



**Universidade Estadual de Campinas**  
**Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação**  
**Departamento de Máquinas Componentes e**  
**Sistemas Inteligentes**

**Análise das Fronteiras de Estabilidade da Máquina Síncrona**  
**vista pelo Modelo de 3ª Ordem.**

**Autor: Heverton Augusto Pereira**

**Orientadora: Profa. Dra. Ana Cristina Cavalcanti Lyra**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Comissão Examinadora

Profa. Dra. Ana Cristina Cavalcanti Lyra – DMCSI/FEEC/UNICAMP

Prof. Dr. José Tarcísio Resende – DEP/UFV

Prof. Dr. Gilmar Barreto – DMCSI/FEEC/UNICAMP

Campinas, 09 de Fevereiro de 2009

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA  
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

P414a                      Pereira, Heverton Augusto  
                                 Análise das fronteiras de estabilidade da máquina  
                                 síncrona vista pelo modelo de 3ª ordem / Heverton  
                                 Augusto Pereira. --Campinas, SP: [s.n.], 2009.

                                 Orientador: Ana Cristina Cavalcanti Lyra.  
                                 Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de  
Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de  
Computação.

                                 1. Máquinas elétricas síncronas. 2. Estabilidade -  
Fronteiras. 3. Simulação por computador. I. Lyra, Ana  
Cristina Cavalcanti. II. Universidade Estadual de  
Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de  
Computação. III. Título.

Título em Inglês: Stability frontiers analysis of the synchronous machines under the  
third order model

Palavras-chave em Inglês: Synchronous Machines, Stability Frontiers, Simulation

Área de concentração: Automação

Titulação: Mestre em Engenharia Elétrica

Banca examinadora: José Tarcísio Resende, Gilmar Barreto

Data da defesa: 09/02/2009

Programa de Pós Graduação: Engenharia Elétrica

## COMISSÃO JULGADORA - TESE DE MESTRADO

**Candidato:** Heverton Augusto Pereira

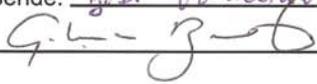
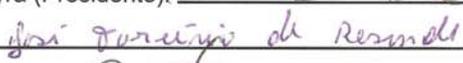
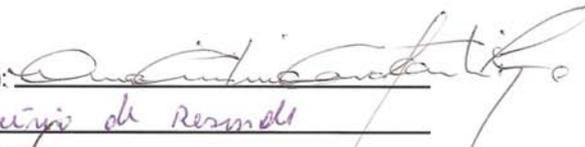
**Data da Defesa:** 9 de fevereiro de 2009

**Título da Tese:** "Análise das Fronteiras de Estabilidade da Máquina Síncrona Vista pelo Modelo de 3º Ordem"

Profa. Dra. Ana Cristina Cavalcanti Lyra (Presidente):

Prof. Dr. José Tarcísio de Resende:

Prof. Dr. Gilmar Barreto:



# Agradecimentos

Agradeço a Deus por ter inventado o descanso no final de semana, e a minha orientadora Ana Cristina, por ter aberto mão deste descanso para desenvolvermos este trabalho. Estes dois anos que pareciam longos passaram tão rápidos que parecia o Asafa Powell correndo os 100 m rasos.

Dedico este trabalho a meu pai que é um grande exemplo, pois mesmo enfrentando muitas dificuldades é um vencedor, e a minha mãe que mesmo se preocupando mais do que o necessário, tem uma olhar muitas vezes a frente do seu tempo, e foi quem me deu um computador de presente com o qual obtive maior conhecimento nos anos finais da minha graduação. Ainda na minha família, uma homenagem a minha avó Zélia, e aos meus irmãos Humberto, Monaliza e Janiliza para os quais sei que devo ser sempre exemplo. Aos meus tios Adail e Vicente que me proporcionaram viver em um lugar tranqüilo, onde tive as melhores condições possíveis para realizar o mestrado.

Um parágrafo em especial a minha namorada Liliane, pois com esses dois anos de mestrado estamos metade do nosso namoro distante fisicamente, mas graças às promoções de celulares estamos sempre pertos.

Como na multiplicação a ordem não importa, para os amigos também não, pois eles servem para multiplicar as alegrias. Marciano, Daiwison, Renato, Elismar, Nilson, Tiago, Denis e ao meu afilhado Warley lá de Minas, aos garotos do Pará Fábio, Neliton, Marcus e Bruno, e de São Paulo meu grande amigo Sergio Jardim e aos amigos Leonardo Wanderley e Geison Tsun.

Como dizia Carlos Drummond de Andrade: “tinha uma pedra no meio do caminho”. Para fazer bem feito, no meio do caminho tinham duas pedras, uma em cada canal, quase morri, não agüentava nem chorar. Mas, graças ao amigo Ronaldo e a Cillene, que além de me escolher para trabalhar no Unibanco, ligou para o diretor do banco as 9 da noite numa sexta de carnaval para poderem liberar minha operação. Do Unibanco dedico este trabalho também aos amigos Michael, Winston.

Encerrando com um agradecimento especial ao Dr. Carlos Alberto Teixeira e aos professores Delly e Ricardo dos Santos, pois se não tivessem confiado em mim, poderia não ter escrito este trabalho.

Dedico este trabalho  
ao meu pai, Júlio;  
à minha mãe, Maria Aparecida;  
ao meu irmão, Humberto;  
à minhas irmãs, Monaliza e Janaliza

# Resumo

Nas últimas décadas as formas de transmissão de conhecimentos têm evoluído muito rapidamente, principalmente pela evolução da tecnologia da informação. A modelagem de sistemas físicos tem atingido grande complexidade, tornando as equações matemáticas difíceis de interpretação. Essa complexidade impõe um desafio no ensino dos componentes dos sistemas de energia elétrica, que pode ser superado com a utilização de ferramentas computacionais. O objetivo deste trabalho é desenvolver um aplicativo computacional didático, para simulações de estabilidade da máquina síncrona, que permita a análise da influência do controle de reativo e do sinal estabilizador na estabilidade da máquina síncrona. Além disso, é analisada a influência da reatância do transformador na estabilidade. Neste trabalho todas as análises de estabilidade têm como premissa as fronteiras de estabilidade, oscilatória e aperiódica, desenvolvidas a partir do modelo de 3ª ordem da máquina síncrona. O modelo de 3ª ordem foi desenvolvido a partir do modelo de 5ª ordem, e ambos não incluem os enrolamentos amortecedores. Uma comparação realizada entre os dois modelos mostrou grande semelhança entre os modelos de 3ª e 5ª ordem. Para o desenvolvimento da interface gráfica foi utilizado o Matlab®. A interface foi desenvolvida para maior usabilidade, onde a simulação é realizada sem necessidade do uso de linguagens de baixo nível. Assim, o foco é analisar os gráficos gerados a partir da simulação. Os cinco módulos desenvolvidos foram: simulação do modelo de 3ª ordem, comparação entre o modelo de 3ª e 5ª ordem, comparação entre ganhos de reativo, comparação entre sinais estabilizadores e comparação com e sem transformador. A inclusão de outros módulos pode ser realizada de maneira rápida, proporcionando que atualizações possam ser realizadas sem impacto ao sistema original.

**Palavras-chave:** Máquinas Síncronas, Fronteiras de Estabilidade, Simulação.

# Abstract

The ways to spread knowledge in the last decades have been rapidly evolved, most due to improvements on information technology. The modeling of physical systems has reached vast complexity. In advance, the mathematical equations used on these models have become harder to interpret. This complexity imposes a challenge on teaching synchronous machines and it can be managed through the use of computational resources. The purpose of this work is to develop a didactical application, that helps teaching synchronous machines stability and allow the analysis of the reactive control and stabilizing signal influences on synchronous machine stability. Additionally, the influence of the transformer reactance on the stability is analyzed. Every stability analysis included on this work has as premise the stability frontiers, oscillatory and aperiodic, developed through the synchronous machine's third order model. The 3rd order model was developed from the 5th order and none of the models include dampers winding. A comparison between the 3rd and 5th order models showed great similarity among them. Matlab® was used to develop a graphical interface and the models were simulated with the use of Simulink®. Usability was the key factor during the development of the interface, were the simulations can be done without the need of low-level languages. Thus, the focus should be analyzing the graphics generated through the simulation. The five modules developed were: 3rd order model simulation, comparison between 3rd and 5th order models, reactive gain comparison, stability signal comparisons and the comparison with and without transformer. New modules can be easily added to this work, providing new updates without affecting the original system.

**Keywords:** Synchronous Machines, Stability Frontiers, Simulation.

# Sumário

Agradecimentos.....	iv
Resumo.....	vi
Abstract .....	vii
Lista de Figuras .....	x
Lista de Tabelas.....	xii
Lista de Símbolos .....	xiii
1. Introdução.....	1
1.1. Organização do Trabalho .....	2
2. Máquinas Síncronas .....	3
2.1. Conceitos.....	4
2.1.1. Estator.....	6
2.1.2. Rotor.....	7
2.1.3. Enrolamento amortecedor .....	9
2.2. Princípio de funcionamento .....	10
2.3. Tensão induzida.....	11
3. Sistema Elétrico de Potência.....	15
3.1. História.....	15
3.2. História do Sistema Elétrico Brasileiro.....	17
3.3. A influência do Controle de Excitação .....	20
3.4. Torque Sincronizante e Torque de Amortecimento .....	21
3.5. Sinais Estabilizadores.....	22
3.6. FACTS .....	23
4. Modelos da Máquina Síncrona.....	25
4.1. Transformação de Park.....	26
4.2. O Modelo de 5ª Ordem.....	28
4.3. O Modelo de 3ª Ordem.....	29
4.4. Comparação Entre os Modelos de 3ª e 5ª Ordem.....	30
4.5. Fronteiras de Estabilidade .....	33
5. Aplicativo Desenvolvido.....	35

5.1.	Modelo de 3ª Ordem .....	37
5.2.	Modelo de 3ª Ordem .....	38
5.3.	Modelo de 3ª Ordem com Transformador.....	39
5.4.	Comparação dos Modelos de 3ª e 5ª Ordem .....	40
5.5.	Comparação de Diferentes Ganhos de Reativo.....	41
5.6.	Comparação de Diferentes Ganhos de Sinal Estabilizador.....	42
5.7.	Módulos Auxiliares .....	43
6.	Resultados .....	45
6.1.	Modelo de 3ª Ordem .....	45
6.2.	Comparação do Ganho de Reativo.....	51
6.3.	Comparação do Sinal Estabilizador .....	56
6.4.	Modelo de 3ª Ordem com transformador .....	61
7.	Conclusões .....	65
	Referências Bibliográficas .....	67

# Lista de Figuras

Figura 2.1 - Máquina síncrona desmontada .....	5
Figura 2.2 – Estator trifásico conectado em estrela .....	6
Figura 2.3 – Estator em construção .....	7
Figura 2.4 – Rotor de pólos salientes (a) e lisos(b).....	8
Figura 2.5 – Rotor de pólos salientes .....	9
Figura 2.6 – Enrolamentos amortecedores .....	10
Figura 2.7 – Máquina síncrona simplificada.....	11
Figura 2.8 – Circuitos magnéticos.....	12
Figura 2.9 – Onda de força magneto motriz da fase a.....	13
Figura 2.10 – Montagem de um dos geradores de Itaipu .....	14
Figura 3.1 - Principais linhas de transmissão do sistema elétrico brasileiro.....	19
Figura 4.1 – Representação dos eixos d,q na máquina síncrona .....	26
Figura 4.2 – Comparação do ângulo delta entre os modelos de 3 <sup>a</sup> e 5 <sup>a</sup> Ordem.....	30
Figura 4.3 – Comparação da corrente de campo entre os modelos de 3 <sup>a</sup> e 5 <sup>a</sup> Ordem .....	31
Figura 4.4 – Comparação da velocidade relativa do rotor entre os modelos de 3 <sup>a</sup> e 5 <sup>a</sup> Ordem .....	32
Figura 4.5 – Comparação do torque eletromagnético entre os modelos de 3 <sup>a</sup> e 5 <sup>a</sup> Ordem .....	32
Figura 5.1 – Estrutura do aplicativo desenvolvido.....	36
Figura 5.2 – Tela Inicial .....	36
Figura 5.3 – Tela de simulação do modelo de 3 <sup>a</sup> ordem .....	38
Figura 5.4 – Tela de simulação do modelo de 3 <sup>a</sup> ordem com e sem transformador .....	39
Figura 5.5 – Tela de comparação entre o modelo de 3 <sup>a</sup> e 5 <sup>a</sup> ordem .....	40
Figura 5.6 – Tela de comparação de duas situações de ganho de reativo .....	41
Figura 5.7 – Tela de comparação de duas situações de sinal estabilizador.....	42
Figura 5.8 – Tela de configuração do delta(0) .....	43
Figura 5.9 – Tela para entendimento das variáveis .....	44
Figura 6.1 – Simulação do modelo de 3 <sup>a</sup> ordem conforme Tabela 6.2. ....	46
Figura 6.2 – Velocidade relativa do rotor e torque eletromagnético.....	47
Figura 6.3 – Potência ativa e ângulo $\delta$ . ....	48
Figura 6.4 – Potência reativa e corrente de campo. ....	49

Figura 6.5 – Variação da potência ativa e reativa. ....	49
Figura 6.6 – Relação torque eletromagnético versus ângulo. ....	50
Figura 6.7 – Fronteiras de estabilidade. ....	51
Figura 6.8 – Simulação de diferentes ganhos de reativo conforme Tabela 6.3.....	52
Figura 6.9 – Ângulos $\delta$ com diferentes ganhos de reativos.....	53
Figura 6.10 – Correntes de campo com diferentes ganhos de reativos. ....	54
Figura 6.11 – Potências ativas e reativas com diferentes ganhos de reativos. ....	54
Figura 6.12 – Curva torque versus ângulo $\delta$ para diferentes ganhos de reativos.....	55
Figura 6.13 – Fronteiras de estabilidade para diferentes ganhos de reativos.....	56
Figura 6.14 – Simulação de diferentes sinais estabilizadores conforme Tabela 6.4.....	57
Figura 6.15 – Ângulo $\delta$ para diferentes sinais estabilizadores.....	58
Figura 6.16 – Corrente de campo para diferentes sinais estabilizadores. ....	58
Figura 6.17 – Potência ativa para diferentes sinais estabilizadores. ....	59
Figura 6.18 – Potência reativa para diferentes sinais estabilizadores. ....	59
Figura 6.19 – Curva torque versus ângulo $\delta$ para diferentes sinais estabilizadores.....	60
Figura 6.20 – Fronteiras de estabilidade para diferentes sinais estabilizadores.....	60
Figura 6.21 – Simulação do modelo de 3 <sup>a</sup> ordem com transformador conforme Tabela 6.5.....	62
Figura 6.22 – Ângulo $\delta$ para simulação sem e com transformador.....	62
Figura 6.23 – Corrente de campo para simulação sem e com transformador. ....	63
Figura 6.24 – Potência ativa e reativa para simulação sem e com transformador. ....	64
Figura 6.25 – Fronteiras de estabilidade sem e com transformador.....	64

## Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Empreendimentos em Operação .....	4
Tabela 6.1 - Características da Máquina Síncrona.....	46
Tabela 6.2 - Simulação do Modelo de 3ª Ordem. ....	47
Tabela 6.3 – Simulação do Modelo de 3ª Ordem com Variação no Ganho de Reativos.....	52
Tabela 6.4 – Simulação do Modelo de 3ª Ordem com Variação no Sinal Estabilizador.....	57
Tabela 6.5 – Simulação do Modelo de 3ª Ordem com Transformador.....	61

## Lista de Símbolos

$\delta$	Ângulo elétrico entre eixo $d$ e eixo síncrono
$\lambda$	Variável das equações características
$\theta$	Ângulo elétrico entre eixo $d$ e fase $a$
$\theta_{\text{ELE}}$	Ângulo elétrico
$\theta_{\text{MEC}}$	Ângulo mecânico
$\omega$	Velocidade angular
$e$	Ganho normalizado do regulador de reativos
$f$	Frequência em Hz
$f_{\text{abc}}$	Variáveis na referência $abc$
$f_{\text{dq0}}$	Variáveis na referência $dq0$
$i$	Corrente de campo
$i_0$	Corrente de campo na posição de equilíbrio
$i_a, i_b, i_c$	Correntes das fases $a, b, c$ do estator
$i_d, i_q, i_0$	Correntes transformadas $dq0$ de estator
$J$	Momento de inércia de massa girante ( rotor da máquina e turbina)
$k$	Ganho normalizado do sinal estabilizador de velocidade
$L$	Indutância de campo
$L_d$	Indutância de eixo direto $d$
$L_q$	Indutância de eixo de quadratura $q$
$L'$	Indutância transitória de campo
$L_d'$	Indutância transitória de eixo $d$
$M$	Coefficiente de indutância mútua entre enrolamentos de estator e rotor
$n$	Velocidade de rotação em RPM
$p$	Pares de pólos
$P$	Potência ativa
$P_m$	Potência mecânica
$P_0$	Potência ativa na posição de equilíbrio
$P_N$	Potência ativa normalizada

$Q$	Potência reativa
$Q_0$	Potência reativa na posição de equilíbrio
$R$	Resistência de campo
$R_e$	Resistência de estator
$T_{dq0}$	Matriz de transformação de variáveis na referência abc para referência dq0
$T_m$	Torque mecânico acelerador de eixo
$T_D$	Torque de amortecimento
$T_S$	Torque sincronizante
$t$	Tempo
$V$	Tensão eficaz entre linhas da barra infinita
$X$	Reatância de campo
$X_d$	Reatância de eixo direto
$X_q$	Reatância de eixo de quadratura
$X'$	Reatância transitória de campo
$X'_d$	Reatância transitória de eixo $d$
$y$	Velocidade relativa do rotor

# Capítulo 1

## Introdução

Com a evolução da informática, cada vez mais softwares têm sido desenvolvidos para auxiliar pesquisadores e profissionais na execução de suas atividades.

A simulação de sistemas reais é uma etapa importante na análise e avaliação de projetos de engenharia. Na área de sistemas de energia elétrica, a simulação dinâmica dos sistemas elétricos tornou-se imprescindível, tanto para o desenvolvimento de novas metodologias e equipamentos para o setor elétrico, quanto para o ensino e treinamento dos futuros profissionais do setor [1].

Em um evento realizado por Especialistas em Operação de Centrais Hidrelétricas (SEPOCH), foi ressaltada a economia de tempo em treinamento com a utilização de simulações computacionais, pois o treinamento prático em função da operação no dia a dia é lento, tendo em vista que os eventos não ocorrem com a frequência necessária ao treinamento, bem como são também de difícil controle [2].

O objetivo deste trabalho é desenvolver um aplicativo computacional utilizando o Matlab®, para auxiliar os estudantes e profissionais da área de máquinas elétricas e sistemas de energia elétrica no entendimento de como os controles afetam o comportamento da máquina síncrona. Para isso foi utilizado o modelo de 3ª ordem, e as fronteiras de estabilidade desenvolvidas a partir deste modelo. O estudo pelas fronteiras de estabilidade traz uma visão muitas vezes ocultada pela análise das equações diferenciais.

## 1.1. Organização do Trabalho

O trabalho está organizado em sete capítulos, onde os três primeiros representam o embasamento teórico. O Capítulo 4 faz a ligação entre a parte teórica e os resultados alcançados neste trabalho, os quais estão exibidos nos três últimos capítulos.

No Capítulo 2 é feita uma revisão sobre teoria de máquinas síncronas, ressaltando a sua importância, na geração de energia elétrica. Neste capítulo também são descritos alguns conceitos técnicos do funcionamento das máquinas síncronas.

No Capítulo 3 é realizada uma revisão sobre a história do desenvolvimento dos sistemas elétricos de potência no final do século 19, dos problemas originados com a interligação dos sistemas elétricos na década de 1950, e como esses problemas foram superados.

No Capítulo 4 é apresentada a modelagem de 5ª e 3ª ordem da máquina síncrona, e como o modelo de 3ª ordem foi obtido a partir do modelo de 5ª ordem. Pelo fato dos modelos não incluírem os enrolamentos amortecedores, a solução utilizada foi multiplicar a resistência de rotor, o que proporciona aumentar o amortecimento das oscilações reduzindo assim o tempo de simulação. Essa solução foi apresentada nos trabalhos que desenvolveram os modelos simplificados [17] [18] [19].

No Capítulo 5 é apresentada a interface gráfica desenvolvida neste trabalho, que é constituída de cinco módulos. Apesar de cada módulo possuir uma finalidade, e terem sido desenvolvidos separadamente, na versão final os módulos estão integrados em uma plataforma única e algumas funções são utilizadas por todos os módulos, trazendo assim o benefício do aplicativo total ficar mais simples e eficiente.

No Capítulo 6 são apresentados os resultados das simulações para os módulos desenvolvidos, exceto para o módulo de comparação entre o modelo de 3ª e 5ª ordem, que será apresentado no Capítulo 4.

No Capítulo 7 são apresentadas as principais conclusões do trabalho, com destaque para o efeito das variáveis nas fronteiras de estabilidade. Finalizando com algumas sugestões para trabalhos que poderão ser realizados a partir do aplicativo desenvolvido.

# Capítulo 2

## Máquinas Síncronas

A energia elétrica produzida a partir de hidrelétricas representa 75,6% da produção de energia elétrica brasileira. Nelas a energia potencial da água é transformada em cinética e esta é transformada em energia elétrica através da conversão eletromecânica que ocorre no interior das máquinas síncronas.

Além das hidrelétricas as máquinas síncronas também são utilizadas nas usinas térmicas e nucleares, as quais produzem 22% e 2%, respectivamente, totalizando 99,6% da produção de energia elétrica produzida no Brasil. Sendo os 0,4% da energia elétrica restantes, produzida a partir de outras máquinas, como as assíncronas na geração eólica, ou armazenada em baterias através de geração fotovoltaica. A Tabela 2.1 exibe a quantidade de energia elétrica produzida por cada tipo de usina nos empreendimentos em operação no país [3].

Devido à elevada participação das máquinas síncronas na geração de energia elétrica, o desenvolvimento de ferramentas didáticas para entender o seu funcionamento, e o efeito dos controladores a ela associados, é de extrema importância para o ensino e treinamento de profissionais que atuam no setor de geração e de proteção do sistema elétrico de potência.

Tabela 2.1 - Empreendimentos em Operação

<b>Tipo</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Potência Outorgada (kW)</b>	<b>Potência Fiscalizada (kW)</b>	<b>%</b>
<b>CGH</b>	228	120.809	120.187	0,12
<b>EOL</b>	17	273.850	272.650	0,27
<b>PCH</b>	314	2.272.448	2.216.789	2,17
<b>SOL</b>	1	20	20	0,00
<b>UHE</b>	159	74.572.295	75.066.931	73,46
<b>UTE</b>	1.039	25.214.260	22.500.308	22,02
<b>UTN</b>	2	2.007.000	2.007.000	1,96
<b>Total</b>	<b>1.760</b>	<b>104.460.682</b>	<b>102.183.885</b>	<b>100,00</b>

Fonte: ANEEL

Onde:

CGH	Central Geradora Hidrelétrica
EOL	Central Geradora Eólica
PCH	Pequena Central Hidrelétrica
SOL	Central Geradora Solar Fotovoltaica
UHE	Usina Hidrelétrica de Energia
UTE	Usina Termelétrica de Energia
UTN	Usina Termonuclear

## 2.1. Conceitos

As máquinas síncronas, na operação como geradores, são as principais responsáveis por transformar a energia mecânica em energia elétrica. Esse processo é conhecido como conversão eletromecânica de energia. Essas máquinas podem operar como geradores ou motores. Devido a razões construtivas e ao seu custo maior em relação à máquina de indução, ela é mais utilizada como gerador.

