

Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA
Engenharia de Energia

Metodologias de Controle de Excitação de Geradores Síncronos: LgV e *Backstepping*

Autor: Priscilla Dias da Silva
Orientador: Professor Dr. Flávio H. J. R. Silva

Brasília, DF
2014



Priscilla Dias da Silva

Metodologias de Controle de Excitação de Geradores Síncronos: LgV e *Backstepping*

Monografia submetida ao departamento de Engenharia de Energia da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia.

Universidade de Brasília - UnB

Faculdade UnB Gama - FGA

Orientador: Professor Dr. Flávio H. J. R. Silva

Brasília, DF

2014

Priscilla Dias da Silva

Metodologias de Controle de Excitação de Geradores Síncronos: LgV e *Backstepping*/ Priscilla Dias da Silva. – Brasília, DF, 2014-
104 p. : il. Cores ; 30 cm.

Orientador: Professor Dr. Flávio H. J. R. Silva

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA , 2014.

1. LgV. 2. Backstepping. I. Professor Dr. Flávio H. J. R. Silva. II. Universidade de Brasília. III. Faculdade UnB Gama. IV. Metodologias de Controle de Excitação de Geradores Síncronos: LgV e *Backstepping*.

CDU 02:141:005.6

Priscilla Dias da Silva

Metodologias de Controle de Excitação de Geradores Síncronos: LgV e *Backstepping*

Monografia submetida ao departamento de Engenharia de Energia da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia.

Trabalho aprovado. Brasília, DF, 10 de julho de 2014:

Professor Dr. Flávio H. J. R. Silva
Orientador

**Professor Dr. Luís Filomeno de Jesus
Fernandes**
Convidado 1

Professora Dra. Taís Calliero Tognetti
Convidado 2

Brasília, DF
2014

Esse trabalho é dedicado à minha família que sempre me incentivou e apoiou para que eu pudesse aproveitar plenamente minhas experiências acadêmicas.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer primeiramente à minha família pelo apoio e incentivo em relação às minhas práticas acadêmicas, sempre mostrando entusiasmo e satisfação em cada conquista.

Agradeço também ao meu orientador, Prof. Dr. Flávio H. J. Silva, pelo apoio, sempre disposto a ajudar e tirar dúvidas, mesmo em situações adversas.

“Viver é muito perigoso... Porque aprender a viver é que é o viver mesmo... Travessia perigosa, mas é a da vida. Sertão que se alteia e abaixa... O mais difícil não é um ser bom e proceder honesto, dificultoso mesmo é um saber definido o que quer e ter o poder de ir até o rabo da palavra.”
(Guimarães Rosa)

Resumo

Métodos de prevenção de perda de sincronismo estão presentes no projeto de geração de energia elétrica para garantia da sua qualidade. Este trabalho aborda a estabilidade transitória em sistemas de potência com a utilização de duas metodologias de controle não lineares para o amortecimento de oscilações e aumento na margem de estabilidade. As metodologias utilizadas são LgV e *Backstepping*. O sistema considerado é um gerador síncrono *versus* barramento infinito. Primeiramente é feita a modelagem do sistema, que é então analisado com as ferramentas matemáticas adequadas propostas para o projeto. Os métodos de controle são derivados da Teoria de Lyapunov. Os parâmetros internos do gerador foram retirados de bibliografias complementares. A comparação se dá por testes realizados para dois tipos de perturbações de caráter transitório. Para cada perturbação, os parâmetros arbitrários do sinal de controle são investigados. Os resultados são representados através de simulações no *software* MatLab.

Palavras-chaves: estabilidade transitória, LgV, *backstepping*, controle não-linear.

Abstract

Methods designed to prevent power systems from losing synchronism have been widely integrated with projects. The present work falls within the field of nonlinear control for transient stability in power systems. The methods used are LgV - Damping Injection – and Backstepping. The considered system is a synchronous generator connected to an infinite bus. Firstly, a model for the system is written and analyzed with appropriate mathematical tools. The methods come from Lyapunov Theory and a pre-fault starting point considering internal parameters of the machine from complimentary bibliographies. Two different types of faults are considered and simulated, including two transient interruptions regarding the transmission lines. For each fault, the control parameters are investigated. The results are presented through simulations using MatLab.

Key-words: transient stability, LgV, backstepping, nonlinear control.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Estabilidade de pontos de equilíbrio. Fonte: Siqueira (2012)	34
Figura 2 – Fronteira da Região de Estabilidade. Fonte: Bazanella (1997)	35
Figura 3 – Superfícies de Nível. Fonte: Siqueira (2012).	36
Figura 4 – Pêndulo simples. Fonte: Khalil, 2002.	40
Figura 5 – Trajetória do Pêndulo Simples	42
Figura 6 – Trajetória do Pêndulo Simples com Controle LgV	43
Figura 7 – Trajetória Do Pêndulo Simples com Controle <i>Backstepping</i>	45
Figura 8 – Conexão Gerador – Barramento Infinito. Adaptado de Padiyar (2002) .	49
Figura 9 – Rotor girante e estator de um gerador. Fonte: (Karimi,2008).	50
Figura 10 – Representação do Gerador Síncrono. Fonte: Adaptado de Padiyar (1996)	51
Figura 11 – Classificação de estabilidade.	56
Figura 12 – Sistema de excitação DC separado. Adaptado de Kundur (1994)	58
Figura 13 – Instante pré-falta - Situação A. Adaptado de Kundur (1994)	70
Figura 14 – Instante durante a ocorrência da falta - Situação A. Adaptado de Kundur (1994)	70
Figura 15 – Trajetória do Sistema para $t_{\text{curto}} = 0.400s$ - Situação A	71
Figura 16 – Efeito da constante de amortecimento no ângulo e desvio de velocidade $t_{\text{curto}} = 0.4931s$ - Situação A	72
Figura 17 – Efeito da constante de amortecimento nas tensões nos eixos Q e D para $t_{\text{curto}} = 0.4931s$ - Situação A	72
Figura 18 – Efeito da constante de amortecimento nas tensões de armadura e terminal para $t_{\text{curto}} = 0.4931s$ - Situação A	73
Figura 19 – Ângulo e Desvio de velocidade para $t_{\text{curto}} = 0.400s$ - Situação A	74
Figura 20 – Tensões nos eixos D e Q para $t_{\text{curto}} = 0.400s$ - Situação A	74
Figura 21 – Tensões de armadura e terminal para $t_{\text{curto}} = 0.400s$ - Situação A . . .	75
Figura 22 – Ângulo e Desvio de velocidade para $t_{\text{curto}} = 0.400s$ e $C = 0.1$ - Situação A	76
Figura 23 – Tensões nos eixos Q e D para $t_{\text{curto}} = 0.400s$ e $C = 0.1$ - Situação A . .	76
Figura 24 – Tensões de armadura e terminal para $t_{\text{curto}} = 0.400s$ e $C = 0.1$ - Situação A	77
Figura 25 – Tensão terminal para $t_{\text{curto}} = 0.400s$ e $C = 0.1$ - Situação A	77
Figura 26 – Ângulo do rotor e desvio de velocidade para $t_{\text{curto}} = 0.400s$ e diferentes valores de k_1 - Situação A	79

Figura 27	– Tensões nos eixos Q e D para $t_{\text{curto}} = 0.400s$ e diferentes valores de k_1	
	-	
	Situação A	79
Figura 28	– Tensões de armadura e terminal para $t_{\text{curto}} = 0.400s$ e diferentes valores de k_1 - Situação A	80
Figura 29	– Ângulo do rotor e desvio de velocidade para $t_{\text{curto}} = 0.400s$ e diferentes valores de k_2 - Situação A	80
Figura 30	– Tensões nos eixos Q e D para $t_{\text{curto}} = 0.400s$ e diferentes valores de k_2 - Situação A	81
Figura 31	– Tensões de armadura e terminal para $t_{\text{curto}} = 0.400s$ e diferentes valores de k_2 - Situação A	81
Figura 32	– Ângulo do rotor e desvio de velocidade para $t_{\text{curto}} = 0.400s$ e diferentes valores de k_3 - Situação A	82
Figura 33	– Tensões dos eixos Q e D para $t_{\text{curto}} = 0.400s$ e diferentes valores de k_3 - Situação A	82
Figura 34	– Tensões de armadura e terminal para $t_{\text{curto}} = 0.400s$ e diferentes valores de k_3 - Situação A	83
Figura 35	– Ângulo do rotor e desvio de velocidade para $t_{\text{curto}} = 0.400s$. - Situação A	84
Figura 36	– Tensões nos eixos Q e D para $t_{\text{curto}} = 0.400s$ - Situação A	84
Figura 37	– Tensões de armadura e terminal para $t_{\text{curto}} = 0.400s$ - Situação A	85
Figura 38	– Configuração anterior e posterior ao curto - Situação B	85
Figura 39	– Representação do curto-circuito próximo ao barramento - Situação B	86
Figura 40	– Trajetória do Sistema para $t_{\text{curto}} = 0.100s$ - Situação B	86
Figura 41	– Ângulo do rotor e desvio de velocidade para $t_{\text{curto}} = 0.100s$ - Situação B	87
Figura 42	– Tensões nos eixos Q e D para $t_{\text{curto}} = 0.100s$ - Situação B	87
Figura 43	– Tensões de armadura e terminal para $t_{\text{curto}} = 0.100s$ - Situação B	88
Figura 44	– Ângulo e desvio de velocidade para diferentes valores de C - Situação B	89
Figura 45	– Tensões nos eixos para valores de C - Situação B	89
Figura 46	– Tensões de armadura e terminal para valores de C - Situação B	90
Figura 47	– Ângulo e desvio de velocidade síncrona para $C = 0.05$ e $t_{\text{curto}} = 0.100s$ - Situação B	91
Figura 48	– Tensões nos eixos Q e D para $C = 0.05$ e $t_{\text{curto}} = 0.100s$ - Situação B	91
Figura 49	– Tensões de armadura e terminal para $C = 0.05$ e $t_{\text{curto}} = 0.100s$ - Situação B	92
Figura 50	– Ângulo do rotor e desvio de velocidade para $t_{\text{curto}} = 0.100s$ - Situação B	93
Figura 51	– Tensões nos eixos Q e D para $t_{\text{curto}} = 0.100s$ - Situação B	93
Figura 52	– Tensões de armadura e terminal para $t_{\text{curto}} = 0.100s$ - Situação B	94

Lista de tabelas

Tabela 1 –	Reatâncias equivalentes de Thévenin do gerador - Situação A	70
Tabela 2 –	Aumento do tempo crítico com aumento do armotecimento - Situação A	73
Tabela 3 –	Tempos críticos para diferentes parâmetros de controle LgV - Situação A	75
Tabela 4 –	Valores dos parâmetros para convergência do sistema - Situação A . . .	78
Tabela 5 –	Valores dos parâmetros de controle - Situação A	83
Tabela 6 –	Configurações para simulação - Situação B	86
Tabela 7 –	Aumento do tempo crítico do armotecimento - Situação B	88
Tabela 8 –	Tempos críticos para diferentes parâmetros de controle LgV - Situação B	90
Tabela 9 –	Valores dos parâmetros para convergência do sistema - Situação B . . .	92
Tabela 10 –	Melhores valores dos parâmetros nas faixas selecionadas - Situação B .	92
Tabela 11 –	Comparação da obtenção da lei de controle	95
Tabela 12 –	Comparação entre os resultados dos métodos	95
Tabela 13 –	Constantes Internas do Gerador Utilizadas	103

Lista de abreviaturas e siglas

AVR	<i>Automatic Voltage Regulator</i>
DFL	<i>Direct Feedback Linearization</i>
ANN	<i>Artificial Neural Network</i>
UMBI	Uma Máquina Barramento Infinito
FACTS	<i>Flexible Alternating Current Transmission System</i>

Lista de símbolos

Ψ_S	Fluxo magnético no estator
Ψ_R	Fluxo magnético no rotor
L_{SS}	Indutância no estator
L_{RR}	Indutância no rotor
L_{SR}	Indutância mútua estator/rotor
ψ_d	Fluxo no eixo direto
ψ_f	Fluxo de campo
ψ_q	Fluxo no eixo de quadratura
ψ_g	Fluxo na bobina amortecedora
i_s	Corrente no estator
i_r	Corrente no rotor
i_q	Corrente no eixo de quadratura
i_g	Corrente na bobina amortecedora
i_f	Corrente de campo
i_d	Corrente no eixo direto
i_0	Corrente homopolar
i_a	Corrente na fase a
i_b	Corrente na fase b
i_c	Corrente na fase c
ϕ_d	Fluxo eletromagnético no eixo direto
ϕ_q	Fluxo eletromagnético no eixo de quadratura
ϕ_0	Fluxo eletromagnético homopolar

ϕ_{fd}	Fluxo eletromagnético de campo
L_d	Indutância no enrolamento do eixo direto
L_q	Indutância no enrolamento do eixo de quadratura
L_0	Indutância homopolar
L_{ad}	Indutância mútua armadura/eixo direto
V_q	Tensão no enrolamento do eixo de quadratura
V_t	Tensão terminal
V_d	Tensão no enrolamento do eixo direto
V_0	Tensão homopolar
V_f	Tensão nos terminais da bobina f
V_{fd}	Tensão no enrolamento de campo
r_s	Resistência equivalente no estator
r_{fd}	Resistência equivalente de campo
ω	Desvio de velocidade síncrona
ω_b	Velocidade angular do rotor
E'_q	Tensão no eixo de quadratura
E'_d	Tensão no eixo direto
E'_{fd}	Tensão de campo
E_B	Tensão no barramento infinito
T_d	Constante de tempo no eixo direto
T_q	Constante de tempo no eixo de quadratura
J	Momento de inércia do rotor
P	Número de polos
M	Coefficiente de inércia do rotor
D	Coefficiente de amortecimento natural
θ_m	Ângulo mecânico

θ_e	Ângulo elétrico
T_m	Torque mecânico na direção da rotação
T_e	Torque elétrico oposto ao torque mecânico
δ	Ângulo do rotor
P_e	Potência elétrica
R_f	Resistência da bobina f
R_g	Resistência da bobina g
R_l	Resistência da linha de transmissão
x_d	Reatância no enrolamento direto
x_q	Reatância no enrolamento de quadratura
x_g	Reatância do gerador
x_l	Reatância da linha de transmissão
x_{ad}	Reatância de dispersão de armadura do eixo d
x_{aq}	Reatância de dispersão de armadura do eixo q
x_{ld}	Reatância equivalente no eixo direto
x_{lq}	Reatância equivalente no eixo de quadratura
x'_d	Reatância transitória no eixo direto
x'_q	Reatância transitória no eixo de quadratura
τ	Constante de tempo transitória
V_r	Tensão referência
v_d	Tensão no eixo direto do estator
v_q	Tensão no eixo de quadratura do estator
K_f	Constante de proporcionalidade AVR
E_{fd0}	Tensão inicial de campo

Sumário

I	Conceitos Iniciais	27
1	Introdução	29
1.1	Descrição do Problema	30
1.2	Objetivos	30
1.2.1	Objetivo Geral	30
1.2.2	Objetivo Específico	30
1.3	Metodologia Simplificada	30
1.4	Organização do Trabalho	31
2	Tópicos de Análise e Controle de Sistemas Não-Lineares	33
2.1	Estabilidade de Lyapunov	35
2.2	Controlador LgV	37
2.3	Controlador <i>Backstepping</i>	38
2.4	Exemplo do Pêndulo Simples	40
2.4.1	LgV	42
2.4.2	<i>Backstepping</i>	43
II	Modelagem Dinâmica do Sistema	47
3	Análise e Controle do Problema de Estabilidade Transitória UMBI	49
3.1	Modelagem do Problema no Barramento Infinito	49
3.1.1	Princípios de Funcionamento do Gerador Síncrono	50
3.1.2	Modelo do Gerador Síncrono para o Caso do Barramento Infinito	50
3.2	A Estabilidade Transitória	55
3.2.1	Controle de Excitação	57
III	Projeto de Controladores e Resultados	61
4	Projeto de Controle de Excitação	63
4.1	Controle pelo Método LgV	63
4.2	Controle pelo Método <i>Backstepping</i>	64
4.2.1	A Obtenção da Lei de Controle	65
4.3	Resultados Esperados	67
4.3.1	LgV	67
4.3.2	<i>Backstepping</i>	67

5	Resultados Obtidos	69
5.1	Situação A: Curto em Uma das Linhas de Transmissão	70
5.1.1	Controle LgV para Situação A	73
5.1.2	Controle <i>Backstepping</i> para situação A	78
5.2	Situação B: Curto nas Proximidades do Barramento Infinito	85
5.2.1	Controle LgV para situação B	88
5.2.2	Controle <i>Backstepping</i> para situação B	92
5.3	Considerações Finais	94
5.3.1	Comparação Da Obtenção Da Lei De Controle	94
5.4	Comparação dos Resultados de Cada Metodologia	95
6	Conclusões	97
	Referências Bibliográficas	99
	Apêndices	101
	APÊNDICE A Parâmetros do Gerador	103

Parte I

Conceitos Iniciais

1 Introdução

Os padrões de vida atuais são bastante diferentes em vários aspectos, quando comparados aos padrões anteriores aos do século XIX. O desenvolvimento dos sistemas de potência teve um papel fundamental nessa mudança.

