_p^{-1} & 0 \\ 0^T & U \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dq0} \\ i_r \end{bmatrix} \quad (\text{A.23})$$

Isolando o vetor enlace de fluxo, a equação (A.23) fica na forma:

$$\begin{bmatrix} \Psi_{dq0} \\ \Psi_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_p L_{ss} C_p^{-1} & C_p L_{sr} \\ L_{rs} C_p^{-1} & L_{rr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dq0} \\ i_r \end{bmatrix} \quad (\text{A.24})$$

$$0 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{A.25})$$

$$U = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{A.26})$$

Onde, a equação (A.25) é a matriz nula e a equação (A.26) é chamada de matriz identidade.

Os vetores enlace de fluxo, tensão e corrente referentes ao referencial dq0 são representados pelas equações (A.27), (A.28) e (A.29).

$$\Psi_{dq0}^T = [\Psi_d \ \Psi_q \ \Psi_0] \quad (\text{A.27})$$

$$e_{dq0}^T = [e_d \ e_q \ e_0] \quad (\text{A.28})$$

$$i_{dq0}^T = [i_d \ i_q \ i_0] \quad (\text{A.29})$$

O termo $C_p L_{ss} C_p^{-1}$ presente na equação (A.24) pode ser escrito na forma de indutâncias de eixo-d L_d , eixo-q L_q e componente zero L_0 :

$$C_p L_{ss} C_p^{-1} = \begin{bmatrix} L_d & 0 & 0 \\ 0 & L_q & 0 \\ 0 & 0 & L_0 \end{bmatrix} \quad (\text{A.30})$$

$$L_d = L_{aa0} + L_{ab0} + 3/2 * L_{aa2} \quad (\text{A.31})$$

$$L_q = L_{aa0} + L_{ab0} - 3/2 * L_{aa2} \quad (\text{A.32})$$

$$L_0 = L_{aa0} - 2 * L_{ab0} \quad (\text{A.33})$$

Os termos $C_P L_{sr}$, e $L_{rs} C_P^{-1}$ são:

$$C_P L_{sr} = \sqrt{\frac{3}{2}} \begin{bmatrix} L_{afd} & L_{a1d} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -L_{a1q} & -L_{a2q} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{A.34})$$

$$L_{rs} C_P^{-1} = \sqrt{\frac{3}{2}} \begin{bmatrix} L_{afd} & 0 & 0 \\ L_{a1d} & 0 & 0 \\ 0 & -L_{a1q} & 0 \\ 0 & -L_{a2q} & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{A.35})$$

Agora aplicando a transformação de Park para as tensões de estator e de rotor obtém-se a equação matricial:

$$\begin{bmatrix} e_{dq0} \\ e_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_P & 0 \\ 0^T & U \end{bmatrix} \left(\frac{d\theta}{dt} \frac{d}{d\theta} \begin{bmatrix} C_P^{-1} & 0 \\ 0^T & U \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} \Psi_{dq0} \\ \Psi_r \end{bmatrix} + R \begin{bmatrix} C_P & 0 \\ 0^T & U \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_P^{-1} & 0 \\ 0^T & U \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -i_{dq0} \\ i_r \end{bmatrix} \quad (\text{A.36})$$

Simplificando a equação (2.36) resulta em:

$$\begin{bmatrix} e_d \\ e_q \\ e_0 \end{bmatrix} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_d \\ \Psi_q \\ \Psi_0 \end{bmatrix} + \omega_r * \begin{bmatrix} -\Psi_q \\ \Psi_d \\ 0 \end{bmatrix} - R_a * \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} \quad (\text{A.37})$$

Onde $\omega_r = \frac{d\theta}{dt} = 2\pi f$ é a velocidade angular do rotor em radianos elétricos por segundo.

Considerando um circuito é balanceado pode-se eliminar a componente de sequência zero. Levando-se em conta que o componente diferencial do enlace de fluxo presente na equação (A.37) é pequeno e decai rapidamente no tempo após uma perturbação, pode-se eliminar este componente, simplificando de forma substancial análise da estabilidade do gerador síncrono. Aplicando-se essas simplificações, as equações das tensões ficam da seguinte forma:

$$e_d = \frac{d}{dt} \Psi_d - \omega_r \Psi_q - R_a i_d \quad (\text{A.38})$$

$$e_q = \frac{d}{dt} \Psi_q + \omega_r \Psi_d - R_a i_q \quad (\text{A.39})$$

A potência trifásica nos terminais do gerador pode ser calculada a partir das tensões e correntes como a seguir:

$$P_t = e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c \quad (\text{A.40})$$

$$P_t = e_d i_d + e_q i_q \quad (\text{A.41})$$

A potência eletromagnética transferida no entreferro pode ser obtida adicionando-se as perdas resistivas no estator:

$$P_e = P_t + (i_d^2 + i_q^2) R_a \quad (\text{A.42})$$

Substituindo-se na equação (A.42) as tensões representadas pelas equações (A.38) e (A.39) obtém-se a equação da potência eletromagnética transferida no entreferro em termos dos fluxos:

$$P_e = \omega_r (\Psi_d i_q - \Psi_q i_d) \quad (\text{A.43})$$

O torque eletromagnético pode ser obtido dividindo-se a equação (A.43) pela velocidade mecânica do rotor ω_m , em radianos por segundo:

$$T_e = \frac{P_e}{\omega_m} (\Psi_d i_q - \Psi_q i_d) \quad (\text{A.44})$$

Modelo do Gerador Síncrono Por Unidade

De forma a simplificar o modelo matemático do gerador síncrono é conveniente igualar as indutâncias mutuas entre o enrolamento do estator e cada enrolamento dos eixos do rotor:

$$\overline{L}_{ad} = \overline{L}_{afd} = \overline{L}_{a1d} \quad (\text{A.45})$$

$$\overline{L}_{aq} = \overline{L}_{a1q} = \overline{L}_{a2q} \quad (\text{A.46})$$

$$\overline{L}_{ad} = \overline{L}_d - \overline{L}_l \quad (\text{A.47})$$

$$\overline{L}_{aq} = \overline{L}_q - \overline{L}_l \quad (\text{A.48})$$

A indutância L_l é denominada indutância de dispersão, e L_{ad} e L_{aq} são as indutâncias mutuas entre os enrolamentos do estator e os eixos d e q.

Desprezando-se as pequenas variações de ω_r e igualando-a a um obtém-se:

$$\bar{T}_e = \bar{\Psi}_d \bar{i}_q - \bar{\Psi}_q \bar{i}_d \quad (\text{A.49})$$

$$\bar{e}_d = -\bar{\Psi}_q - \bar{R}_a \bar{i}_d \quad (\text{A.50})$$

$$\bar{e}_q = \bar{\Psi}_d - \bar{R}_a \bar{i}_q \quad (\text{A.51})$$

Nesta dissertação, daqui em diante, serão usados somente os valores por-unidade, portanto não será mais necessária a barra superior nas variáveis.

$$e_d = -\Psi_q - R_a i_d$$

$$e_q = \Psi_d - R_a i_q$$

$$\frac{d}{dt} \Psi_{fd} = \omega_0 (e_{fd} - R_{fd} i_{fd}) \quad (\text{A.52})$$

$$\frac{d}{dt} \Psi_{1d} = \omega_0 R_{1d} i_{1d} \quad (\text{A.53})$$

$$\frac{d}{dt} \Psi_{1q} = \omega_0 R_{1q} i_{1q} \quad (\text{A.54})$$

$$\frac{d}{dt} \Psi_{2q} = \omega_0 R_{2q} i_{2q} \quad (\text{A.55})$$

O termo ω_0 é a frequência angular a 60Hz. Seu valor é de 377 rad. eletr./s.

As equações (A.50) e (A.51) estabelecem a relação entre tensões nos terminais, enlaces de fluxo e correntes no estator a partir do referencial 'dq0'. As equações (A.52), (A.53) (A.54) e (A.55) descrevem as variações dos fluxos nos circuitos de campo e circuitos amortecedores do gerador síncrono.

A descrição mecânica do modelo com relação às variações de torque eletromagnético é representada a seguir:

$$\frac{d\Delta\omega_0}{dt} = \frac{1}{2H} (T_m - T_e - K_D \Delta\omega_0) \quad (\text{A.56})$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega_0 \Delta\omega_0 \quad (\text{A.57})$$

T_m - torque mecânico aplicado ao gerador;

$\Delta\omega_0$ - a variação da velocidade angular;

δ - a posição angular do rotor;

K_D - a constante de amortecimento;

H - a constante de inércia.

Circuito Equivalente do Eixo-d e Eixo-q

Considerando-se as indutâncias mutuas no rotor entre enrolamentos do mesmo eixo e igualando-as a L_{ad} e L_{aq} respectivamente:

$$L_{f1d} = L_{ad} \quad (\text{A.58})$$

$$L_{12d} = L_{aq} \quad (\text{A.59})$$

As indutâncias próprias referentes a cada enrolamento referentes a cada eixo são:

$$L_{ffd} = L_{fd} + L_{ad} \quad (\text{A.60})$$

$$L_{11d} = L_{1d} + L_{ad} \quad (\text{A.61})$$

$$L_{11q} = L_{1q} + L_{aq} \quad (\text{A.62})$$

$$L_{22q} = L_{2q} + L_{aq} \quad (\text{A.63})$$

Sendo assim, os enlaces de fluxo no gerador podem ser representados pela matriz:

$$\begin{bmatrix} \Psi_d \\ \Psi_q \\ \Psi_{fd} \\ \Psi_{1d} \\ \Psi_{1q} \\ \Psi_{2q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & 0 & L_{ad} & L_{ad} & 0 & 0 \\ 0 & L_d & 0 & 0 & L_{aq} & L_{aq} \\ L_{ad} & 0 & L_{ffd} & L_{ad} & 0 & 0 \\ L_{ad} & 0 & L_{ad} & L_{11d} & 0 & 0 \\ 0 & L_{aq} & 0 & 0 & L_{11q} & L_{aq} \\ 0 & L_{aq} & 0 & 0 & L_{aq} & L_{22q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_{fd} \\ i_{1d} \\ i_{1q} \\ i_{2q} \end{bmatrix} \quad (\text{A.64})$$

Os circuitos equivalentes do eixo-d e eixo-q podem ser representados na forma apresentada na figura A.2

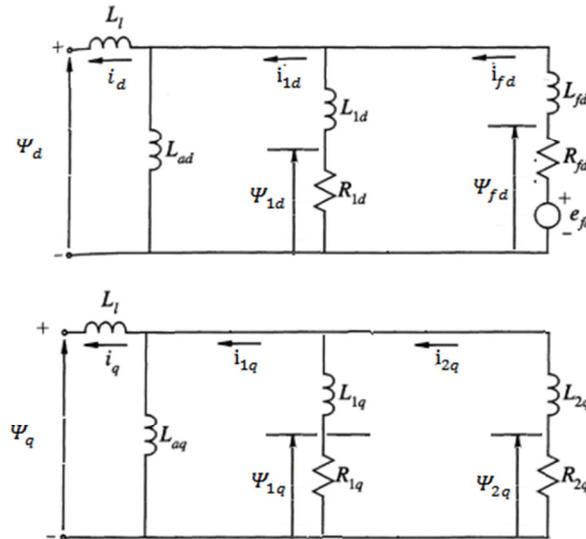


Figura A.2 – Circuitos Equivalentes do Gerador Síncrono.