A máquina síncrona é composta de estator, que aloja um enrolamento monofásico ou trifásico e onde normalmente é induzida tensão alternada. O rotor, que contém um enrolamento que é usualmente alimentado com corrente contínua e que serve para criar o

campo magnético principal na máquina. Outras partes que compõem a máquina síncrona são os enrolamentos amortecedores, a sapata polar, os anéis coletores e as escovas. A Figura 2.1 exibe uma máquina síncrona desmontada.

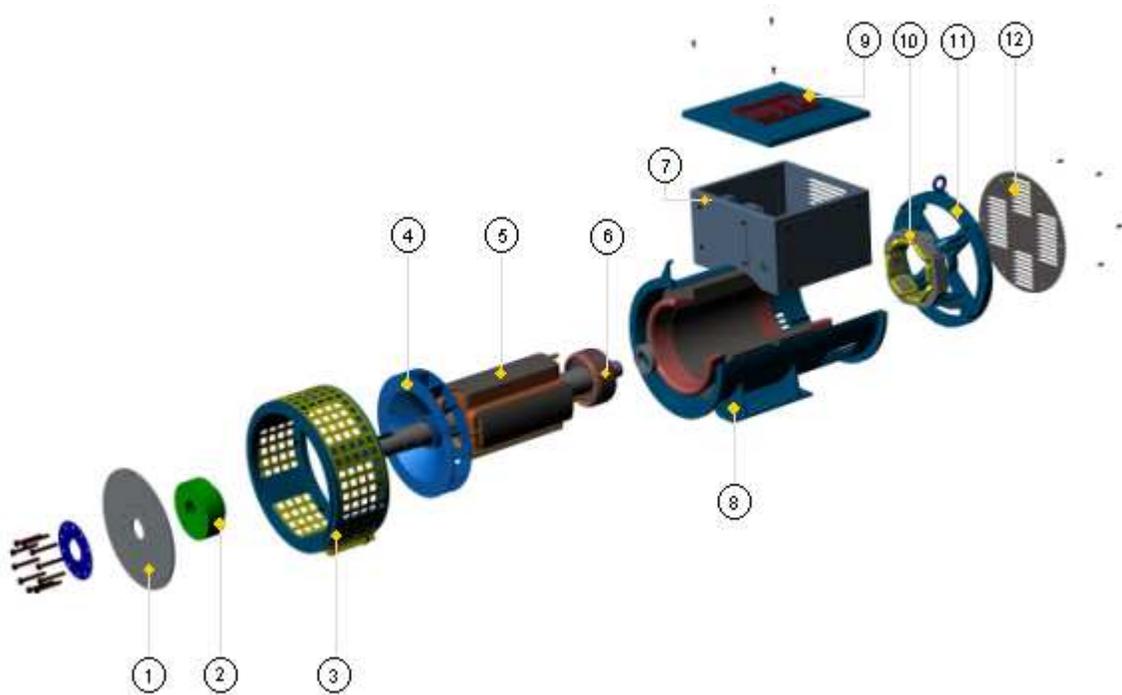


Figura 2.1 - Máquina síncrona desmontada

Fonte: WEG

Onde:

- |                          |                               |
|--------------------------|-------------------------------|
| 1 - Disco de Acoplamento | 7 - Caixa de Ligação          |
| 2 - Bucha de acoplamento | 8 - Carcaça                   |
| 3 - Flange               | 9 - Tampa da caixa de ligação |
| 4 - Ventilador           | 10 - Estator da Excitatriz    |
| 5 - Rotor Principal      | 11 - Tampa Traseira           |
| 6 - Rotor da Excitatriz  | 12 - Veneziana                |

### 2.1.1. Estator

Na Figura 2.1 o estator está acoplado à carcaça da máquina. Ele é composto de chapas de aço laminadas dotadas de ranhuras axiais onde é alojado o enrolamento do estator. As chapas possuem características magnéticas de alta permeabilidade, criando um caminho magnético de baixa relutância para o fluxo, diminuindo assim, o fluxo disperso e concentrando o campo no entreferro. A construção do estator, a partir de chapas, tem a mesma justificativa que para os demais tipos de máquinas de corrente alternada, como a diminuição das perdas provocadas por correntes parasitas (correntes de Foucault), as quais estariam presentes em maior grau, caso fosse empregado uma construção maciça. As chapas são em geral tratadas termicamente a fim de reduzir o valor das perdas específicas por histerese [4].

No enrolamento do estator é induzida a tensão alternada, e o enrolamento é ligado ao sistema elétrico. Devido a essa maior complexidade e a alta potência envolvida, o estator geralmente fica na parte estática da máquina. Para um estator com enrolamentos trifásicos, as três fases *abc* podem estar conectadas em estrela ou triângulo, e uma mesma fase de um enrolamento pode ser conectada em série ou paralelo. Na Figura 2.2 são exibidos os enrolamentos de um estator trifásico conectado em estrela, com cada fase ligada em série.

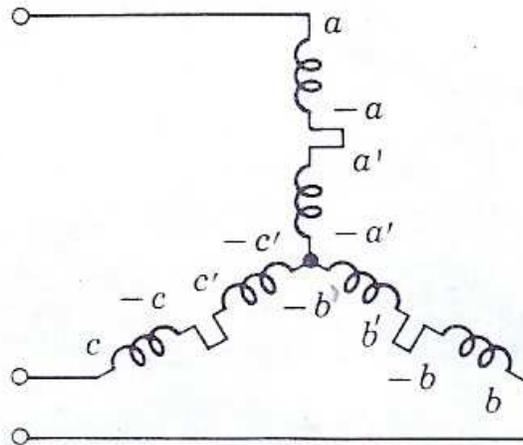


Figura 2.2 – Estator trifásico conectado em estrela

A Figura 2.3 exibe um estator em construção.

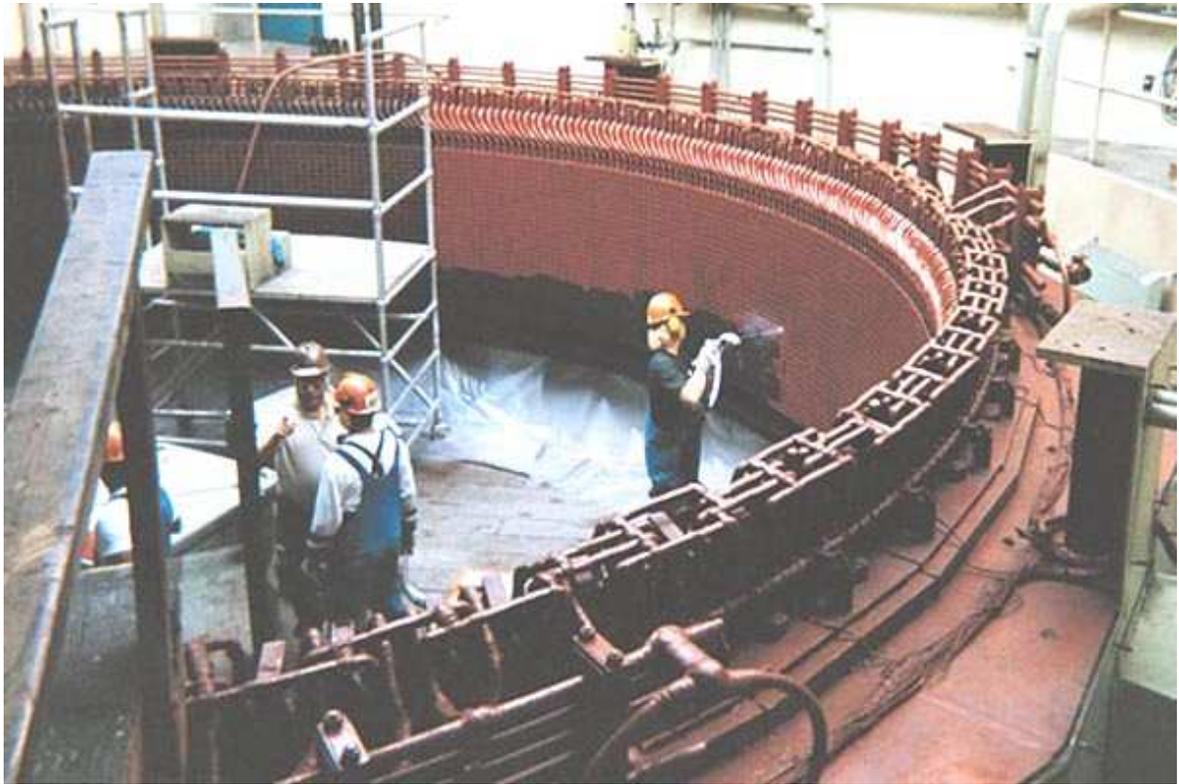


Figura 2.3 – Estator em construção

### 2.1.2. Rotor

Geralmente constituído do mesmo material do estator, sendo formado por chapas metálicas justapostas. O tipo de rotor divide as máquinas síncronas em dois grupos. O primeiro é composto por máquinas de rotor cilíndrico, ou pólos lisos, que corresponde a máquinas que operam com alta velocidade, são mais utilizadas em usinas termoelétricas e nucleares. O segundo grupo é formado por máquinas de rotor com pólos salientes, onde as máquinas operam em baixas velocidades e são mais empregadas em usinas hidrelétricas. Na figura 2.4 é exibido um rotor de pólos salientes (a) e um rotor de pólos lisos (b).

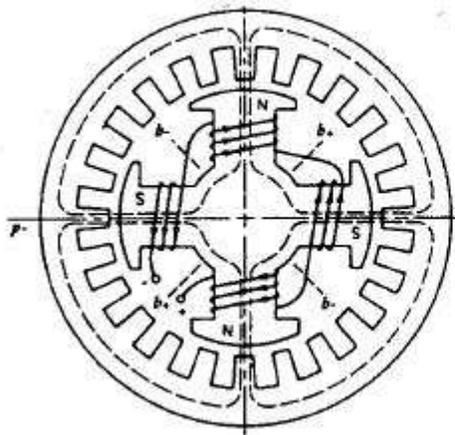


Figura 2.4a – Rotor de pólos salientes



Figura 2.4b – Rotor de pólos lisos

As máquinas de rotor de pólos lisos possuem um enrolamento distribuído e um entreferro uniforme. Geralmente tem dois ou quatro pólos e o rotor é mais comprido e com pequeno diâmetro. As máquinas de rotor de pólos salientes possuem uma elevada quantidade de pólos e operam com baixa velocidade. A relação entre a velocidade e o número de pólos é exibida na Equação 2.1.

$$n = \frac{120f}{P} \quad (2.1)$$

Onde:

$n$  velocidade de rotação da máquina

$f$  frequência

$P$  número de pólos

Assim, para uma máquina operando na frequência de 60 Hz, com 2 pólos a velocidade de rotação é de 3600 RPM, enquanto se a máquina tivesse 64 pólos, a velocidade de operação seria de 112,5 RPM, para uma frequência de 60 Hz. Na Figura 2.5 é exibido um rotor de uma máquina de pólos salientes.



Figura 2.5 – Rotor de pólos salientes

O enrolamento de campo é excitado por uma fonte de tensão contínua que pode ser uma bateria, um gerador de tensão contínua ou um circuito retificador. Esta fonte é denominada excitatriz. Juntamente com essa fonte há um regulador de tensão capaz de manter a tensão de campo num valor especificado para a operação do gerador. O enrolamento de campo é de baixa potência (cerca de 5% do valor total da máquina) [5]. Para grandes geradores pode chegar a menos de 1%.

### **2.1.3. Enrolamento amortecedor**

Além do enrolamento de campo, tanto o rotor de pólos lisos quanto o de pólos salientes pode conter também um enrolamento chamado de enrolamento amortecedor. Este enrolamento é alojado em ranhuras semi-abertas e de formato redondo sobre a superfície do rotor. A função principal deste enrolamento é promover uma maior estabilidade da máquina, com o amortecimento de oscilações que ocorrem em condições transitórias, como numa retirada brusca de carga, em alterações súbitas de tensão, ou a variações de velocidade de maneira a evitar que a máquina perda o sincronismo [6]. A Figura 2.6 exhibe um enrolamento amortecedor no pólo da máquina.

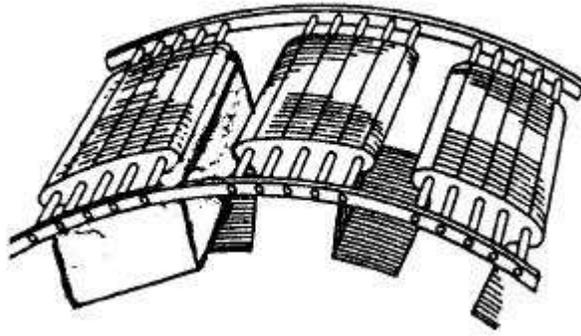


Figura 2.6 – Enrolamentos amortecedores

## 2.2. Princípio de funcionamento

A máquina síncrona como muitas outras máquinas elétricas têm o princípio de funcionamento baseado na Lei de Indução Eletromagnética. Esta é uma lei física que quantifica a indução eletromagnética, como o efeito da produção de corrente elétrica em um circuito colocado sob efeito de um campo magnético variável ou por um circuito em movimento em um campo magnético constante.

A conversão eletromecânica de energia ocorre quando variações de fluxos magnéticos são associadas a movimentações mecânicas. Em máquinas elétricas girantes, tensões são geradas nos enrolamentos (conjuntos de bobinas), pela rotação desses enrolamentos dentro de um campo magnético, pela rotação de um campo magnético que atravessa um enrolamento ou pela variação da relutância do entreferro com a rotação do rotor (variação do comprimento do entreferro) [5].

Uma máquina primária é acoplada mecanicamente ao rotor onde estão alojados os pólos e exerce sobre ele uma força mecânica fazendo-o girar. O enrolamento de campo é alimentado com tensão contínua como explicado anteriormente. Assim, o movimento relativo entre o rotor e o estator faz com que surja uma tensão nos terminais do gerador. Ao ser ligado a uma carga a tensão induzida faz com que circule corrente pelo gerador e pela carga. A potência mecânica transferida pela máquina primária é assim convertida em energia elétrica (descontadas as perdas).

Quando um gerador síncrono fornece potência elétrica a uma carga, as correntes de estator criam uma onda de fluxo magnético girante no entreferro na velocidade síncrona.

Esse fluxo girante reage com o fluxo também girante no rotor (campo da máquina) que estão na mesma velocidade elétrica e, portanto estacionários entre si criando-se um conjugado ou torque eletromagnético que resulta numa tendência dos eixos magnéticos do estator e do rotor se alinharem. A Figura 2.7 exhibe a estrutura descrita para uma máquina síncrona de maneira simplificada, com a presença de um único enrolamento no estator.

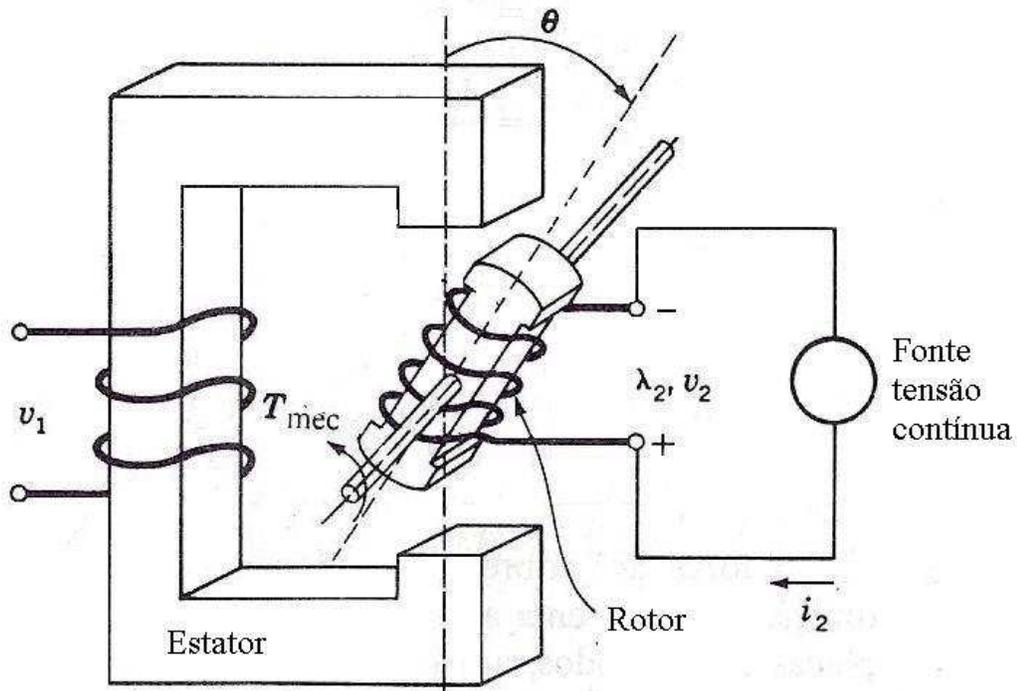


Figura 2.7 – Máquina síncrona simplificada

### 2.3. Tensão induzida

As tensões geradas nos enrolamentos de estator seguem a mesma forma da indução magnética e pode ser determinada com base nos princípios da variação do fluxo concatenado no interior da bobina ou pelo movimento relativo entre os condutores e o campo magnético.

Para uma rotação completa do rotor, da máquina de dois pólos, gera-se um ciclo completo de tensão na bobina. Então para produzir tensão com a frequência de 60 Hz, é necessário que o rotor gire a 60 rps ou 3600 rpm. Se a máquina for de quatro pólos com meia rotação do rotor gera-se um ciclo completo de tensão na bobina, pois o ângulo elétrico

é diferente do ângulo mecânico, se a máquina for diferente de 2 pólos, como pode ser observado na Equação 2.2. A Figura 2.8 ilustra a relação entre número de pólos e os circuitos magnéticos formados.

$$\theta_{ELE} = \frac{\theta_{MEC} P}{2} \quad (2.2)$$

Onde:

- $\theta_{ELE}$  ângulo elétrico
- $\theta_{MEC}$  ângulo mecânico
- $P$  número de pólos

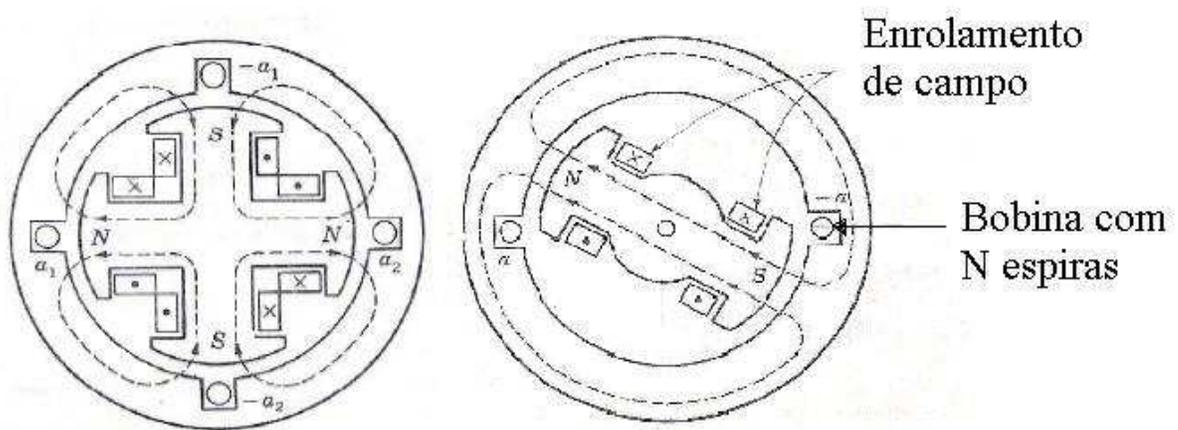


Figura 2.8 – Circuitos magnéticos

Considerando um estator com enrolamentos trifásicos, como o apresentado na Figura 2.8 e uma máquina em regime permanente, as tensões (entre fase e neutro) de saída dos enrolamentos são senoidais defasadas de  $120^\circ$ . Numa máquina trifásica os enrolamentos são fisicamente defasados de  $120^\circ$ . A Figura 2.9 exibe como a oscilação da força magneto motriz é percebida pelo enrolamento da fase  $a$  e, a modelagem da tensão induzida nas fases  $abc$  é exibida nas Equações de 2.3 a 2.5.

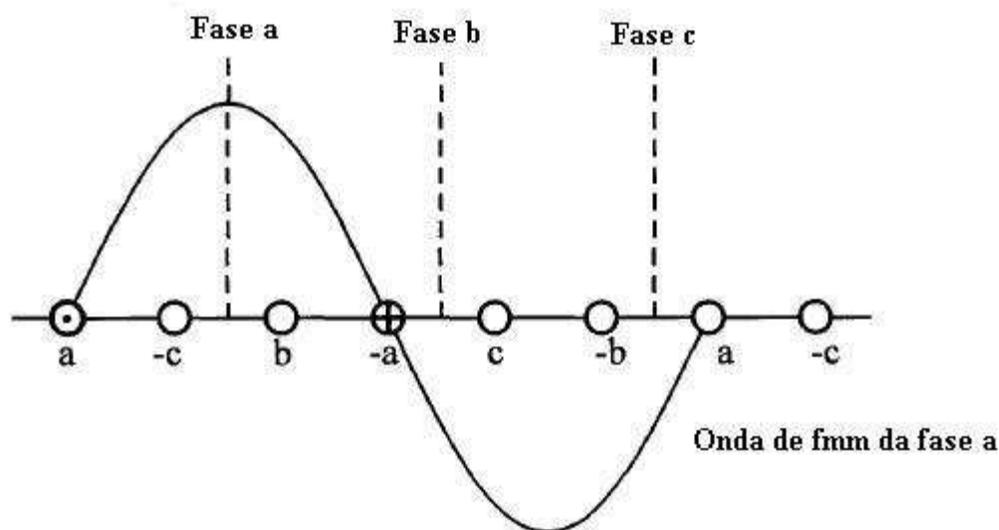


Figura 2.9 – Onda de força magneto motriz da fase a

$$V_a = V_{MAX} \cos(\omega t) \quad (2.3)$$

$$V_b = V_{MAX} \cos(\omega t - 120^\circ) \quad (2.4)$$

$$V_c = V_{MAX} \cos(\omega t + 120^\circ) \quad (2.5)$$

Onde:

$V_a$       tensão na fase *a*

$V_{MAX}$     tensão máxima fase neutra

$\omega$         velocidade angular

$t$         tempo

Com o crescimento da demanda por energia elétrica em todo o mundo, grandes projetos têm sido desenvolvidos para atender essa demanda. Para ilustrar a complexidade dos grandes projetos é exibida na Figura 2.10 uma foto da montagem de um dos geradores da hidroelétrica de Itaipu.