Inicialmente, os sistemas de potência consistiam exclusivamente de um gerador que fornecia energia aos postes de iluminação pública de uma pequena área urbana. Para este tipo de sistema, a estabilidade não representava um fator relevante e os requisitos de qualidade eram mínimos. Com o aumento da demanda e da tecnologia no setor, a geração de energia elétrica fora dos centros urbanos tornou-se necessária. Assim, passaram a existir os sistemas de transmissão e distribuição, e conseqüentemente a interligação entre sistemas de potências. (Bazanella,1997)

As interligações dos sistemas elétricos de potência contribuem para o aumento da margem de segurança e economia da operação dos mesmos. Durante a operação normal do sistema, podem ocorrer perturbações que afetam localmente ou até mesmo todo o sistema interligado, prejudicando o fornecimento de energia elétrica à população. Essas perturbações acarretam em oscilações eletromecânicas no eixo dos gerador, o que compromete a velocidade do rotor, a tensão terminal e a potência elétrica gerada. Desta forma, a análise de estabilidade frente a perturbações tornou-se um assunto de suma importância na operação dos sistemas elétricos. (Karimi, 2008)

As perturbações que ocorrem no sistema elétrico de potência podem ser classificadas como de pequeno e de grande porte. Pequenas perturbações são consideradas rotineiras durante a operação de um gerador, tais como variações normais de carga e de geração. As grandes perturbações causam uma variação abrupta na configuração do sistema, podendo citar a perda de uma unidade geradora ou um curto circuito em uma linha de transmissão ou em um barramento. A análise de estabilidade do sistema frente a grandes perturbações é denominada estabilidade transitória. (Kundur, 1994).

Os primeiros problemas de instabilidade causando interrupções no fornecimento de energia elétrica foram estudados no início do século XX, dada a ocorrência de um curto circuito em uma linha de transmissão. Naquela época, nenhum ou pouco material existia para auxiliar a análise do comportamento do sistema. Ainda no início do século XX foram desenvolvidos analisadores de rede, que permitiram a análise da interconexão entre sistemas, e o regulador AVR – Automatic Voltage Regulator. Esse regulador de tensão tem com objetivo amenizar as oscilações. Com o avanço da tecnologia e facilidade

de cálculos numéricos, principalmente através de computadores, os métodos não lineares tornaram-se mais acessíveis. Diversos problemas de estabilidade surgiram com a variedade dos parâmetros dos sistemas e suas condições de operação. Conseqüentemente, vários métodos de análise e controle foram desenvolvidos para esses sistemas de potência, tais como *Backstepping*, controle *Fuzzy*, *Direct Feedback Linearization* (DFL), *Artificial Neural Network* (ANN), LgV, entre outros (Bessa, 2010; Karimi 2008 & Zhu *et al.*, 1997).

1.1 Descrição do Problema

A atual dependência de energia elétrica para a execução das tarefas cotidianas implicam em uma necessidade de confiabilidade da entrega de demanda. Sistemas elétricos de potência estão sendo usados operando nas proximidades de seus limites de estabilidade. Isto ocorre em razão do crescimento contínuo da demanda e também de dificuldades de instalação de novas linhas de transmissão e unidades geradoras (devidas às restrições econômicas e ambientais). Essa tem sido a causa principal do agravamento dos problemas que oscilações eletromecânicas podem gerar. Estes problemas podem ter conseqüências desastrosas para a estabilidade dos sistemas, podendo levá-los a colapsos parciais ou mesmo totais. (Kundur, 1994 e Padiyar 1996).

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Analisar a influência do controle de excitação na regulação de tensão terminal de um gerador síncrono frente a grandes perturbações.

1.2.2 Objetivo Específico

Estudar metodologias de projeto de controle de excitação não lineares de um gerador síncrono, LgV e *Backstepping*, com o objetivo de regular a tensão terminal da máquina e conseqüentemente amortecer oscilações e aumentar a margem de estabilidade.

1.3 Metodologia Simplificada

Cada gerador do sistema elétrico de potência é considerado um subsistema. A descrição matemática do comportamento deste subsistema é descrita por um conjunto de equações diferenciais, em que são aplicados os dois métodos de controle escolhidos. A visualização do comportamento dinâmico é promovida através de rotinas no *software* MatLab. O modelo inicial é então comparado aos modelos provenientes dos sistemas com

controle. A investigação de desempenho da utilização do controle é feita no aumento da margem de estabilidade e o amortecimento do sistema. Ambos os projetos de controlador são comparados com o sistema sem controle, que é a referência. A comparação ocorre através dos indicadores tempo, com o aumento do tempo crítico de eliminação de faltas, e amplitude das oscilações das variáveis algébricas ao longo do tempo através de gráficos.

1.4 Organização do Trabalho

O presente trabalho foi organizado em três partes: Conceitos Iniciais, Modelagem Dinâmica do Sistema e Projeto de Controladores e Resultados. Nestas partes estão contidos seis capítulos. No capítulo dois, as ferramentas matemáticas a serem utilizadas são descritas e são apresentados o método direto de análise de Lyapunov e os métodos de controle LgV e *Backstepping*. No capítulo três são introduzidos a modelagem da máquina em um barramento infinito através de seus princípios de funcionamento e os conceitos de estabilidade transitória. No capítulo quatro encontram-se os projetos de controladores pelas duas metodologias propostas. No capítulo cinco são apresentados os resultados obtidos. No capítulo seis são descritas as conclusões do trabalho.

2 Tópicos de Análise e Controle de Sistemas Não Lineares

Neste capítulo são apresentadas as ferramentas matemáticas necessárias para se analisar o problema da estabilidade transitória em sistemas elétricos com ênfase na teoria de Lyapunov.

De acordo com Khalil (2002), certos sistemas dinâmicos são modelados por um número finito de equações diferenciais ordinárias conectadas (ver Equações 2.1)

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= f_1(t, x_1, x_2, \dots, x_n, u) \\ \dot{x}_2 &= f_2(t, x_1, x_2, \dots, x_n, u) \\ &\vdots \\ \dot{x}_n &= f_n(t, x_1, x_2, \dots, x_n, u)\end{aligned}\tag{2.1}$$

Onde $x_1, x_2, \dots, x_n \in \mathfrak{R}^n$ são as variáveis de estado, representando a memória passada do sistema dinâmico, f_1, f_2, \dots, f_n são funções continuamente diferenciáveis e $u \in \mathfrak{R}^m$ é um conjunto de variáveis de entrada específicas. Utilizando a notação de vetor para a forma compactada, obtém-se:

$$\dot{x} = f(t, x, u)\tag{2.2}$$

Um sistema autônomo é aquele que não depende explicitamente do tempo. Quando não há uma entrada u , este pode ser modelado de acordo com a Equação 2.3.

$$\dot{x} = f(x)\tag{2.3}$$

A solução da Equação 2.3, dado um tempo inicial t_0 e um estado inicial x_0 , representa o comportamento do sistema, chamada de trajetória, descrita pela Equação 2.4.

$$\varphi = \varphi(t, x_0)\tag{2.4}$$

Um conceito importante na análise de sistemas lineares é o de ponto de equilíbrio. De acordo com Khalil (2002), ponto de equilíbrio é o ponto $x = x_e$ no espaço do estado em que, se o sistema começar no ponto x_e , ele tende a permanecer neste ponto para todo tempo futuro. Para o sistema autônomo, os pontos de equilíbrio são todas as raízes reais (ver Equação 2.5).

$$0 = f(x)\tag{2.5}$$

Os pontos de equilíbrio podem ser transladados para o ponto de origem 0 através de uma transformação de coordenada e são divididos em estáveis, instáveis ou assintoticamente estáveis (Khalil, 2002).

- Estável se, para um dado valor arbitrariamente pequeno $\epsilon > 0$ existir um $\delta = \delta(\epsilon) > 0$ tal que $\|x_0 - x_e\| < \delta$ e $\|\varphi(t, x_0)\| < \epsilon$, $\forall t > 0$;
- Assintoticamente estável se $\|x(t)\| < \delta$ e $\lim_{t \rightarrow \infty} x(t) = 0$;
- Instável se não for estável.

Em outras palavras, um ponto de equilíbrio é estável se, para pequenas perturbações, as soluções permanecem em uma vizinhança arbitrariamente pequena do ponto de equilíbrio, como pode ser visto geometricamente na Figura 1.

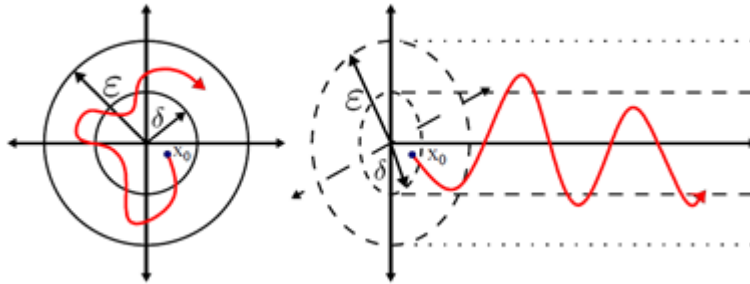


Figura 1 – Estabilidade de pontos de equilíbrio. Fonte: Siqueira (2012)

Outro conceito importante é o de região de estabilidade. Para Khalil (2002), região de estabilidade é um subconjunto do espaço de estados cujas trajetórias iniciando dentro deste conjunto tendem ao equilíbrio estável. A região de estabilidade pode ser definida conforme a Equação 2.6.

$$\dot{A} = \{x \in \mathfrak{R}^n, \lim_{t \rightarrow \infty} \varphi(t, x_0) = 0\} \quad (2.6)$$

Existem limites definitos na região de estabilidade chamados de fronteira da região de estabilidade. Esta fronteira é o fecho das variedades estáveis dos pontos de equilíbrio daquela região (Khalil, 2002). Ou seja, se a solução do sistema sair da região de estabilidade, a trajetória tende a divergir ou convergir para um outro ponto de equilíbrio fora desta região. Um exemplo de fronteiras da região de estabilidade do modelo clássico de um gerador síncrono pode ser visto na Figura 2.

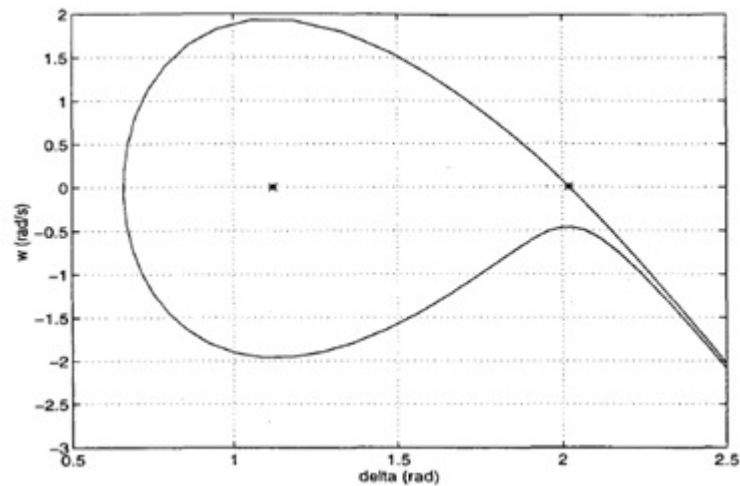


Figura 2 – Fronteira da Região de Estabilidade. Fonte: Bazanella (1997)

A Figura 2 apresenta um ponto de equilíbrio estável no centro da região de estabilidade e um ponto de equilíbrio instável em sua fronteira.

2.1 Estabilidade de Lyapunov

Nesta seção é abordado o método direto de análise, também conhecido como teoria de Lyapunov. O segundo método de Lyapunov permite analisar as características de estabilidade do sistema e pode ser utilizado mesmo quando não há pontos de equilíbrios (Khalil, 2002).

Função energia é a função escalar auxiliar a partir da qual pode-se obter informações globais a respeito da dinâmica do sistema linear (Chiang, 1988). A partir deste conceito, pode-se escrever uma função, chamada de função de Lyapunov, para o estudo de estabilidade local. A Função de Lyapunov é a função diferenciável escalar $V : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ que satisfaça:

1. $V(x)$ é localmente definida positiva;
2. $\dot{V}(x)$ é localmente definida negativa.

Em que as seguintes definições sejam levadas em consideração:

Definição 2.1.1. (Função Definida Positiva): “Uma função contínua $V : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ é localmente definida positiva se, e somente se, $V(0) = 0$ e $V(x) > 0$ para qualquer $x \in \mathbb{R}^n - \{0\}$; e é localmente semidefinida positiva se existir uma constante real $r > 0$, tal que $V(x) > 0$ para qualquer x em que $\|x\| < r, x \in \mathbb{R}^n - \{0\}$.”

Definição 2.1.2. (Função Definida Negativa): “Uma função contínua $V : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ é localmente definida negativa se $-V(x)$ for definida positiva; e é localmente semi-definida negativa se $-V(x)$ for localmente semidefinida positiva.”

A existência da função de Lyapunov é condição suficiente para estabilidade assintótica da origem. A função de Lyapunov é decrescente ao longo das trajetórias do sistema e $\lim_{t \rightarrow \infty} V(x) = 0$. Na Figura 3, pode-se visualizar o comportamento da função de Lyapunov, onde L_1 , L_2 e L_3 são constantes de superfície de Lyapunov ou superfície de nível (Khalil, 2002).