(Adaptado: KUNDUR, 1994).

Efeitos da Saturação no Modelo do Gerador

Os efeitos da saturação apresentam um papel importante no projeto do controle de excitação. O fluxo de dispersão predomina no espaço do entreferro, portanto considera-se que a indutância de dispersão é independente da saturação do ferro. Sendo L_{adns} e L_{aqns} as indutâncias mutuas não saturadas, as indutâncias mutuas saturadas são:

$$L_{ads} = K_{sd}L_{adns} \quad (A.65)$$

$$L_{aqs} = K_{sq}L_{aqns} \quad (A.66)$$

Os fatores de saturação K_{sd} e K_{sq} representam o grau de saturação do eixo-d e do eixo-q respectivamente. O fator K_{sq} pode ser considerado 1 pu devido o caminho do fluxo no eixo-q ser, em sua maior parte, no entreferro.

$$K_{sd} = \frac{\Psi_{sat}}{(\Psi_{sat} + \Delta\Psi)} \quad (A.67)$$

A variação entre o enlace de fluxo não saturado e o enlace de fluxo saturado, no entreferro, é representada na figura A.3 e é dada pela equação a seguir:

$$\Delta\Psi = A_{sat}e^{B_{sat}(\Psi_{sat}-\Psi_T)} \quad (A.68)$$

As constantes A_{sat} , B_{sat} , e o fluxo de limiar Ψ_T , podem ser obtidas por ensaio em circuito aberto.

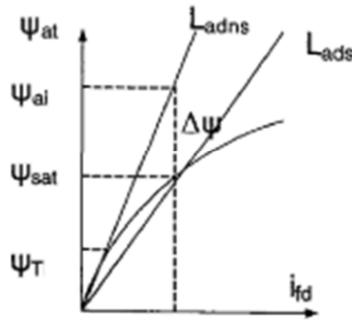


Figura A.3 – Curva de Saturação.

(Fonte: KUNDUR, 1994).

O enlace de fluxo saturado no entreferro é obtido pela equação a seguir:

$$\Psi_{sat} = \sqrt{\Psi_{ad}^2 + \Psi_{aq}^2} \quad (A.69)$$

APÊNDICE B – Gerador Síncrono Conectado ao Barramento Infinito

O modelo da rede para o estudo é o do gerador síncrono conectado ao barramento infinito. A figura 2.6 ilustra o cenário em estudo. O gerador cuja tensão nos terminais é V_t está conectado à barra infinita através do transformador TR, de reatância X_{TR} em série com duas linhas de transmissão paralelas, LT-1 e LT-2, de reatâncias X_{LT1} , X_{LT2} , respectivamente. O conjunto dessas reatâncias é representado por uma reatância equivalente denominada de X_E , a qual é variável dependendo das condições de operação do sistema, como por exemplo, o acionamento da proteção de uma das linhas. A corrente I_t é obtida através da análise do fluxo de potência no sistema.

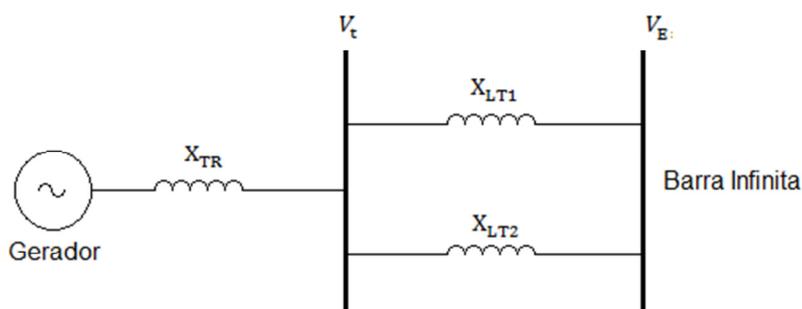


Figura B.1 – Modelo do Gerador Conectado ao Barramento Infinito.

A tensão nos terminais do gerador e tensão equivalente da rede pode ser representada no referencial dq0. Na figura B.2 observa-se o diagrama fasorial descritos pelas equações a seguir:

$$\tilde{V}_t = e_d + je_q \quad (\text{B.1})$$

$$\tilde{V}_B = e_{Bd} + je_{Bq} \quad (\text{B.2})$$

As componentes dq0 são decompostas da seguinte forma:

$$e_d = V_t \sin \delta_i \quad (\text{B.3})$$

$$e_q = V_t \cos \delta_i \quad (\text{B.4})$$

$$e_{Bd} = V_B \sin \delta_B \quad (\text{B.5})$$

$$e_{Bq} = V_B \cos \delta_B \quad (\text{B.6})$$

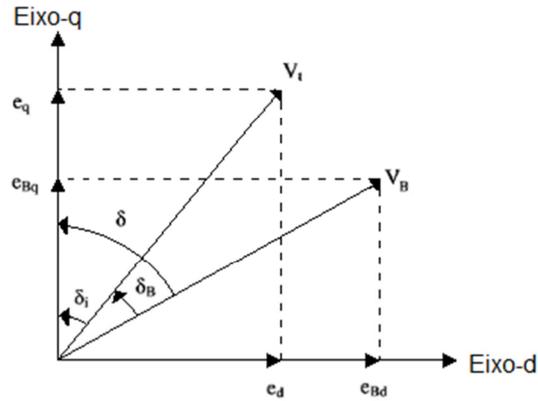


Figura B.2 – Diagrama Fasorial das Tensões.

(Adaptado: KUNDUR, 1994).

A partir da obtenção de uma reatância equivalente da rede X_E e das equações das tensões conclui-se que:

$$\tilde{V}_t = \tilde{V}_B + jX_E I_t \quad (\text{B.7})$$

Sendo que $I_t = i_d + ji_q$ é a corrente nos terminais do gerador no referencial dq0. Assim a tensão nos terminais decomposta em componentes dq0 é:

$$e_d = e_{Bd} - X_E i_q \quad (\text{B.8})$$

$$e_q = e_{Bq} - X_E i_d \quad (\text{B.9})$$

A equação (A.52) da variação de fluxo do circuito de campo pode ser expressa em relação à tensão de saída de excitatriz da seguinte forma:

$$e_{fd} = E_{fd} \frac{R_{fd}}{L_{adns}} \quad (\text{B.10})$$

$$\frac{d}{dt} \Psi_{fd} = \omega_0 E_{fd} \frac{R_{fd}}{L_{adns}} - \omega_0 R_{fd} i_{fd} \quad (\text{B.11})$$

Os enlaces de fluxo Ψ_d e Ψ_q são dados por:

$$\Psi_d = \Psi_{ad} - L_l i_d \quad (\text{B.12})$$

$$\Psi_q = \Psi_{aq} - L_l i_q \quad (\text{B.13})$$

De acordo com a figura A.2 do Apêndice A, os enlaces de fluxo mútuos nos eixo-d e eixo-q podem ser escritos na forma:

$$\Psi_{ad} = L''_{ads} \left(\frac{\Psi_{fd}}{L_{fd}} + \frac{\Psi_{1d}}{L_{1d}} - i_d \right) \quad (\text{B.14})$$

$$\Psi_{ad} = L''_{aqs} \left(\frac{\Psi_{1q}}{L_{1q}} + \frac{\Psi_{2q}}{L_{2q}} - i_q \right) \quad (\text{B.15})$$

$$\text{Onde, } L''_{ads} = \left(\frac{1}{\frac{1}{L_{ads}} + \frac{1}{L_{fd}} + \frac{1}{L_{1d}}} \right) \text{ e } L''_{aqs} = \left(\frac{1}{\frac{1}{L_{aqs}} + \frac{1}{L_{1d}} + \frac{1}{L_{2q}}} \right).$$

Sendo assim, considerando-se $\Psi_{1d} = \Psi_{ad}$:

$$\Psi_{fd} = L_{fd} \left(\frac{\Psi_{ad}}{L''_{ads}} + i_d - \frac{\Psi_{ad}}{L_{1d}} \right) \quad (\text{B.16})$$

As tensões em regime transitório são obtidas através dos enlaces de fluxo mútuos nos eixo-d e eixo-q:

$$e''_d = L''_{aqs} \left(\frac{\Psi_{1q}}{L_{1q}} + \frac{\Psi_{2q}}{L_{2q}} \right) \quad (\text{B.17})$$

$$e''_q = L''_{ads} \left(\frac{\Psi_{fd}}{L_{fd}} + \frac{\Psi_{1d}}{L_{1d}} \right) \quad (\text{B.18})$$

Desprezando as variações de velocidade e os termos envolvendo as derivadas dos enlaces de fluxo, a tensão nos terminais do gerador decomposta nos termos do referencial dq0:

$$e_d = e''_d - L''_{qs} i_q - R_a i_d \quad (\text{B.19})$$

$$e_q = e''_q - L''_{ds} i_d - R_a i_q \quad (\text{B.20})$$

No sistema por unidade, as reatâncias X''_{ds} e X''_{qs} , tem mesmo valor que as indutâncias L''_{ds} e L''_{qs} . Substituindo-se as equações (B.19) e (B.20) nas equações (B.17) e (B.18), obtêm-se as seguintes equações para a corrente no referencial dq0:

$$i_d = \frac{(X_E + X''_{qs})(e''_q - V_B \cos \delta) - R_a(e''_d + V_B \sin \delta)}{R_a^2 + (X_E + X''_{qs})(X_E + X''_{ds})} \quad (\text{B.21})$$

$$i_q = \frac{R_a(e''_q - V_B \cos \delta) + (X_E + X''_{qs})(e''_d + V_B \sin \delta)}{R_a^2 + (X_E + X''_{qs})(X_E + X''_{ds})} \quad (\text{B.22})$$

O ângulo delta pode ser obtido fazendo a análise das figuras B.2 e B.3:

$$\delta = \sin^{-1} \left(\frac{X_E P_t}{V_t V_B} \right) + \tan^{-1} \left(\frac{X_{qs} I_t \cos \varphi - R_a I_t \sin \varphi}{V_t + R_a I_t \cos \varphi + X_{qs} I_t \sin \varphi} \right) \quad (\text{B.23})$$

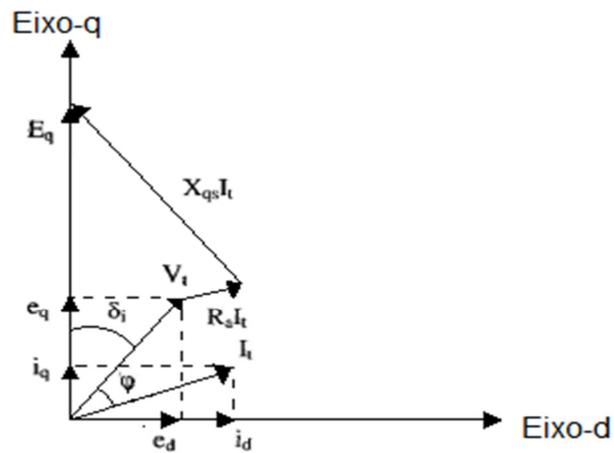


Figura B.3 – Diagrama Fasorial da Tensão e Corrente de Terminal do Gerador.