Figura 2.10 – Montagem de um dos geradores de Itaipu

# Capítulo 3

## Sistema Elétrico de Potência

A partir de 1950 tiveram início as primeiras interligações dos sistemas de energia elétrica, com o objetivo de tornar possível a geração e a transmissão de energia de forma mais econômica e confiável. O aspecto econômico se traduz principalmente pela redução das reservas girantes dos sistemas individuais, tendo em vista que a reserva girante global requerida pelo sistema interligado pode ser consideravelmente menor do que a soma das reservas girantes originais. No tocante a confiabilidade, ela se deve ao fato de que no sistema interligado torna-se possível a assistência mútua entre seus membros, ou seja, possibilita a transferência de energia de um sistema para outro [7].

### 3.1. História

O uso comercial de eletricidade começou no final da década de 1870 quando lâmpadas foram usadas para iluminação de residências e ruas. O primeiro sistema de potência completo (incluindo um gerador, cabos, fusível, medidor, e cargas) foi construído por Thomas Edison, em Nova York e começou a operar em Setembro de 1882. Este sistema foi um sistema de geração dc alimentado por vapor, com capacidade para suprir a demanda de potência de 59 consumidores em uma área de 1,5 km de raio. A carga, que consistia basicamente de lâmpadas incandescentes, foi alimentada a 110 V através de um sistema de cabos aterrados. Em poucos anos sistemas similares estavam em operação em muitas grandes cidades em torno do mundo. Com o desenvolvimento do motor por Frank Sprague

em 1884, eles foram adicionados nos sistemas existentes. Este foi o começo do desenvolvimento de uma das maiores indústrias do mundo [8].

Apesar de um espalhamento inicial do uso de sistemas cc, eles foram quase completamente anulados pelos sistemas ac. Em 1886, as limitações de sistemas dc ficaram mais evidentes. Eles podiam entregar potência somente em distâncias próximas da geração, para manter as potências das perdas ( $RI^2$ ) e as quedas de voltagem em níveis aceitáveis. Os níveis de voltagem tinham que ser altos para transmissão em longas distâncias. Estas voltagens não foram aceitáveis para geração e consumo de potência, assim, uma forma conveniente de transformação tornou-se uma necessidade.

O desenvolvimento do transformador e da transmissão ac por L. Gaulard e J. D. Gibbs em Paris, na França, impulsionaram os sistemas de potência elétrica ac. George Westinghouse comprou os direitos deste desenvolvimento nos Estados Unidos. Em 1886, William Stanley, um associado de Westinghouse, desenvolveu e testou um transformador comercial prático e um sistema de distribuição ac para 150 lâmpadas em Massachusetts. Em 1889, a primeira linha de transmissão da América do Norte foi colocada em operação em Oregon. Este sistema foi uma linha de transmissão monofásica em 4000 V transmitindo em uma distância de 21 km.

Com o desenvolvimento dos sistemas polifásicos por Nikola Tesla, o sistema ac tornou-se mais atrativo. Em 1888, Tesla registrou várias patentes em motores ac, geradores, transformadores, e sistemas de transmissão. Westinghouse comprou as patentes das recentes invenções, e ele formou a base dos atuais sistemas ca.

Na década de 1890, havia consideráveis controvérsias sobre a padronização em dc ou ac da indústria elétrica. Houve calorosas discussões entre Edison, que defendia o sistema dc, e Westinghouse, que era a favor do sistema ac. No decorrer do século, o sistema ac prevaleceu sobre o sistema dc pelas seguintes razões:

- Níveis de voltagem podem ser facilmente transformados em sistemas ac, logo provendo flexibilidade para o uso de diferentes voltagens para geração, transmissão, e distribuição.
- Geração ca é muito mais simples que geração cc.
- Motores ca são muito mais simples e baratos que motores cc.

O aumento da necessidade de transmitir grandes quantidades de potência para longas distâncias criou um incentivo para um progressivo uso de maiores níveis de voltagem. Com o desenvolvimento das válvulas a arco de mercúrio no começo da década de 1950, tornou-se economicamente viável a utilização de sistemas de transmissão em alta voltagem de (HVDC). A transmissão HVDC é atrativa para transmissão de grandes blocos de potência para longas distâncias (500 km para linhas de transmissão aéreas e 50 km para cabos dos sistemas de transmissão aterrados ou submersos). A primeira aplicação comercial moderna de transmissão HDVC ocorreu em 1954 quando a Suécia e a ilha de Gotland foram interconectadas por um cabo submarino de 96 km. Com o advento das válvulas de tiristores, a transmissão HDVC tornou-se cada vez mais atrativo, sendo que a sua primeira aplicação ocorreu em 1972 no sistema de potência entre Quebec e New Brunswick. Com o custo e o tamanho dos equipamentos de conversão diminuindo e a confiabilidade aumentando, tem ocorrido um aumento no uso da transmissão HVDC [8].

### **3.2. História do Sistema Elétrico Brasileiro**

O marco inicial aconteceu em 1879, quando foi inaugurada iluminação elétrica na estação central da ferrovia Dom Pedro II (Central do Brasil), no Rio de Janeiro, cuja fonte de energia era um dínamo. Em 1881, instala-se a primeira iluminação pública ainda alimentada por dínamos. Já em 1883 o Brasil inaugurava a sua primeira central geradora termelétrica com 52KW de capacidade, movida a lenha, que alimentava 39 lâmpadas na cidade de Campos, RJ, inaugurando a prestação do serviço público de iluminação na América do Sul. A preferência pelo modelo hidrelétrico também é antiga: a primeira hidrelétrica brasileira também foi construída em 1883, em Diamantina, MG [9].

Ao longo dos anos 40, seguindo a tendência de outros setores estratégicos, o Estado amplia seu papel e passa a atuar diretamente na produção. O primeiro investimento nesse sentido foi a criação da Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (CHESF) em 1945.

Décadas mais tarde o governo promoveria importantes mudanças na legislação tarifária brasileira. Uma lei de 1971 (5.655/71) estabeleceu a garantia de 10% a 12% de retorno sobre o capital investido, a ser computada na tarifa. A medida visava a dar sustentação financeira ao setor e serviu também para financiar sua expansão. Havia ainda a facilidade

de obtenção de recursos junto à Eletrobrás e a entrada de empréstimos externos. Foi um período em que o setor desenvolveu sólidas bases financeiras.

A década de 90 foi um período de mudanças profundas. O primeiro passo foi dado em 1993 com a extinção da equalização tarifária e a criação dos contratos de suprimento entre geradores e distribuidores, começando a se preparar o mercado para a desestatização. Depois vieram as licitações para novos empreendimentos de geração; a criação da figura do produtor independente de energia e a determinação do livre acesso aos sistemas de transmissão e distribuição juntamente com a liberdade para os grandes consumidores escolherem onde adquirir seus suprimentos de energia.

Em 1996, o Ministério das Minas e Energia implantou o projeto de reestruturação do setor elétrico brasileiro. Uma das principais conseqüências foi a desverticalização da cadeia produtiva de geração, transmissão, distribuição e comercialização de energia elétrica. A geração e a comercialização foram progressivamente desreguladas a fim de se incentivar a competição. A transmissão e distribuição continuaram sendo tratadas como serviços públicos regulados.

Diante dessa nova configuração, o Governo Federal cria, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), cuja função é regular as atividades do setor. Outras mudanças foram implantadas com o objetivo de organizar o mercado e a estrutura da matriz energética brasileira, com destaque para a criação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos em 1997 e do Mercado Atacadista de Energia (MAE) e o Operador Nacional do Sistema (ONS), em 1998.

Com um modelo de geração essencialmente hidrelétrico, o Brasil se viu em situação de emergência ao atravessar um período de chuvas escassas que baixou consideravelmente os reservatórios das usinas. Em maio de 2001 o governo foi obrigado a adotar medidas emergenciais para evitar um colapso na oferta de energia. O período do racionamento atrasou o crescimento do setor.

Entre 2003 e 2004 o Governo Federal deu mais alguns importantes passos no sentido de tornar menos vulnerável o setor elétrico nacional. Foi criada a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) para planejar o setor elétrico a longo prazo, o Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico (CMSE), responsável por avaliar permanentemente a segurança do suprimento de energia elétrica do país, e a Câmara de Comercialização de Energia Elétrica

(CCEE), no lugar do antigo Mercado Atacadista de Energia (MAE), para organizar as atividades de comercialização de energia no sistema interligado.

A Figura 3.1 exibe as principais linhas de transmissão que fazem à interligação do sistema elétrico brasileiro atual.

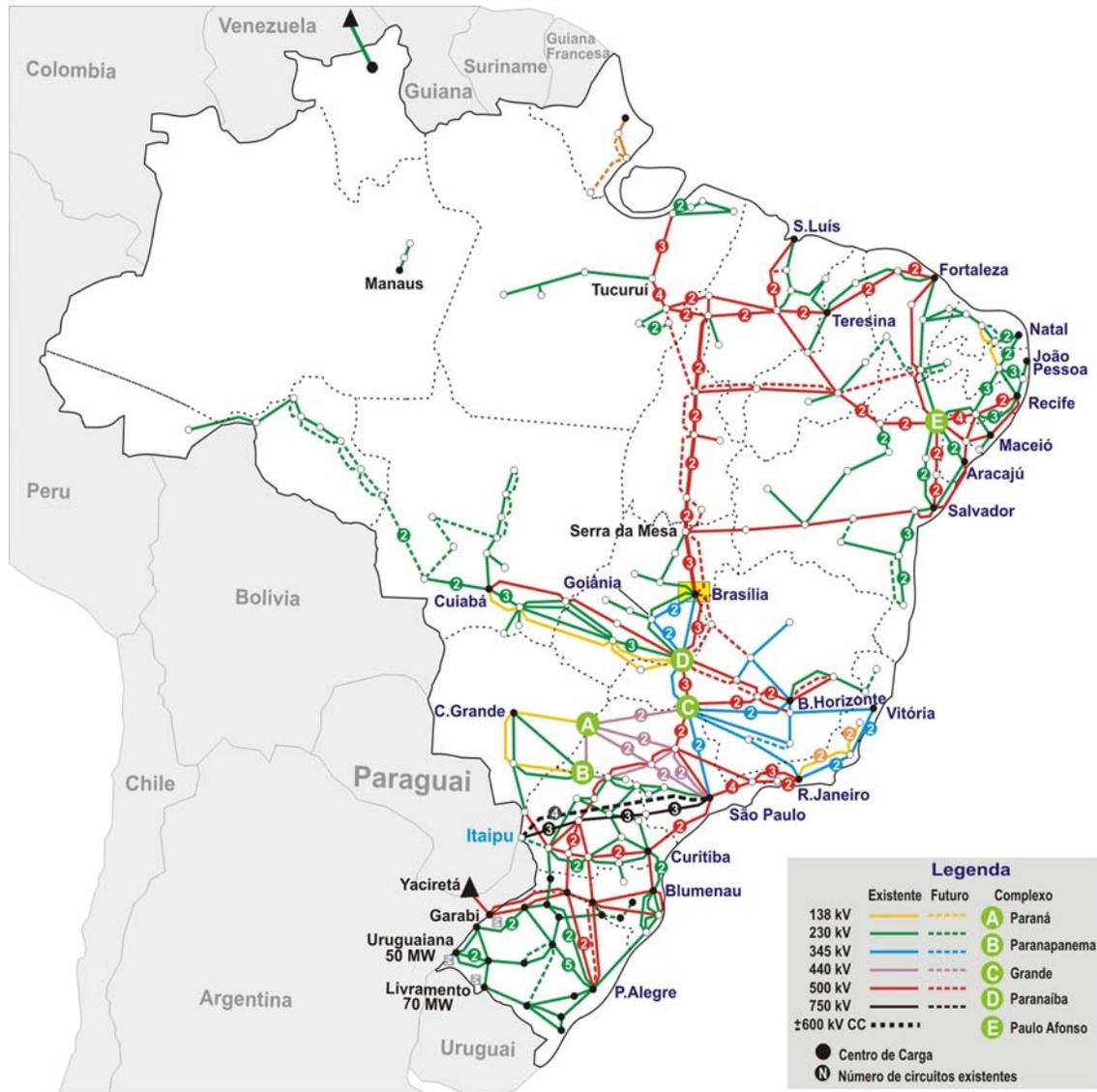


Figura 3.1 - Principais linhas de transmissão do sistema elétrico brasileiro

Vários benefícios são alcançados com a interligação do sistema elétrico. Mas, na década de 1950 quando ocorreram às primeiras interligações de um sistema elétrico, novos problemas surgiram. Os principais foram os problemas dinâmicos como as oscilações eletromecânicas de baixa frequência.

### 3.3. A influência do Controle de Excitação

Os estudos em estabilidade começaram no início do século passado, se concentrando nos dispositivos de controle de excitação, de velocidade e na evolução das características construtivas dos geradores, como nas reatâncias das bobinas. A evolução tecnológica dos controladores proporcionou que os sistemas começassem a operar com pequenas margens de estabilidade.

O limite de estabilidade de regime permanente (estática) dos geradores é definido então como sendo a máxima potência possível de ser entregue ao sistema sem perda de sincronismo, com a carga do sistema sendo aumentada de forma gradual, e as correntes de campo sendo ajustadas somente após cada incremento de carga. Assim sendo, a perda de sincronismo sob a condição de corrente de campo constante. Estas instabilidades (violações dos limites de estabilidade estática) caracterizam-se por serem do tipo aperiódica, ou seja, por uma aceleração contínua dos rotores dos geradores [7].

O regulador de tensão e/ou reativos além de propiciar um melhor controle de reativos e de tensão, permitia também uma extensão dos limites de estabilidade estática dos geradores síncronos, sendo os principais benefícios:

- Aumentou a capacidade de operação dos geradores com altos fatores de potência, bem como na região de sub-excitação. Esta característica mostrou-se de suma importância, tendo em vista a utilização crescente a partir de 1950, de capacitores estáticos no sistema de transmissão. Estes, em conjunto com as longas linhas de transmissão em alta tensão, podem acarretar problemas consideráveis em condições de carga leve, quando então pode ser necessária a operação sub-excitada dos geradores.
- Permitiu uma redução na relação de curto-circuito dos geradores (reatâncias maiores), o que tornava possível um projeto mais econômico dos mesmos (diminuição do tamanho físico dos geradores, maior capacidade de volt-ampères para uma máquina de mesmo tamanho).
- Permitiu a operação dos geradores em sistemas com reatância mais elevadas.

No entanto, um artigo clássico escrito por HEFFRON e PHILLIPS em 1952 [10], que ao realizarem estudos com o objetivo de mostrar os benefícios provenientes da utilização de um regulador de tensão, constataram que conforme as condições de operação se tornavam mais severas (carga pesada), a ação deste regulador acarretava em um desempenho predominantemente oscilatório do gerador, levando-o até mesmo à instabilidade sob a forma de oscilações de amplitudes crescentes.

Embora eles tenham se referido ao ponto de operação além do qual estas oscilações ocorriam, como sendo limite de estabilidade de regime permanente na presença de um regulador de ação contínua, posteriormente este limite foi mais apropriadamente denominado como limite de estabilidade dinâmica. Este limite veio a ser reconhecido como limite prático de estabilidade visto que em geral, ele representa a capacidade máxima de transferência de potência do gerador operando com regulador automático de tensão [10].

### **3.4. Torque Sincronizante e Torque de Amortecimento**

O entendimento da natureza das oscilações eletromecânicas, inerentes ao sistema elétrico de potência, é bastante útil para o entendimento da estabilidade do sistema elétrico. Um trabalho publicado por DEMELLO e CONCORDIA em 1969 mostrou que para uma dada frequência de oscilação do rotor do gerador, ocorre uma variação do torque elétrico de mesma frequência e proporcional à amplitude desta oscilação [11].

As análises foram realizadas através de um modelo linearizado de uma máquina síncrona de pólos salientes conectada a um barramento infinito. Esse modelo foi o mesmo desenvolvido por HEFFRON e PHILLIPS em 1952, e não levaram em consideração os efeitos das dinâmicas de outras máquinas. Nesse trabalho, os autores definem o problema de oscilações eletromecânicas de baixa frequência e também fornecem a base teórica para a introdução de sinais estabilizantes suplementares nos sistema de excitação dos geradores, tendo como objetivo principal fornecer amortecimento adequado às oscilações do rotor [11].

A variação do torque elétrico pode ser decomposta em duas componentes ortogonais, denominadas torques de amortecimento e torque sincronizante, a Equação 3.1 mostra a decomposição do torque elétrico.

$$\Delta T_E = T_S \Delta \delta + T_D \Delta \omega \quad (3.1)$$

onde:

- $T_S \Delta \delta$  varia em fase no tempo com o ângulo do rotor e corresponde ao torque sincronizante.
- $T_D \Delta \omega$  varia em fase com a velocidade do rotor e corresponde a componente do torque de amortecimento.

Existe um equilíbrio entre esses torques no conjunto turbina-rotor de cada gerador, sob condições de regime permanente, de modo que todos os geradores operam em sincronismo. Se o sistema é perturbado, ocorre um desequilíbrio de torques, resultando em uma aceleração ou desaceleração dos rotores das máquinas. Uma instabilidade pode ocorrer por falta de torque sincronizante ou por falta de torque de amortecimento. No primeiro caso, a instabilidade é caracterizada por um crescimento contínuo do ângulo do rotor (instabilidade aperiódica), e no segundo por oscilações com amplitudes crescentes no tempo (instabilidade oscilatória) [12].

### 3.5. Sinais Estabilizadores

Oscilações eletromecânicas de baixa frequência foram observadas, tão logo se iniciaram as primeiras interligações de sistemas no Canadá e EUA, em 1956 e 1964, respectivamente. O amortecimento negativo destas oscilações (que resultaram primariamente de variações aleatórias de carga) ficou evidente. O atraso da resposta dos reguladores eram as principais fontes de amortecimento negativo destas oscilações. O amortecimento das oscilações foi obtido através da introdução de sinais suplementares nos sistemas de controle da excitação dos geradores [13] [7].

O estudo dos problemas relacionados com oscilações de baixa frequência em sistemas de energia elétrica exige atenção especial tanto para o controle do sistema como para a análise de segurança da operação. Tais oscilações estão associadas principalmente com desequilíbrios de torque eletromecânico nos geradores síncronos, resultando em trocas oscilatórias de potência através das interligações.

A ocorrência de oscilações eletromecânicas de baixa frequência, evidentes como oscilações dos fluxos de potência sincronizantes nas linhas de transmissão, é uma consequência direta das interações dinâmicas entre os geradores síncronos quando o sistema é sujeito a perturbações. Flutuações normais de carga podem levar a seu aparecimento. Essas oscilações podem ser uma consequência das interações dinâmicas entre grupos de geradores (um grupo oscila contra outro), ou entre um gerador (ou grupo de geradores) e o resto do sistema. O primeiro caso estabelece as oscilações de modo entre áreas, e o segundo caso, as oscilações de modo local. A faixa de frequência é entre 0,1 a 0,8 Hz para oscilações de modo entre áreas, e entre 1,0 a 2,0 Hz para oscilações de modo local. Esses modos caracterizam-se por possuir baixo amortecimento natural, o qual pode ser muito reduzido ou negativo, devido à ação dos reguladores automáticos de tensão dos geradores [16].

Estas oscilações podem levar a grandes problemas de estabilidade, podendo levar um sistema interligado ao colapso parcial e até mesmo ao colapso total. Quando ocorrem colapsos parciais, alguns sistemas podem ficar isolados, também conhecido como ilhamentos, de maneira que a estabilidade dependerá das suas próprias reservas girantes. Caso o sistema em ilhamento possuir excesso de reserva girante, seus controles como os de velocidade das turbinas, terão que atuar para controlar a vazão de água e conseqüentemente a frequência.

Os ilhamentos ocorrem quando parte da rede elétrica torna-se eletricamente isolada do sistema interligado, mas ainda continua a ser energizada por geradores distribuídos conectados no subsistema isolado. A perda do suprimento da rede acontece devido a desligamentos de trechos de linha, ramos ou subestações provocados pela atuação dos dispositivos de proteção em resposta a faltas no sistema elétrico, bem como em razão de desligamentos indevidos ou acidentais provocados por algum procedimento operativo [14].

### **3.6. FACTS**

Devido às políticas de desregulamentação, empresas do setor elétrico por todo mundo estão operando em mercados cada vez mais competitivos. Ao mesmo tempo, pressões econômicas e ambientais impõem severas restrições à construção de novas linhas de

transmissão, de forma que o aumento da capacidade de transferência de potência dos sistemas é, usualmente, conseguido pelo reforço das linhas já existentes. O desenvolvimento de novas tecnologias, tal como os FACTS (Flexible AC Transmission System), tem ajudado as empresas do setor elétrico a lidarem com os problemas acima mencionados. Além de estenderem os limites de transmissão da rede, controladores FACTS podem exercer controle contínuo sobre diversas grandezas elétricas, tais como impedâncias e tensões, e, assim, também contribuem de forma expressiva para a melhoria da estabilidade dos sistemas [15].

A ação de controle mais comumente utilizada para contornar o problema das oscilações eletromecânicas de baixa frequência é a aplicação de Estabilizadores de Sistemas de Potência (PSS – Power Systems Stabilizers). A função desse dispositivo é estender os limites de estabilidade do sistema através da modulação da excitação dos geradores. Já a utilização de dispositivos FACTS possibilita o aumento na capacidade de transmissão, bem como o controle de fluxo de potência em uma rota de transmissão designada [16].

# Capítulo 4

## Modelos da Máquina Síncrona

Usualmente, os estudos de estabilidade de máquina síncrona são feitos de duas formas. A primeira chamada de “elementar”, na qual o torque elétrico é calculado em regime e, em seguida, utilizado na equação diferencial do movimento do rotor. A outra forma, chamada de “completa”, na qual é estabelecido um modelo de ordem elevada (maior ou igual à sétima ordem) o qual leva em consideração todas as variáveis de estado envolvidas [17].

De fato, o torque elétrico é calculado numa situação chamada “transitória”, levando à substituição de certos parâmetros, tais como, f.e.m e reatância, de regime por parâmetros chamados de transitórios. A diferença entre estas categorias de parâmetros é a resistência do rotor, que pode ser suposta infinita em regime e nula na situação transitória.

Para estabelecer uma conexão entre as duas formas de estudo, a partir de um modelo de ordem elevada, são desenvolvidos modelos elementares. A consideração da resistência de rotor, nem nula, nem infinita, permite evidenciar um amortecimento das oscilações mecânicas do rotor. Este efeito é semelhante ao produzido pelos enrolamentos amortecedores, que para velocidades superiores à síncrona ocasionam um torque frenador, e para velocidades inferiores um torque acelerador. Finalmente uma escolha conveniente de resistência de rotor pode maximizar o amortecimento das oscilações mecânicas.