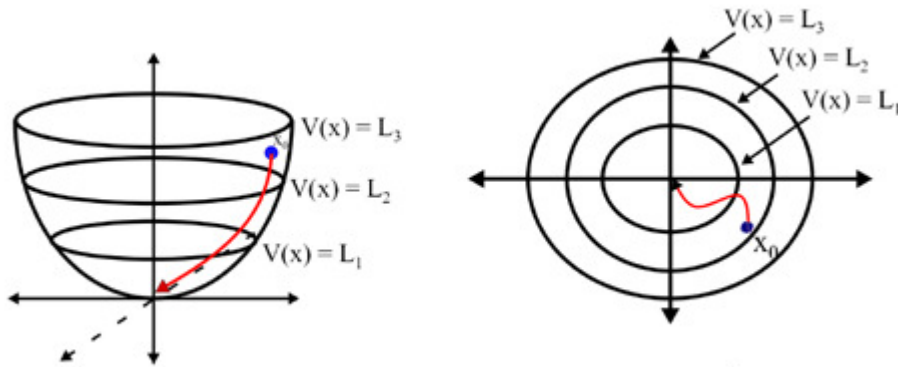


Figura 3 – Superfícies de Nível. Fonte: Siqueira (2012).

A determinação da função de Lyapunov pode ser uma tarefa bastante difícil. Entretanto, uma vez encontrada, a função de Lyapunov pode ser utilizada para o projeto de lei de controle estabilizante em sistemas não lineares.

Considerando que o sistema da Equação 2.3 não seja assintoticamente estável na origem, uma entrada $u = h(x)$ pode ser utilizada. Para esta situação, a função de Lyapunov de controle (FLC) pode ser definida como (Khalil, 2002):

Definição 2.1.3 (Função de Lyapunov de Controle): “Uma função diferenciável tal que $V : \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}$ é uma função de Lyapunov de controle se existir uma lei de realimentação de controle suave $u = h(x)$ com $h(0) = 0$ tal que a função $W(x) : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$, definida por $W(x) = V(x, h(x))$, seja a função de Lyapunov do sistema.”

A existência da FLC é condição suficiente para assegurar a estabilização da origem em malha fechada através da realimentação de controle (Khalil, 2002).

A partir dos conceitos apresentados anteriormente, é possível trabalhar com modelos através de metodologias de obtenção de leis de controle por realimentação baseadas na teoria de Lyapunov. As duas metodologias abordadas neste trabalho são LgV e *Backstepping*.

2.2 Controlador LgV

Nesta seção, é apresentado o controle LgV. Este controle emergiu diante da análise de estabilidade de Lyapunov para aferir estabilidade assintótica a um sistema estável ou aumentar o amortecimento do sistema que já seja assintoticamente estável. Todos os conceitos apresentados nesta seção referentes à metodologia de controle LgV têm como fonte Bazanella (1997).

Considerando o modelo já apresentado:

$$\dot{x} = f(x) \quad (2.7)$$

Onde $x \in \mathfrak{R}^n$ é o vetor estado, um controle não linear é inserido no sistema, tal que a Equação 2.8 é satisfeita.

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u \quad (2.8)$$

Em que $f(x)$ e $g(x)$ são funções contínuas conhecidas. O objetivo é determinar uma lei de estado contínua, conforme Equação 2.9.

$$u = h(x) \quad (2.9)$$

De maneira que $x = 0$ é um ponto de equilíbrio assintoticamente estável em malha fechada.

O controle é baseado no conhecimento da função de Lyapunov, que é dividida em duas partes: $L_f V(x)$ e $L_g V(x)$. Estas partes são definidas, respectivamente, nas Equações 2.10 e 2.11.

$$L_f V(x) = \frac{\partial V(x)}{\partial x} f(x) \leq 0 \quad (2.10)$$

$$L_g V(x) = \frac{\partial V(x)}{\partial x} g(x) \leq 0 \quad (2.11)$$

As restrições da função de Lyapunov continuam a existir. Desta forma, a Equação 2.12 deve ser satisfeita.

$$L_f V(x) + L_g V(x)u < 0, \quad \forall u \in \mathfrak{R}^n \quad (2.12)$$

De maneira que $x \neq 0$, pois a função de Lyapunov deve valer 0 no ponto de equilíbrio $x = 0$.

A existência de uma função de energia, e conseqüentemente uma função de Lyapunov, implica na existência de uma lei de controle assintoticamente estabilizadora (Sontag, 1983). Esta lei geralmente é suave em todos os pontos, com exceção do ponto de equilíbrio.

Sendo x_e^0 um ponto de equilíbrio estável do sistema em malha aberta dentro de uma determinada região de estabilidade \mathcal{B} , a derivada da função de Lyapunov é definida

negativa. Ainda, para garantir que a 2.12 é definida negativa, o termo controlador $L_g V(x)u$ é sempre negativo. Para tanto, $L_g V(x)u$ deve ser do tipo $-C[L_g V(x)]^2$, uma possível escolha para u é $u = -C[L_g V(x)]$, tornando o termo sempre definido negativo. Então:

$$u = u(\varphi(x)), \quad \varphi = -C \left(L_g V(x) \right)^T, \quad C > 0 \quad (2.13)$$

É preciso garantir que o controle somente irá intervir no sistema em um momento em que o estado do mesmo não seja de equilíbrio. Para isso, faz-se necessário o conhecimento do mesmo. O controle u então pode ser representado conforme Equação 2.14.

$$u = -C[\varphi(x) - \varphi(x_e^0)] \quad (2.14)$$

Onde $\varphi(x)$ é uma função de x escolhida para realizar o controle de acordo com os dispositivos disponíveis de maneira que $u = 0$ quando $x = x_e^0$. Esta função para o caso específico do gerador síncrono é apresentada no capítulo 4.

2.3 Controlador *Backstepping*

Nesta seção é apresentado o controle *Backstepping*. *Backstepping* é uma técnica de controle baseada na Teoria de Lyapunov desenvolvida nos anos 90 por Petar V. Kokotovic para estabilizar sistemas dinâmicos não lineares. Estes sistemas são ordenados de maneira que se possa estabilizar cada subsistema em cascata com uma estrutura recursiva. O processo termina quando o controle final (entrada) é especificado (Khalil, 2002).

De acordo com Khalil (2002), o modelo da Equação 2.3 deve ser reorganizado e escrito conforme as Equações 2.15 e 2.16.

$$\dot{\eta} = f(\eta) + g(\eta)\xi \quad (2.15)$$

$$\dot{\xi} = u \quad (2.16)$$

Onde $[\eta^T, \xi]^T \in \mathfrak{R}^{n+1}$ são as variáveis de estado e $u \in \mathfrak{R}^1$ é a lei de controle. As funções f e g são funções suaves conhecidas. Elas estão no domínio de validade do sistema e pertencem a \mathfrak{R}^n . Este sistema, assim como o sistema original, possui uma função de Lyapunov garantindo um ponto de equilíbrio estável, que é transladado para $\vec{0}$, conforme a Equação 2.17.

$$\eta^* = \vec{0} \rightarrow f(\eta^*) = 0 \quad (2.17)$$

O objetivo é projetar uma lei de controle de realimentação para estabilizar o ponto de origem. A lei de controle é tratada como uma variável de estado ($\dot{\xi} = u$). ξ deve ser

uma função suave tal que $\xi = \phi(\eta)$, onde $\phi(0) = 0$ para uma origem assintoticamente estável. Desta maneira, segue que:

$$\dot{\eta} = f(\eta) + g(\eta)\phi(\eta) \quad (2.18)$$

Adicionando e subtraindo o termo $g(\eta)\phi(\eta)$ da Equação 2.18, chega-se às Equações 2.19 e 2.20.

$$\dot{\eta} = [f(\eta) + g(\eta)\phi(\eta)] + g(\eta)[\xi - \phi(\eta)] \quad (2.19)$$

$$\dot{\xi} = u \quad (2.20)$$

Pode-se então realizar uma troca de variável, conforme Khalil (2002):

$$z = \xi - \phi(\eta) \quad (2.21)$$

Resultando nas Equações 2.22 e 2.23

$$\dot{\eta} = [f(\eta) + g(\eta)\phi(\eta)] + g(\eta)z \quad (2.22)$$

$$\dot{z} = u - \dot{\phi}(\eta) \quad (2.23)$$

Onde

$$\dot{\phi}(\eta) = \frac{\partial \phi}{\partial \eta} \cdot \frac{\partial \eta}{\partial t} = \frac{\partial \phi}{\partial \eta} \cdot \dot{\eta} = \frac{\partial \phi}{\partial \eta} \cdot [f(\eta) + g(\eta)\xi] \quad (2.24)$$

Realizando outra troca de variável $v = u - \dot{\phi}(\eta)$, obtém-se uma conexão em cascata. Este sistema é similar ao inicial, com a diferença que a primeira componente possui um ponto de equilíbrio na origem assintoticamente estável quando a entrada é igual a zero (Khalil, 2002).

No controle através do método *Backstepping*, cada subsistema deve satisfazer às condições da análise de estabilidade pela teoria de Lyapunov separadamente. Por este motivo, a função de Lyapunov utilizada para o *Backstepping* não é a função do tipo energia utilizada no controle pelo método LgV. Desta maneira, para cada subsistema, é atribuída uma candidata da função de Lyapunov adequada (Khalil, 2002).

$$V_c(\eta, \xi) = V(\eta) + \frac{1}{2}z^2 \quad (2.25)$$

$$\dot{V}_c = \frac{\partial V}{\partial \eta} \cdot [f(\eta) + g(\eta)\phi(\eta)] + \frac{\partial V}{\partial \eta} \cdot g(\eta)z + zv \leq -V(\eta) + \frac{\partial V}{\partial \eta} \cdot g(\eta)z + zv \quad (2.26)$$

Uma escolha adequada para v é a Equação 2.27

$$v = -\frac{\partial V}{\partial \eta} \cdot g(\eta) - kz, \quad k > 0 \quad (2.27)$$

Em que

$$\dot{V}_c \leq -V(\eta) - kz^2 \quad (2.28)$$

E o sistema é consequentemente assintoticamente estável. A lei de controle u pode ser descrita da seguinte forma (Khalil, 2002): (ver Equação 2.29)

$$u = \frac{\partial \phi}{\partial \eta} \cdot [f(\eta) + g(\eta)\xi] - \frac{\partial V}{\partial \eta} \cdot g(\eta) - k[\xi - \phi(\eta)] \quad (2.29)$$

O processo pode ser ajustado para sistemas com um número elevado de variáveis de estado, conforme Equação 2.30

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(\eta) + g(\eta)z_1 \\ \dot{z}_1 &= f(\eta, z_1) + g(\eta, z_1)z_2 \\ \dot{z}_2 &= f(\eta, z_1, z_2) + g(\eta, z_1, z_2)z_3 \\ &\vdots \\ \dot{z}_{k-1} &= f(\eta, z_1, z_2, \dots, z_{k-1}) + g(\eta, z_1, z_2, \dots, z_{k-1})z_k \\ \dot{z}_k &= f(\eta, z_1, z_2, \dots, z_{k-1}, z_k) + g(\eta, z_1, z_2, \dots, z_{k-1}, z_k)u \end{aligned} \quad (2.30)$$

Onde $x \in \mathfrak{R}^n$ e $z_1, z_2, \dots, z_{k-1}, z_k$ são escalares. O processo se inicia no primeiro subsistema, em que z_1 é visto como a variável de entrada. Na etapa seguinte, para o segundo subsistema, a variável z_2 é a nova variável de entrada e esse é estabilizado para uma nova candidata de função de Lyapunov que leva em consideração as variáveis de estado do subsistema em que se está trabalhando. O controle é aplicado de maneira sistemática e repetido para os subsistemas em sequência até que a entrada u seja descrita e possa ser aplicável ao sistema inicial depois de substituição para que dependa apenas de x (Khalil, 2002).

2.4 Exemplo do Pêndulo Simples

Considere o pêndulo da Figura 4.

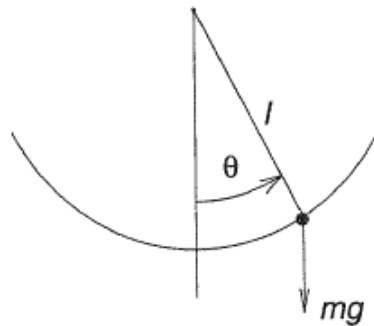


Figura 4 – Pêndulo simples. Fonte: Khalil, 2002.

Onde l é o comprimento da vara e m é a massa da esfera. Assume-se que a vara é rígida e que tem massa igual a zero. θ é o ângulo entre a vara e o eixo vertical, onde o pêndulo é livre para se mover. A esfera possui movimento circular com raio l . Utilizando-se a segunda lei de Newton, a equação do movimento na direção tangencial pode ser descrita conforme Equação 2.31 (Khalil, 2002):

$$ml\ddot{\theta} = -mg \sin(\theta) - kl\dot{\theta} \quad (2.31)$$

Onde g é constante gravitacional e k é a constante de fricção do ar.

Para a determinação do modelo, admite-se que $x_1 = \theta$ e $x_2 = \dot{\theta}$.

$$\dot{x}_1 = x_2 \quad (2.32)$$

$$\dot{x}_2 = -\frac{g}{l} \sin(x_1) - kx_2 \quad (2.33)$$

Onde os pontos de equilíbrio são encontrados da seguinte maneira:

$$0 = x_2 \quad (2.34)$$

$$0 = -\frac{g}{l} \sin(x_1) - kx_2 \quad (2.35)$$

Os pontos de equilíbrio são:

$$\begin{bmatrix} x_{1e} \\ x_{2e} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n\pi \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.36)$$

Onde n é qualquer número inteiro. A partir da descrição física do pêndulo, observa-se que há apenas dois pontos de equilíbrio – $(0, 0)$ e $(\pi, 0)$ – e os outros pontos de equilíbrio são repetições destes quando o pêndulo realiza voltas completas (Khalil, 2002). A principal diferença entre estes dois pontos consiste na sua estabilidade.