(Adaptado: KUNDUR, 1994).

APÊNDICE C – Lógica Paraconsistente Anotada

A Lógica Paraconsistente Anotada (LPA) tem como fundamento principal a aceitação da contradição sem que o conflito invalide as conclusões. Na LPA as fórmulas proposicionais têm suas anotações em um reticulado finito denominado Reticulado de Hasse, que possui em seus vértices a representação de quatro estados lógicos, sendo eles Verdadeiro, Falso, Inconsistente e Paracompleto (V,F,T e \perp) (DA SILVA FILHO, 1999).

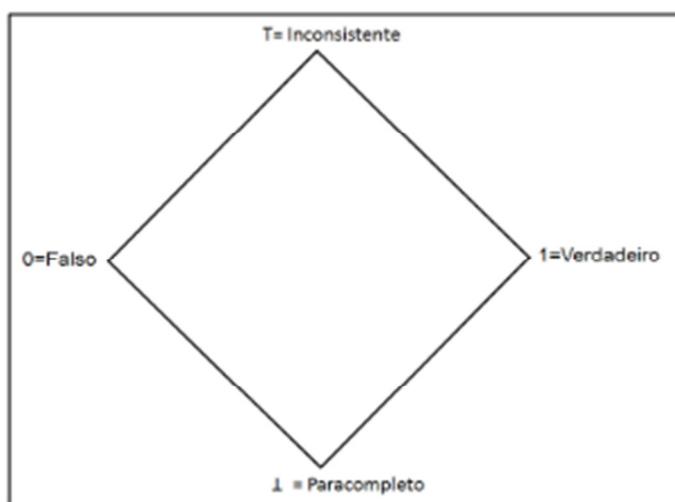


Figura C.1 – Reticulado de Hasse.
(Fonte: DA SILVA FILHO, 1999).

Na fundamentação da Lógica Paraconsistente Anotada com anotação de dois valores - LPA2v, a anotação relacionada à proposição P é composta por dois valores (μ, λ) que representam respectivamente o Grau de Evidência Favorável e o Grau de Evidência Desfavorável, onde $(\mu, \lambda \in \{x \in \mathbb{R} \mid 0 \leq x \leq 1\})$.

Conforme visto em Da Silva Filho (1999) a anotação (μ, λ) pode ser apresentada no reticulado representado no plano cartesiano denominado quadrado unitário do plano cartesiano (QUPC), como mostra a figura C.1.

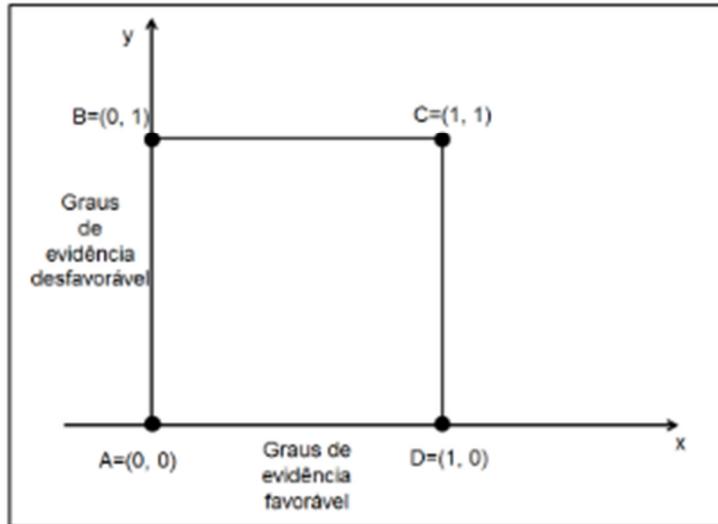


Figura C.2 – Reticulado Representado no QUPC.
(Fonte: DA SILVA FILHO, 1999).

Assim, os estados dos vértices no quadrado ABCD são:

A = (0,0) – Paracompleto;

B = (0,1) – Falso;

C = (1,1) – Inconsistente;

D = (1,0) – Verdadeiro.

O segmento de reta que interliga os pontos B e D mostrado na figura C.2, é denominado de segmento perfeitamente definido, e a distância entre este e qualquer ponto localizado em seus segmentos paralelos, é definida pela equação (4.1), a partir dos valores das coordenadas (x,y) do determinado ponto.

$$d(x,y) = x + y - 1 \quad (C.1)$$

Sendo assim, nota-se que há uma relação direta entre a distância e os estados de inconsistência e paracompleteza.

Para o ponto C, $d(1,1) = +1 \rightarrow$ Estado Extremo de Inconsistência;

Para o ponto A, $d(0,0) = -1 \rightarrow$ Estado Extremo de Paracompleteza.

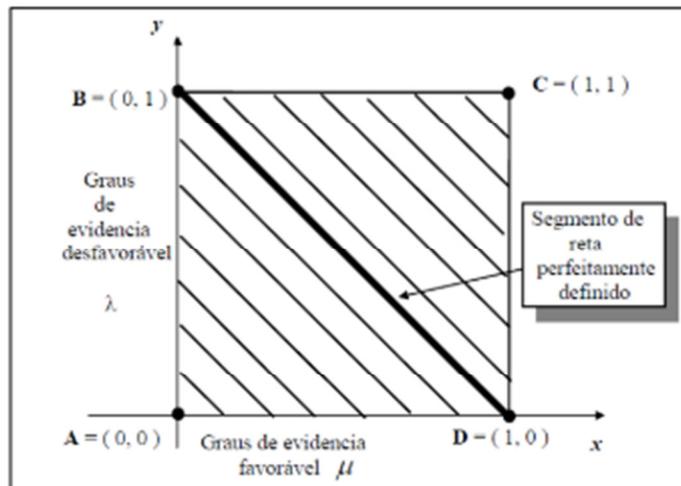


Figura C.3 – Segmento de Reta Perfeitamente Definido.
(Fonte: DA SILVA FILHO, 1999).

É possível verificar através da análise da figura 4.2, que quando os valores de x e y variam entre 0 e 1, os resultados da equação (C.1) variam entre 1 e -1. O valor desta equação é denominado na LPA2v como Grau de Contradição, e, portanto, define-se que, quando o valor do Grau de Contradição é positivo e tende à unidade, ele tende à Inconsistência. Porém se o valor do Grau de Contradição é negativo e tende a -1, diz-se que o Grau de Contradição tende à Paracompleteza.

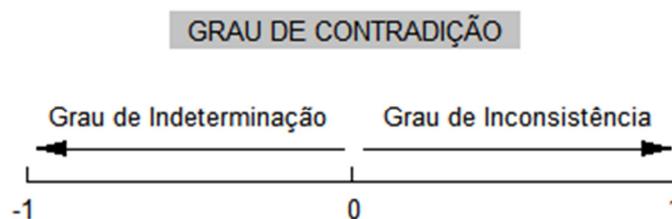


Figura C.4 – Grau de Contradição.

Portanto, a equação para o Grau de Contradição é:

$$G_{ct} = \mu + \lambda - 1 \tag{C.2}$$

No QUPC, o segmento de reta que interliga os pontos A e C, é denominado segmento perfeitamente indefinido. Da mesma forma que no segmento perfeitamente definido, são considerados segmentos paralelos,

assim vistos na figura C.4. A distância entre este e qualquer ponto localizado em seus segmentos paralelos, é definida pela equação (C.3), a partir dos valores das coordenadas (x, y) do determinado ponto.

$$d(x, y) = x - y \quad (C.3)$$

Para o ponto D, $d(1,0) = +1 \rightarrow$ Estado Extremo de Verdade;

Para o ponto B, $d(0,1) = -1 \rightarrow$ Estado Extremo de Falsidade.

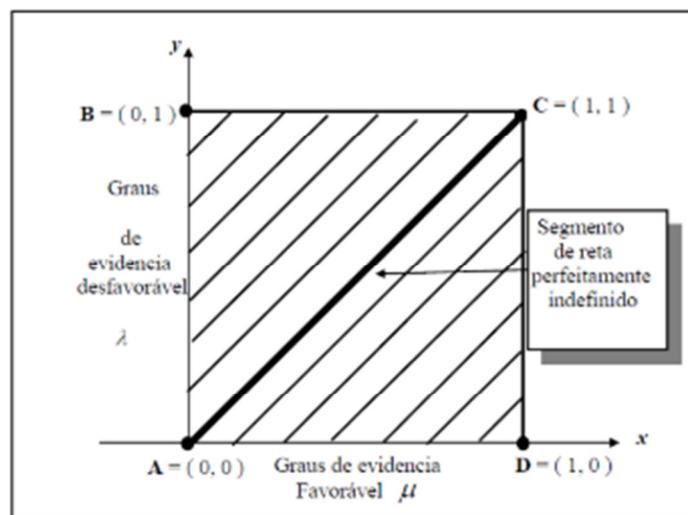


Figura C.5 – Segmento de Reta Perfeitamente Indefinido.
(Fonte: DA SILVA FILHO, 1999).

Quando os valores de x e y variam entre 0 e 1, os resultados da equação (C.3) variam entre 1 e -1. O valor desta equação é denominado na LPA2v como Grau de Certeza. Quando o valor do Grau de Certeza é positivo e tende à unidade, ele tende à Verdadeiro. Se o valor do Grau de Certeza é negativo e tende a -1, diz-se que o Grau de Certeza tende à Falsidade.

Portanto, a equação para o Grau de Contradição é:

$$G_c = \mu - \lambda \quad (C.4)$$

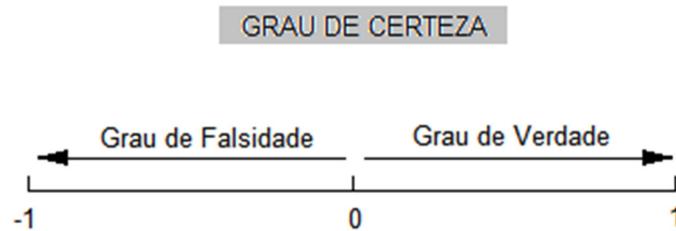


Figura C.6 – Grau de Certeza.