Para o desenvolvimento dos modelos elementares, algumas considerações para simplificar a complexidade dos modelos são feitas, como modelar a máquina sem os enrolamentos amortecedores, e transformações matemáticas, como a transformação de Park, são utilizadas para reduzir a ordem do modelo matemático.

## 4.1. Transformação de Park

As dificuldades na solução dos circuitos podem ser sensivelmente reduzidas através de uma mudança de variáveis (transformação linear). Como para o observador no rotor as distribuições de corrente são estacionárias no tempo e no espaço, a idéia é decompor as distribuições de correntes do estator em duas distribuições senoidais também estacionárias no tempo e no espaço.

Uma forma mais simples e elegante de representar o circuito do estator é com a utilização da transformação dq0. Através da transformação os parâmetros da estator são escritos em função das componentes de eixo direto (eixo  $d$ ) e em quadratura do rotor (eixo  $q$ ), em vez dos eixos  $abc$  do estator, como pode ser observado na Figura 4.1.

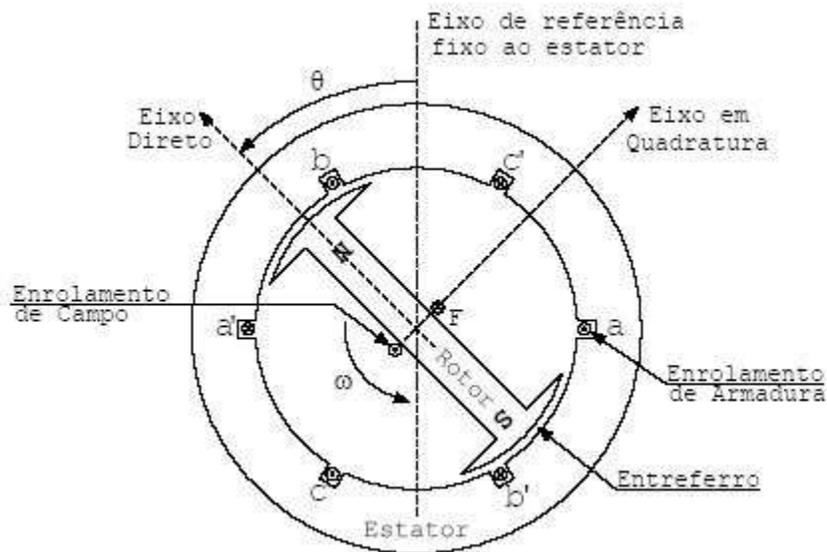


Figura 4.1 – Representação dos eixos d,q na máquina síncrona

A transformação de componentes de três eixos defasados de  $120^\circ$ , em dois eixos defasados de  $90^\circ$  é conhecido com transformação de Park. Para o caso da transformação dos eixos  $abc$  do estator da máquina síncrona em dois eixos  $dq0$ , é realizada utilizando a Equação 4.1.

$$[f_{dq0}] = [T_{dq0}(\theta)] [f_{abc}] \quad (4.1)$$

Onde:

$$T_{dq0}(\theta) = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin \theta & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

Assim, para uma transformação das correntes do estator do eixo  $abc$  para o eixo  $dq0$ , utilizando as Equações 4.1 e 4.2 temos:

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin \theta & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

Resolvendo a matriz acima a corrente  $i_0$  é calculada na Equação 4.4:

$$i_0 = \frac{1}{3}(i_a + i_b + i_c) \quad (4.4)$$

Como em condições de regime, com as fases equilibradas, a soma das correntes é igual a zero, a componente  $i_0$  não influencia na transformação dos eixos. A transformação inversa também é verdadeira, assim basta inverter a matriz  $T_{dq0}(\theta)$ , para termos:

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 1 \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

## 4.2. O Modelo de 5ª Ordem

Admitindo apenas um grau de liberdade mecânica para a máquina (rotação de um rotor rígido em torno do eixo fixo) e levando em conta os seis enrolamentos independentes (três fases no estator, enrolamento de campo e dois enrolamentos amortecedores no rotor), é possível construir um modelo razoavelmente completo da máquina de oitava ordem.

Aplicando a Transformada de Park às três variáveis de estado de correntes de estator, é possível desacoplar inteiramente uma variável de todas as demais da máquina (a corrente de seqüência zero). Desta forma, o modelo da máquina passa ser de sétima ordem.

O dois enrolamentos amortecedores não são essenciais para o funcionamento da máquina síncrona. Seu efeito, que aparece quando a velocidade da máquina é diferente da velocidade síncrona, é análogo ao mecanismo que origina torque em máquinas de indução e foi estudado sob este ponto de vista. Sem estes enrolamentos o modelo da máquina passa a ser de quinta ordem.

Os enrolamentos amortecedores serão omitidos pelo fato de não serem essenciais, e sua presença tenderá a ocultar o amortecimento introduzido pelo enrolamento de campo. As Equações de 4.6 a 4.7 representam o modelo de 5ª ordem descrito para a máquina síncrona [18].

$$\frac{d\delta}{dt} = y \quad (4.6)$$

$$\frac{dy}{dt} = \frac{p}{J}(T_m + T_e) \quad (4.7)$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{\omega R}{X'}(i_o - i) - \frac{\omega^2 M}{X' X_d}(V \text{sen}(\delta) - R_e i_d + X_q i_q + \frac{X_q i_q y}{\omega}) \quad (4.8)$$

$$\frac{di_d}{dt} = \frac{\omega}{X'_d}(V \text{sen}(\delta) - R_e i_d + X_q i_q + \frac{X_q i_q y}{\omega}) - \frac{\omega^2 MR}{X'_d X}(i_o - i) \quad (4.9)$$

$$\frac{di_q}{dt} = \frac{\omega}{X'_q}(V \cos(\delta) - R_e i_q - X_d i_d - \frac{X_d i_d y}{\omega} - \omega Mi - Myi) \quad (4.10)$$

$$T_e = \frac{p}{\omega}(\omega M i i_q + (X_d - X_q) i_d i_q) \quad (4.11)$$

### 4.3. O Modelo de 3ª Ordem

Com o desenvolvimento do modelo de 5ª Ordem, ocorre uma redução substancial da complexidade matemática das equações da máquina síncrona. Partindo do princípio que um modelo deve ser o mais simples possível, mas não ser simplista, ou seja, deve continuar representando as características do sistema físico para o qual foi modelado, equações matemáticas ainda mais simples foram propostas em outros trabalhos [18], [19], para representar a máquina síncrona sem perder informações significativas a respeito deste sistema. O Modelo de 5ª Ordem foi reduzido para um de 3ª Ordem e para redução da ordem do modelo, algumas considerações foram feitas.

Desprezando as resistências dos enrolamentos do estator e a máquina ligada no barramento infinito, é possível integrar as correntes de rotor. Utilizando o procedimento de centragem, termos oscilantes rápidos de valor médio nulo podem em primeira aproximação ser desprezados [17], [18] e [19]. Assim a partir das Equações 4.6 a 4.11 são obtidas as equações do modelo de 3ª Ordem. As equações do modelo de 3ª Ordem da máquina síncrona são exibidas nas Equações 4.12 a 4.15.

$$\frac{d\delta}{dt} = y \quad (4.12)$$

$$\frac{dy}{dt} = \frac{P}{J}(T_m + T_e) \quad (4.13)$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{\omega R}{X'}(i_o - i) + \frac{\omega MVy}{X' X_d} \text{sen}(\delta) \quad (4.14)$$

$$T_e = \frac{P}{\omega} \left( -\frac{\omega MVi}{X_d} \text{sen}(\delta) + \frac{V^2}{2} \left( \frac{1}{X_d} - \frac{1}{X_q} \right) \text{sen}(2\delta) \right) \quad (4.15)$$

Para verificar se o modelo de 3ª Ordem é mais simples, foi comparado com o modelo de 5ª Ordem.

#### 4.4. Comparação Entre os Modelos de 3ª e 5ª Ordem

Como consequência das aproximações feitas ao se estabelecer um modelo para a máquina síncrona, como para qualquer sistema físico, existirá diferenças entre o comportamento previsto pelo modelo e o observado da máquina. Diferenças tanto maiores quanto mais simples o modelo. Modelos simples, mas que mantenham as características essenciais da máquina, tem um atrativo por permitirem eventualmente mostrar os efeitos que seriam dissolvidos na complexidade de modelos melhores [17] [18] [19].

A comparação realizada entre o modelo de 3ª e 5ª ordem, tem como objetivo analisar se as simulações apresentam variações muito discrepantes. As variáveis comparadas são: ângulo  $\delta$ , corrente de campo, velocidade relativa do rotor e torque eletromagnético. A Figura 4.2 exibe as curvas de comparação do ângulo  $\delta$  entre o modelo de 3ª e 5ª Ordem.

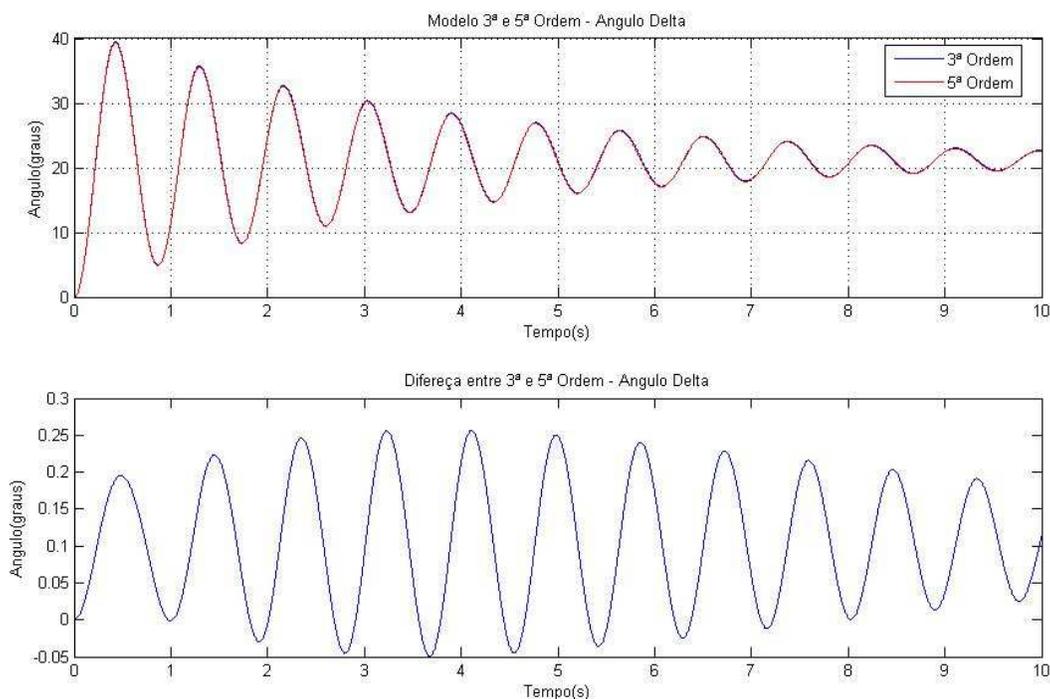


Figura 4.2 – Comparação do ângulo delta entre os modelos de 3ª e 5ª Ordem

No primeiro gráfico da Figura 4.2 são exibidas as curvas do ângulo  $\delta$  para os dois modelos, e no segundo gráfico é exibida a diferença entre a curva do modelo de 3ª e 5ª ordem. Neste segundo gráfico é observado que a diferença entre as curvas tem valor máximo de 0,26°, o que representa uma diferença de 1%, ou seja, uma diferença muito pequena.

A Figura 4.3 apresenta a mesma característica da Figura 4.2, nela é exibida uma comparação da corrente de campo entre o modelo de 3ª e 5ª Ordem. Na Figura 4.4 é exibido uma comparação entre a velocidade relativa do rotor e na Figura 4.5 do torque eletromagnético. Em todas as comparações a diferença entre os modelos foi muito pequena.

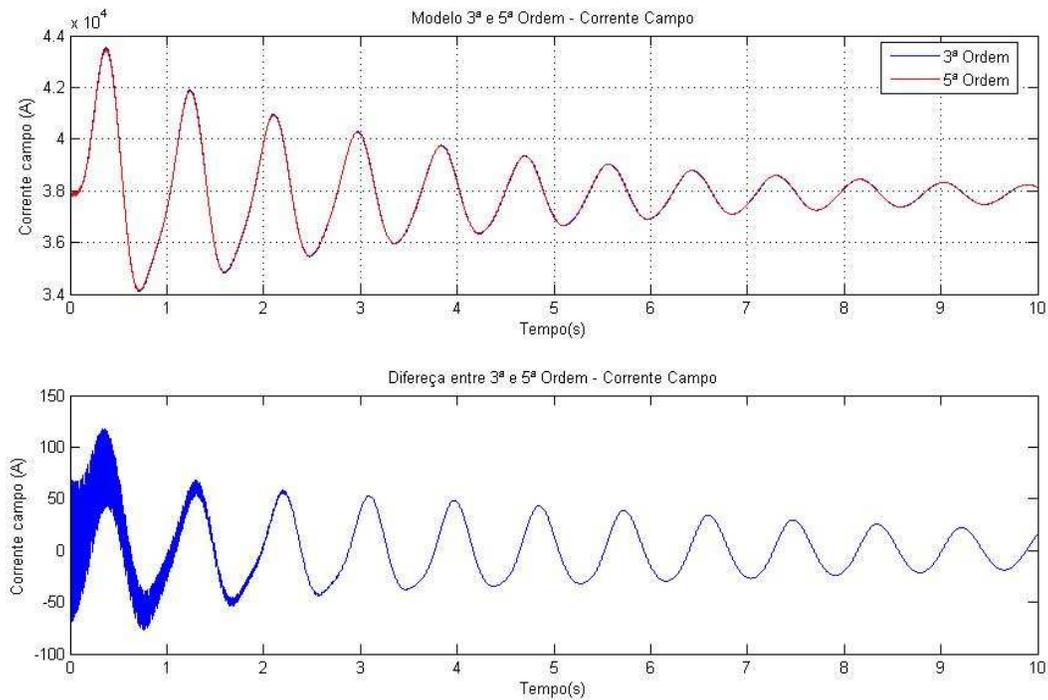


Figura 4.3 – Comparação da corrente de campo entre os modelos de 3ª e 5ª Ordem

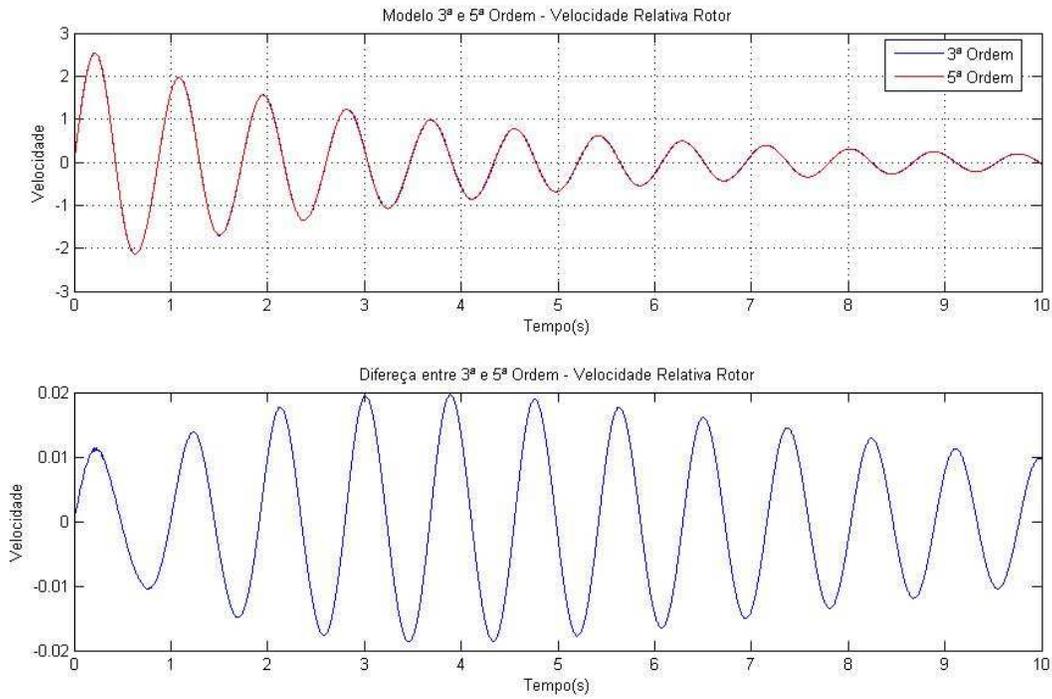


Figura 4.4 – Comparação da velocidade relativa do rotor entre os modelos de 3ª e 5ª Ordem

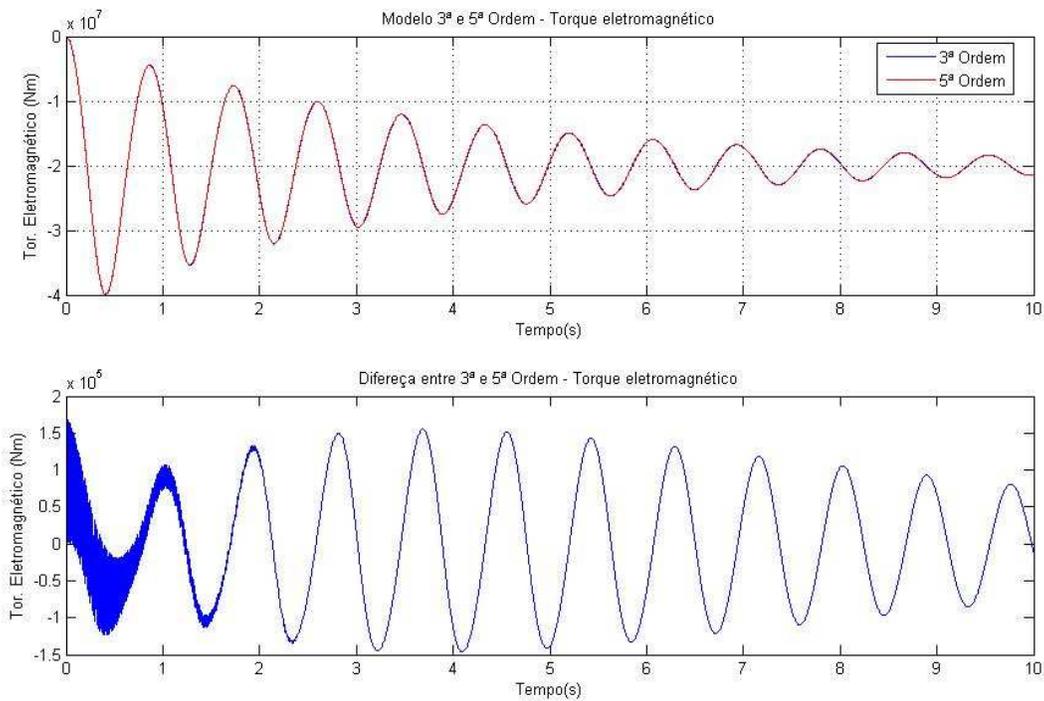


Figura 4.5 – Comparação do torque eletromagnético entre os modelos de 3ª e 5ª Ordem

## 4.5. Fronteiras de Estabilidade

As equações do modelo de 3ª Ordem foram modeladas com o ganho de reativo ( $e$ ) e o sinal estabilizador ( $k$ ) e estão exibidas nas Equações 4.16 a 4.19 [18]. Com estas equações os critérios de estabilidade de Routh-Hurwitz foram aplicados e as equações chamadas de fronteiras de estabilidade obtidas. Essas fronteiras foram obtidas para a máquina de pólos lisos.

$$\frac{d\delta}{dt} = y \quad (4.16)$$

$$\frac{dy}{dt} = \frac{p}{J}(T_m + T_e) \quad (4.17)$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{\omega R}{X'}(i_o(1 + e(\cos \delta_0)) - i(1 + e(\cos \delta))) + \frac{\omega MVy}{X'X_d} \text{sen} \delta + \frac{k}{L} y \quad (4.18)$$

$$T_e = \frac{p}{\omega} \left( -\frac{\omega MVi}{X_d} \text{sen} \delta \right) \quad (4.19)$$

Linearizando as Equações 4.16, 4.17 e 4.18 em torno da posição de equilíbrio e considerando a Equação 4.19, obteve-se a equação característica, exibida na Equação 4.20.

$$\frac{J}{P} L \lambda^3 + \frac{J}{P} R(1 + e \cos \delta) \lambda^2 + \frac{PVM}{X_d} \left( Li \cos \delta + \frac{VM}{X_d} \sin^2 \delta + K \sin \delta \right) \lambda + \frac{PVMR}{X_d} i(e + \cos \delta) = 0 \quad (4.20)$$

onde:

$$K = \frac{kVM}{X_d}$$

A Equação 4.21 corresponde à fronteira de estabilidade aperiódica e a Equação 4.22 é à fronteira de estabilidade oscilatória [18] [19].

$$e + \cos(\delta) = 0 \quad (4.21)$$

$$(-P) < P_N \left( \frac{\sin \delta}{e} + \frac{\sin 2\delta}{2} + \frac{k}{e} (e + \cos \delta + 1) \right) \quad (4.22)$$

As Equações 4.21 e 4.22 correspondem às fronteiras que exibem até onde a máquina síncrona pode operar sem perder o sincronismo. A fronteira de estabilidade aperiódica limita o ângulo de operação da máquina síncrona, enquanto a fronteira oscilatória controla o limite de potência ativa.

Nas equações de estabilidade estão embutidos dois fatores:  $k$  (sinal estabilizador) e  $e$  (ganho de reativo), estes fatores podem influenciar as fronteiras e, conseqüentemente os limites de estabilidade da máquina síncrona. Tanto o ganho de reativo, quanto o sinal estabilizador foram explicados no capítulo 3 e serão foco do estudo nos próximos capítulos.

O objetivo deste capítulo foi rerepresentar o modelo de 3ª Ordem, desenvolvido a partir do modelo de 5ª Ordem, e apresentando no início da década de 90 [18]. Também foi exibido como a partir o modelo de 3ª ordem foram desenvolvidas as fronteiras de estabilidade, aperiódica e oscilatória.

# Capítulo 5

## Aplicativo Desenvolvido

Neste capítulo é apresentado o aplicativo desenvolvido. A partir da teoria sobre máquinas síncronas, sinal estabilizador e ganho de reativo os módulos foram construídos. Numa primeira parte, os módulos foram desenvolvidos separados. Após sua validação e apresentação os módulos foram unidos e um novo programa foi desenvolvido com reutilização de códigos, tornando o aplicativo mais eficiente computacionalmente.

A Figura 5.1 apresenta como os programas são estruturados e qual o fluxo da informação. Foram desenvolvidos cinco módulos, os quais serão detalhados neste capítulo. Alguns módulos como “Sair” e “Configurar Deltao” são utilizados como auxiliares para todos os módulos. As equações diferenciais dos modelos de 3ª e 5ª ordem foram desenvolvidas no Simulink e todos os módulos utilizam estes arquivos para simulação.