Por fins didáticos de simplificação, pode-se considerar que a constante de amortecimento $k = 0$. Isto significa dizer que a resistência de fricção é desprezada. Desconsiderando-se a constante k , o modelo reduz-se às Equações 2.37 e 2.38.

$$\dot{x}_1 = x_2 \quad (2.37)$$

$$\dot{x}_2 = -\frac{g}{l} \sin(x_1) \quad (2.38)$$

O comprimento l foi considerado de tal maneira que $g = l$. Então $\frac{l}{g} = 1$. Para estes valores, a trajetória do pêndulo simples pode ser vista na Figura 5:

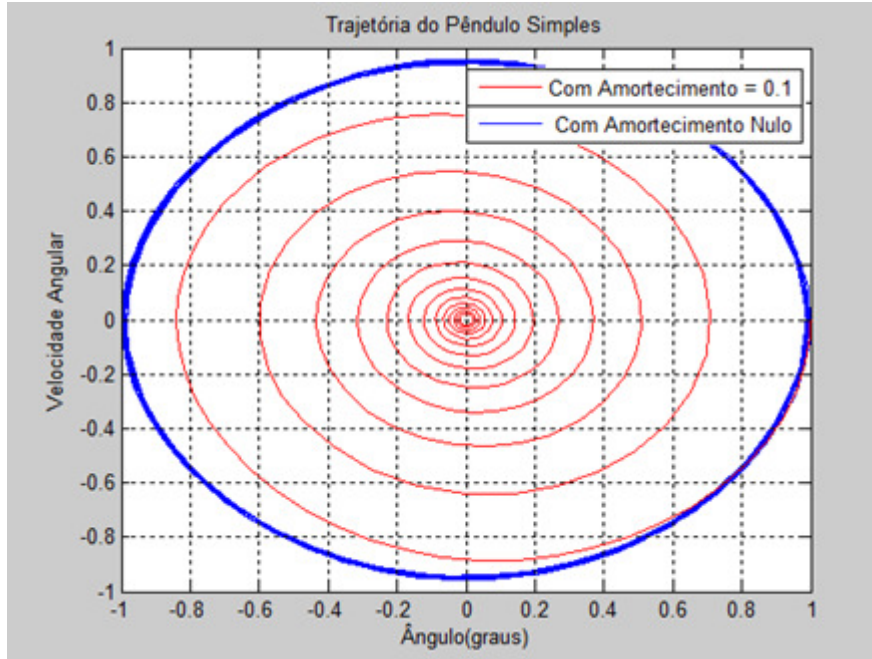


Figura 5 – Trajetória do Pêndulo Simples

Para a Figura 5, o ponto inicial é $x_0 = (1, 0)$ e o tempo inicial $t_0 = 0s$. A constante de amortecimento é de 0.1 para a trajetória em vermelho. Pode-se observar que a constante de amortecimento do sistema é fator decisivo na estabilidade assintótica, ou seja, sem ela a trajetória do modelo não converge para a origem.

Nas subseções 2.4.1 e 2.4.2 são utilizadas, respectivamente, as metodologias de controle LgV e *Backstepping* para conferir a estabilidade assintótica ao sistema sem amortecimento por fricção.

2.4.1 LgV

Adicionando-se a parcela de controle $g(x)u$ às equações 2.37 e 2.38, obtém-se:

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u \quad (2.39)$$

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix}, f(x) = \begin{bmatrix} x_2 \\ -\frac{l}{g} \sin(x_1) \end{bmatrix}, g(x) = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.40)$$

De acordo com Terrell (2009), a função de Lyapunov para o sistema do pêndulo dado pelo modelo das Equações 2.32 e 2.33 vem da equação da energia mecânica total e é igual a:

$$V(x_1, x_2) = \frac{1}{2}x_2^2 + [1 - \cos(x_1)] \quad (2.41)$$

Para obter a lei de controle u , a partir da Equação 2.13, tem-se que:

$$\varphi = -C \left(L_g V(x) \right)^T = -C \left[\frac{\partial V(x)}{\partial x} g(x) \right] = -C \left(\frac{\partial V(x)}{\partial x_1} + \frac{\partial V(x)}{\partial x_2} \right) \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.42)$$

$$\varphi = \begin{bmatrix} 0 \\ -C[x_2 + \sin(x_1)] \end{bmatrix} \quad (2.43)$$

Para garantir que o sinal de controle seja nulo quando o sistema estiver operando em um ponto de equilíbrio (ver Equação 2.14), a seguinte equação deve ser satisfeita.

$$u = C[x_{2e} + \sin(x_{1e}) - x_2 - \sin(x_1)] \quad (2.44)$$

Onde C é um parâmetro arbitrariamente escolhido de acordo com o nível de amortecimento desejado e x_{1e} e x_{2e} são os pontos de equilíbrio da Equação 2.36. A trajetória do sistema com a utilização do controle LgV pode ser visualizada na Figura 6.

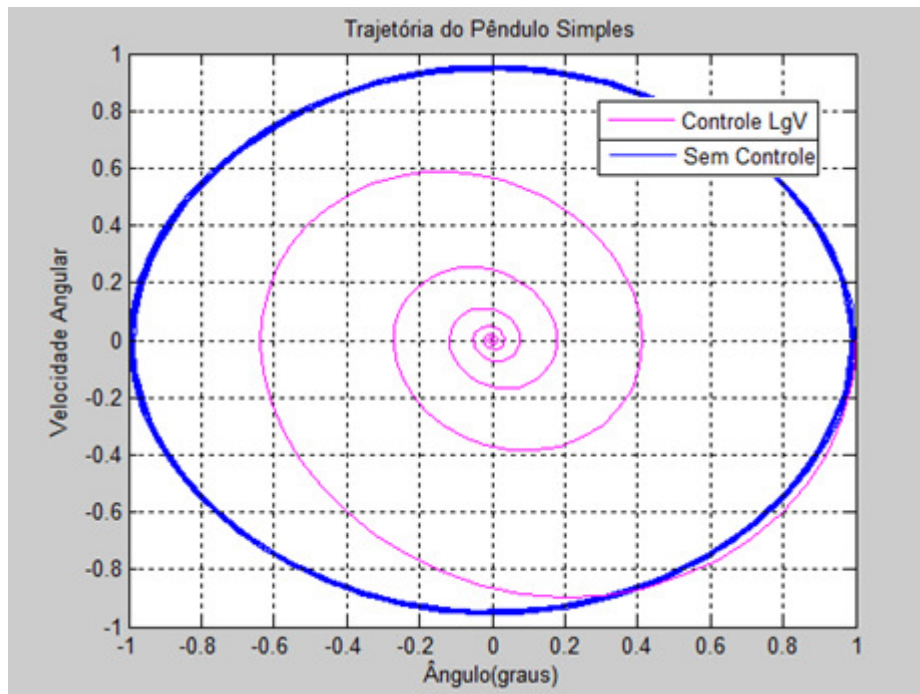


Figura 6 – Trajetória do Pêndulo Simples com Controle LgV

A trajetória da Figura 6 foi esboçada a partir da escolha de $C = 0.3$. Pode-se observar que o sistema do pêndulo simples converge ao ponto de equilíbrio na origem com uma curta trajetória.

2.4.2 Backstepping

Considera-se o mesmo modelo do pêndulo, (ver Equação 2.40).

$$\dot{x}_1 = x_2 \quad (2.45)$$

$$\dot{x}_2 = -\frac{g}{l} \sin(x_1) + u \quad (2.46)$$

Primeiramente a variável virtual v_1 é introduzida de maneira que $x_2 = v_1 = \dot{x}_1$. Então utiliza-se a função de Lyapunov candidata para o primeiro subsistema $V_1 = \frac{1}{2}x_1^2$. Para garantir os requisitos em que a derivada temporal de V_1 seja negativa definida, então

$$\dot{V}_1 = x_1\dot{x}_1 \leq -\alpha x_1^2, \quad \dot{x}_1 = -\alpha x_1 \quad (2.47)$$

Onde α é um parâmetro arbitrariamente escolhido. Uma nova variável virtual z_2 é inserida: $z_2 = x_2 - v_1$. Logo, a derivada temporal de z_2 é calculada e passa a ser o segundo subsistema do modelo.

$$\dot{x}_1 = -\alpha x_1 \quad (2.48)$$

$$\dot{z}_2 = -\frac{g}{l} \sin(x_1) + u + \alpha x_1 \quad (2.49)$$

O segundo subsistema também deve ser estabilizado, para isso, a função candidata de Lyapunov para este subsistema é $V_2 = V_1 + \frac{1}{2}z_2^2$.

$$\dot{V}_2 = -\alpha x_1^2 + z_2\dot{z}_2 = -\alpha x_1^2 + (x_2 + \alpha x_1^2) \left(-\frac{g}{l} \sin(x_1) + u - \alpha^2 x_1^2 \right) \leq -\alpha x_1^2 - \beta z_2^2 \quad (2.50)$$

Onde β é um novo parâmetro de controle a ser escolhido. Ao isolar u da Equação 2.50, o controle u é obtido (ver Equação 2.51).

$$u = \frac{-\beta z_2^2}{(x_2 + \alpha x_1^2 + \epsilon)} + \alpha^2 x_1^2 + \frac{g}{l} \sin(x_1) \quad (2.51)$$

Onde ϵ tem um valor muito pequeno em comparação às grandezas do sistema, seu único papel é garantir que o denominador do primeiro termo nunca seja zero mesmo quando o sistema estiver na origem. A trajetória do sistema com a utilização do controle *Backstepping* pode ser visualizada na Figura 7.

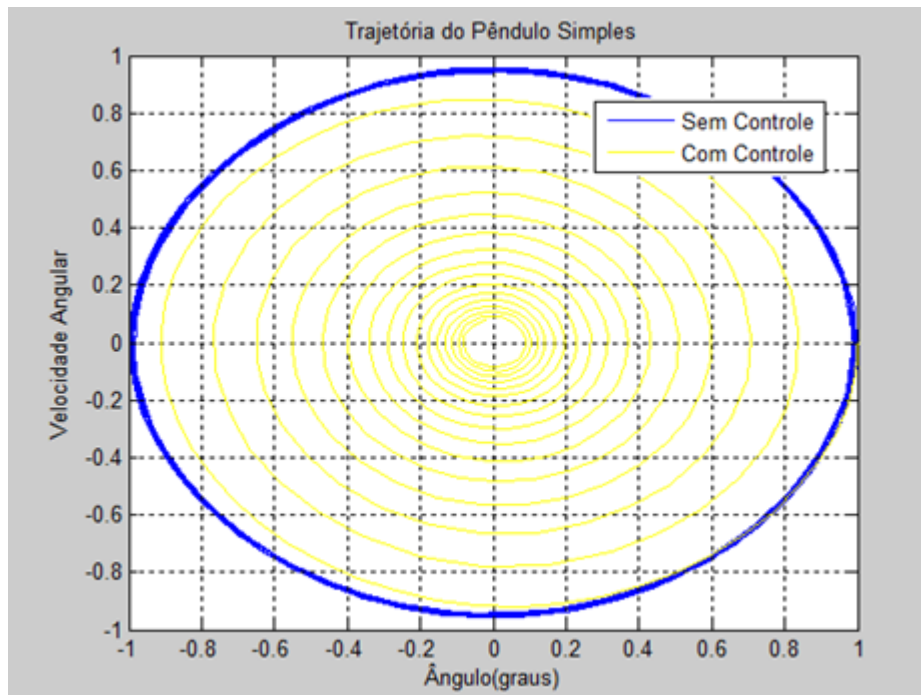


Figura 7 – Trajetória Do Pêndulo Simples com Controle *Backstepping*

A trajetória da Figura 7 foi esboçada a partir da escolha de parâmetros $\alpha = \beta = 0.1$ e $\epsilon = 0.001$. Pode-se observar que o sistema é amortecido mas que há a dificuldade de se chegar no ponto de equilíbrio estável, permanecendo em um ponto muito próximo à origem. A alteração dos parâmetros de controle α e β pode ser realizada para obter níveis desejados de amortecimento

Devido ao fato de existirem somente dois subsistemas neste modelo, apenas um passo é executado na determinação da lei de controle, pois cada passo relaciona dois subsistemas. Para um modelo com n subsistemas, a obtenção da lei de controle é dividida em $n - 1$ etapas, como é o caso do modelo do gerador síncrono trabalhado no capítulo 4, onde há 3 subsistemas e 2 passos para a determinação de u .

Parte II

Modelagem Dinâmica do Sistema

3 Análise e Controle do Problema de Estabilidade Transitória UMBI

Neste capítulo são abordados o modelamento do gerador síncrono e o problema de estabilidade transitória. Este modelo é necessário para que o comportamento do sistema possa ser previsto em condições outras que não sejam as iniciais.

3.1 Modelagem do Problema no Barramento Infinito

Os equipamentos mais complexos do sistema de potência são os geradores. Por isso, durante uma simulação numérica, o modelo do gerador deve ser bem especificado de maneira que as limitações existentes para aquela modelagem sejam conhecidas.

Segundo Jordão (1980), barramento infinito é uma fonte hipotética na qual a variação de carga não apresenta mudanças sensíveis de tensão e frequência. Ou seja, a capacidade do barramento é muito grande se comparada à potência do gerador, então o barramento absorve ou supre quantidades relativas de potência para manter a tensão e a frequência. Pode-se dizer que a inércia do barramento é muito maior do que a inércia do gerador.

O sistema UMBI – Uma Máquina Barramento Infinito – pode ser visualizado na Figura 8.

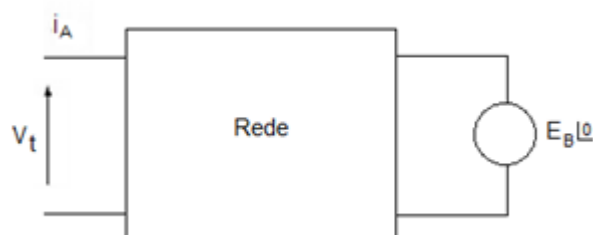


Figura 8 – Conexão Gerador – Barramento Infinito. Adaptado de Padiyar (2002)

Na Figura 8, a tensão de saída do gerador V_t está conectada ao barramento infinito através de uma rede e considera-se que a tensão no barramento infinito E_B é constante e tem defasagem nula.

De acordo com Padiyar (2002), ao analisar perturbações externas ao gerador, como problemas na linha de transmissão, a generalização do grupo gerador para um único gerador equivalente conectado ao barramento é aceitável.

Nesta seção, o sistema do gerador síncrono no barramento infinito é caracterizado com as condições necessárias para a análise de estabilidade transitória, abordada na seção posterior. O problema é considerado para os períodos pré, durante e pós-falta.

3.1.1 Princípios de Funcionamento do Gerador Síncrono

O sistema de geração de energia é um sistema eletromecânico e deve possuir essencialmente uma turbina com um eixo girante acoplado a um gerador. Os princípios de funcionamento das máquinas elétricas estão nas leis do eletromagnetismo. Um condutor exposto a um campo magnético variante no espaço ou no tempo tem induzida em seus terminais uma certa diferença de potencial. No caso do gerador, um campo magnético invariante no tempo tem seu rotor movimentado pelas turbinas, fazendo com que este campo seja variante no espaço (Kundur, 1994). A Figura 9 ilustra este mecanismo.

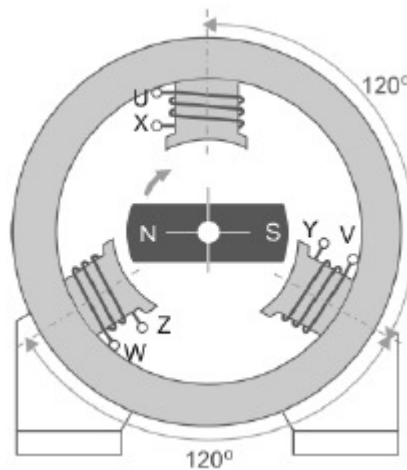


Figura 9 – Rotor girante e estator de um gerador. Fonte: (Karimi,2008).

O movimento causado pelas turbinas provoca a rotação do rotor ao centro do estator da Figura 9, que passa a ter uma tensão em seus enrolamentos trifásicos.