Os eixos que representam o Grau de Certeza e o Grau de Contradição podem ser dispostos num único plano onde são respectivamente dispostos na horizontal e na vertical. A partir deste novo reticulado, visto na figura C.5, é possível representar o resultado da análise dos graus de evidência favorável e de evidência desfavorável, atribuídos à proposição P.

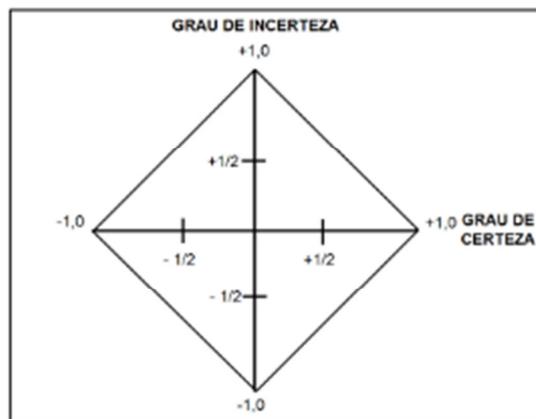


Figura C.7 – Representação dos Graus de Certeza e de Contradição.
(Fonte: DA SILVA FILHO, 1999).

Delimitando-se regiões no QUPC, cada qual com seu estado lógico resultante bem definido, a partir das equações (C.2) e (C.4), é possível obter um único estado resultante de saída. A resolução de 12 estados pode parecer a mais, mas fica claro, no entanto, que o quadrado unitário pode ser dividido em qualquer número de regiões exigidas pela aplicação do projeto. Os novos segmentos de reta com suas respectivas denominações, que delimitam as regiões no quadrado unitário para uma resolução 12, podem ser vistas na figura C.7.

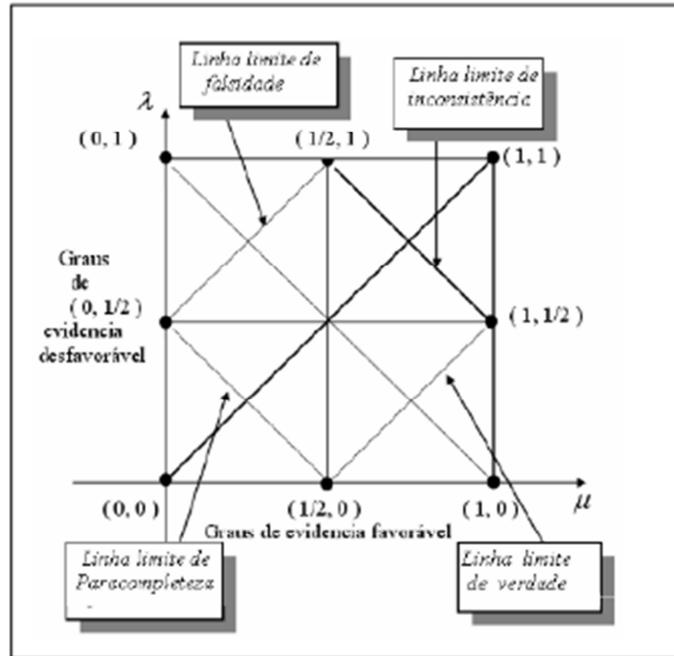


Figura C.8 – QUPC Delimitado em 12 Regiões.
(Fonte: DA SILVA FILHO, 1999).

Cada região recebe uma denominação de acordo com a sua proximidade com os pontos de estados extremos do reticulado. O QUPC de resolução 12 com as regiões e os seus correspondentes estados resultantes de saída, são mostrados na figura C.8 onde os estados extremos do quadrado unitário são:

- $V \Rightarrow$ Verdadeiro.
- $F \Rightarrow$ Falso;
- $T \Rightarrow$ Inconsistente;
- $\perp \Rightarrow$ Paracompleto.

E os estados não-extremos são denominados:

- $\perp \rightarrow F \Rightarrow$ Paracompleto tendendo ao Falso;
- $\perp \rightarrow V \Rightarrow$ Paracompleto tendendo ao Verdadeiro;
- $T \rightarrow F \Rightarrow$ Inconsistente tendendo ao Falso;
- $T \rightarrow V \Rightarrow$ Inconsistente tendendo ao Verdadeiro;
- $QV \rightarrow T \Rightarrow$ Quase-Verdadeiro tendendo ao Inconsistente;
- $QF \rightarrow T \Rightarrow$ Quase-Falso tendendo ao Inconsistente;

- $QF \rightarrow \perp \Rightarrow$ Quase-Falso tendendo ao Paracompleto;
- $QV \rightarrow \perp \Rightarrow$ Quase- Verdadeiro tendendo ao Paracompleto.

É possível concluir através da análise da figura 4.8 que os valores de certeza foram delimitados pelo grau de verdade igual a $1/2$ para ser considerado “Verdadeiro” e grau de falsidade igual a $-1/2$ para ser considerado “Falso”. Da mesma forma os estados extremos nos eixos dos valores de incerteza foram delimitados por grau de inconsistência igual a $1/2$, para ser considerado “Inconsistente” e grau de paracompleteza igual a $-1/2$ para ser considerado “Paracompleto”.

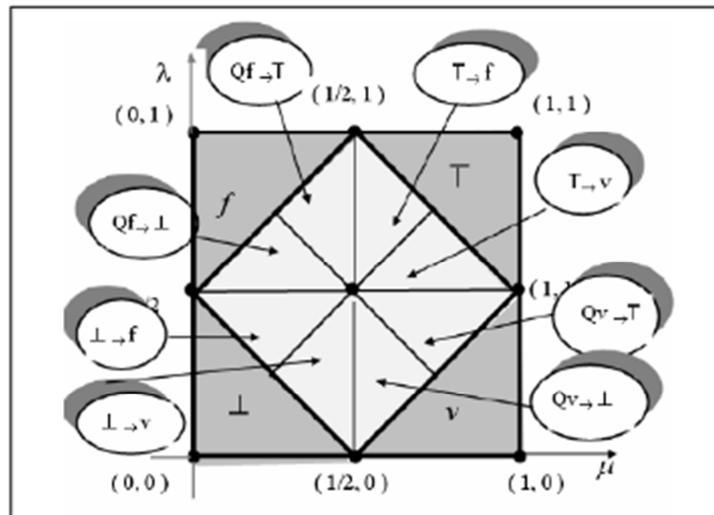


Figura C.9 – Representação dos Estados no QUPC.
(Fonte: DA SILVA FILHO, 1999).

Os valores limitantes dos estados extremos e não-extremos podem ser vistos na figura C.9 e são denominados de Valores Limite, onde:

$V_{scc} \Rightarrow$ Valor Limite Superior de Controle de Certeza;

$V_{scct} \Rightarrow$ Valor Limite Superior de Controle de Contradição;

$V_{icc} \Rightarrow$ Valor Limite Inferior de Controle de Certeza;

$V_{icct} \Rightarrow$ Valor Limite Inferior de Controle de Contradição.

Os valores limitantes dos estados extremos e não-extremos são decididos a partir da aplicação e portanto podem ser ajustados. No caso da figura C.10 eles estão ajustados todos para o valor de $1/2$.

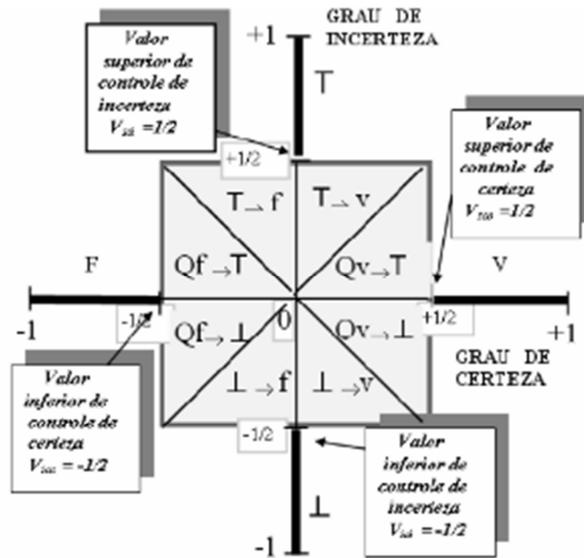


Figura C.10 – Representação dos Valores Limites no QUPC.
(Fonte: DA SILVA FILHO, 1999).

APÊNDICE D – Script em MATLAB® do Modelo em Estudo

```
% |-----|
% |          PROPOSTA DE CONTROLE PREDITIVO PARACONSISTENTE LPAv2          |
% |-----|

clear all; %LIMPAR MEMÓRIA
clc; %LIMPAR ÁREA DE TRABALHO
disp(' |-----| ');
disp(' |          PROPOSTA DE CONTROLE PREDITIVO          | ');
disp(' |          PARACONSISTENTE LPAv2          | ');
disp(' |-----| ');
disp(' ');
disp('PERTURBAÇÃO TIPO 1: Curto-Circuito Trifásico LT-2');
disp('PERTURBAÇÃO TIPO 2: Abertura da LT-2');
disp('PERTURBAÇÃO TIPO 3: Variação no Torque Mecânico em 5%');
disp('PERTURBAÇÃO TIPO 4: Variação na Tensão em 2% na Barra do Gerador');
disp(' ');
Pert=input('Insira o tipo de perturbação a ser estudada: ');
disp(' ');
disp('SISTEMA DE EXCITAÇÃO 1: AVR');
disp('SISTEMA DE EXCITAÇÃO 2: AVR+PSS');
disp('SISTEMA DE EXCITAÇÃO 3: CONTROLE PREDITIVO CONVENCIONAL');
disp('SISTEMA DE EXCITAÇÃO 4: CONTROLE PREDITIVO PARACONSISTENTE');
disp(' ');
Exct=input('Insira o sistema de excitação: ');

% |-----|
% |          CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO          |
% |-----|
Et=1.0;
Pt=0.9;
Qt=0.436;

% |-----|
% |          TEMPOS DO SISTEMA          |
% |-----|
ti=0.0; %TEMPO INICIAL
tpf=10; %TEMPO PRÉ-FALTA
tef=0.17; %TEMPO DA ELIMINAÇÃO DA FALTA
tt=1.0;
tmax=360.0; %TEMPO MÁXIMO DE SIMULAÇÃO
ta=0.01; %AMOSTRA DE TEMPO
n=3;

% |-----|
% |          PARÂMETROS DA REDE          |
% |-----|
XT=0.15; %REATÂNCIA DO TRANSFORMADOR
XLT1=0.5; %REATÂNCIA DA LINHA DE TRANSMISSÃO 2
XLT2=0.93; %REATÂNCIA DA LINHA DE TRANSMISSÃO 2

% |-----|
% |          PARÂMETROS DO GERADOR          |
% |-----|
%CONSTANTES MECÂNICAS
```