A interface gráfica será exibida entre as Figuras 5.2 e 5.8, onde os módulos serão apresentados separadamente ressaltando as características individuais. A tela inicial do programa é exibida na Figura 5.2, onde é possível acessar qualquer um dos cinco módulos.

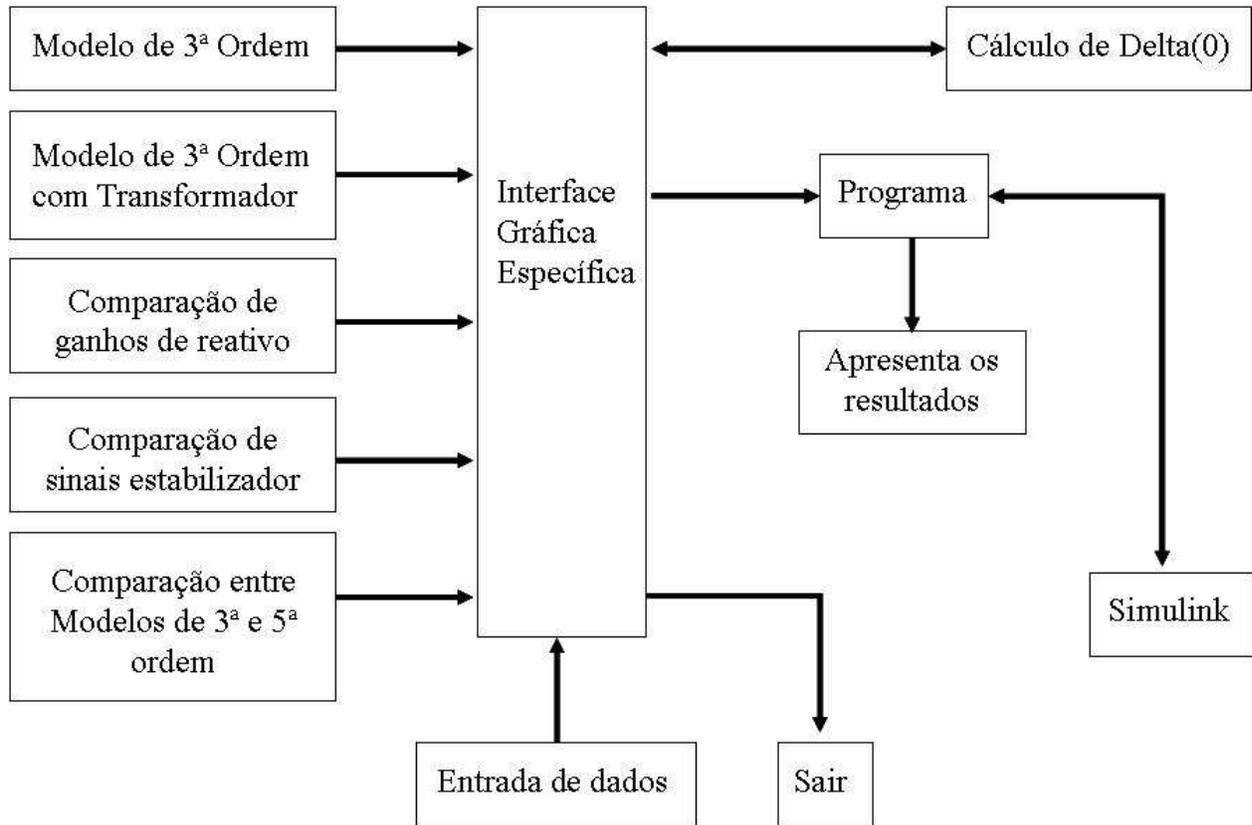


Figura 5.1 – Estrutura do aplicativo desenvolvido

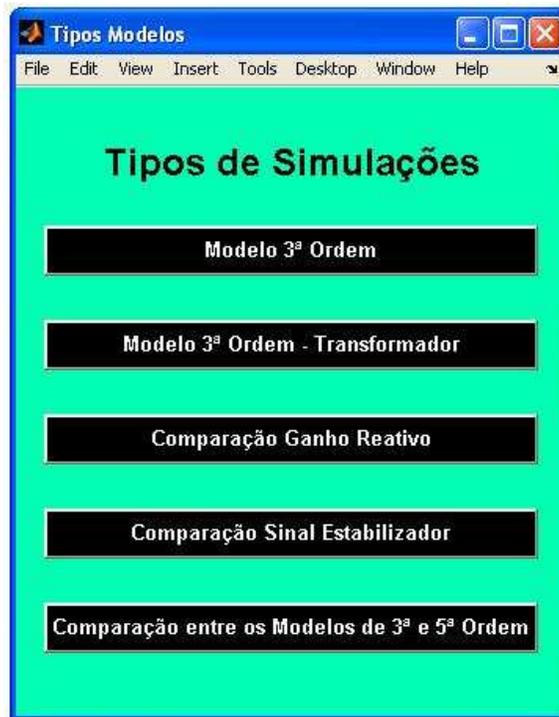


Figura 5.2 – Tela Inicial

## 5.1. Modelo de 3ª Ordem

O primeiro módulo é utilizado para a simulação do modelo de 3ª ordem. As equações deste modelo foram apresentadas no Capítulo 4 e as entradas do programa são:

- $T_{mec}$  – Torque mecânico.
- Tempo de simulação e Incremento.
- $P(0)$  – Potencia ativa inicial e  $Q(0)$  – Potencia reativa inicial.
- $Y(0)$  – Velocidade relativa do rotor inicial.
- $\Delta(0)$  – Ângulo elétrico inicial entre o eixo  $d$  e o eixo síncrono.
- $e$  – Ganho do regulador de reativos.
- $k$  – Sinal estabilizador.
- Fator de multiplicação da resistência do rotor.

Conforme a Equação 5.1, através do torque mecânico é possível calcular a potência ativa,

$$T_m = \frac{\omega P}{P} \quad (5.1)$$

Sendo a potência ativa limitada pela potência aparente da máquina, que representa o máximo de potência que pode ser gerada. A potência aparente é uma soma vetorial da potência ativa e da potência reativa conforme pode ser observado na Equação 5.2.

$$S^2 = P^2 + Q^2 \quad (5.2)$$

Para inicialização dos parâmetros é necessário os valores de  $P(0)$  e  $Q(0)$ , obtidos pelas Equações 5.1 e 5.2, e esses valores podem ser substituídos nas Equações 5.3 e 5.4 para a obtenção da corrente de rotor inicial  $i_o$  e do ângulo inicial  $\delta_o$ .

$$i_o = \frac{X_d}{V_w M} \sqrt{P_o^2 + \left[ Q_o - \frac{V^2}{X_d} \right]^2} \quad (5.3)$$

$$tg \delta_o = \frac{-P_o^2}{- \left[ Q_o - \frac{V^2}{X_d} \right]} \quad (5.4)$$

Em relação ao ângulo  $\Delta(0)$  existem duas estratégias de simulação, a primeira é usar o valor próximo da posição de equilíbrio  $\delta_o$ , utilizando a Equação 5.4, e fazer  $\Delta(0) = \delta_o$ , ou distante da posição de equilíbrio, quando o valor é inicializado com zero, por exemplo. O usuário tem a opção de simular com qualquer valor de  $\Delta(0)$ , e para isso foi criado um módulo para calcular o valor de  $\delta_o$  que será apresentado a seguir.

## 5.2. Modelo de 3ª Ordem

A interface gráfica desenvolvida para a simulação do modelo de 3ª ordem é apresentada na Figura 5.3. Como o objetivo deste capítulo é apresentar a interface gráfica desenvolvida, os resultados gráficos serão exibidos no Capítulo 6.

A opção de multiplicar a resistência de rotor foi disponibilizada pelo fato da máquina, quando modelada em 3ª ordem, perdendo os enrolamentos amortecedores, demora mais tempo para amortecer as oscilações, de maneira que uma resistência maior de campo provoca um efeito similar, trazendo como vantagem, uma diminuição no tempo de simulação para a máquina atingir o regime permanente.



Figura 5.3 – Tela de simulação do modelo de 3ª ordem

### 5.3. Modelo de 3ª Ordem com Transformador

Com o desenvolvimento dos sistemas de energia elétrica, as distâncias entre as usinas produtoras e os centros consumidores causaram problemas. Estes foram reduzidos com a utilização de transformadores, que possibilitam elevar as tensões para reduzir as perdas nas linhas de transmissão. O objetivo de desenvolver um módulo no aplicativo, incluindo o transformador, é entender o comportamento das fronteiras de estabilidade do gerador na presença do transformador, já que como mencionado, o gerador em geral não funciona conectado diretamente ao barramento infinito, mas sim ao transformador. A Figura 5.4 exibe a interface gráfica do módulo desenvolvido para analisar o transformador.

A única variável nova em relação ao módulo de 3ª ordem é a reatância percentual do transformador. Para um transformador de 325 MVA, 20/230 KV a reatância percentual situa-se na faixa de 12 % a 20 %.

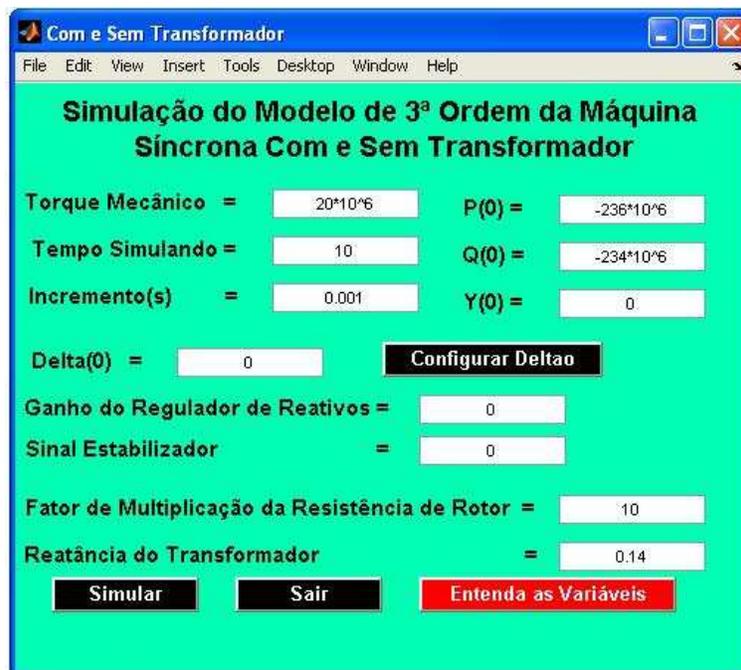


Figura 5.4 – Tela de simulação do modelo de 3ª ordem com e sem transformador

## 5.4. Comparação dos Modelos de 3ª e 5ª Ordem

Os resultados da comparação entre o modelo de 3ª e 5ª ordem já foram apresentadas no capítulo anterior e a interface gráfica desenvolvida é exibida na Figura 5.5. Os resultados comparativos entre os modelos apresentam resultados semelhantes, de maneira que nenhum impacto relevante ocorre pela utilização do modelo de 3ª ordem.

As entradas de dados para as simulações são semelhantes às apresentadas para o modelo de 3ª ordem, sendo que a única inclusão é a possibilidade de multiplicar a resistência do modelo de 5ª ordem, como é feito com o de 3ª ordem. O modelo de 5ª ordem também não possui enrolamentos amortecedores, o que diminui o amortecimento natural. O artifício de aumentar a resistência do rotor provoca aumento no amortecimento, como mencionado anteriormente.

Apesar da possibilidade de entrar com os dados de ganho de reativo ( $e$ ) e sinal estabilizador ( $k$ ), o modelo de 5ª ordem não foi modelado com essas variáveis, então para uma correta comparação os valores de ganho de reativo e sinal estabilizador devem permanecer iguais a zero.



Figura 5.5 – Tela de comparação entre o modelo de 3ª e 5ª ordem

## 5.5. Comparação de Diferentes Ganhos de Reativo

O objetivo do ganho de reativo é possibilitar a máquina operar com ângulos maiores que 90°. Este comportamento pode ser observado na análise da fronteira aperiódica de estabilidade. A interface gráfica desenvolvida para analisar o ganho de reativo é exibida na Figura 5.6. Nela é possível comparar dois valores distintos de ganho de reativo. A saída que será exibida no próximo capítulo mostra o comportamento das variáveis corrente de campo (referida ao estator), velocidade relativa do rotor e ângulo  $\delta$  além das curvas Torque x ângulo  $\delta$  e das fronteiras de estabilidade.



Figura 5.6 – Tela de comparação de duas situações de ganho de reativo

Através da análise da Equação 4.22, exibida no Capítulo 4, que determina a fronteira de estabilidade oscilatória, observa-se que o ganho de reativo deve ser diferente de zero, pois ele está presente no denominador desta equação.

$$(-P) < P_N \left( \frac{\sin \delta}{e} + \frac{\sin 2\delta}{2} + \frac{k}{e} (e + \cos \delta + 1) \right) \quad (4.22)$$

Além disso, através da Equação 4.21, também exibida no Capítulo 4, referente à fronteira de estabilidade aperiódica, conclui-se que o valor do ganho de reativo  $e$ , deve ser menor ou igual a um, pois é limitado por uma função  $\cos$ .

$$e + \cos \delta = 0 \quad (4.21)$$

Para o gerador operar entre  $0^\circ$  e  $180^\circ$ , o valor do ganho de reativo deve situar entre 0 e 1, sendo diferente de zero pela limitação do denominador na fronteira oscilatória.

## 5.6. Comparação de Diferentes Ganhos de Sinal Estabilizador

O objetivo do sinal estabilizador é possibilitar a máquina operar em potências maiores. Este comportamento pode ser observado na análise da fronteiras oscilatória de estabilidade. A interface gráfica desenvolvida para analisar a influência do sinal estabilizador é exibida na Figura 5.7 é a mesma que para o ganho de reativo. Nela é possível comparar dois valores distintos sinal estabilizador.

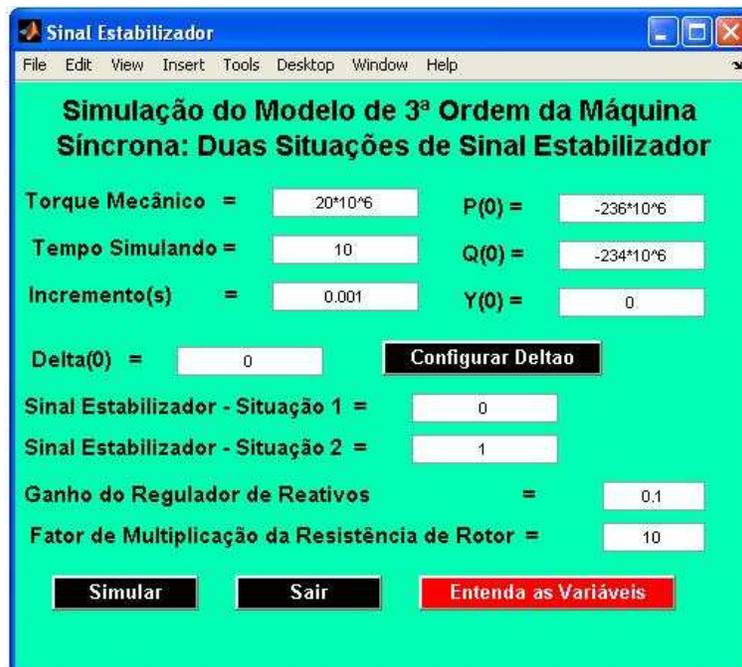


Figura 5.7 – Tela de comparação de duas situações de sinal estabilizador

Diferente do ganho de reativo, o sinal estabilizador não possui limitações de valores. Quando o valor de  $k$  é igual a zero indica que não existe sinal estabilizador

## 5.7. Módulos Auxiliares

Como pode ser observado em todos os cinco módulos, existe um botão chamado ‘Configurar Delta’. Nele é possível calcular o valor de  $\delta_0$  presente nas equações do modelo de 3ª ordem, e através deste valor ter uma referência da posição de equilíbrio. Caso o Delta(0) for preenchido com zero, indica que está distante da posição de equilíbrio. Quando Delta(0) for inicializado com o valor de  $\delta_0$ , calculado na Figura 5.8, a máquina parte perto da posição de equilíbrio.



Figura 5.8 – Tela de configuração do delta(0)

O botão ‘Sair’, fecha todas as janelas do Matlab®, limpa a *workspace* e a janela de comandos. Para auxiliar a utilização do aplicativo foi criada uma tela com conceitos sobre as principais variáveis utilizadas. O botão ‘Entenda as Variáveis’ exibe a tela que está representada na Figura 5.9.



Figura 5.9 – Tela para entendimento das variáveis

# Capítulo 6

## Simulações - Resultados

O objetivo deste capítulo é explorar as funcionalidades do aplicativo descritas no Capítulo 5. Para isso várias simulações são realizadas, abordando algumas das possibilidades de análise através do aplicativo. Nas simulações são exibidas as fronteiras de estabilidade e o ponto de operação da máquina. Quando a máquina opera dentro da região das fronteiras, ela está estável, nas regiões perto das fronteiras, qualquer perturbação pode levar a máquina à instabilidade, e fora da região de fronteiras a máquina perde o sincronismo.

Outras variáveis que são exibidas além das fronteiras de estabilidade são: o ângulo de operação, a velocidade relativa do rotor, o torque eletromagnético, a curva torque versus ângulo, a corrente de campo que está referida ao lado do estator, a potência ativa e a reativa.

### 6.1. Modelo de 3ª Ordem

Como mencionado no capítulo anterior, com o desenvolvimento das equações de 3ª ordem da máquina síncrona foi possível desenvolver as fronteiras de estabilidade oscilatória e aperiódica. O módulo de simulação do modelo de 3ª Ordem foi o primeiro a ser desenvolvido, e sua validação foi feita com as simulações realizadas em [18]. Com o desenvolvimento do aplicativo no Matlab®, várias simulações puderam ser realizadas de maneira rápida, modo mais eficiente e amigável que a utilização do software SIMNON, utilizado nos trabalhos anteriores [17], [18] e [19].

A máquina utilizada em todas as simulações possui as características exibidas na tabela 6.1.

Tabela 6.1 - Características da Máquina Síncrona.

Potência nominal	325MVA	Velocidade mecânica	112,5 rpm
Fator de potência	0,85	Número de pólos	64
Tensão de linha	20 KV	Inércia combinada da turbina e gerador	$35,1 * 10^6 \text{ Kg} \cdot \text{m}^2$
Resistência de estator	0,00234 $\Omega$		
Reatância de dispersão do estator	0,1478 $\Omega$		
Reatância de eixo direto	1,0467 $\Omega$		
Reatância de eixo de quadratura	0,5911 $\Omega$		
Reatância de dispersão do rotor (referida ao estator)	0,2525 $\Omega$		
Resistência de rotor (referida ao estator)	0,0005 $\Omega$		

Na Figura 6.1, que é a tela do modulo do modelo de 3ª ordem, é feita uma simulação para apresentar as saídas do aplicativo. Para isso é utilizada a configuração exibida na Tabela 6.2:



Figura 6.1 – Simulação do modelo de 3ª ordem conforme Tabela 6.2.

Tabela 6.2 - Simulação do Modelo de 3ª Ordem.

Variável	Valor
Torque mecânico	$23,5 \cdot 10^6 \text{ N}\cdot\text{m}$
Ganho de reativo	0,1
Sinal estabilizador	0
Resistência do rotor multiplicada por	10
$P(0)$	$-276 \cdot 10^6 \text{ W}$
$Q(0)$	$-171 \cdot 10^6 \text{ VA}_r$
$Y(0)$	0
$\Delta(0)$	0

As variáveis, velocidade relativa do rotor e torque eletromagnético são exibidas na Figura 6.2. Como era esperado, quando a máquina entra no estado permanente a velocidade relativa do rotor tende para zero. O torque eletromagnético tem sinal contrário ao torque mecânico de  $23,5 \cdot 10^6 \text{ Nm}$  que serviu de entrada da simulação.

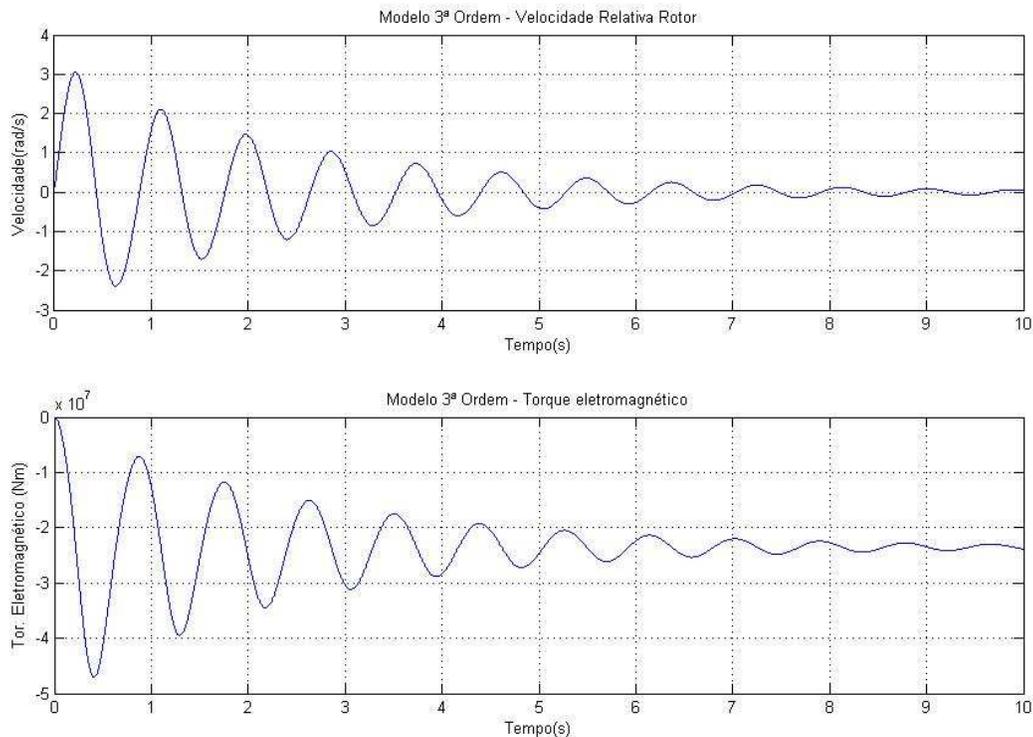


Figura 6.2 – Velocidade relativa do rotor e torque eletromagnético.

Na Figura 6.3 são exibidos os gráficos da potência ativa e do ângulo  $\delta$ , ângulo elétrico entre eixo  $d$  e o eixo síncrono. Para a máquina ligada no barramento infinito, ou seja, com tensão de saída constante, a potência ativa e o ângulo  $\delta$  apresentam comportamento similar que pode ser observado nesta figura.