Quando o gerador é conectado a uma carga através da rede elétrica, o processo se resulta em fornecimento de potência para aquela carga. A potência, denominada potência aparente, é representada por um valor complexo e possui uma parte ativa, descrita como a componente real, e uma parte reativa, a componente imaginária. O envio de potência ativa sempre deve ser ajustado no gerador de maneira a fornecer uma potência aparente determinada a uma carga que possui variações de ângulo interno de defasagem. O sistema de controle tem um papel fundamental neste processo. (Kundur, 1994)

3.1.2 Modelo do Gerador Síncrono para o Caso do Barramento Infinito

Para utilizar as equações básicas da máquina síncrona retiradas de Padiyar (1996), é preciso assumir que:

1. A força magnetomotriz (mmf) no entreferro está distribuída senoidalmente;
2. Os harmônicos são negligenciados;
3. A saliência está restrita ao rotor; e
4. A saturação magnética e a histerese não são consideradas.

Seguindo a convenção, as correntes são assumidas como deixando a bobina nos terminais e a tensão nesses terminais vai caindo na direção da corrente para o caso do gerador. Na Figura 10 pode-se observar a representação do gerador síncrono.

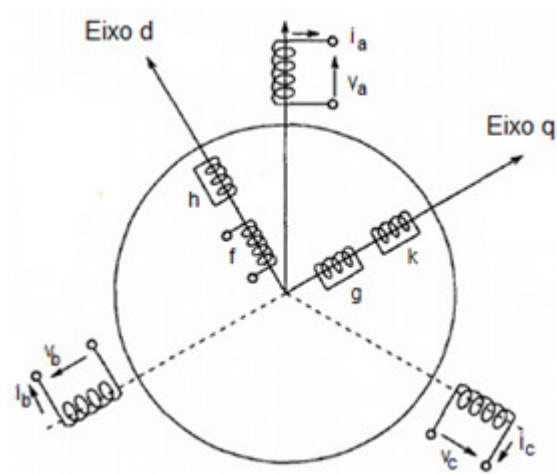


Figura 10 – Representação do Gerador Síncrono. Fonte: Adaptado de Padiyar (1996)

No gerador da Figura 10, há três enrolamentos de armadura a , b e c no estator e quatro enrolamentos no rotor: o enrolamento de campo f e os enrolamentos amortecedores g , h e k . Para efeitos de análise, é adotado o gerador com apenas uma bobina amortecedora – bobina k no eixo q (Padiyar, 1996).

No estudo de máquinas elétricas, a utilização de transformadas entre eixos de referência é bastante importante na análise e implementação de sistemas de controle. As transformadas de Clarke e de Park tornam possível a representação de variáveis trifásicas com defasagem de 120° por outras variáveis bifásicas defasadas de 90° em eixos de referência estacionários e girantes – eixos d e q (Kundur, 1994).

As correntes nos eixos a , b e c são transformadas para o eixo de quadratura e direto a partir de uma relação com a matriz de Park \mathbf{P} .

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 1 \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Onde

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_q \\ \dot{i}_d \\ \dot{i}_0 \end{bmatrix} = \mathbf{P}^{-1} \begin{bmatrix} \dot{i}_a \\ \dot{i}_b \\ \dot{i}_c \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

$$\mathbf{P}^{-1} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \sin(\theta) & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

O sistema é de natureza eletromecânica. Por isso, vários fenômenos em diferentes partes do gerador devem ser contabilizados para o equacionamento final.

a) Equações elétricas

O fluxo concatenado no estator e no rotor são respectivamente:

$$\psi_S = [L_{SS}]i_S + [L_{SR}]i_R \quad (3.4)$$

$$\psi_R = [L_{RR}]i_R + [L_{SR}]i_S \quad (3.5)$$

Onde as correntes são vetores e as indutâncias são matrizes relacionando os eixos existentes e as bobinas amortecedoras. A partir da transformação para dois eixos apresentada na Figura 10, segue que (Padiyar, 1996):

$$\psi_d = x_d i_d + x_{ad} i_f \quad (3.6)$$

$$\psi_f = x_f i_f + x_{ad} i_d \quad (3.7)$$

$$\psi_q = x_q i_q + x_{aq} i_g \quad (3.8)$$

$$\psi_g = x_g i_g + x_{aq} i_q \quad (3.9)$$

E as tensões nos dois eixos de interesse são:

$$E'_q = \frac{x_{ad}\psi_f}{x_f} \quad (3.10)$$

$$E'_d = -\frac{x_{aq}\psi_g}{x_g} \quad (3.11)$$

Fazendo uma substituição nas equações anteriores, pode-se obter:

$$\frac{dE'_q}{dt} = \frac{1}{T_d} \left[-E'_q + (x_d - x'_d)i_d + E_{fd} \right] \quad (3.12)$$

$$\frac{dE'_d}{dt} = \frac{1}{T_q} \left[-E'_d - (x_q - x'_q)i_q \right] \quad (3.13)$$

Em que

$$E_{fd} = \frac{x_{ad}}{R_f} v_f \quad (3.14)$$

$$T_d = \frac{x_f}{\omega_b R_f} \quad (3.15)$$

$$T_q = \frac{x_g}{\omega_b R_g} \quad (3.16)$$

Neste momento, para incluir a influência da rede no sistema, considere a Figura 8 e admita que a caixa da rede seja composta por uma resistência R_l e uma indutância x_l . Então a tensão terminal é dada por:

$$V_t = v_q + j v_d \quad (3.17)$$

Em que

$$v_q = R_l i_q - x_l i_d + E_B \cos(\theta) \quad (3.18)$$

$$v_d = R_l i_d - x_l i_q - E_B \sin(\theta) \quad (3.19)$$

E θ é o ângulo de defasagem entre a tensão terminal e a tensão do barramento infinito. Considerando que a linha de transmissão possui resistência desprezível, as correntes em cada eixo são descritas como:

$$i_q = \frac{E_B \sin(\theta) + E'_d}{x'_q + x_l} \quad (3.20)$$

$$i_d = \frac{E_B \cos(\theta) - E'_q}{x'_d + x_l} \quad (3.21)$$

Além disso, a potência ativa de saída, elemento básico na análise eletromecânica, pode ser descrito da seguinte maneira, em *pu* (Padiyar, 1996):

$$P_e = v_d i_d + v_q i_q + 2 v_0 i_0 \quad (3.22)$$

Para bobinas conectadas em estrela sem a presença de neutro, $i_0 = 0$. Reescrevendo a equação em termos de E'_q

$$P_e = \frac{E'_q V_t}{x'_d} \sin(\theta) + \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x'_d} \right) \frac{V_t^2}{2} \sin(2\theta) \quad (3.23)$$

Semelhanamente para a potência reativa

$$Q = \frac{E'_q V_t}{x'_d} \cos(\theta) - \left(\frac{1}{x_q} + \frac{1}{x'_d} \right) \frac{V_t^2}{2} + \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x'_d} \right) \frac{V_t^2}{2} \cos(2\theta) \quad (3.24)$$

b) Equações mecânicas

Em relação à parte mecânica do comportamento da máquina, para Padiyar (1996), se a inércia da turbina for associada ao gerador, a expressão para o torque pode ser considerada da seguinte maneira:

$$M \frac{d^2 \theta_m}{dt^2} + D \frac{d\theta_m}{dt} = T_m - T_e \quad (3.25)$$

Os ângulos mecânico e elétrico se relacionam da seguinte forma, onde P é o número de polos:

$$\theta_m = \frac{2}{P} \theta_e \quad (3.26)$$

A partir destas equações, o modelo do gerador pode ser encontrado. O torque pode ser descrito como:

$$T_e = E'_d i_d + E'_q i_q + (x'_d - x'_q) i_d i_q \quad (3.27)$$

Utilizando o eixo de referência do rotor, o ângulo do rotor é chamado de δ . O modelo fica:

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega \quad (3.28)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{M} [-D\omega + T_m - T_e] \quad (3.29)$$

$$\frac{dE'_q}{dt} = \frac{1}{T_d} [-E'_q + (x_d - x'_d) i_d + E_{fd}] \quad (3.30)$$

$$\frac{dE'_d}{dt} = \frac{1}{T_q} [-E'_d + (x_q - x'_q) i_q] \quad (3.31)$$

Ou, substituindo as Equações 3.20, 3.21 e 3.27 nas Equações 3.28 a 3.31:

$$\dot{x}_1 = x_2 \quad (3.32)$$

$$\dot{x}_2 = \frac{1}{M} [-Dx_2 + T_m - x_4 \cdot \kappa - x_3 \cdot \mu - (x'_d - x'_q) \cdot \kappa \cdot \mu] \quad (3.33)$$

$$\dot{x}_3 = \frac{1}{T_d} \left[-x_3 \left(\frac{x_d - x'_d}{x_l + x'_d} + 1 \right) + \frac{x_d - x'_d}{x_l + x'_d} E_B \cos(x_1) + E_{fd} \right] \quad (3.34)$$

$$\dot{x}_4 = \frac{1}{T_q} \left[-x_4 \left(\frac{x_q - x'_q}{x_l + x'_q} + 1 \right) + \frac{x_q - x'_q}{x_l + x'_q} E_B \sin(x_1) \right] \quad (3.35)$$

Onde

$$\kappa = \frac{E_B \cos(x_1) - x_3}{x_l + x'_d} \quad (3.36)$$

$$\mu = \frac{E_B \sin(x_1) - x_4}{x_l + x'_q} \quad (3.37)$$

E as variáveis de estado x_1 , x_2 , x_3 e x_4 são:

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta \\ \omega \\ E'_q \\ E'_d \end{bmatrix} \quad (3.38)$$

A potência mecânica e a tensão de campo são entradas do sistema. A tensão de campo é constante quando não há um sinal de controle. A corrente de eixo e a potência elétrica dependem das conexões externas da máquina.

O domínio de validade do modelo é limitado por algumas considerações físicas. Sabendo-se que a tensão do eixo em quadratura é proporcional à magnitude do campo magnético concatenado no rotor, seu valor deverá ser sempre positivo. Outro fator físico que limita o comportamento da máquina é o fato de que esta não admite escorregamento de pólos durante operação normal. Assim, não se admite que o ângulo ultrapasse os limites de $\pm\pi$. A região do modelo é dada por (Bazanella, 1997):

$$\mathcal{R} = \{x \in \mathbb{R}^3 : \delta \in [-\pi, \pi]; E'_q > 0\} \quad (3.39)$$

O ideal é que, mesmo com esta abrangência de angulação, o sistema opere a ângulos menores que 90° .

3.2 A Estabilidade Transitória

De modo geral, estabilidade relacionada a sistemas elétricos de potência está associada à propriedade de permanência de um estado de equilíbrio em condições padrões de operação deste sistema mesmo que ocorra uma perturbação de caráter transitório (Costa & Silva, 2000).

Segundo Costa & Silva (2000), sistemas elétricos de geração, quando avaliados em uma larga escala de tempo denominada regime permanente, são operados em equilíbrio entre o torque mecânico que entra nas turbinas e o torque elétrico na saída de cada máquina.

Para Machowsk *et al.* (2008), geradores síncronos, utilizados em sua grande maioria em hidrelétricas e termoelétricas, operam com uma velocidade de rotação constante

sincronizada com a tensão elétrica alternada. Em outras palavras, existe uma sincronia entre o campo do rotor e do estator. Esta sincronização com a rede reflete também em uma sincronização com os outros geradores que possam estar no sistema. O sincronismo existente no sistema é o principal item avaliado no estudo da estabilidade transitória (Machowsk *et al.*, 2008).

Para que um gerador seja conectado a um barramento infinito no qual existam outros geradores e cargas conectadas, existem alguns requisitos de sincronização. O gerador precisa apresentar a mesma tensão eficaz, mesma sequência de fases do sistema externo e também tensões instantâneas iguais em cada par de terminais a serem interligados. De uma maneira geral, a estabilidade pode ser classificada conforme a Figura 11.

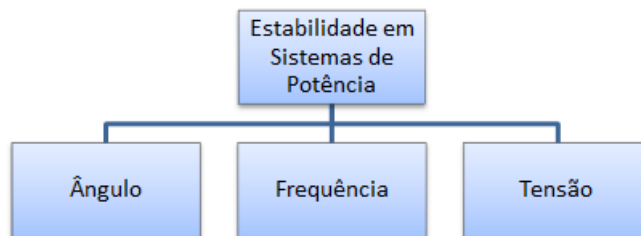


Figura 11 – Classificação de estabilidade.

Quando a perturbação ocorre, há uma discrepância entre as potências elétrica e mecânica do sistema. Um gerador pode então acelerar em relação a outro, causando a perda de sincronismo. A separação da posição angular do rotor pode ainda crescer mais se o sistema não absorver energia cinética suficiente devido ao desvio de velocidade (Padiyar, 1996).

A prevenção da perda de sincronismo em um sistema de potência elétrico depois de uma perturbação transitória é essencial para o funcionamento da central de geração. Os sistemas de potência possuem vários modos de oscilação devido à interação de seus componentes, como disjuntores e transformadores. O crescimento dessas oscilações é origem da perda de sincronismo no grupo gerador (Costa & Silva, 2000).

De acordo com Karimi (2008), para se ter um sistema de geração confiável, a rede precisa ser capaz de resistir a perturbações, permanecendo em uma determinada faixa de condições pré-estabelecidas. Para Kundur (1994), Estabilidade transitória é a habilidade de um sistema de potência de manter o sincronismo quando sujeito a perturbações transitórias. A estabilidade depende tanto do estado de operação inicial quanto da severidade da perturbação. Por vezes, as perturbações estudadas para o controle de geradores síncronos incluem perda na conexão de subsistemas, curto-circuito na linha de transmissão ou até mesmo a perda de grandes geradores. Pode-se também citar a perda de carga como causadora de curto-circuito. O curto-circuito pode ser entre uma fase e o neutro, entre duas fases e o neutro ou até mesmo entre as três fases do sistema de transmissão ou

barramento.

Segundo Kundur (1994), a estabilidade é influenciada por características não lineares e o sistema pode responder a uma falta alterando suas variáveis tais como a tensão do barramento, o ângulo do rotor do gerador e o fluxo de potência. Se as características de funcionamento permanecem num determinado limite, o sistema continua em sincronismo. A perda de sincronismo pode ser notada a partir de 2 segundos da falta, e por isso se enquadra em estabilidade transitória (0 a 10 segundos).

O sistema responde a uma perturbação através de dispositivos de proteção instalados, como por exemplo os relés. Este dispositivo é utilizado para a isolação de área, geralmente crítica para a operação, causando variação de fluxo de potência e de velocidade no rotor das máquinas. O desempenho do sistema é diretamente afetado pelo uso de equipamentos de proteção. Por isso, a análise da perturbação e a ação de controle geralmente é feita com o foco específico no tipo instabilidade gerada (Costa & Silva, 2000).

Existe uma série de fatores que influenciam a estabilidade transitória. Os fatores clássicos relacionados são: a carga do gerador; a saída do gerador no momento da falta, dependência do tipo de falta e sua localização; a reatância do sistema de transmissão após a falta; o tempo de eliminação da falta; a reatância do gerador; a inércia do gerador; a excitação da corrente de campo (magnitude da tensão interna do gerador); e a magnitude da tensão do barramento infinito. (Kundur, 1994)

A excitação da corrente de campo do gerador é o parâmetro mais maleável para recuperação do equilíbrio do sistema. Outros fatores como a magnitude da tensão do barramento, a inércia e a reatância do gerador são características previamente definidas e não permitem variação em sua magnitude durante a perturbação.