H=3.5; %CONSTANTE DE INÉRCIA
KD=0; %CONSTANTE DE AMORTECIMENTO

%-----
%CONSTANTES DE TEMPO:

Td01=8;
Tq01=1;
Td011=0.03;
Tq011=0.07;

%-----
%REATÂNCIAS NÃO SATURADAS:

Xdns=1.81; %REATÂNCIA DO EIXO-D
Xdns1=0.3; %REATÂNCIA TRANSITÓRIA DO EIXO-D
Xdns11=0.23; %REATÂNCIA SUB-TRANSITÓRIA DO EIXO-D

Xqns=1.76; %REATÂNCIAS DO EIXO-Q
Xqns1=0.65; %REATÂNCIA TRANSITÓRIA DO EIXO-Q
Xqns11=0.25; %REATÂNCIA SUB-TRANSITÓRIA DO EIXO-Q

%REATÂNCIA DE DISPERSÃO
Xl=0.15;

%REATÂNCIAS MUTUAS NÃO SATURADAS

Xadns=Xdns-Xl;
Xaqns=Xqns-Xl;

%REATÂNCIA DO ENROLAMENTO DE CAMPO
Xfd=Xadns*(Xdns1-Xl)/(Xdns-Xdns1);

%REATÂNCIA DO ENROLAMENTO AMORTECEDOR DO EIXO-D
X1d=Xadns*Xfd*(Xdns11-Xl)/(Xadns*Xfd-Xadns*(Xdns11-Xl)-Xfd*(Xdns11-Xl));

%REATÂNCIA DO ENROLAMENTO AMORTECEDOR 1 DO EIXO-Q
X1q=Xaqns*(Xqns1-Xl)/(Xqns-Xqns1);

%REATÂNCIA DO ENROLAMENTO AMORTECEDOR 2 DO EIXO-Q
X2q=Xaqns*X1q*(Xqns11-Xl)/(Xaqns*X1q-Xaqns*(Xqns11-Xl)-X1q*(Xqns11-Xl));

%-----
%RESISTÊNCIAS:

%RESISTENCIA DO ENROLAMENTO DO ESTATOR
Rs=0.003;

%RESITÊNCIA DO ENROLAMENTO DE CAMPO
Rfd=(Xadns+Xfd)/(377*Td01);

%RESITÊNCIA DO ENROLAMENTO AMORTECEDOR DO EIXO-D
R1d=(1/(377*Td011))*(X1d+(Xadns*Xfd/(Xadns+Xfd)));

%RESITÊNCIA DO ENROLAMENTO AMORTECEDOR 1 DO EIXO-Q
R1q=(Xaqns+X1d)/(377*Tq01);

%RESITÊNCIA DO ENROLAMENTO AMORTECEDOR 2 DO EIXO-Q
R2q=(1/(377*Tq011))*(X2q+(Xaqns*X1q/(Xaqns+X1q)));

%-----

%CARACTERÍSTICA DE SATURAÇÃO DO GERADOR

A=0.03125;

B=6.931;

ft1=0.8;

%

%

%

PARÂMETROS DOS SISTEMAS DE EXCITAÇÃO

%

%REGULADOR AUTOMÁTICO DE TENSÃO - AVR

KA=200; %GANHO DA EXCITATRIZ

TR=0.015; %CONSTANTE DE TEMPO DO TRANSDUTOR DE TENSÃO

Efmax=7.0; %LIMITE MÁXIMO DA EXCITATRIZ

Efmin=-6.4; %LIMITE MÍNIMO DA EXCITATRIZ

vmax=0.2;

vmin=-0.2;

%

%ESTABILIZADOR DE SISTEMA DE POTÊNCIA - PSS

KPSS=9.5; %GANHO DO ESTABILIZADOR DE SISTEMA DE POTÊNCIA

Tw=1.41; %CONSTANTE DE TEMPO DO WASH-OUT

T1=0.154; %CONSTANTE DE TEMPO DE COMPENSAÇÃO DE FASE DO PSS

T2=0.033; %CONSTANTE DE TEMPO DE COMPENSAÇÃO DE FASE DO PSS

%

%

%

PARÂMETROS DO SISTEMA DE CONTROLE PREDITIVO PARACONSISTENTE

%

PW_MIN=1; %VALOR MÍNIMO DO PESO RELACIONADO À VELOCIDADE

PW_MAX=3; %VALOR MÁXIMO DO PESO RELACIONADO À VELOCIDADE

PV_MIN=1; %VALOR MÍNIMO DO PESO RELACIONADO À TENSÃO

PV_MAX=2; %VALOR MÁXIMO DO PESO RELACIONADO À TENSÃO

PTe_MIN=1; %VALOR MÁXIMO DO PESO RELACIONADO AO TORQUE

PTe_MAX=3; %VALOR MÍNIMO DO PESO RELACIONADO AO TORQUE

Kw=8; %GANHO FIXO DO CONTROLADOR RELACIONADO À VELOCIDADE

Kv=1; %GANHO FIXO DO CONTROLADOR RELACIONADO À TENSÃO

Kp=0.05; %GANHO FIXO DO CONTROLADOR RELACIONADO AO TORQUE

Ke=5; %CONSTANTE DA MATRIZ R

pfac1=1;

pfac2=1;

%

%

%

CONDIÇÕES INICIAIS DO SISTEMA

%

Fi=atan(Qt/Pt); %FATOR DE POTÊNCIA

IT=cos(Fi)+j*sin(Fi); %VETOR CORRENTE

It=abs(IT); %MÓDULO DA CORRENTE

%

%EFEITOS DA SATURAÇÃO

Ea=Et+(Rs+j*Xl)*IT;

Fa=abs(Ea);

F1=A*exp(B*(Fa-ft1));

Ksd=Fa/(Fa+F1);

Ksq=Ksd;

```

%-----
%REATÂNCIAS SATURADAS
Xads=Ksd*Xadns; %REATÂNCIA MUTUA DO EIXO-D
Xaqs=Ksq*Xaqns; %REATÂNCIA MUTUA DO EIXO-Q
Xadsl=1/(1/Xads+1/Xfd); %REATÂNCIA MUTUA TRANSITÓRIA DO EIXO-D
Xaqsl=1/(1/Xaqs+1/Xlq); %REATÂNCIA MUTUA TRANSITÓRIA DO EIXO-Q
Xadsll=1/(1/Xads+1/Xfd+1/Xld); %REATÂNCIA MUTUA SUB-TRANSITÓRIA DO EIXO-D
Xaqsl=1/(1/Xaqs+1/Xlq+1/X2q); %REATÂNCIA MUTUA SUB-TRANSITÓRIA DO EIXO-Q
Xqs=Xl+Xaqs; %REATÂNCIA DO EIXO-Q
Xdsll=Xadsl+Xl; %REATÂNCIA TRANSITÓRIA DO EIXO-D
Xqsl=Xaqsl+Xl; %REATÂNCIA SUB-TRANSITÓRIA DO EIXO-Q

%-----
%ÂNGULO DE CARGA DELTA
deltat=atan((Xqs*It*cos(Fi)-
Rs*It*sin(Fi))/(Et+Rs*It*cos(Fi)+Xqs*It*sin(Fi)));

%-----
%ÂNGULO THETA ENTRE A CORRENTE E O EIXO-Q
theta=deltat+Fi;

%-----
%DECOMPOSIÇÃO DOS VALORES DE CORRENTE E TENSÃO EM TERMOS DOS EIXOS DQ
ed=Et*sin(deltat);
eq=Et*cos(deltat);
id=It*sin(theta);
iq=It*cos(theta);

%-----
%CORRENTES NOS CIRCUITOS AMORTECEDORES DO ROTOR
i1d=0;
i1q=0;
i2q=0;

%-----
%DEVIO DE VELOCIDADE DO ROTOR
RPM=0;

%-----
%FLUXOS NO ENTREFERRO
fad=eq+Rs*iq+Xl*id;
faq=-Xaqs*iq;

%-----
%VALORES DO FLUXO, TENSÃO E CORRENTE NO CIRCUITO DE CAMPO DO ROTOR
ifd=fad/Xads+id;
efd=Rfd*ifd;
ffd=fad+Xfd*ifd;
ifd0=ifd;

%-----
%FLUXOS NOS ENROLAMENTOS AMORTECEDORES DO ROTOR
f1q=faq;
f1d=fad;
f2q=faq;

%-----
%FLUXOS NO EIXO D E EIXO Q
fd=eq-Rs*iq;

```

```
fq = -ed - Rs * id;
```

```
%-----  
%TORQUE ELETROMAGNÉTICO NO GERADOR  
Te = fd * iq - fq * id;  
Tm0 = Te;
```

```
%-----  
%TENSÕES SUBTRANSITÓRIAS NO EIXO-D E EIXO-Q  
Ed11 = Xaqs11 * (f1q / X1q + f2q / X2q);  
Eq11 = Xads11 * (ffd / Xfd + fld / Xld);
```

```
%-----  
%REATÂNCIAS EQUIVALENTES DA REDE EM SUAS CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO  
Xpf = XT + XLT1 * XLT2 / (XLT1 + XLT2);  
Xf = XT;  
Xef = XT + XLT1;
```

```
%-----  
%TENSÃO EQUIVALENTE NO BARRAMENTO INFINITO, ÂNGULO E SUAS COMPONENTES DQ  
EB = Et - j * Xpf * It * (cos(φi) - j * sin(φi));  
delta = deltat - angle(EB);  
Eb0 = abs(EB);  
Ebd0 = Eb0 * sin(delta);  
Ebq0 = Eb0 * cos(delta);
```

```
%-----  
%VALORES INICIAIS DO SISTEMA DE EXCITAÇÃO  
Efd = efd * Xadns / Rfd;  
Vref = Efd / KA + Et;  
v1 = Et;  
v2 = 0;  
vso = 0;  
py2 = 0;  
Efd0 = Efd;  
Vtdes(1:60000/ta) = 1;
```

```
%-----  
%VALORES INICIAIS DAS CONDIÇÕES DO SISTEMA PARA n=1:3  
ET(1:n) = Et;  
TE(1:n) = Te;  
TM(1:n) = Tm0;  
Fdelta(1:n) = delta;  
EFD(1:n) = Efd;  
IFD(1:n) = ifd;  
FRPM(1:n) = RPM;  
VoI(1:n) = 0;  
RPMI(1:n) = 0;  
DRPM(1:n) = 0;
```

```
%-----  
%CONDIÇÕES INICIAIS DO MECANISMO DE AJUSTE DE PESOS PARA CONSISTENTE  
PW(1:n) = 1;  
PV(1:n) = 1;  
PTe(1:n) = 1;
```

```
%-----  
%INICIALIZAÇÃO DAS CONSTANTES COMPUTACIONAIS  
k = 3;
```

```

t=0;

%-----
%CORES PARA DIFERENCIAÇÃO DAS CURVAS DE ESTUDO DOS CONTROLADORES
cor_1='g';
cor_2='--k';
cor_3='b';
cor_4='--g';

while t<tmax;

%-----
%                                PERTURBAÇÕES APLICADAS AO SISTEMA
%-----
%PERTURBAÇÃO TIPO 1: CURCO-CIRCUITO TRIFÁSICO NA LT2
if Pert==1;
    if t<tpf
        Tm=Tm0;
        Re=0;
        Xe=Xpf;
        Eb=Eb0;
    elseif t<tef
        Tm=Tm0;
        Re=0.;
        Xe=Xf;
        Eb=0;
    else
        Tm=Tm0;
        Re=0;
        Xe=Xef;
        Eb=Eb0;
    end
%-----
%PERTURBAÇÃO TIPO 2: ABERTURA DA LT2
elseif Pert==2;
    if t<tpf
        Tm=Tm0;
        Re=0;
        Xe=Xpf;
        Eb=Eb0;
    elseif t<tef
        Tm=Tm0;
        Re=0;
        Xe=Xef;
        Eb=Eb0;
    else
        Re=0;
        Xe=Xef;
        Eb=Eb0;
    end
%-----
%PERTURBAÇÃO TIPO 3: VARIAÇÃO DO TORQUE MECÂNICO EM 5%
elseif Pert==3;
    if t<tpf
        Tm=Tm0;
        Re=0;
        Xe=Xpf;
        Eb=Eb0;
    else
        if TM(k-1)>(Tm0-0.05*Tm0)