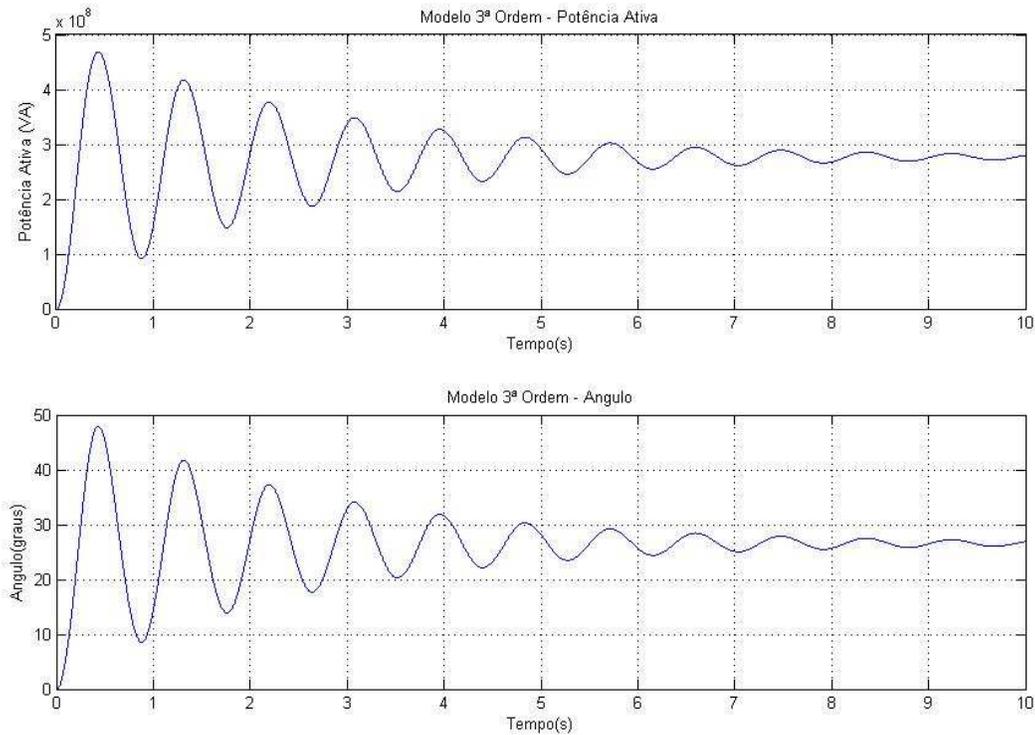


Figura 6.3 – Potência ativa e ângulo  $\delta$ .

Na Figura 6.4 são exibidos os gráficos de potência reativa e corrente de campo. A relação entre a potência ativa e reativa é exibida na Figura 6.5. Nela é possível observar o aumento da potência ativa e a redução da potência reativa.

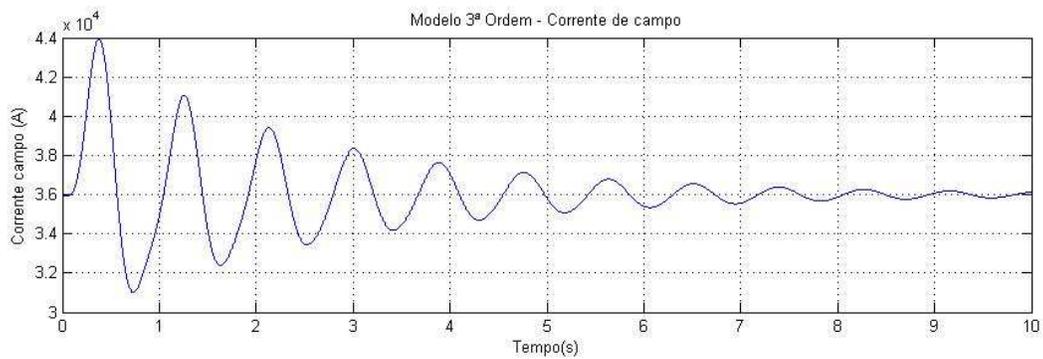
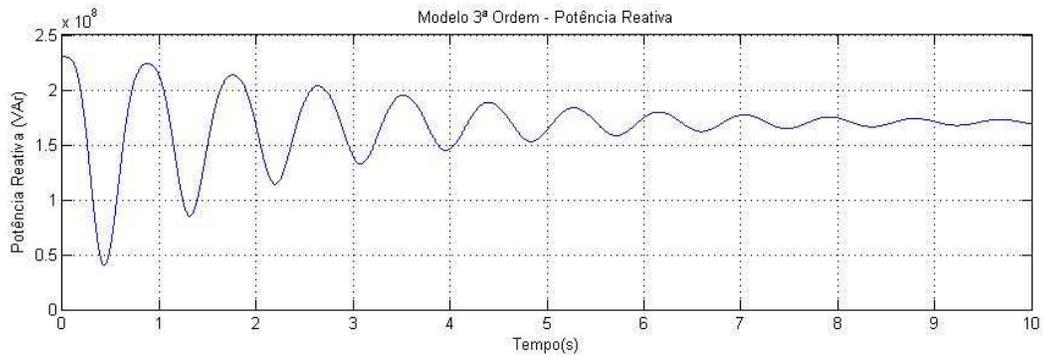


Figura 6.4 – Potência reativa e corrente de campo.

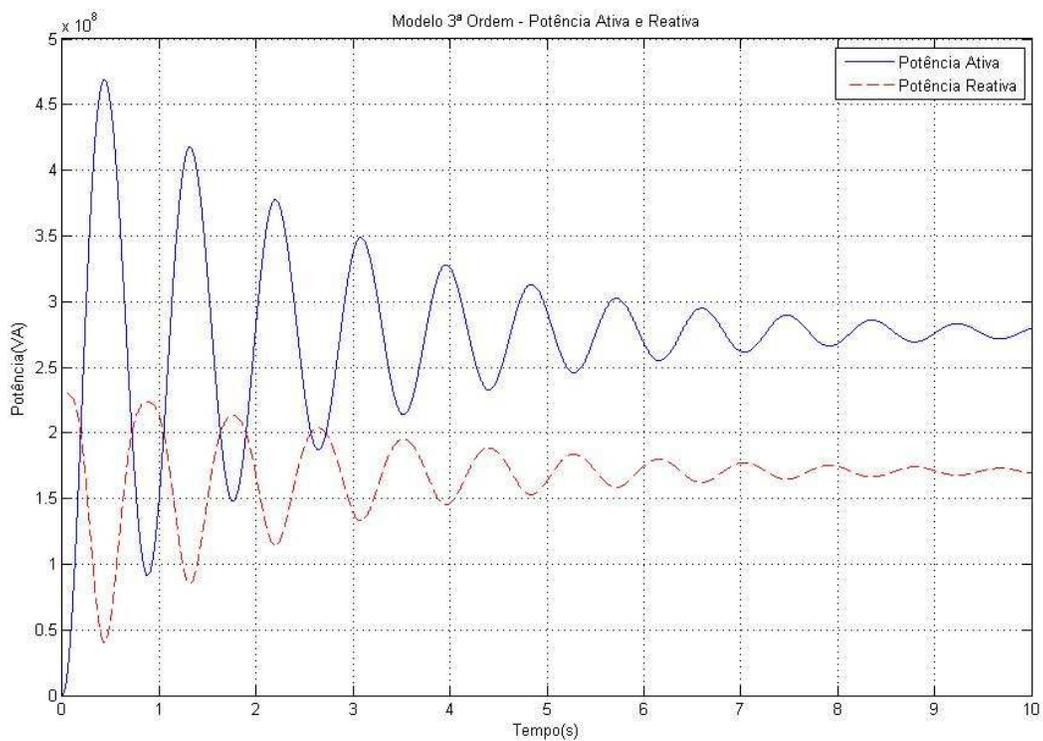


Figura 6.5 – Variação da potência ativa e reativa.

Na Figura 6.6 é exibida a relação entre torque eletromagnético versus ângulo  $\delta$ . O comportamento da curva indica que a máquina opera de maneira estável. O regime permanente ocorreu em torno dos  $27^\circ$ , e a curva tem sentido horário.

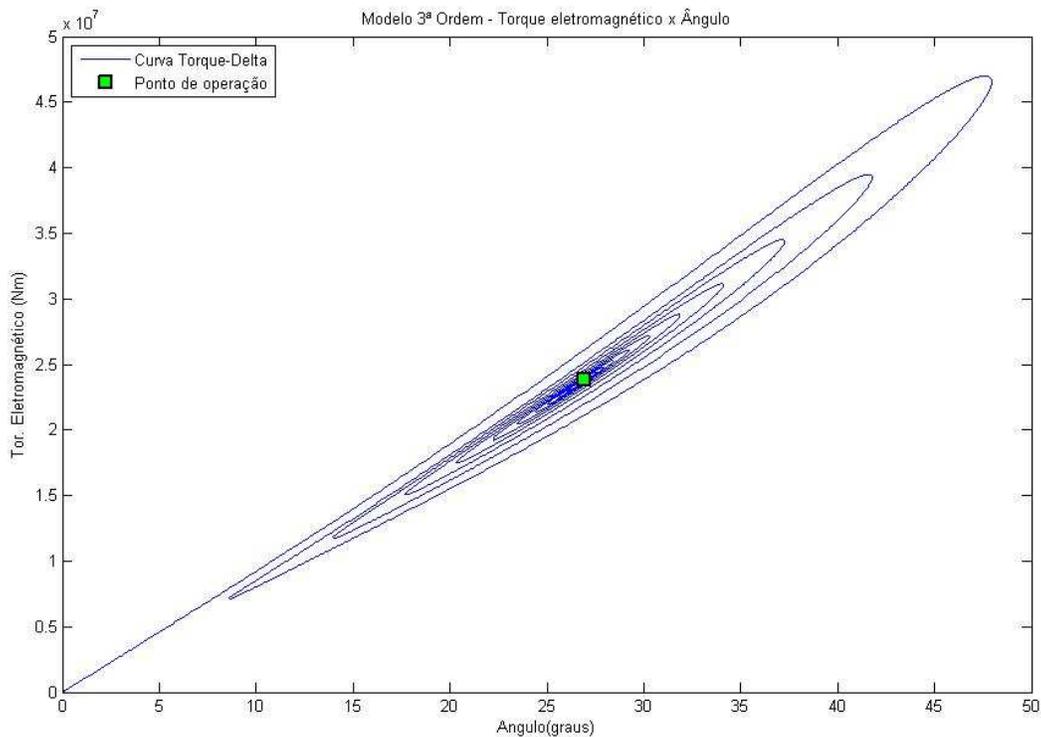


Figura 6.6 – Relação torque eletromagnético versus ângulo.

Introduzindo agora a análise através das fronteiras de estabilidade, é exibido na Figura 6.7 o gráfico das fronteiras e da curva de operação da máquina, além do ponto que a máquina opera. Assim é possível analisar a que distância a máquina opera das fronteiras de estabilidade e se está perto ou não de perder o sincronismo.

Como o parâmetro  $e$  foi igual a 0,1, nesta simulação já houve um aumento do ângulo de operação que passou de  $90^\circ$  para  $96^\circ$ , deslocando a fronteira aperiódica. O ponto de operação da máquina está em torno dos  $27^\circ$ , o que já foi constatado na curva torque versus ângulo.

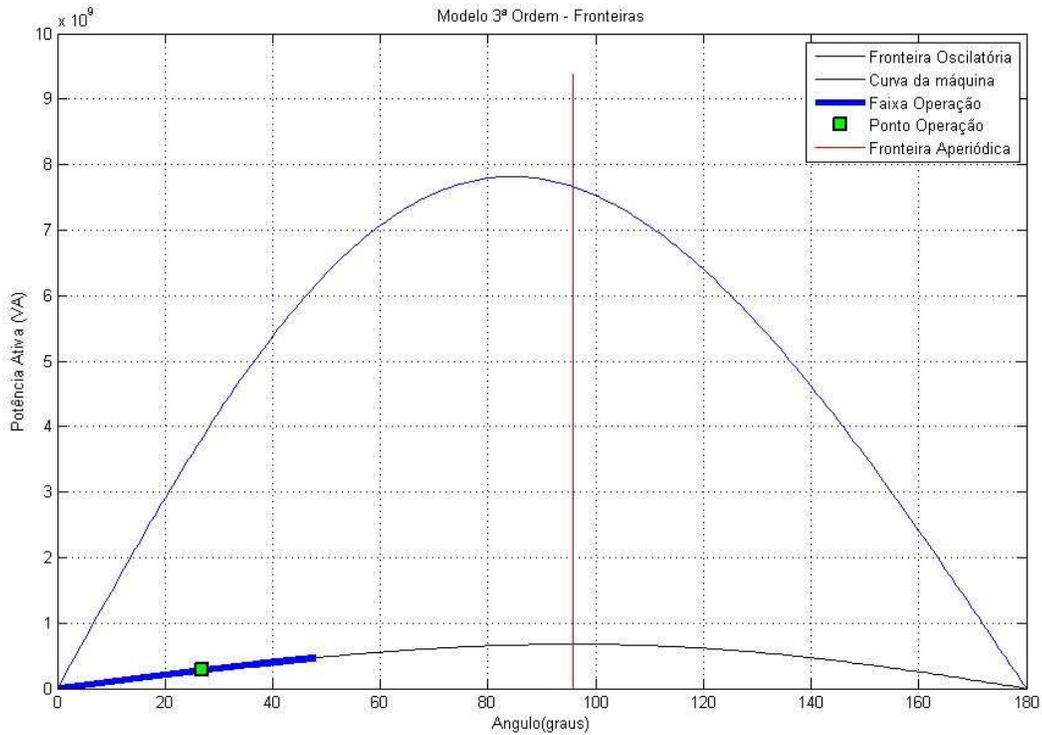


Figura 6.7 – Fronteiras de estabilidade.

## 6.2. Comparação do Ganho de Reativo

Como mencionado no Capítulo 3, o regulador de tensão/reactivos além de propiciar um melhor controle de reativos e de tensão, permite também uma extensão dos limites de estabilidade estática dos geradores síncronos, permitindo a máquina operar com ângulos maiores que  $90^\circ$ . Como a máquina está ligada ao barramento infinito, o efeito do ganho de reativos ocorrerá apenas no controle de reativos. A tabela 6.3 exibe os parâmetros utilizados na simulação, que também podem ser observados na Figura 6.8.

O fato da resistência do rotor estar multiplicada por um fator igual a 10, indica que ocorrerá aumento do amortecimento e conseqüentemente redução do tempo de simulação até o sistema atingir o regime permanente.

Tabela 6.3 – Simulação do Modelo de 3ª Ordem com Variação no Ganho de Reativos.

Variável	Valor
Torque mecânico	$23,5 \cdot 10^6 \text{ N}\cdot\text{m}$
Ganho de reativo - Situação 1	0,2
Ganho de reativo - Situação 2	0,9
Sinal estabilizador	0
Resistência do rotor multiplicada por	10
P(0)	0 W
Q(0)	$-100 \cdot 10^6 \text{ VAr}$
Y(0)	0
Delta(0)	0



Figura 6.8 – Simulação de diferentes ganhos de reativo conforme Tabela 6.3.

A Figura 6.9 exibe a comparação entre os ângulos  $\delta$ . Para a situação onde o valor do ganho de reativo é igual a 0,2 a máquina opera com ângulo ligeiramente maior. Essa diferença diminui quando a máquina é inicializada perto da posição de equilíbrio. Como nesta simulação a potência

ativa foi inicializada com zero, distante dos 276 MVA da posição de equilíbrio, uma pequena diferença é observada no regime permanente.

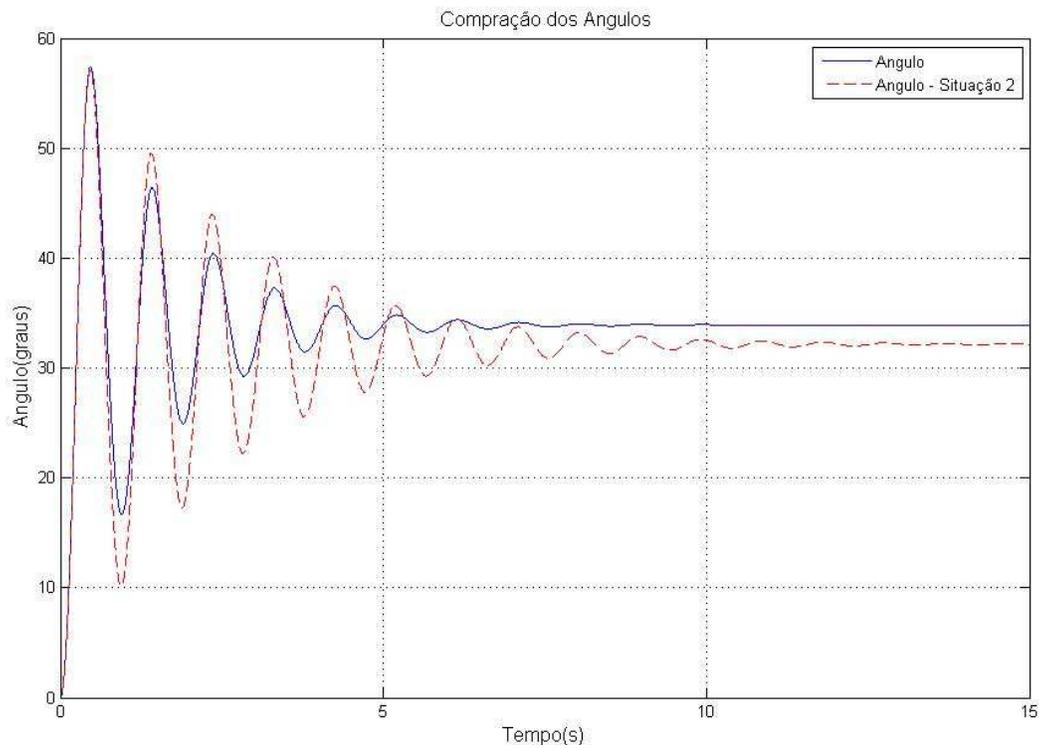


Figura 6.9 – Ângulos  $\delta$  com diferentes ganhos de reativos.

A Figura 6.10 exibe a comparação entre as correntes de campo para a situação de ganho de reativo igual a 0,2 e igual a 0,9. A corrente de campo aumenta com o aumento do ganho de reativos, o que implica em aumento da potência reativa produzida, que pode ser observada na Figura 6.11. Esta figura exibe também a comparação entre as potências ativas nas duas situações. Independente do valor do ganho de reativo, a potência ativa permanece no mesmo valor, em torno de 276 MVA em regime permanente, não sendo influenciada pelos valores do ganho de reativo. Mas um aumento das oscilações com o aumento do ganho de reativo pode ser observado, que ocorre devido a um menor amortecimento das oscilações pelo sistema.

A diminuição do amortecimento natural do sistema devido à introdução de ganho de reativo foi observada, quando na metade do século passado, quando ocorreram as primeiras interligações nos sistemas elétricos.

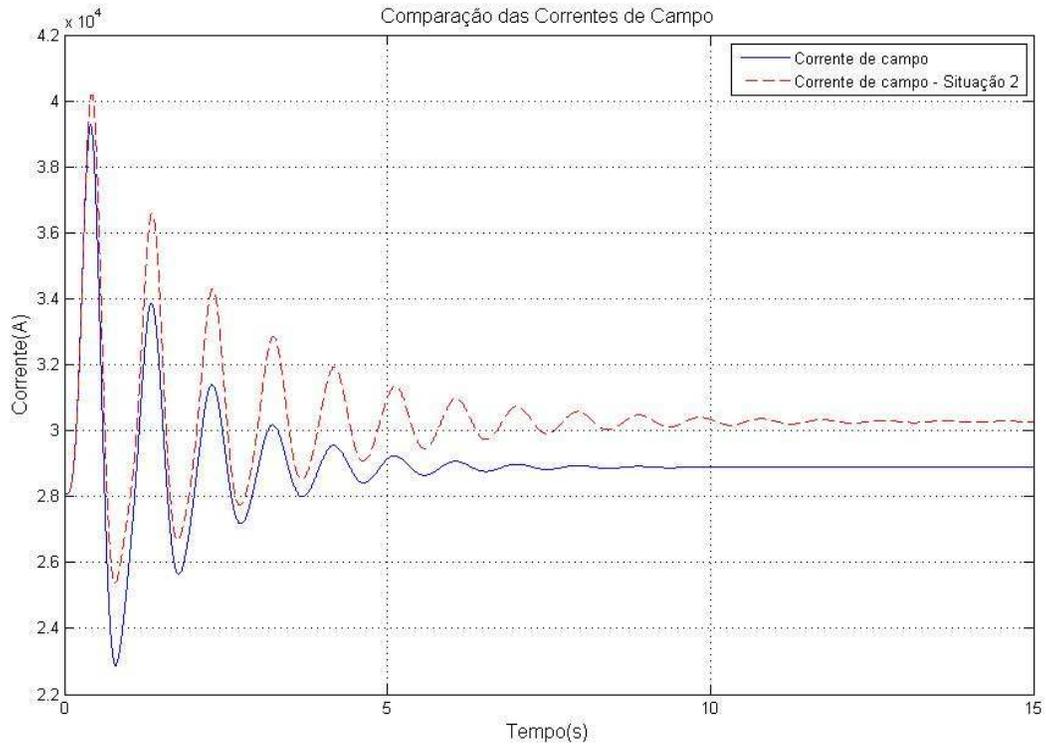


Figura 6.10 – Correntes de campo com diferentes ganhos de reativos.

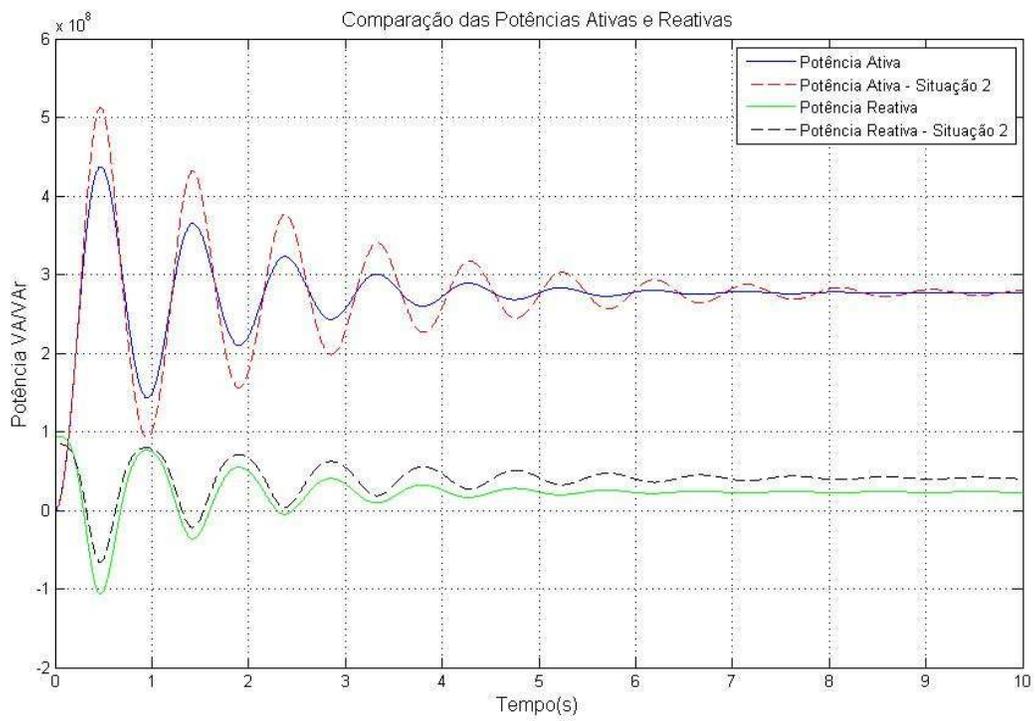


Figura 6.11 – Potências ativas e reativas com diferentes ganhos de reativos.