De acordo com Hingorani (1993), existem dispositivos baseados em altas tensão e potência. Eles são capazes de aumentar a controlabilidade do fluxo de potência e da tensão garantindo a estabilidade do sistema. Estes dispositivos são chamados de FACTS, *Flexible Alternating Current Transmission System*. Segundo Costa & Silva (2000), para a instalação de tais dispositivos, é necessário que o sistema seja flexível. Sistemas flexíveis são aqueles em que os dispositivos não estão conectados rigidamente entre si, havendo a possibilidade de adição de equipamentos ao longo destas conexões. Eventuais impactos podem ser absorvidos com o uso destes equipamentos, no entanto, sozinhos, eles por muitas vezes não proporcionam as margens de estabilidade necessárias.

3.2.1 Controle de Excitação

Existem acoplados ao geradores síncronos sistemas de controle de excitação. Eles foram desenvolvidos com o objetivo de evitar a perda de sincronismo da máquina. O controle de excitação do gerador síncrono age intervindo na potência reativa entre as má-

quinas ligadas ao sistema. Este controle pode também atuar melhorando o amortecimento das oscilações eletromecânicas. (Padiyar, 1996)

Um sistema completo de excitação possui circuitos de proteção, sensores na saída, estabilizadores e um regulador, que compara os dados obtidos com uma dada referência. Este regulador envia o sinal para o excitador, que está ligado ao gerador. Na figura 2.3, pode-se observar o mecanismo de um excitador DC separado que gera uma corrente de campo, responsável pela tensão do enrolamento de armadura do gerador. A saída E_X depende da velocidade e das configurações de enrolamento da armadura do excitador. Ela apresenta uma relação não linear com a corrente de campo, mas pode ser considerada linear em uma determinada faixa de abrangência onde é utilizada (Padiyar, 1996).

Existem três principais tipos de sistemas excitadores: de corrente direta, de corrente alternada ou por transformadores ou enrolamentos indutivos no gerador. Eles apresentam funções auxiliares como sensores de tensão, compensadores de carga, estabilizadores, limites mínimo e máximo de excitação e controle do fator de potência (Kundur, 1994).

Os reguladores podem ser divididos em regulador de tensão e regulador de velocidade. O regulador de tensão é o dispositivo que tem a função de controlar a corrente de campo da saída da excitatriz para adequação da tensão terminal e da potência reativa no gerador síncrono. Já o regulador de velocidade tem a função de controlar a velocidade da turbina para que a frequência da tensão terminal do gerador seja adequada. Um sistema de geração de energia como uma hidroelétrica precisa de reguladores para o seu bom funcionamento e estabilidade pois está sujeito a grandes variações de carga (Costa & Silva, 2000). A Excitação do gerador síncrono é feita como ilustra a Figura 12.

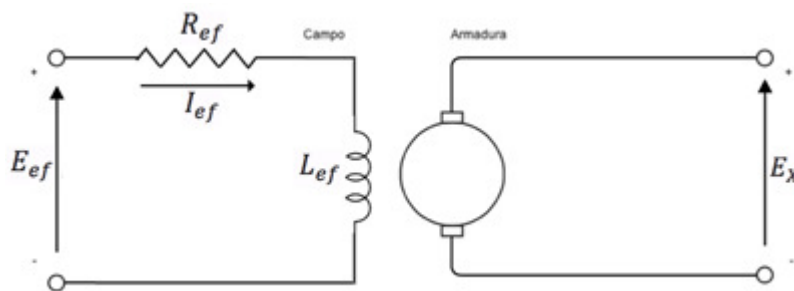


Figura 12 – Sistema de excitação DC separado. Adaptado de Kundur (1994)

Na Figura 12, a tensão de campo E_{ef} gera uma corrente de campo i_{ef} que induz uma tensão no enrolamento de armadura do gerador

O modelo do sistema de potência é não linear. Para uma análise mais precisa do sistema, adota-se um método de controle compatível com as não linearidades do sistema. Dentre os métodos de controle baseados na estabilidade de Lyapunov mais comuns, encontram-se o LgV, *Nonlinear Damping*, *Backstepping* e o *Sliding Mode Control*. Tam-

bém é usado o controlador DFL (Direct Feedback Linearization), capaz de linearizar o modelo implementando leis de compensação de não linearidade (Karimi, 2008). No presente trabalho são analisados os métodos LgV e *Backstepping*.

Parte III

Projeto de Controladores e Resultados

4 Projeto de Controle de Excitação

Neste capítulo, o controle por realimentação baseado nos métodos LgV e *Backstepping* de obtenção da lei de controle é utilizado para o caso do gerador síncrono discutido no capítulo anterior.

O controle se dá na tensão de campo E_{fd} através do sistema excitador. A tensão passa a ser influenciada pela entrada e deixa de ser uma constante. Por tanto ela é dividida em E (parte constante) e u (parte variável de controle na malha fechada).

O sistema passa a ser descrito por:

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega \quad (4.1)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{M} [-D\omega + T_m - T_e] \quad (4.2)$$

$$\frac{dE'_q}{dt} = \frac{1}{T_d} [-E'_q + (x_d - x'_d)i_d + E + u] \quad (4.3)$$

$$\frac{dE'_d}{dt} = \frac{1}{T_q} [-E'_d + (x_q - x'_q)i_q] \quad (4.4)$$

4.1 Controle pelo Método LgV

Se depois da falta, o estado cair a região de validade da função de Lyapunov, o sistema eventualmente irá para o ponto de equilíbrio. Para utilizar o método, é preciso encontrar a função de Lyapunov.

A relação de transferência de energia mecânica e elétrica no gerador pode ser usada para a formulação da função de Lyapunov do gerador síncrono.

Em Métodos Analíticos para a Síntese de Controladores em Sistemas de Potência (1997), Bazanella propõe um projeto de controle para o sistema do gerador síncrono *versus* barramento infinito por método não linear, considerando o modelo clássico do gerador. O autor aborda o modelo e faz sua análise de estabilidade através de uma função de Lyapunov do tipo energia. Para chegar nesta função, Bazanella considera que se trata de uma máquina de rotor liso e que há regulador de tensão. No presente trabalho, o modelo trabalhado é o de dois eixos e a função de Lyapunov de Bazanella (1997) é utilizada como

uma aproximação, como segue:

$$V(x_1, x_2, x_3) = \frac{1}{2}x_2^2 + b_1x_3[\cos(x_1) - \cos(x_{e1})] - P(x_1 - x_{e1}) + \frac{b_1b_3}{2b_2}(x_3 - x_{e3})^2 \quad (4.5)$$

Onde b_1 , b_2 e b_3 são parâmetros do gerador apresentados no apêndice A.

Devido ao fato de que a energia do sistema deve permanecer menor do que a energia do ponto de equilíbrio instável, esta função é definida positiva para a região:

$$\mathcal{B} = \{x \in \mathfrak{R}^3 : V(x) < V(x_e^i)\} \quad (4.6)$$

A derivada temporal da função é (Bazanella, 1997):

$$\dot{V}(x_1, x_2, x_3) = -\frac{b_1}{b_2}[-b_2(\cos(x_1) - \cos(x_{e1})) + b_3(x_3 - x_{e3})]^2 - Dx_2^2 \quad (4.7)$$

Onde $\dot{V} = 0$, para uma região:

$$\mathcal{M} = \{x \in \mathfrak{R}^3 : -b_2(\cos(x_1) - \cos(x_{e1})) + b_3(x_3 - x_{e3}) = 0; x_2 = 0\} \quad (4.8)$$

Sendo válida também $\dot{V} \leq 0 \forall x \in \mathfrak{R}^3$. O ponto de equilíbrio instável pertence a este conjunto, porém não pertence ao conjunto \mathcal{B} . Por este motivo, o ponto de equilíbrio estável é o único que tem sua estabilidade assintótica estabelecida. \mathcal{B} é uma estimativa da região de estabilidade (Bazanella, 1997).

Para a mesma função de Lyapunov abordada, a lei de controle extraída de Bazanella é igual a:

$$\varphi(x) = b_2 \cos(x_1) - b_3x_3 \quad (4.9)$$

E, de acordo com a Equação 2.14,

$$u = C[\varphi(x) - \varphi(x_e^0)] = C[b_2 \cos(x_1) - b_3x_3] - C[b_2 \cos(x_{e1}^0) - b_3x_{e3}^0] \quad (4.10)$$

Onde C é uma constante arbitrariamente escolhida.

O controle é então projetado a partir de sinais de entrada do ângulo do rotor e da tensão do eixo de quadratura (x_1 e x_3). Na prática, o eixo de quadratura não existe, ele é considerado como uma aproximação a partir de uma transformação de coordenadas reais para simplificar os cálculos. Entretanto, é possível fazer uma estimativa dos dados não mensuráveis diretamente utilizando observadores de estado (Johansson, 2001).

4.2 Controle pelo Método *Backstepping*

Para evitar a manipulação algébrica de alguns termos do modelo apresentado, as constantes que multiplicam as variáveis das equações foram substituídas por a , b , c , d , e , f , g , h e i , como segue:

$$\dot{x}_1 = x_2 \quad (4.11)$$

$$\dot{x}_2 = -ax_2 + bP_m - cx_3 \sin(x_1) - d \sin(x_1) \cos(x_1) \quad (4.12)$$

$$\dot{x}_3 = -ex_3 + f \cos(x_1) + gu \quad (4.13)$$

$$\dot{x}_4 = -hx_4 + i \sin(x_1) \quad (4.14)$$

Onde u é a lei de controle, e os coeficientes a, b, c, d, e, f, g, h e i estão descritos no Apêndice A.

Como a lei de controle atua na derivada da terceira variável de estado, o quarto subsistema, não é considerado para a obtenção de u . No entanto, a tensão no eixo D ainda será representada e analisada após a adição do controle. O modelo a ser utilizado é o mesmo do método LgV, de maneira que a comparação possa se dar da melhor forma possível. Por isso, as mesmas considerações físicas do método LgV são aplicadas. Desta maneira, o modelo final para o qual a metodologia *Backstepping* é aplicada é:

$$\dot{x}_1 = x_2 \quad (4.15)$$

$$\dot{x}_2 = -ax_2 + bP_m - cx_3 \sin(x_1) \quad (4.16)$$

$$\dot{x}_3 = -ex_3 + f \cos(x_1) + gu \quad (4.17)$$

Em que :

$$\begin{aligned} f_1(x_1) &= 0 \\ g_1(x_1) &= 1 \\ f_2(x_1, x_2) &= -ax_2 + bP_m \\ g_2(x_1, x_2) &= -cx_3 \sin(x_1) \\ f_3(x_1, x_2, x_3) &= -ex_3 + f \cos(x_1) \\ g_3(x_1, x_2, x_3) &= g \end{aligned} \quad (4.18)$$

4.2.1 A Obtenção da Lei de Controle

A obtenção da lei de controle envolve a criação de variáveis virtuais v e z , como já foi explicado no capítulo 2 deste documento. Para o sistema de três equações diferenciais, dois passos são necessários para a identificação do controle adequado (Khalil, 2002).

Passo 1:

O passo 1 consiste em adicionar as variáveis virtuais que auxiliam na aplicação da metodologia para relacionar os dois primeiros subsistemas.

Para começar o processo de obtenção do controle, utiliza-se a variável virtual $\dot{x}_1 = v_1 = x_2$ aplicada ao primeiro subsistema. Utilizando a candidata da função de Lyapunov $V_1 = \frac{1}{2}x_1^2$, então:

$$\dot{V}_1 = x_1\dot{x}_1 = -\lambda x_1^2 \quad (4.19)$$

E $\dot{x}_1 = -\lambda x_1$, onde λ é um número positivo. Fazendo uso de uma nova variável virtual em que:

$$\begin{aligned} z_2 &= x_2 - v_1 \\ \dot{z}_2 &= x_2 + \lambda x_1 \\ \dot{z}_2 &= -\alpha x_2 + bP_m - c x_3 \sin(x_1) - \lambda x_1^2 \end{aligned} \quad (4.20)$$

Deve-se agora impor as condições de estabilidade de Lyapunov para o segundo subsistema ($\dot{z}_2 = -\alpha x_2 + bP_m - c x_3 \sin(x_1) - \lambda x_1^2$). Por isso, para este subsistema, deve haver uma função de Lyapunov que obedeça às restrições de positividade abordadas no capítulo 2. Uma nova candidata à função de Lyapunov é sugerida da mesma maneira que foi feito para o primeiro subsistema $\dot{x}_1 = x_2$. A seguinte candidata a função de Lyapunov é proposta: $V_2 = V_1 + \frac{1}{2}z_2^2$. Para garantir as condições de convergência ao ponto de equilíbrio, $\dot{V}_2 = x_1\dot{x}_1 + z_2\dot{z}_2 = -\lambda x_1^2 - \alpha z_2^2$. A variável de estado x_3 é considerada como a entrada de controle do segundo subsistema. Outra variável virtual é descrita, de maneira que $\dot{x}_2 = v_2 = x_3$.

Passo 2:

O passo dois consiste na relação entre os segundo e terceiro subsistemas de maneira sistemática similarmente ao passo 1. Assim:

$$z_3 = x_3 - v_2 \quad (4.21)$$

Mais uma vez, deve ser eleita uma nova candidata de função de Lyapunov conveniente para a metodologia. $V_3 = V_2 + \frac{1}{2}z_3^2$ e $\dot{V}_3 = x_1\dot{x}_1 + z_2\dot{z}_2 + z_3\dot{z}_3 = -\lambda x_1^2 - \alpha z_2^2 - \sigma z_3^2$. Por isso, $\dot{z}_3 = -\sigma z_3$. No processo de cálculo da derivada temporal de z_3 , o fator u aparece. Ao isolá-lo, obtém-se:

$$u = \frac{1}{g} \left[-\sigma z_3 + e x_3 - f \cos(x_1) - \dot{v}_2(x_1, x_2, x_3, a, b, c, e, f, \lambda, \alpha) \right] \quad (4.22)$$

Após as substituições de z_3 e \dot{v}_2 por funções de x_1 , x_2 e x_3 , a seguinte lei de controle é obtida:

$$\begin{aligned} u = \frac{1}{g} \left\{ -\sigma \left[x_3 - \alpha(x_2 + \lambda x_1) + \frac{ax_2 - bP_m}{c \sin(x_1)} \right] - f \cos(x_1) \right. \\ \left. + (\alpha + a)^2 \left(-ax_2 + P_m - c x_3 \sin(x_1) \right) + e x_3 + \alpha \lambda^2 x_1 + \right. \\ \left. \frac{1}{c} (ax_2 - bP_m) \left(\lambda x_1 \cot(x_1) \csc(x_1) \right) \right\} \end{aligned} \quad (4.23)$$

Onde os parâmetros λ , α e σ podem ser escolhidos de acordo com a configuração desejada do sistema. Esta lei de controle conta com a entrada das três variáveis: ângulo do rotor, desvio de velocidade síncrona e também tensão do eixo de quadratura (x_1 , x_2 e x_3). Mais uma vez deve-se fazer uso de observadores de estado para sua utilização.