```

```

        Tm=TM(k-1)-0.000003;
        Re=0;
        Xe=Xpf;
        Eb=Eb0;
        else
            Tm=Tm0-0.05*Tm0;
        end
    end

%-----
%PERTURBAÇÃO TIPO 4: VARIAÇÃO DE 2% NA TENSÃO DOS TENMINAIS
elseif Pert==4;
    Vchg=-0.02;
    if t<tpf
        Tm=Tm0;
        Re=0;
        Xe=Xpf;
        Eb=Eb0;
        Vref=Efd0/KA+1;
        Vtdes(1:60000/ta)=1;
    else
        Tm=Tm0;
        Re=0;
        Xe=Xpf;
        Eb=Eb0;
        Vref=Efd0/KA+1+Vchg;
        Vtdes(1:200000)=1+Vchg;
    end
end

%-----
%-----
%
% ATUALIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DO SISTEMA
%-----
%REATÂNCIAS EQUIVALENTES DA REDE EM SUAS CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO
Rt=Re+Rs;
Xtq=Xe+Xqsll;
Xtd=Xe+Xdsll;
D=Rt*Rt+Xtq*Xtd;

%-----
%TENSÃO EQUIVALENTE NO BARRAMENTO INFINITO, ÂNGULO E SUAS COMPONENTES DQ
Ebd=Eb*sin(delta);
Ebq=Eb*cos(delta);

%-----
%TENSÕES SUBTRANSITORIAS NO EIXO-D E EIXO-Q
Edll=Xaqsll*(f1q/X1q+f2q/X2q);
Eqll=Xadsll*(ffd/Xfd+f1d/X1d);

%-----
%VALORES DAS CORRENTES E TENSÕES NOS TERMINAIS
id=(Xtq*(Eqll-Ebq)-Rt*(Ebd+Edll))/D;
iq=(Rt*(Eqll-Ebq)+Xtd*(Ebd+Edll))/D;
it=sqrt(id^2+iq^2);
ed=Ebd-Xe*iq;
eq=Ebq+Xe*id;
et=sqrt(ed^2+eq^2);

%-----

```

```

%VALORES DOS FLUXOS E CORRENTES NOS ENROLAMENTOS DO ROTOR
fd=eq+Rs*iq;
fq=-ed-Rs*id;
fad=fd+Xl*id;
faq=fq+Xl*iq;
fa=sqrt(fad^2+faq^2);
ifd=(ffd-fad)/Xfd;
ild=(fad-fld)/Xld;
ilq=(faq-flq)/Xlq;
i2q=(faq-f2q)/X2q;

%-----
%TORQUE ELETROMAGNÉTICO DESENVOLVIDO PELO GERADOR
Te=fd*iq-fq*id;

%-----
%POTÊNCIAS ATIVA E REATIVA, E FATOR DE POTÊNCIA
Pt=ed*id+eq*iq;
Qt=eq*id-ed*iq;
Fi=acos(Pt/abs(it)/et);

%-----
%ATUALIZAÇÃO GRÁFICA
IT(k)=it;
ET(k)=et;
TE(k)=Te;
PT(k)=Pt;
QT(k)=Qt;
FI(k)=Fi;
IFD(k)=ifd;

%-----
%VALORES DAS CONSTANTES DE CONTROLE DO MODELO
m1=Eb*(Xtq*sin(delta)-Rt*cos(delta))/D;
m2=Xtq/D;
m3=Rt/D;
n1=Eb*(Rt*sin(delta)+Xtd*cos(delta))/D;
n2=Rt/D;
n3=Xtd/D;
k1=n1*(fad+Xaqs*id)-m1*(faq+Xadsl*iq);
k2=n2*(fad+Xaqs*id)-m2*(faq+Xadsl*iq)+Xadsl*iq/Xfd;
k3=ed/et*(-Rs*m1+Xl*n1+Xaqs*n1)+eq/et*(-Rs*n1-Xl*m1-Xadsl*m1);
k4=ed/et*(-Rs*m2+Xl*n2+Xaqs*n2)+eq/et*(-Rs*n2-Xl*m2-Xadsl*(m2-1/Xfd));

k1=1.6249;
k2=1.1164;
k3=0.1768;
k4=0.3782;

%-----
%EFEITOS DA SATURAÇÃO
if fa>=0.8
    fi=A*exp(B*(fa-ft1));
    Ksd=fa/(fa+fi);
    Ksq=Ksd;
else
    Ksd=1;

```

```

    Ksq=Ksd;
end
%-----
%REATÂNCIAS DO GERADOR COMPUTADAS COM OS EFEITOS DA SATURAÇÃO
Xads=Ksd*Xadns;
Xaqs=Ksq*Xaqns;
Xadsl=1/(1/Xads+1/Xfd);

%-----
%
%                               SISTEMA DE CONTROLE DE EXCITAÇÃO
%-----
%SISTEMA DE EXCITAÇÃO 1: AVR
if Exct==1
    Efd=KA*(Vref-v1);
    color=cor_1;

%-----
%SISTEMA DE EXCITAÇÃO 2: AVR+PSS
elseif Exct==2
    Efd=KA*(Vref-v1+vso);
    color=cor_2;

%-----
%SISTEMA DE EXCITAÇÃO 3: CONTROLE PREDITIVO CONVENCIONAL
elseif Exct==3
    if sign(DRPM(k-2))~=sign(DRPM(k-1));
        if abs(RPM)<=0.0001
            pfac1=1;
        elseif abs(RPM)<=0.001
            pfac1=2;
        elseif abs(RPM)<=0.005
            pfac1=2;
        else
            pfac1=1;
        end
    end

    if abs(Vtdes(k)-v1)<0.001;
        pfac2=1;
    elseif Vtdes(k)-v1>=0.05;
        pfac2=2;
        pfac1=1;
    end;

%-----
% MATRIZ DE PESOS
Q=[pfac1*Kw*120*pi 0 0; 0 pfac2*Kv 0; 0 0 Kp];
R=Ke;
PF1(1:4)=8;
PF2(1:4)=1;
PF1(k)=pfac1*Kw;
PF2(k)=pfac2*Kv;

% PREVISÃO DAS SAÍDAS DO SISTEMA
DDdet(k)=120*pi*FRPM(k-1)*ta;
E1=[2 -ta/2/H*k1;0 -k3;2*H/ta -k1]*[FRPM(k-1);DDdet(k)]+[-FRPM(k-2);Vtdes(k)-et;-2*H/ta*FRPM(k-2)];
E2=[-ta/2/H*k2;-k4;-k2]*[120*pi*ta];

%CALCULO DAS VARIÁVEIS DE CONTROLE
delta_u=(-E1'*Q*E2)/(E2'*Q*E2+R);

```

```

Efd=delta_u*Xadns/Rfd+Efd0;
VolI(k)=VolI(k-1)+abs(Vtdes(k)-et);
RPMI(k)=RPMI(k-1)+abs(RPM);
color=cor_4;

%-----
%SISTEMA DE EXCITAÇÃO 4: CONTROLE PREDITIVO PARACONSISTENTE
elseif Exct==4
%-----
%REDE DE ANALISE PARACONSISTENTE LPAv2

DW_MIN=0;      %BANDA INFERIOR PARA EXTRAÇÃO DE GRAU DE EVIDÊNCIA DA
               %VELOCIDADE

DW_MAX=0.00000002041; %BANDA SUPERIOR PARA EXTRAÇÃO DE GRAU DE EVIDÊNCIA DA
               %VELOCIDADE

DET_MIN=0;     %BANDA INFERIOR PARA EXTRAÇÃO DE GRAU DE EVIDÊNCIA DA
               %TENSÃO

DET_MAX=0.05; %BANDA SUPERIOR PARA EXTRAÇÃO DE GRAU DE EVIDÊNCIA DA
               %TENSÃO

%-----
%ETAPA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

DW_1=(FRPM(k-1))-(FRPM(k-2)); %DESVIO DE VELOCIDADE PARA O NAP 1
DW_2=(FRPM(k-2))-(FRPM(k-1)); %DESVIO DE VELOCIDADE PARA O NAP 2
ET_1=ET(k)-Vtdes(k); %DESVIO DE TENSÃO PARA O NAP 1
ET_2=Vtdes(k)-ET(k); %DESVIO DE TENSÃO PARA O NAP 2

%-----
%ETAPA DE EXTRAÇÃO DOS GRAUS DE EVIDÊNCIA FAVORÁVEIS

%EXTRAÇÃO DO GRAU DE EVIDÊNCIA FAVORÁVEL DA VELOCIDADE PARA O NAP 1
if (DW_1>DW_MIN) && (DW_1<DW_MAX)
    mi_1=(DW_1)/(DW_MAX-DW_MIN);
elseif (DW_1<=DW_MIN)
    mi_1=0;
else
    mi_1=1;
end
MI1(k)=mi_1;

%EXTRAÇÃO DO GRAU DE EVIDÊNCIA FAVORÁVEL DA VELOCIDADE PARA O NAP 2
if (DW_2>DW_MIN) && (DW_2<DW_MAX)
    mi_2=(DW_2)/(DW_MAX-DW_MIN);
elseif (DW_2<=DW_MIN)
    mi_2=0;
else
    mi_2=1;
end
MI2(k)=mi_2;

%EXTRAÇÃO DO GRAU DE EVIDÊNCIA FAVORÁVEL DA TENSÃO PARA O NAP 1 E 3
if (ET_1>DET_MIN) && (ET_1<DET_MAX)
    mi_3=(DET_MAX-ET_1)/(DET_MAX-DET_MIN);
elseif (ET_1<=DET_MIN)