As curvas de torque versus ângulo  $\delta$  são exibidas na Figura 6.12. Elas apresentam características semelhantes, havendo um pequeno deslocamento do ângulo no regime permanente conforme observado na Figura 6.9.

A Figura 6.13 exhibe as fronteiras de estabilidade oscilatória e aperiódica, além da curva de operação da máquina e do ponto de operação. Em relação a fronteira aperiódica, ocorreu um deslocamento do ângulo de  $102^\circ$  com ganho de reativos igual a 0,2 para  $155^\circ$  com ganho de reativos igual a 0,9, mostrando assim o que o fato que a inserção do ganho de reativos permite a máquina operar com ângulos maiores que  $90^\circ$ . O efeito negativo presente com a inserção do ganho de reativos é a diminuição da margem de potência ativa, que pode ser observado pela redução na área da fronteira oscilatória. O ponto de operação não sofre variação significativa, mas na situação de ganho de reativos maior o ponto está mais próximo da fronteira oscilatória, assim uma perturbação no sistema poderá levá-lo a perda de sincronismo.

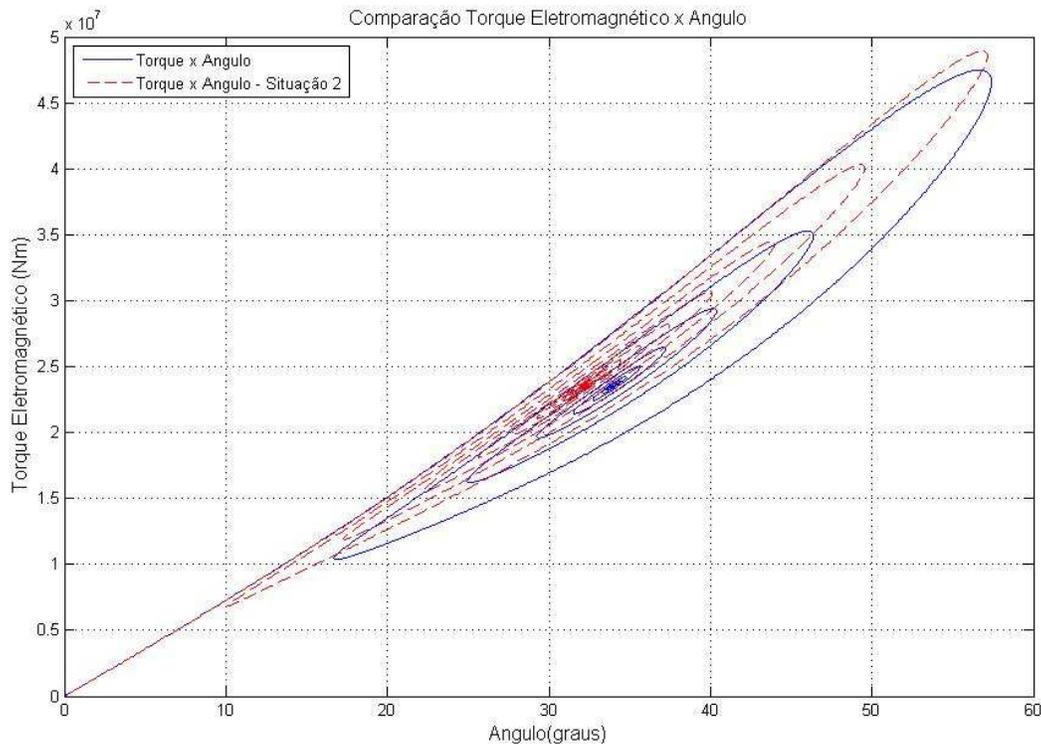


Figura 6.12 – Curva torque versus ângulo  $\delta$  para diferentes ganhos de reativos.

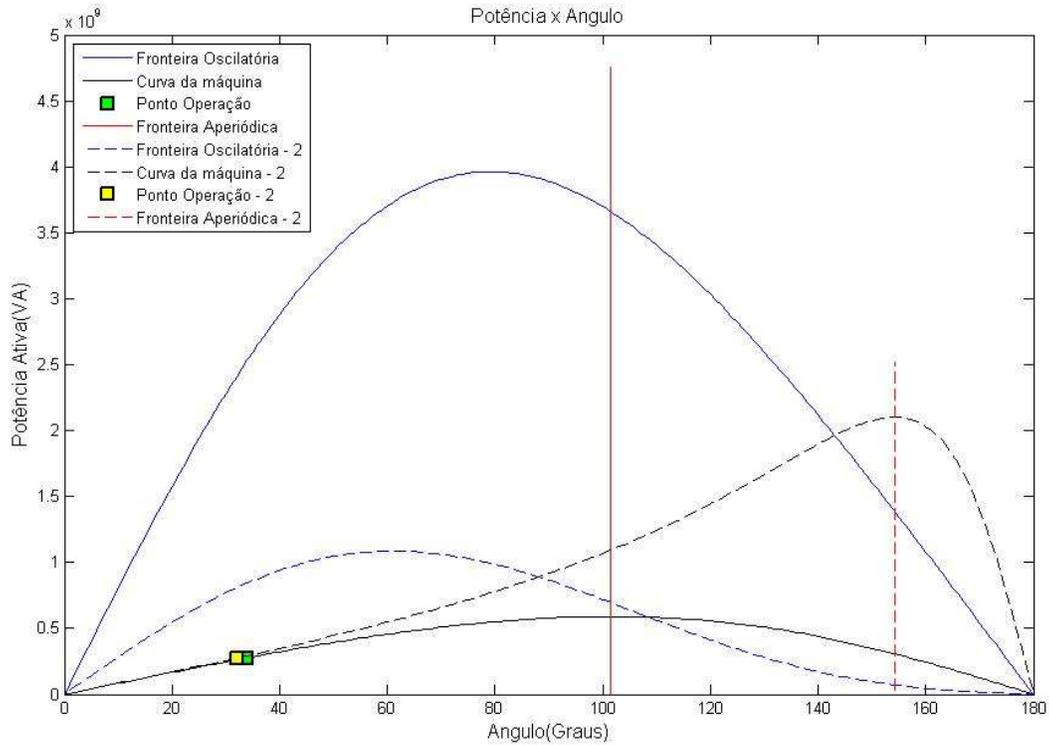


Figura 6.13 – Fronteiras de estabilidade para diferentes ganhos de reativos.

### 6.3. Comparação do Sinal Estabilizador

Como visto, o aumento do ganho de reativos permite a máquina operar em ângulos maiores, mas esse benefício é alcançado com a redução da fronteira oscilatória. Esta característica faz com que a máquina em determinadas situações perca o sincronismo pelo aumento das oscilações perto da fronteira oscilatória. A saída para esse problema foi a inclusão de um sinal conhecido como estabilizador ( $k$ ), que atua como fator proporcional a velocidade relativa do rotor, conforme foi exibido na Equação 4.18.

$$\frac{di}{dt} = \frac{\omega R}{X'} (i_o (1 + e(\cos(\delta_0))) - i(1 + e(\cos(\delta)))) + \frac{\omega M V y}{X' X_d} \text{sen}(\delta) + \frac{k}{L} y \quad (4.18)$$

Como em regime permanente a velocidade relativa do rotor tende a zero, o ganho de sinal estabilizador deixa de atuar no valor da corrente de campo. Os dados para a simulação deste módulo são exibidos na Tabela 6.4, e a interface gráfica da Figura 6.14.

Tabela 6.4 – Simulação do Modelo de 3ª Ordem com Variação no Sinal Estabilizador.

Variável	Valor
Torque mecânico	$20 \cdot 10^6 \text{ N}\cdot\text{m}$
Sinal estabilizador - Situação 1	0
Sinal estabilizador - Situação 2	0,5
Ganho de reativo	0,8
Resistência do rotor multiplicada por	10
P(0)	$-236 \cdot 10^6 \text{ W}$
Q(0)	$-224 \cdot 10^6 \text{ VAr}$
Y(0)	0
Delta(0)	0

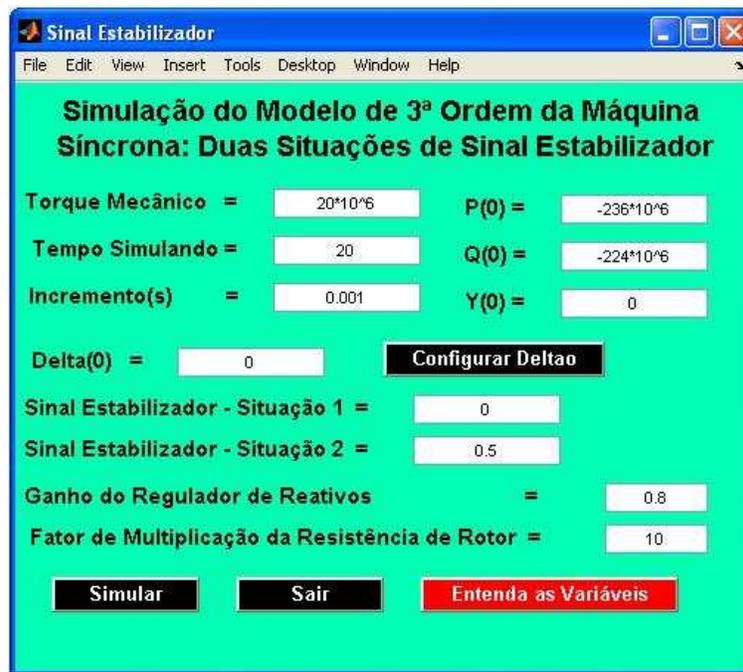


Figura 6.14 – Simulação de diferentes sinais estabilizadores conforme Tabela 6.4.

A inclusão do sinal estabilizador não influencia nenhuma das variáveis analisadas do sistema. Na Figura 6.15 é exibido o gráfico para os ângulos  $\delta$  nas duas situações de sinal estabilizador. Na Figura 6.16 o mesmo comportamento para a corrente de campo. Na Figura 6.17 e 6.18 os gráficos das potências ativa e reativa, respectivamente. A Figura 6.19 exhibe as curvas torque versus ângulo  $\delta$ , as quais estão sobrepostas. E a Figura 6.20 exhibe as fronteiras de estabilidade.

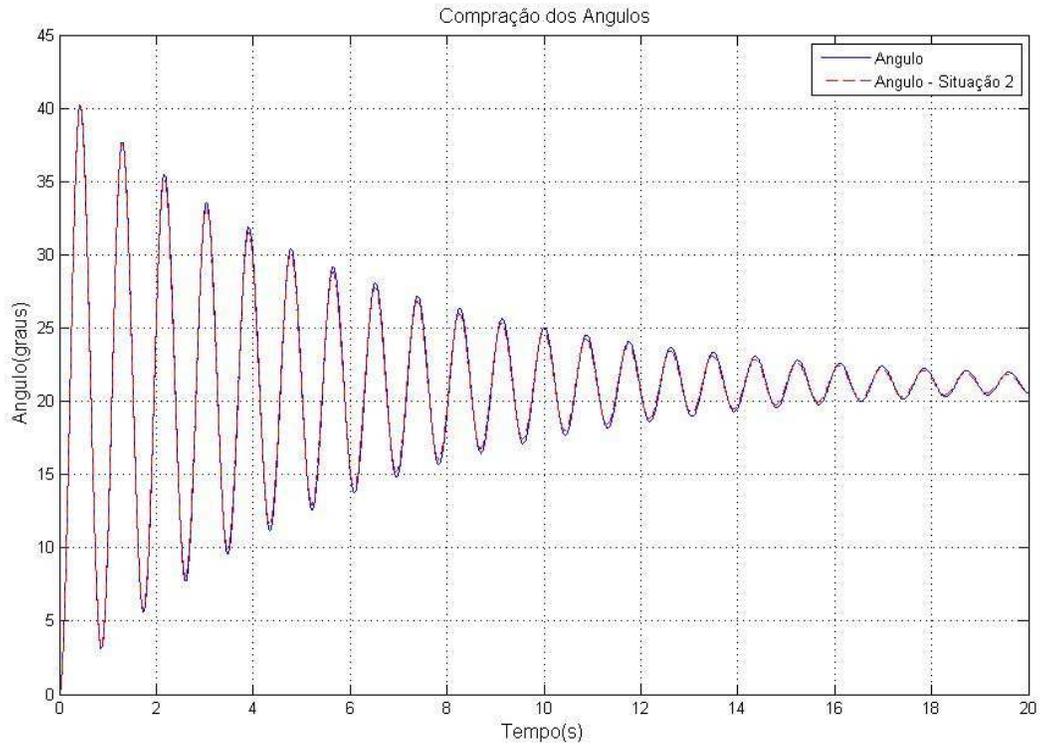


Figura 6.15 – Ângulo  $\delta$  para diferentes sinais estabilizadores.

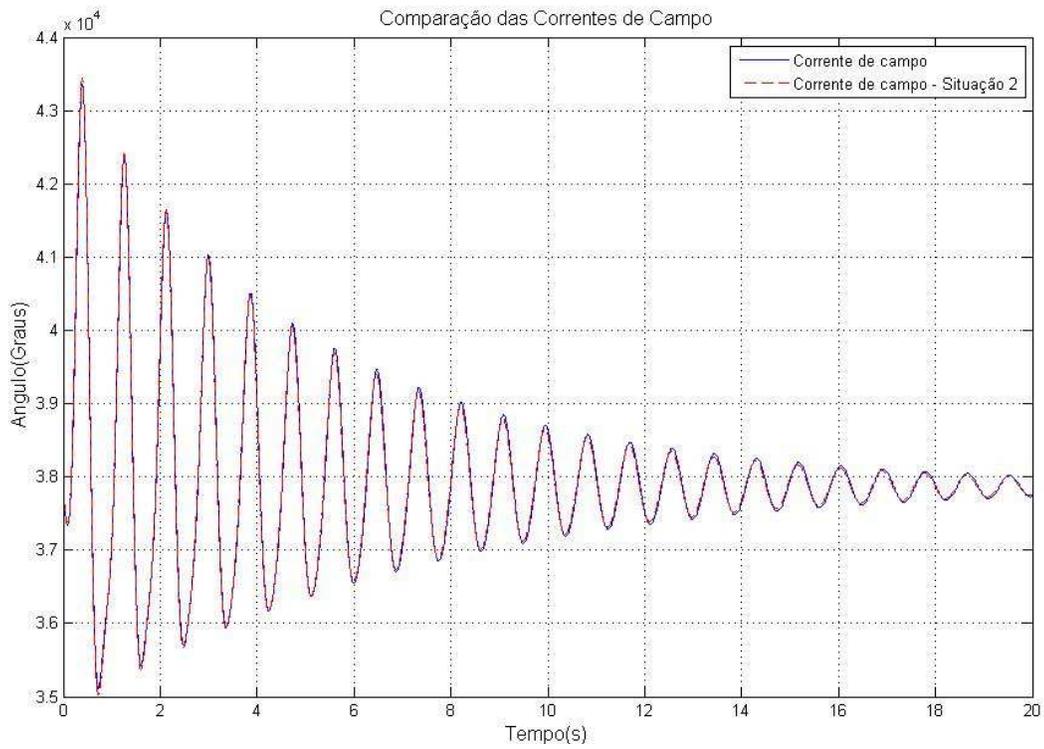


Figura 6.16 – Corrente de campo para diferentes sinais estabilizadores.

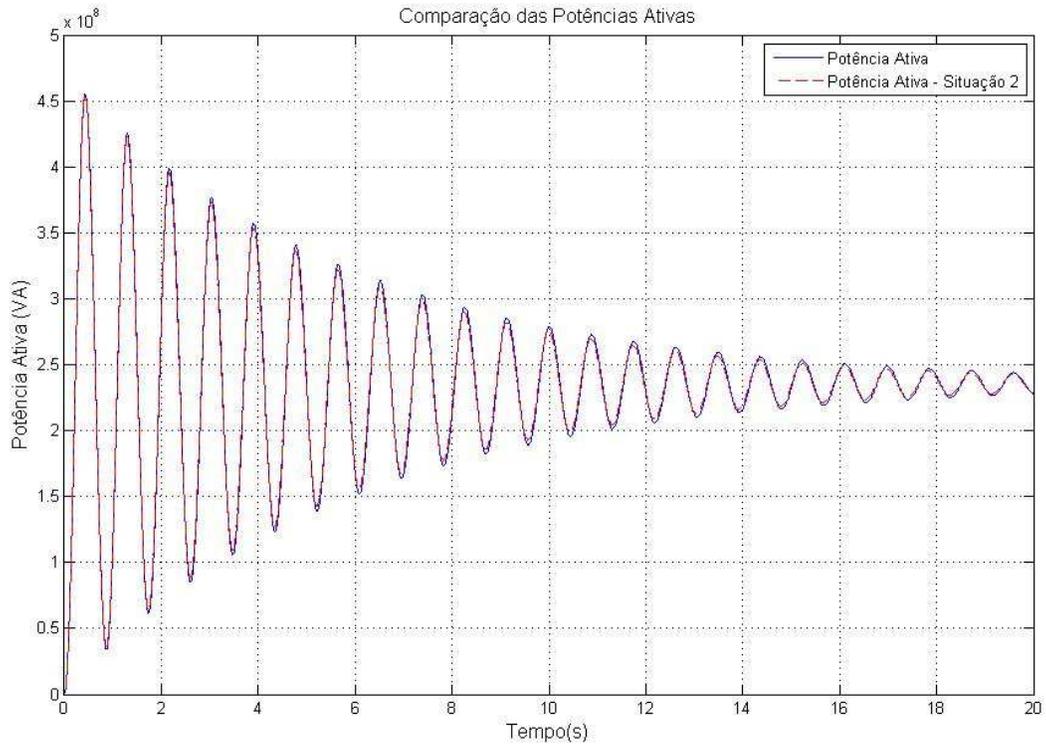


Figura 6.17 – Potência ativa para diferentes sinais estabilizadores.

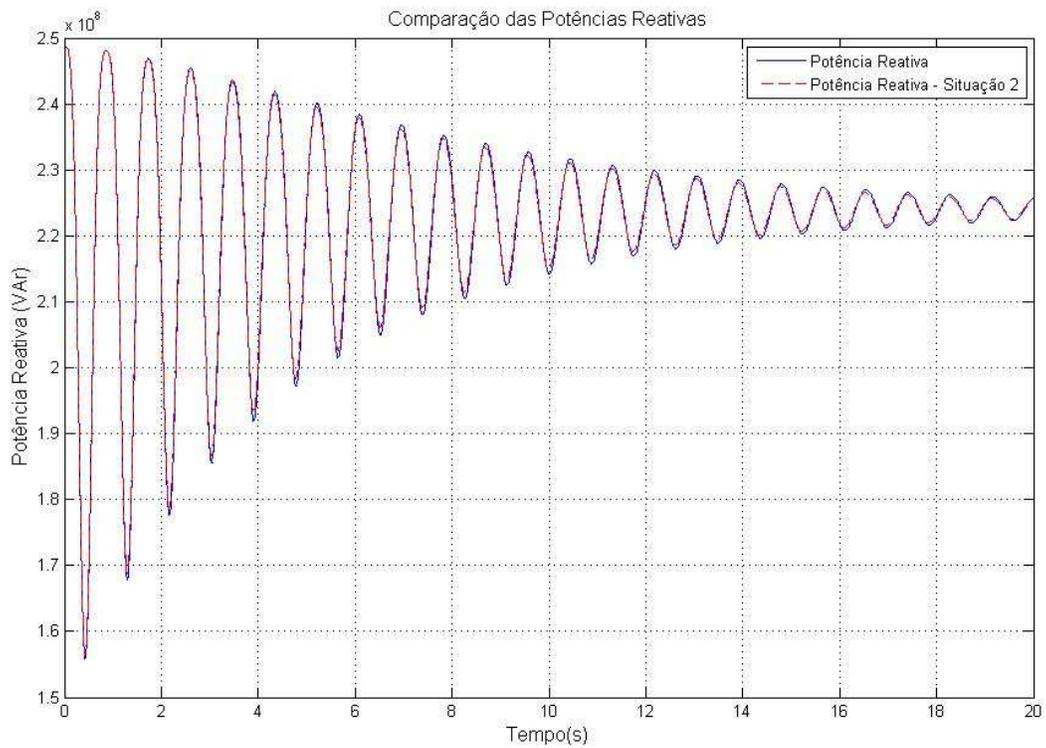


Figura 6.18 – Potência reativa para diferentes sinais estabilizadores.

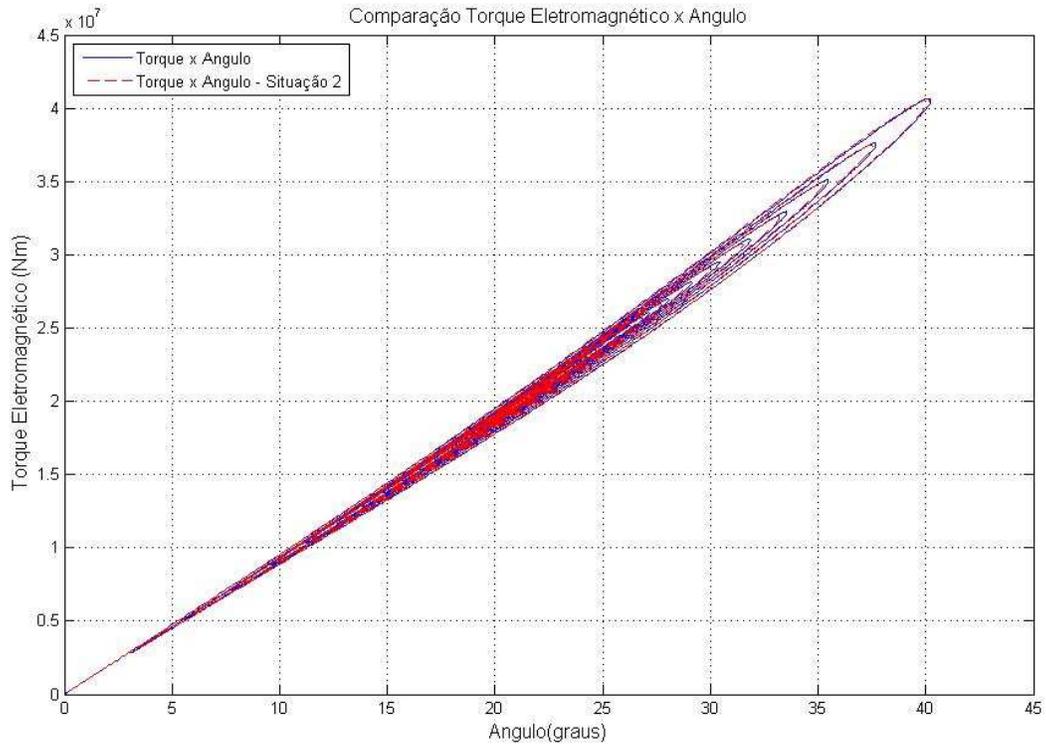


Figura 6.19 – Curva torque versus ângulo  $\delta$  para diferentes sinais estabilizadores.