4.3 Resultados Esperados

Os métodos de controle são empregados com o objetivo de manter os sistemas em características desejáveis e podem promover diferentes resultados.

4.3.1 LgV

O controle LgV é um método de controle que atende às restrições da análise de Lyapunov e é desenvolvido a partir da própria função de Lyapunov do sistema ao invés de candidatas virtuais. Uma vez que a função de Lyapunov é conhecida, o controlador LgV pode ser naturalmente utilizado.

Para melhorar seu rendimento, foi proposta uma adaptação no método LgV em *Stabilization of nonlinear systems via forwarding mod {LgV}* de Praly *et al.* (2001). O controle encontrado não foi aplicável com sucesso ao sistema, tendo que ser readaptado para um bom funcionamento. A estabilidade não pôde ser garantida para operação em condições dos limites de saturação dos sistemas.

A manipulação da etapa de reconhecimento da função de Lyapunov para o método LgV não é viável para quaisquer sistemas não lineares genéricos. Por isso, deve-se ter um cuidado muito grande na hora de projetar a lei de controle. O controlador LgV é um método de controle bem conhecido, mas que possui, por vezes, um retorno não satisfatório quanto ao aumento da margem de estabilidade e amortecimento dos sistemas dinâmicos. (Bazanella, Kokotovic e Silva, 1991)

Além disso, no próprio trabalho de Bazanella (*Métodos Analíticos para Síntese de Controlados em Sistema de Potência*) utilizado como suporte para a utilização do controlador LgV, este se mostrou menos eficiente do que diversos outros métodos, como por exemplo a linearização do sistema. Diante destas informações, espera-se o controlador LgV promova um parcial amortecimento e aumento nas margens de estabilidade no modelo apresentado.

4.3.2 Backstepping

Segundo Zamani *et al.* (2011), o procedimento sistemático recursivo do *Backstepping* é bem estudado na literatura para estabelecer a estabilidade global em cascata através de realimentação. Para este tipo de aproximação cada passo requer a construção de

uma função de Lyapunov característica. O incremento do controle recursivo pode também ser construído na entrada pela manipulação da função de Lyapunov alternativamente ao método tradicional da entrada u . Este método também mostrou-se eficiente em estudo já realizado (Jankovic, 1996). Métodos que utilizam *Backstepping* podem ser extremamente flexíveis às características do sistema e evitam maiores restrições de controle (Freeman e Primbs, 2001).

O controlador *Backstepping* possui utilidade diante de sistemas de diversas origens. Ele é usado também para controle de concentrações em sistemas biológicos e apresenta um comportamento performance aceitável diante de um vasto intervalo de operação (Toroghi et al., 2013).

Os sistemas controlados por excitação em realimentação pelo método *Backstepping*, em geral, apresentaram resultados positivos desejáveis quanto ao aumento na margem de estabilidade e amortecimento (Nemmour et al., 2010, Zamani et al., 2011). Por este motivo, espera-se que a utilização desse cause os mesmos efeitos positivos no sistema relativo ao gerador síncrono *versus* barramento infinito.

5 Resultados Obtidos

Neste capítulo são apresentados os resultados das simulações no *software* MatLab de um gerador síncrono *versus* barramento infinito. O objetivo destas simulações é avaliar o comportamento das variáveis do sistema de potência na ocorrência de duas situações de perturbação com a utilização das leis de controle.

Para realizar a simulação, as constantes internas do gerador síncrono foram retiradas de Padiyar (1996). O ponto inicial de operação é o próprio ponto de equilíbrio, que pode ser representados como:

$$x_e = \begin{bmatrix} x_{e1} \\ 0 \\ x_{e3} \\ x_{e4} \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

O ponto foi encontrado através do método de Newton-Raphson. O método de Newton-Raphson consiste em uma iteração linear em que se utiliza a adição de incrementos e a derivada conhecida da função a partir de um ponto inicial para achar as raízes da equação. O método foi aplicado à equação. Os parâmetros do sistema foram definidos com os dados apresentados no Apêndice A. Para esses dados, tem-se que o ponto de equilíbrio estável é:

$$x_e = \begin{bmatrix} 1.0884 \text{ rad} \\ 0 \\ 1.0993 \text{ pu} \\ -0.2313 \text{ pu} \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

Abordadas nas próximas seções, duas perturbações distintas foram aplicadas ao sistema. As perturbações são:

- A) Um curto em uma das duas linhas de transmissão de energia do gerador para o barramento infinito; e
- B) Um curto perto do barramento infinito.

Os problemas identificados têm como origem uma falta transitória. Desta maneira, antes da perturbação, o sistema apresenta um comportamento determinado no estado estacionário a partir de informações e contantes de operação conhecidas. Considerando que a falta se inicie no momento $t = 5s$, a falta é então eliminada em um tempo t_{curto} através da atuação de mecanismos de proteção. A equação do sistema pode ser considerada

como:

$$\dot{x}(t) = \begin{cases} f_i(x(t)), & \text{para } -\infty \leq t < 5s \\ f_d(x(t)), & \text{para } 5s < t \leq 5s + t_{\text{curto}} \\ f_f(x(t)), & \text{para } 5s + t_{\text{curto}} < t < \infty \end{cases} \quad (5.3)$$

onde os subíndices representam as diferentes funções para os períodos anterior ao perturbação, durante o perturbação e após a mesma respectivamente.

5.1 Situação A: Curto em Uma das Linhas de Transmissão

O sistema encontra-se em regime permanente até o tempo $t = 5s$. Neste momento, um curto-circuito trifásico ocorre em uma linha de transmissão dupla, Figuras 13 e 14. O momento pós falta possui a mesma configuração em duas linhas, como no sistema pré-falta, porém a eliminação de falta causa uma pequena mudança na sua reatância final.

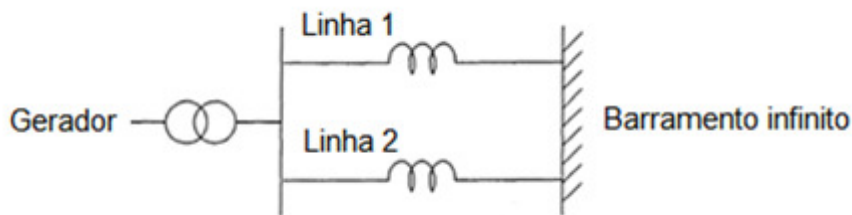


Figura 13 – Instante pré-falta - Situação A. Adaptado de Kundur (1994)

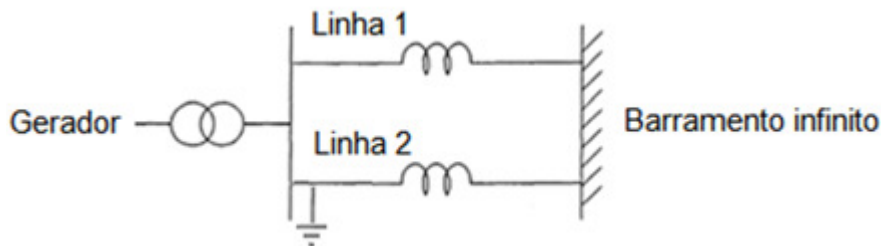


Figura 14 – Instante durante a ocorrência da falta - Situação A. Adaptado de Kundur (1994)

Desta maneira, a reatância equivalente de Thévenin da linha de transmissão é alterada, conforme a Tabela 1.

Tabela 1 – Reatâncias equivalentes de Thévenin do gerador - Situação A

Período	Reatância (pu)
Pré-falta	0.5
Durante a falta	1.0
Pós-falta	0.7

A trajetória do sistema diante desta falta pode ser visualizada na Figura 15:

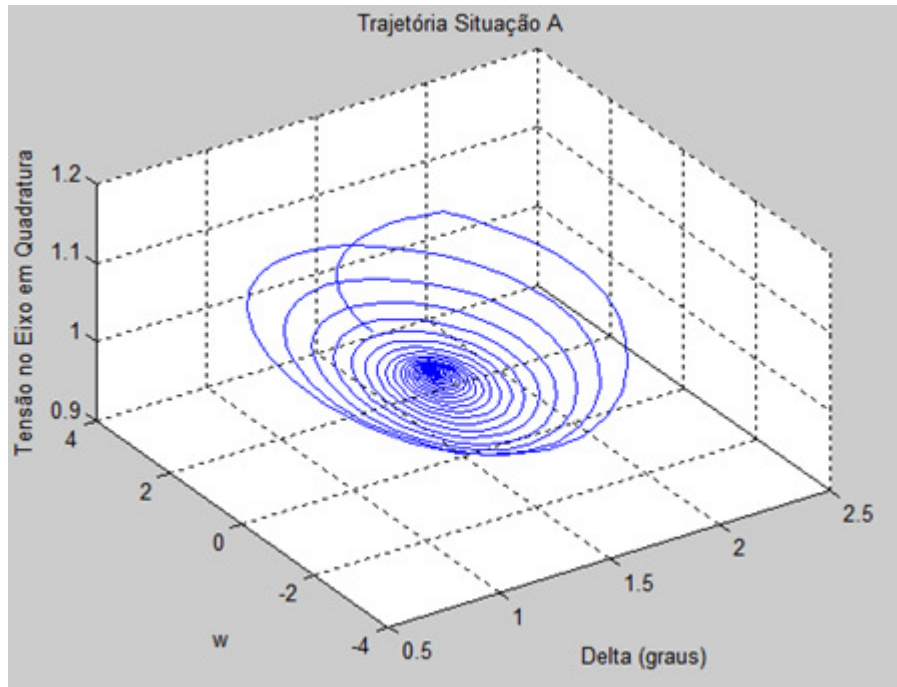


Figura 15 – Trajetória do Sistema para $t_{\text{curto}} = 0.400s$ - Situação A

A trajetória do sistema diante da perturbação abordada anteriormente foi esboçada para um tempo de curto $t_{\text{curto}} = 0.400s$. Para este tempo de duração da falta, o sistema converge ao ponto de equilíbrio estável. Para a avaliação dos parâmetros individualmente, os gráficos seguintes são esboçados para cada variável algébrica em função do tempo.

O próprio modelamento teórico do sistema prevê a ação de amortecedores nos geradores relacionados ao seu projeto e construção. Este amortecimento é reforçado principalmente através de bobinas com este objetivo e pode auxiliar o gerador em um momento de perturbação. A seguir, é ilustrada a relação da constante de amortecimento do sistema, Equação 3.29, e seu efeito no comportamento do gerador frente a uma perturbação.

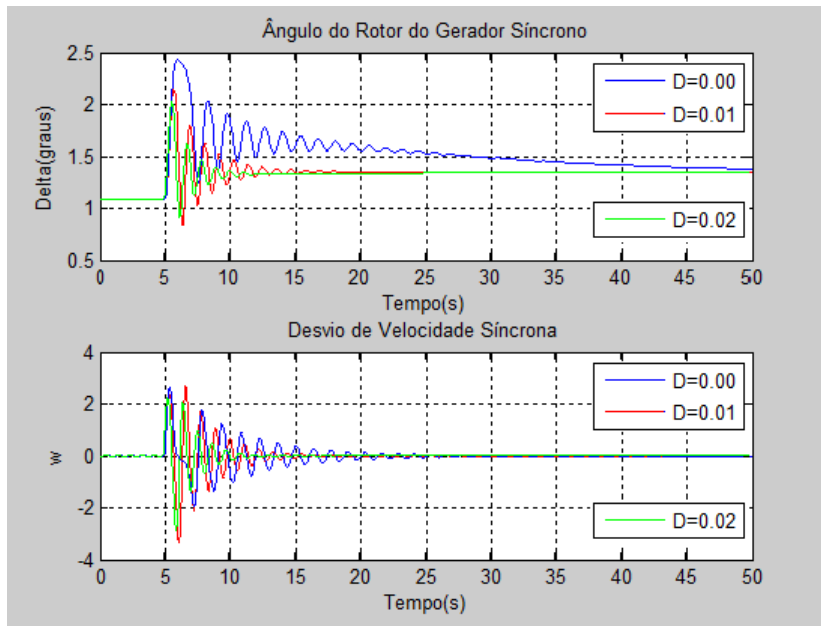


Figura 16 – Efeito da constante de amortecimento no ângulo e desvio de velocidade
 $t_{\text{curto}} = 0.4931\text{s}$ - Situação A

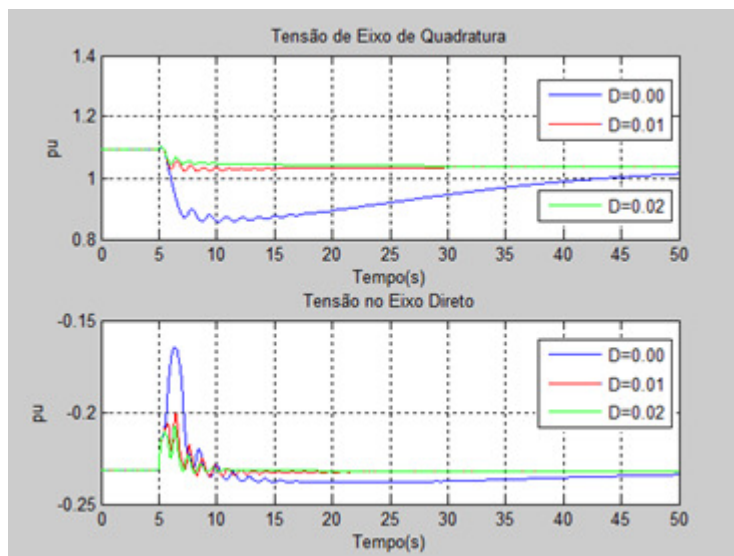


Figura 17 – Efeito da constante de amortecimento nas tensões nos eixos Q e D para
 $t_{\text{curto}} = 0.4931\text{s}$ - Situação A

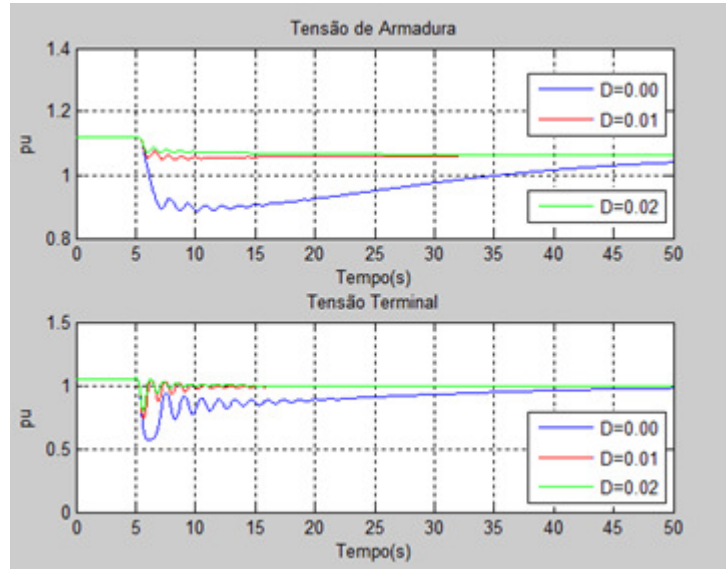


Figura 18 – Efeito da constante de amortecimento nas tensões de armadura e terminal para $t_{\text{curto}} = 0.4931s$ - Situação A

De acordo com as Figuras ?? a 18, é possível notar que apenas um pequeno acréscimo no amortecimento natural, D , do modelo tem um grande impacto na sua operação. As oscilações de todas as variáveis foram fortemente amortecidas e se aproximaram mais rapidamente do ponto de equilíbrio à medida que o amortecimento foi aumentado. Além disso, o tempo crítico de eliminação de faltas é alterado por este amortecimento. Para cada simulação feita, o novo tempo crítico foi aferido e apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 – Aumento do tempo crítico com aumento do amortecimento - Situação A

Constante de Amortecimento (pu)	0.00	0.01	0.02
Tempo crítico (s)	0.4931	0.5898	0.7222

Observa-se, a partir da Tabela 2, que o tempo crítico aumenta consideravelmente mesmo com um pequeno aumento da constante de amortecimento D .