```

```

    mi_3=1;
else
    mi_3=0;
end
MI3(k)=mi_3;

%EXTRAÇÃO DO GRAU DE EVIDÊNCIA FAVORÁVEL DA TENSÃO PARA O NAP 2 E 3
if (ET_2>DET_MIN)&&(ET_2<DET_MAX)
    mi_4=(DET_MAX-ET_2)/(DET_MAX-DET_MIN);
elseif (ET_2<=DET_MIN)
    mi_4=1;
else
    mi_4=0;
end
MI4(k)=mi_4;

%-----
%ETAPA DE EXTRAÇÃO DOS GRAUS DE EVIDÊNCIA DESFAVORÁVEIS

lambda_2=1-mi_3;
LMBD2(k)=lambda_2;

lambda_4=1-mi_4;
LMBD4(k)=lambda_4;

%-----
%NÓ DE ANÁLISE PARACONSISTENTE 1

%CALCULO DO GRAU DE CONTRADIÇÃO
Gct_1=mi_1+lambda_2-1;
GCT1(k)=Gct_1;
%CALCULO DO INTERVALO DE CERTEZA
phi_1=1-abs(Gct_1);

%CALCULO DO GRAU DE CERTEZA
Gc_1=mi_1-lambda_2;

%CALCULO DA DISTÂNCIA D
D_1=sqrt((1-abs(Gc_1))^2+Gct_1^2);

%DETERMINAÇÃO DO SINAL DE SAÍDA
if (phi_1<=0.25)|| (D_1>=1)
    S_1a=0.5;
    S_1b=phi_1;
end

if Gc_1>0;
    Gcr_1=(1-D_1);
elseif Gc_1<=0
    Gcr_1=(D_1-1);
end

%CALCULO DO GRAU DE EVIDÊNCIA RESULTANTE REAL NORMALIZADO
mier_1=(Gcr_1+1)/2;
MIER1(k)=mier_1;

%-----
%NÓ DE ANÁLISE PARACONSISTENTE 2

```

```
%CALCULO DO GRAU DE CONTRADIÇÃO
```

```
Gct_2=mi_2+lambda_4-1;
```

```
GCT2(k)=Gct_2;
```

```
%CALCULO DO INTERVALO DE CERTEZA
```

```
phi_2=1-abs(Gct_2);
```

```
%CALCULO DO GRAU DE CERTEZA
```

```
Gc_2=mi_2-lambda_4;
```

```
%CALCULO DA DISTÂNCIA D
```

```
D_2=sqrt((1-abs(Gc_2))^2+Gct_2^2);
```

```
%DETERMINAÇÃO DO SINAL DE SAÍDA
```

```
if (phi_2<=0.25) || (D_2>=1)
```

```
    S_2a=0.5;
```

```
    S_2b=phi_2;
```

```
end
```

```
if Gc_2>0;
```

```
    Gcr_2=(1-D_2);
```

```
elseif Gc_2<=0
```

```
    Gcr_2=(D_2-1);
```

```
end
```

```
%CALCULO DO GRAU DE EVIDÊNCIA RESULTANTE REAL NORMALIZADO
```

```
mier_2=(Gcr_2+1)/2;
```

```
MIER2(k)=mier_2;
```

```
%-----
```

```
%NÓ DE ANÁLISE PARACONSISTENTE 3
```

```
%CALCULO DO GRAU DE CONTRADIÇÃO
```

```
Gct_3=mi_4+lambda_2-1;
```

```
%CALCULO DO INTERVALO DE CERTEZA
```

```
phi_3=1-abs(Gct_3);
```

```
%CALCULO DO GRAU DE CERTEZA
```

```
Gc_3=mi_4-lambda_2;
```

```
%CALCULO DA DISTÂNCIA D
```

```
D_3=sqrt((1-abs(Gc_3))^2+Gct_3^2);
```

```
%DETERMINAÇÃO DO SINAL DE SAÍDA
```

```
if (phi_3<=0.25) || (D_3>=1)
```

```
    S_3a=0.5;
```

```
    S_3b=phi_3;
```

```
end
```

```
if Gc_3>0;
```

```
    Gcr_3=(1-D_3);
```

```
elseif Gc_3<=0
```

```
    Gcr_3=(D_3-1);
```

```
end
```

```
%CALCULO DO GRAU DE EVIDÊNCIA RESULTANTE REAL NORMALIZADO
mier_3=(Gcr_3+1)/2;
```

```
MIER3(k) = mier_3;
```

```
%-----
%ETAPA DE DESNORMALIZAÇÃO
```

```
if (mier_1>=mier_2)
    bit = 1;
    mier_kw = mier_1;
```

```
else
    bit = 0;
    mier_kw = mier_2;
```

```
end
mier_kv = mier_3;
```

```
MIER_KW(k) = mier_kw;
```

```
MIER_KV(k) = mier_kv;
```

```
BIT(k) = bit;
```

```
%-----
%MECANISMO DE AJUSTE DO PESO REFERENTE A VELOCIDADE E O TORQUE
```

```
peso_w = 2*mier_kw+1;
peso_Te = 2*mier_kw+1;
```

```
if peso_w>PW_MAX
    peso_w=PW_MAX;
elseif peso_w<PW_MIN
    peso_w=PW_MIN;
end
```

```
if peso_Te>PTe_MAX
    peso_Te=PTe_MAX;
elseif peso_Te<PTe_MIN
    peso_Te=PTe_MIN;
end
```

```
%-----
%MECANISMO DE AJUSTE DO PESO REFERENTE A TENSÃO
```

```
peso_v = -mier_kv+2;
```

```
if peso_v>PV_MAX
    peso_v=PV_MAX;
elseif peso_v<PV_MIN
    peso_v=PV_MIN;
end
```

```
%-----
%ATUALIZAÇÃO DOS PESOS CALCULADOS
```

```
PW(k)=peso_w;
```

```
PV(k)=peso_v;
```

```
PTe(k)=peso_Te;
```

```
%-----
% MATRIZ DE PESOS
```

```
Q=[2*pi*60*peso_w*Kw 0 0; 0 peso_v*Kv 0; 0 0 peso_Te*Kp];
```

```
R=Ke;
```

```

% PREVISÃO DAS SAÍDAS DO SISTEMA
DDdet(k)=2*pi*60*FRPM(k-1)*ta;
E1=[2 -ta/2/H*k1;0 -k3;2*H/ta -k1]*[FRPM(k-1);DDdet(k)]+[-FRPM(k-
2)];Vtdes(k)-et;-2*H/ta*FRPM(k-2)];
E2=[-ta/2/H*k2;-k4;-k2]*[2*pi*60*ta];

%CALCULO DAS VARIÁVEIS DE CONTROLE
delta_u=(-E1'*Q*E2)/(E2'*Q*E2+R);
DELTAU(k)=delta_u;
Efd=delta_u*Xadns/Rfd+Efd0;
color=cor_3;
end

%-----
%-----
%
%                               LIMITES DO SISTEMA DE EXCITAÇÃO
%-----
if Efd>=Efmax
    Efd=Efmax;
elseif Efd<=Efmin
    Efd=Efmin;
end
efd=Efd*Rfd/Xadns;
EFD(k)=Efd;

%-----
%-----
%
%                               RESOLUÇÃO DO SISTEMA DE EQUAÇÕES DIFERENCIAIS
%                               PELO MÉTODO DE RUNGE-KUTTA DE 4ª ORDEM
%-----
%PRIMEIRA PARTE
K11=2*pi*60*(efd+Rfd*(fad-ffd)/Xfd)*ta;
ffd=ffd+K11/2;

K21=1/2/H*(Tm-Te-KD*RPM)*ta;
RPM=RPM+K21/2;
py2=120*pi*K21/2/ta;

K31=2*pi*60*(RPM)*ta;
delta=delta+K31/2;

K41=2*pi*60*(R1d*(fad-f1d)/X1d)*ta;
f1d=f1d+K41/2;

K51=2*pi*60*(R1q*(faq-f1q)/X1q)*ta;
f1q=f1q+K51/2;

K61=2*pi*60*(R2q*(faq-f2q)/X2q)*ta;
f2q=f2q+K61/2;

K71=1/TR*(et-v1)*ta;
v1=v1+K71/2;

K81=(KPSS/120/pi*py2-v2/Tw)*ta;
v2=v2+K81/2;
py5=K81/2/ta;

K91=1/T2*(T1*py5+v2-vso)*ta;