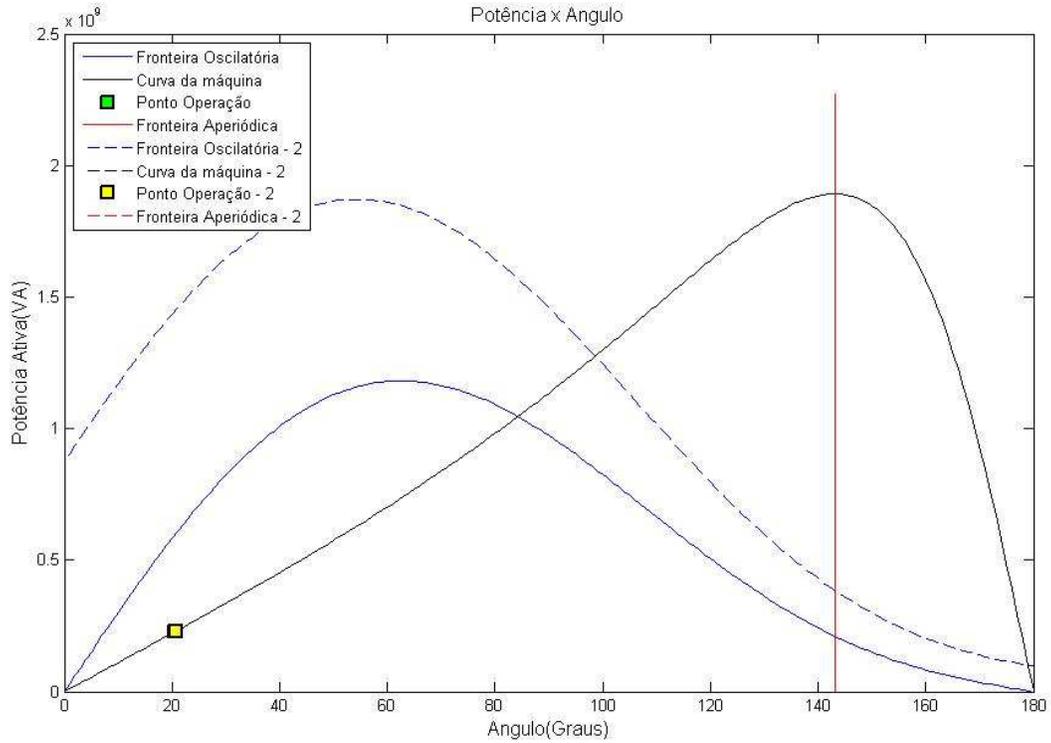


Figura 6.20 – Fronteiras de estabilidade para diferentes sinais estabilizadores.

Nas fronteiras de estabilidade ocorreu o deslocamento na fronteira oscilatória, aumentando a margem de operação para potência ativa. A inclusão do sinal estabilizador não influencia a fronteira aperiódica. Assim, a combinação de sinal estabilizador e ganho de reativo possibilita a máquina operar em ângulos maiores, deslocamento da fronteira aperiódica, e maior margem de potência ativa, deslocamento da fronteira oscilatória.

#### 6.4. Modelo de 3ª Ordem com transformador

Como mencionado anteriormente, devido às grandes distâncias entre os centros produtores de energia e os centros consumidores, os geradores são acoplados a transformadores que elevam a tensão para reduzir as perdas na transmissão. Assim torna-se interessante entender como a inclusão de um transformador altera as fronteiras de estabilidade, oscilatória e aperiódica, e também das variáveis do sistema. Para isso foi desenvolvido o modulo de comparação entre o modelo de 3ª ordem com e sem o transformador. A Tabela 6.5 exibe as configurações do sistema, e a Figura 6.21 exibe a interface gráfica com as informações preenchidas.

**Tabela 6.5 – Simulação do Modelo de 3ª Ordem com Transformador.**

Variável	Valor
Torque mecânico	$23,5 \cdot 10^6 \text{ N}\cdot\text{m}$
Ganho de reativo	0,5
Sinal estabilizador	0
Resistência do rotor multiplicada por	10
$P(0)$	$-276 \cdot 10^6 \text{ W}$
$Q(0)$	$-10 \cdot 10^6 \text{ VAr}$
$Y(0)$	0
$\Delta(0)$	0
Reatância do Transformador	0,2 $\Omega$

Para a simulação com transformador, o caso base é a simulação sem o transformador. A Figura 6.22 exibe os gráficos do ângulo  $\delta$  para situação sem transformador e com reatância do transformador igual a 0,2  $\Omega$ . O ângulo  $\delta$  não é influenciado pela presença do transformador.



Figura 6.21 – Simulação do modelo de 3ª ordem com transformador conforme Tabela 6.5

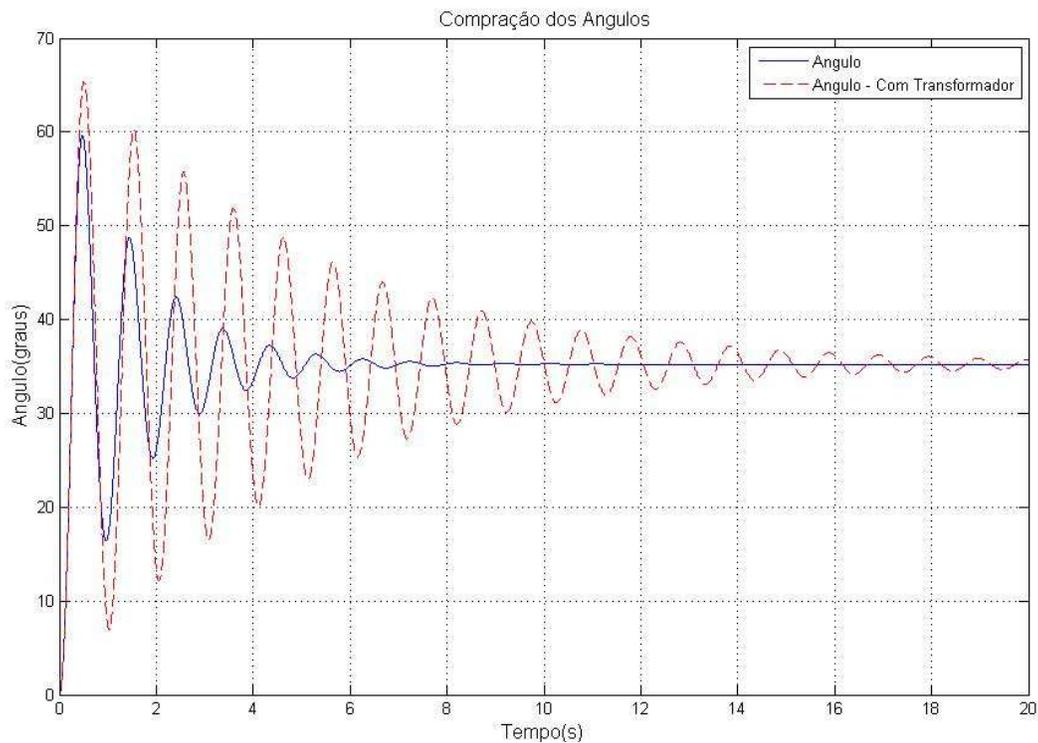


Figura 6.22 – Ângulo  $\delta$  para simulação sem e com transformador.

Analisando a Figura 6.23, que corresponde a corrente de campo, observa-se que com a presença do transformador ocorre um aumento na corrente de campo da máquina, acarretada pela inclusão de mais reatância no sistema.

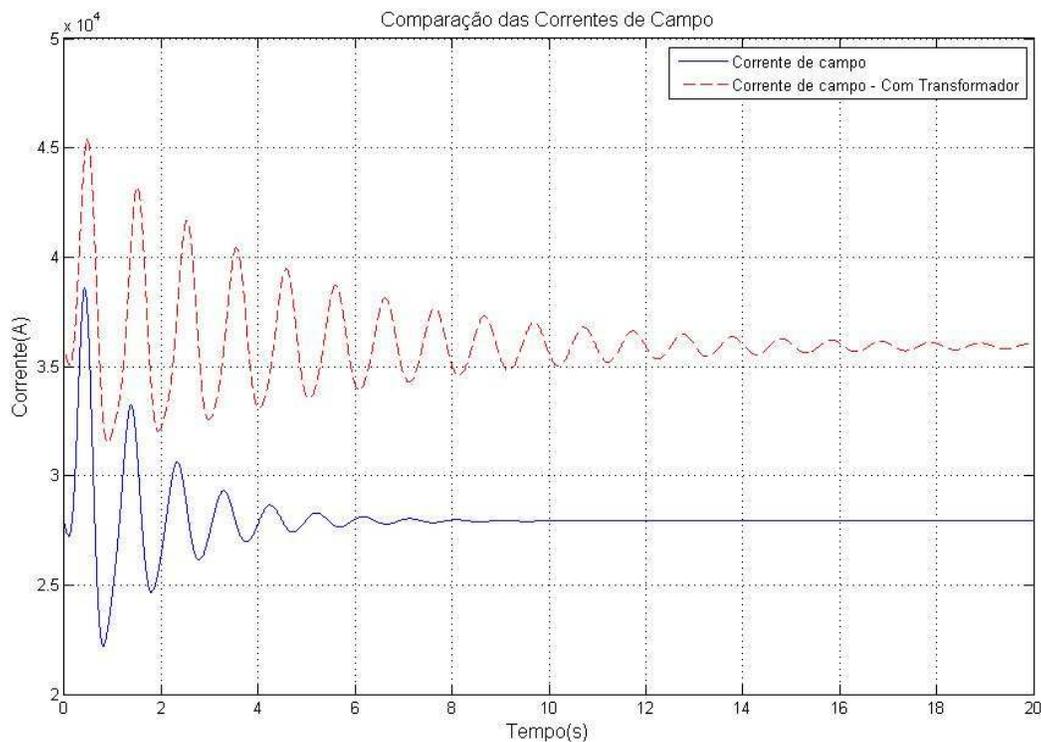


Figura 6.23 – Corrente de campo para simulação sem e com transformador.

Em relação às potências ativa e reativa exibidas na Figura 6.24, elas não foram influenciadas pela presença do transformador. Mas em ambos os casos houve aumento das oscilações até o regime permanente devido a presença do transformador.

Na Figura 6.25 são exibidas as fronteiras de estabilidade, juntamente com a curva da máquina e o ponto de operação da máquina. A inclusão do transformador não altera a fronteira aperiódica, mas provoca a redução da margem de potência ativa deslocando a fronteira oscilatória.

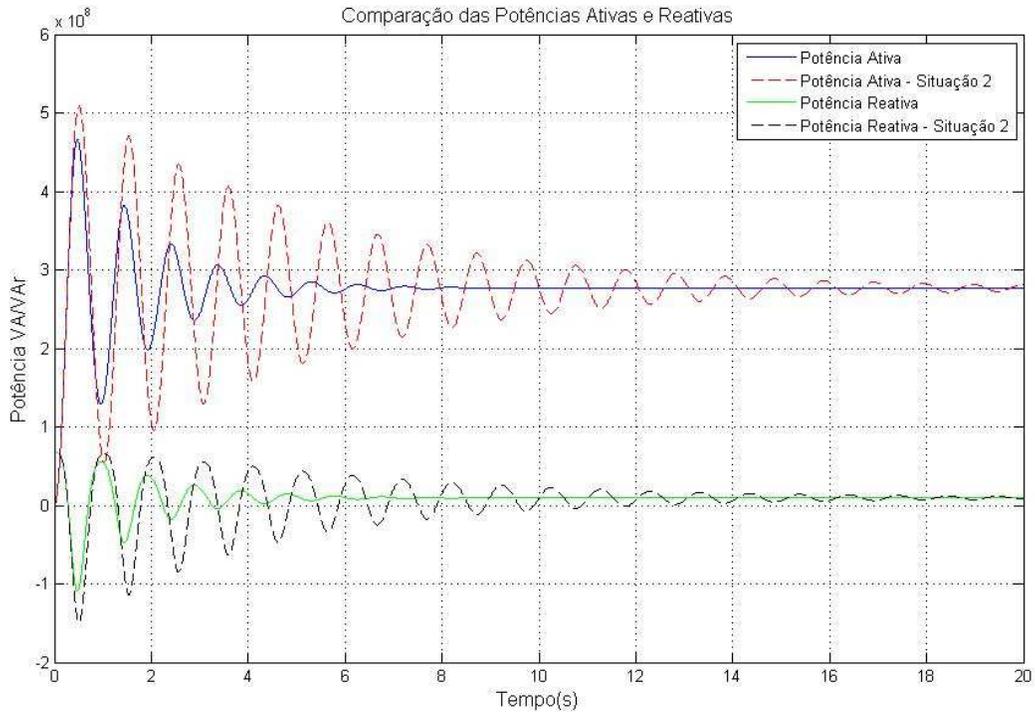


Figura 6.24 – Potência ativa e reativa para simulação sem e com transformador.

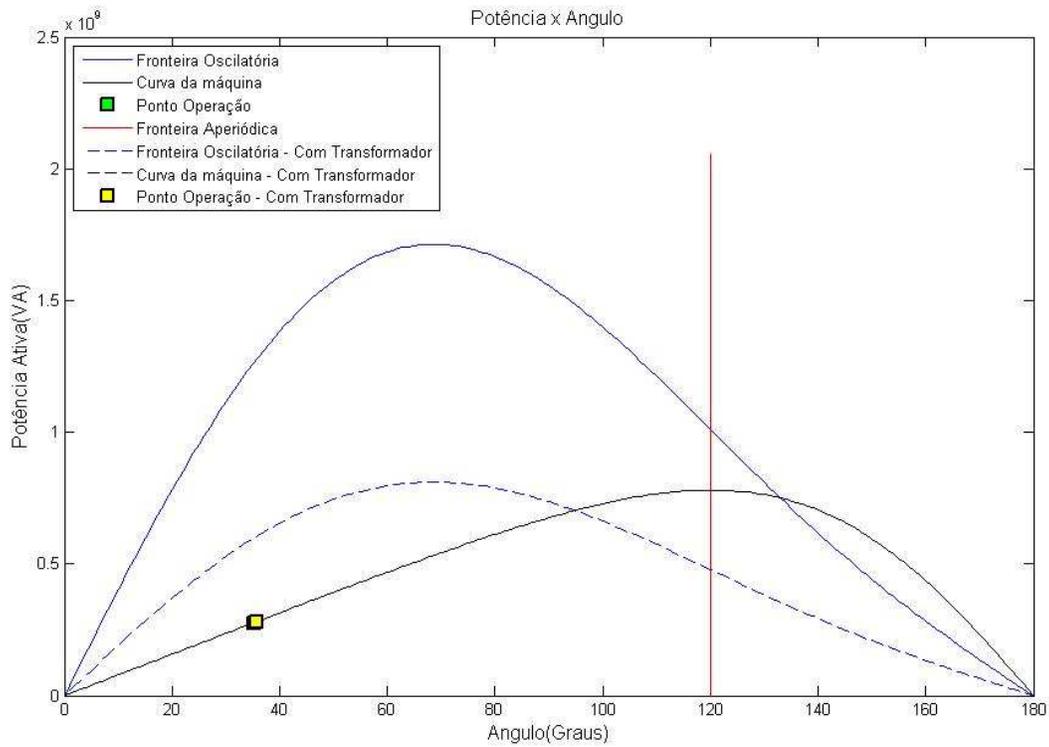


Figura 6.25 – Fronteiras de estabilidade sem e com transformador.

# Capítulo 7

## Conclusões

Com o desenvolvimento do aplicativo, a análise da estabilidade da máquina síncrona pode ser realizada de maneira didática. O foco inicial deste trabalho foi traduzir as equações de fronteiras de estabilidade, desenvolvidas em [18], para um aplicativo com interface gráfica, onde um estudante ou profissional da área de sistemas elétricos de potência fosse capaz de entender, como os controladores de ganho de reativo e sinal estabilizador influenciam a estabilidade da máquina síncrona.

O ganho de reativo proporciona a máquina operar com ângulos maiores, deslocando a fronteira aperiódica, mas reduz a margem de potência que a máquina pode operar, ou seja, a fronteira oscilatória. A inclusão do sinal estabilizador não influencia a fronteira aperiódica, e permite a máquina operar em regiões de maior potência ativa da fronteira oscilatória.

A reatância do transformador provoca efeito misto entre o aumento do ganho de reativo e da inclusão do sinal estabilizador. A fronteira oscilatória diminui, efeito semelhante do aumento do ganho de reativos, enquanto a fronteira aperiódica não é alterada, semelhante ao que acontece com a inclusão do sinal estabilizador.

O módulo de comparação, entre os modelos de 3ª e 5ª ordem, mostrou que as considerações na redução da ordem do modelo de 5ª ordem, não prejudicam a performance do modelo de 3ª ordem.

Em relação à continuidade deste trabalho, algumas sugestões já têm sido feitas para outros estudantes que tem interesse em continuar na abordagem do tema. Uma delas é o desenvolvimento das fronteiras de estabilidade para a máquina de pólos salientes, e quais diferenças comparando com as fronteiras desenvolvidas para a máquina de pólos lisos.

Outro ponto de investigação seria o desenvolvimento do modelo de 5ª ordem com a inclusão de ganhos de reativo e sinal estabilizador. Assim, será possível comparar o uso das fronteiras desenvolvidas para o modelo de 3ª ordem num modelo de 5ª ordem, já que neste é mais complexo achar as equações das fronteiras de estabilidade.

## Referências Bibliográficas

- [1] Agostini, Marcelo N.; Souza, Adriano de; Silva, Aguinaldo S. e; Decker, Ildemar C., “Simulação Dinâmica de Sistema de Energia Elétrica Utilizando o PSPICE”, XIV Congresso Brasileiro de Automática, RN, 2002, pp. 1.
- [2] Simpósio de Especialistas em Operação de Centrais Hidrelétricas, disponível em: <http://www2.itaipu.gov.br/seepoch/artigos/poster/SP12%20-%20CHESF.PDF> [capturado em 01 de agosto de 2008].
- [3] ANEEL, Agencia Nacional de Energia Elétrica, apostila disponível no sitio: <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.asp> [capturado em 17 de setembro de 2008].
- [4] Antunes, Hélio Marcos André, “Modelagem Matemática do Gerador Síncrono Trifásico de Pólos Salientes”. Monografia apresentada a Universidade Federal de Viçosa, UFV, 2007.
- [5] Filho, Ernesto Ruppert, Notas de aula da disciplina IT 306: Tópicos em Sistemas de Energia Elétrica III – Máquinas Síncronas, Unicamp, 2007.
- [6] Baccarini, Lane Maria Rabelo, apostila disponível para consulta no sitio: <http://www.eletrica.ufsj.edu.br/~rabelo/ensino/maquinas1/maquinas-sincronas.pdf> [capturado em 25 de julho de 2008].
- [7] da Costa, Vivaldo Fernando, “Modelo de Sensibilidade de Potência para Análise de Oscilações de Baixa Frequência em Sistemas de Energia Elétrica”. Tese de Doutorado apresentada a Faculdade de Engenharia Elétrica e da Computação, Unicamp, 1992.
- [8] Kundur, P., Power system stability and control. 1st ed., New York: McGraw-Hill.

- [9] Neoenergia, disponível no sitio: <http://www.neoenergia.com/section/historico-setor-eletrico.asp>, [capturado em 15 de setembro de 2008].
- [10] Heffron, W. G.; Phillips, R. A., “Effect of a Modern Amplidyne Voltage Regulator on Underexcited Operation of Large Turbine Generators”, AIEE Trans., 1952, Vol. 71, pp. 692-697.
- [11] Demello, Francisco P.; Concordia, Charles, “Concepts of Synchronous Machine Stability as Affected by Excitation Control”, IEEE Trans., 1969, Vol. PAS-88, pp. 316-329.
- [12] Magalhães, Aline da Silva, “Aplicação do transformador defasador para o amortecimento de oscilações eletromecânicas de baixa frequência em sistemas de energia elétrica”. Dissertação de Mestrado apresentada a Faculdade de Engenharia Elétrica e da Computação, Unicamp, 2006, pp. 14.
- [13] Larsen, E. V.; Swann, D. A., “Applying Power System Stabilizers”, IEE Trans., Part I, II, III, Vol. PAS-100, pp. 3017-3046.
- [14] Nassif, A. B.; Castro, M. S.; da Costa, V. F. ; Silva, L. C. P., “Comparação do PSS, SVC e STATCOM no Amortecimento de Oscilações de Modo Local em Sistemas de Potência”. In: XV Congresso Brasileiro de Automática (CBA), 2004, Gramado. XV Congresso Brasileiro de Automática (CBA), 2004.
- [15] Castro, M. S.; Ayres, H. M.; Kopcak, I.; Silva, L. C. P. ; da Costa, V. F., “A Influência do Modo de Operação do SSSC na Estabilidade de Ângulo de Sistemas Elétricos de Potência”. Controle & Automação, v. 16, p. 344-357, 2007.
- [16] Santos, Carlos Henrique Rennó Ribeiro; Mendes, P. P. C.; Ferreira, Cláudio, “Influência do STATCOM na Estabilidade de Sistemas Elétricos de Potência”. In: IX SEPOPE, 2004, Rio de Janeiro. IX Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica, 2004. v. 1.

- [17] Guazzelli, Maria Beatriz de Paiva, “Estudo da Estabilidade de uma Máquina Síncrona”. Tese de Mestrado apresentada a Faculdade de Engenharia Elétrica e da Computação, Unicamp, 1977.
- [18] Lyra, Ana Cristina Cavalcanti, “Uma Contribuição ao Estudo Dinâmico da Máquina Síncrona”. Tese de Doutorado apresentada a Faculdade de Engenharia Elétrica e da Computação, Unicamp, 1992.
- [19] Lyra, Ana Cristina Cavalcanti, “Controle de Reativos na Máquina Síncrona”. Tese de Mestrado apresentada a Faculdade de Engenharia Elétrica e da Computação, Unicamp, 1984, pp. 263.
- [20] WEG, Disponível no sitio: <http://www.weg.net/br/Produtos-e-Servicos/Energia/Geracao-Transmissao-e-Distribuicao-de-Energia/Geradores-para-Grupos-Geradores> [capturado em 04 de junho de 2008].
- [21] The MathWorks, Inc., Using MATLAB and Using Simulink, 2002.
- [22] Pereira, Heverton Augusto, Lyra, Ana Cristina Cavalcanti, Oliveira, Fabio Maurício Sena de, Burian Junior, Yaro, “Desenvolvimento de um Aplicativo Didático para o ensino de Estabilidade da Máquina Síncrona”. In: ICECE – International Conference on Engineering and Computer Education, Buenos Aires, Argentina, 2009.