```

```
vso=vso+K91/2;
```

```
%-----
```

```
%ATUALIZAÇÃO DAS VARIÁVEIS DO SISTEMA
```

```
Ebd=Eb*sin(delta);  
E bq=Eb*cos(delta);  
Ed11=Xaqs11*(f1q/X1q+f2q/X2q);  
Eq11=Xads11*(ffd/Xfd+f1d/X1d);  
id=(Xtq*(Eq11-E bq)-Rt*(Ebd+Ed11))/D;  
iq=(Rt*(Eq11-E bq)+Xtd*(Ebd+Ed11))/D;  
ed=Ebd-Xe*iq;  
eq=E bq+Xe*id;  
Te=(Eb*cos(delta)+Xe*id+Rs*iq)*iq-(-Eb*sin(delta)+Xe*iq-Rs*id)*id;  
fad=Eb*cos(delta)+Xe*id+Rs*iq+Xl*id;
```

```
%-----
```

```
%SEGUNDA PARTE
```

```
K12=2*pi*60*(efd+Rfd*(fad-ffd)/Xfd)*ta;  
ffd=ffd+K12/2;
```

```
K22=1/2/H*(Tm-Te-KD*RPM)*ta;  
RPM=RPM+K21/2;  
py2=120*pi*K22/2/ta;
```

```
K32=2*pi*60*(RPM)*ta;  
delta=delta+K32/2;
```

```
K42=2*pi*60*(R1d*(fad-f1d)/X1d)*ta;  
f1d=f1d+K42/2;
```

```
K52=2*pi*60*(R1q*(faq-f1q)/X1q)*ta;  
f1q=f1q+K52/2;
```

```
K62=2*pi*60*(R2q*(faq-f2q)/X2q)*ta;  
f2q=f2q+K62/2;
```

```
K72=1/TR*(et-v1)*ta;  
v1=v1+K72/2;
```

```
K82=(KPSS/120/pi*py2-v2/Tw)*ta;  
v2=v2+K82/2;  
py5=K82/2/ta;
```

```
K92=1/T2*(T1*py5+v2-vso)*ta;  
vso=vso+K92/2;
```

```
%-----
```

```
%ATUALIZAÇÃO DAS VARIÁVEIS DO SISTEMA
```

```
Ebd=Eb*sin(delta);  
E bq=Eb*cos(delta);  
Ed11=Xaqs11*(f1q/X1q+f2q/X2q);  
Eq11=Xads11*(ffd/Xfd+f1d/X1d);  
id=(Xtq*(Eq11-E bq)-Rt*(Ebd+Ed11))/D;  
iq=(Rt*(Eq11-E bq)+Xtd*(Ebd+Ed11))/D;  
ed=Ebd-Xe*iq;  
eq=E bq+Xe*id;  
Te=(Eb*cos(delta)+Xe*id+Rs*iq)*iq-(-Eb*sin(delta)+Xe*iq-Rs*id)*id;  
fad=Eb*cos(delta)+Xe*id+Rs*iq+Xl*id;
```

```

%-----
%TERCEIRA PARTE
K13=2*pi*60*(efd+Rfd*(fad-ffd)/Xfd)*ta;
ffd=ffd+K13;

K23=1/2/H*(Tm-Te-KD*RPM)*ta;
RPM=RPM+K23;
py2=120*pi*K23/ta;

K33=2*pi*60*(RPM)*ta;
delta=delta+K33;

K43=2*pi*60*(R1d*(fad-f1d)/X1d)*ta;
f1d=f1d+K43;

K53=2*pi*60*(R1q*(faq-f1q)/X1q)*ta;
f1q=f1q+K53;

K63=2*pi*60*(R2q*(faq-f2q)/X2q)*ta;
f2q=f2q+K63;

K73=1/TR*(et-v1)*ta;
v1=v1+K73;

K83=(KPSS/120/pi*py2-v2/Tw)*ta;
v2=v2+K83;
py5=K83/ta;

K93=1/T2*(T1*py5+v2-vso)*ta;
vso=vso+K93;

%-----
%ATUALIZAÇÃO DAS VARIÁVEIS DO SISTEMA
Ebd=Eb*sin(delta);
Ebq=Eb*cos(delta);
Ed11=Xaqs11*(f1q/X1q+f2q/X2q);
Eq11=Xads11*(ffd/Xfd+f1d/X1d);
id=(Xtq*(Eq11-Ebq)-Rt*(Ebd+Ed11))/D;
iq=(Rt*(Eq11-Ebq)+Xtd*(Ebd+Ed11))/D;
ed=Ebd-Xe*iq;
eq=Ebq+Xe*id;
Te=(Eb*cos(delta)+Xe*id+Rs*iq)*iq-(-Eb*sin(delta)+Xe*iq-Rs*id)*id;
fad=Eb*cos(delta)+Xe*id+Rs*iq+Xl*id;

%-----
%QUARTA PARTE
K14=2*pi*60*(efd+Rfd*(fad-ffd)/Xfd)*ta;
ffd=ffd-K11/2-K12/2-K13+1/6*(K11+2*K12+2*K13+K14);

K24=1/2/H*(Tm-Te-KD*RPM)*ta;
RPM=RPM-K21/2-K22/2-K23+1/6*(K21+2*K22+2*K23+K24);
py2=120*pi*K24/ta;

K34=2*pi*60*(RPM)*ta;
delta=delta-K31/2-K32/2-K33+1/6*(K31+2*K32+2*K33+K34);

K44=2*pi*60*(R1d*(fad-f1d)/X1d)*ta;
f1d=f1d-K41/2-K42/2-K43+1/6*(K41+2*K42+2*K43+K44);

```

```
K54=2*pi*60*(R1q*(faq-f1q)/X1q)*ta;
f1q=f1q-K51/2-K52/2-K53+1/6*(K51+2*K52+2*K53+K54);
```

```
K64=2*pi*60*(R2q*(faq-f2q)/X2q)*ta;
f2q=f2q-K61/2-K62/2-K63+1/6*(K61+2*K62+2*K63+K64);
```

```
K74=1/TR*(et-v1)*ta;
v1=v1-K71/2-K72/2-K73+1/6*(K71+2*K72+2*K73+K74);
```

```
K84=(KPSS/120/pi*py2-v2/Tw)*ta;
v2=v2-K81/2-K82/2-K83+1/6*(K81+2*K82+2*K83+K84);
py5=K84/ta;
```

```
K94=1/T2*(T1*py5+v2-vso)*ta;
vso=vso-K91/2-K92/2-K93+ 1/6*(K91+2*K92+2*K93+K94);
```

```
%-----
```

```
%ATUALIZAÇÃO DAS VARIÁVEIS DO SISTEMA
```

```
Ebd=Eb*sin(delta);
Ebv=Eb*cos(delta);
Ed11=Xaqs11*(f1q/X1q+f2q/X2q);
Eq11=Xads11*(ffd/Xfd+f1d/X1d);
id=(Xtq*(Eq11-Ebv)-Rt*(Ebd+Ed11))/D;
iq=(Rt*(Eq11-Ebv)+Xtd*(Ebd+Ed11))/D;
ed=Ebd-Xe*iq;
eq=Ebv+Xe*id;
Te=(Eb*cos(delta)+Xe*id+Rs*iq)*iq-(-Eb*sin(delta)+Xe*iq-Rs*id)*id;
fad=Eb*cos(delta)+Xe*id+Rs*iq+Xl*id;
```

```
%-----
```

```
%ATUALIZAÇÃO GRÁFICA
```

```
FFD(k)=ffd;
FRPM(k)=RPM;
TE(k)=Te;
TM(k)=Tm;
Fdelta(k)=delta;
DRPM(k)=RPM-FRPM(k-1);
VolI(k)=VolI(k-1)+abs(Vref-et);
RPMI(k)=RPMI(k-1)+abs(RPM);
DDDefd(k)=2*pi*60*(Efd-Efd0)*Rfd/Xadns;
DDDird(k)=-2*pi*60*Rfd*(ifd-ifd0);
DDDffd(k)=(FFD(k)-FFD(k-1))/ta;
```

```
%-----
```

```
%PRÓXIMO PASSO
```

```
t=t+ta;
k=k+1;
end
```

```
%-----
```

```
%PREPARAÇÃO DO GRÁFICO
```

```
t=0:ta:tmax+ta;
if length(t)>length(FFD)
    t=0:ta:tmax-ta;
elseif length(t)<length(FFD)
    t=0:ta:tmax+2*ta;
end
```

```
%-----
```

```

%MOSTRAR ÂNGULO EM GRAUS
Delta=Fdelta*180/pi;
%-----

%-----
%
%           MONTAGEM DOS GRÁFICOS PARA ESTUDO DE CASOS
%-----

%QUADRO 1 - EVOLUÇÃO DAS CONDIÇÕES DO SISTEMA
figure(1);
subplot(2,2,1);
plot(t,FRPM,color);
xlabel('','FontSize',12);
ylabel('','FontSize',12);
title('\it{Desvio na Velocidade (pu)}','FontSize',12);
hold on
legend('CP LPA2v','AVR+PSS','CPC' )

subplot(2,2,2);
plot(t,ET,color);
xlabel('','FontSize',12);
ylabel('','FontSize',12);
title('\it{Tensão nos Terminais (pu)}','FontSize',12);
hold on

subplot(2,2,3);
plot(t,EFD,color);
xlabel('time(s)','FontSize',12);
ylabel('','FontSize',12);
title('\it{Tensão no Circuito de Campo (pu)}','FontSize',12);
hold on

subplot(2,2,4);
plot(t,Delta,color);
xlabel('time(s)','FontSize',12);
ylabel('','FontSize',12);
title('\it{Ângulo de Potência (°)}','FontSize',12);
hold on

%-----

%QUADRO 2 - ANÁLISE DA RESPOSTA DOS NAPS 1 e 2
figure(2);
subplot(2,2,1);
plot(t,MIER1,color);
xlabel('','FontSize',12);
ylabel('','FontSize',12);
title('\it{Grau de Evidência Real do NAP-1}','FontSize',12);
hold on

subplot(2,2,2);
plot(t,MIER2,color);
xlabel('','FontSize',12);
ylabel('','FontSize',12);
title('\it{Grau de Evidência Real do NAP-2}','FontSize',12);
hold on

subplot(2,2,3);
plot(t,PW,color);
xlabel('time(s)','FontSize',12);

```

```

ylabel('','FontSize',12);
title('\it{Fator Referente à Velocidade}','FontSize',12);
hold on

subplot(2,2,4);
plot(t,PV ,color);
xlabel('time(s)','FontSize',12);
ylabel('','FontSize',12);
title('\it{Fator Referente a Tensão}','FontSize',12);
hold on
%-----
%QUADRO 3 - ANÁLISE DA RESPOSTA DO NAP 3 E BIT

figure(3);
subplot(2,2,1);
plot(t,MIER3 ,color);
xlabel('','FontSize',12);
ylabel('','FontSize',12);
title('\it{Grau de Evidência Real do NAP-3}','FontSize',12);
hold on

subplot(2,2,2);
plot(t,BIT ,color);
xlabel('','FontSize',12);
ylabel('','FontSize',12);
title('\it{Sinal de Saída do Fator Referente a
Velocidade}','FontSize',12);
hold on

%-----
%QUADRO 4 - GRAUS DE EVIDÊNCIA

figure(4);
subplot(2,2,1);
plot(t,MI1 ,color);
xlabel('','FontSize',12);
ylabel('','FontSize',12);
title('\it{Grau de Evidência MI-1}','FontSize',12);
hold on

subplot(2,2,2);
plot(t,MI2 ,color);
xlabel('','FontSize',12);
ylabel('','FontSize',12);
title('\it{Grau de Evidência MI-2}','FontSize',12);
hold on

subplot(2,2,3);
plot(t,MI3 ,color);
xlabel('time(s)','FontSize',12);
ylabel('','FontSize',12);
title('\it{Grau de Evidência MI-3}','FontSize',12);
hold on

subplot(2,2,4);
plot(t,MI4 ,color);
xlabel('time(s)','FontSize',12);
ylabel('','FontSize',12);
title('\it{Grau de Evidência MI4}','FontSize',12);

```

```

hold on

%-----
-
%QUADRO 5 - TORQUES

figure(5);
subplot(2,2,1);
plot(t, TM , color);
xlabel(' ', 'FontSize', 12);
ylabel(' ', 'FontSize', 12);
title('\it{Torque Mecânico}', 'FontSize', 12);
hold on

subplot(2,2,2);
plot(t, TE , color);
xlabel(' ', 'FontSize', 12);
ylabel(' ', 'FontSize', 12);
title('\it{Torque Elétrico}', 'FontSize', 12);
hold on

```