Para a simulação de controle da situação A (subseções 5.1.1 e 5.1.2), um tempo de curto de 0.400s e amortecimento de 0.00 pu são utilizados.

5.1.1 Controle LgV para Situação A

O controle LgV deve ser cuidadosamente utilizado para cada situação. Isso se deve ao fato de que o controlador depende dos pontos de equilíbrio iniciais do sistema e também da constante C . Para os valores de C de 0.05, 0.03 e 0.01, o amortecimento das oscilações variaram da seguinte forma:

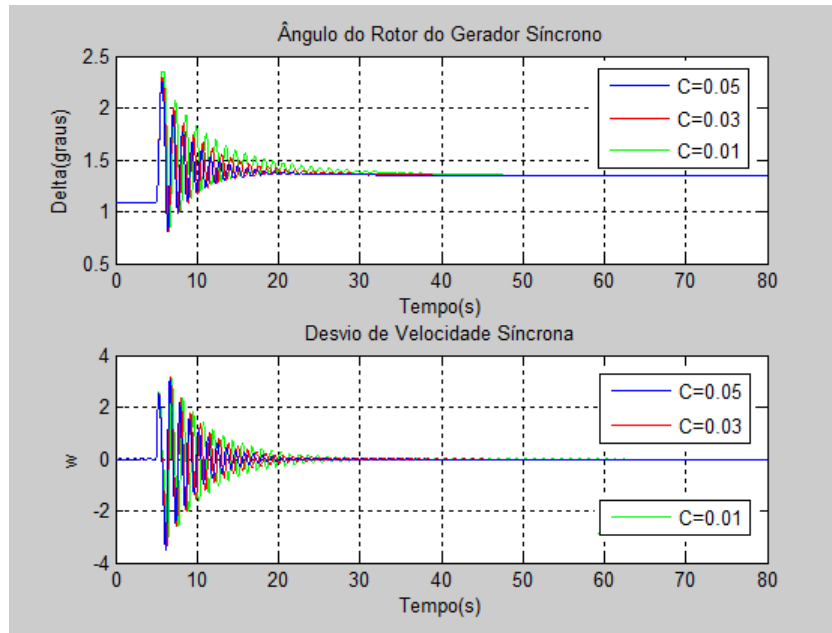


Figura 19 – Ângulo e Desvio de velocidade para $t_{\text{curto}} = 0.400s$ - Situação A

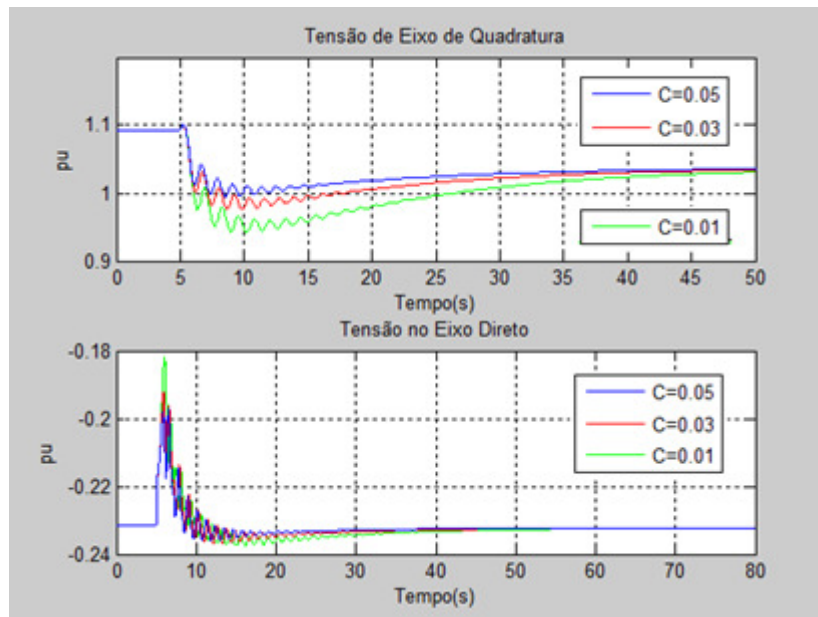


Figura 20 – Tensões nos eixos D e Q para $t_{\text{curto}} = 0.400s$ - Situação A

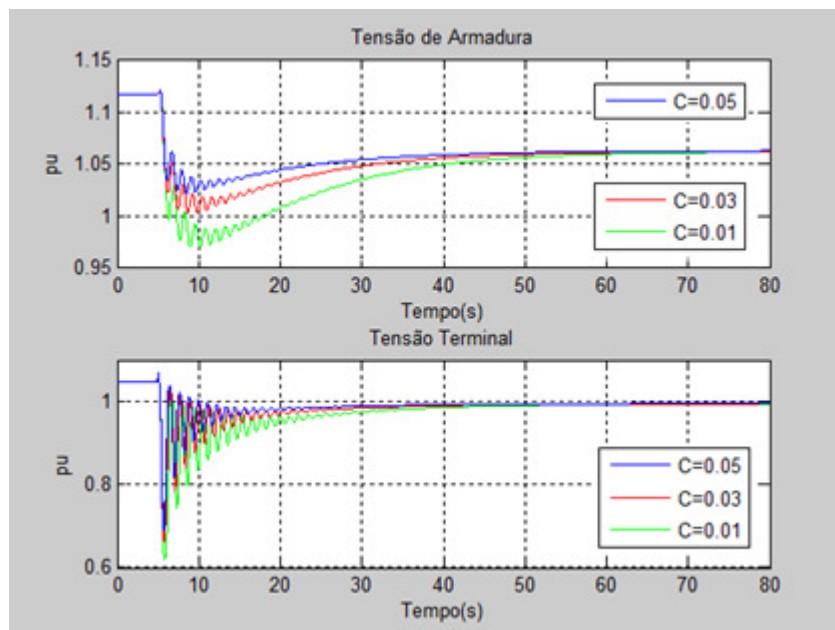


Figura 21 – Tensões de armadura e terminal para $t_{\text{curto}} = 0.400s$ - Situação A

A partir das Figuras 19 a 21, observa-se que quanto maior o parâmetro de controle C , maior o amortecimento das oscilações. O tempo crítico t_{curto} foi alterado de acordo com a Tabela 3.

Tabela 3 – Tempos críticos para diferentes parâmetros de controle LgV - Situação A

Parâmetro de controle C	0.1	0.05	0.03	0.01
Tempo crítico (s)	0.4937	0.4935	0.4932	0.4931

Observa-se a partir da tabela 3 que não houve o aumento de tempo crítico de maneira significativa. Considerando que quanto maior o valor de C , maior o amortecimento das oscilações e também pensando que os dispositivos de controle têm limitações físicas de operação, o valor de $C = 0.10$ foi escolhido para comparação com o sistema sem controle.

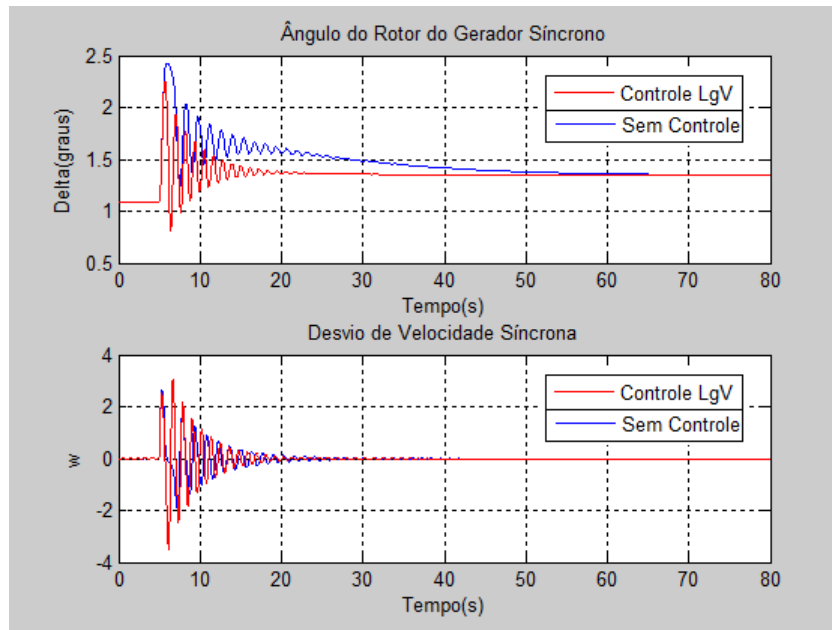


Figura 22 – Ângulo e Desvio de velocidade para $t_{\text{curto}} = 0.400s$ e $C = 0.1$ - Situação A

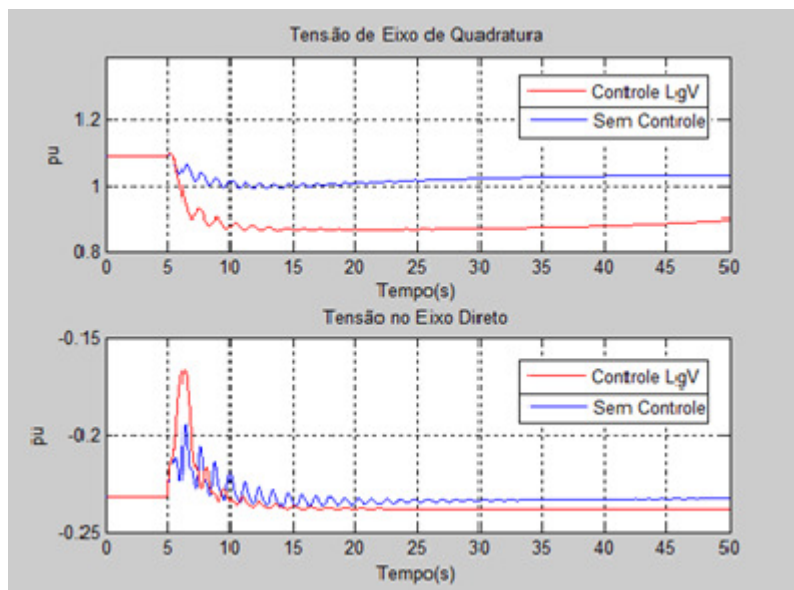


Figura 23 – Tensões nos eixos Q e D para $t_{\text{curto}} = 0.400s$ e $C = 0.1$ - Situação A

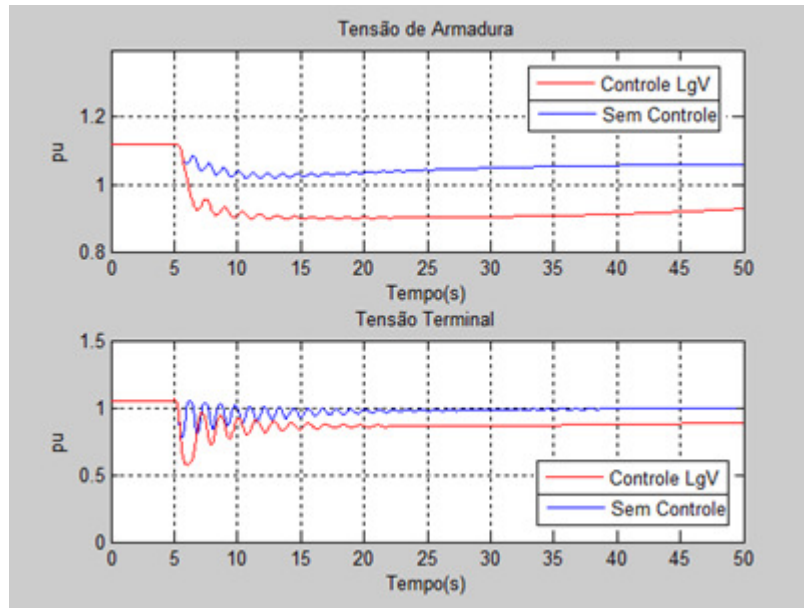


Figura 24 – Tensões de armadura e terminal para $t_{\text{curto}} = 0.400s$ e $C = 0.1$ - Situação A

Observa-se a partir das Figuras 22 a 24 que ocorre um bom amortecimento das oscilações com a utilização do parâmetro de controle selecionado. Nota-se que a tensão terminal não é estabilizada até o tempo $t = 50s$. Entretanto, isto não representa problemas desde que esta retorne a um valor próximo a $1 pu$. A estabilização da tensão terminal pode ser observada na Figura 25, onde a tensão terminal é esboçada até o tempo $t = 150s$.

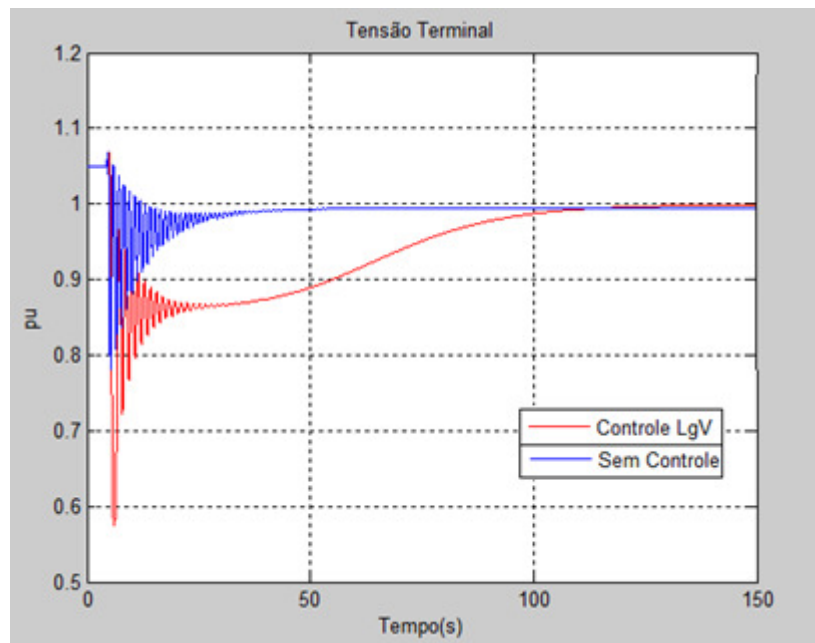


Figura 25 – Tensão terminal para $t_{\text{curto}} = 0.400s$ e $C = 0.1$ - Situação A

Se comparada ao sistema sem controle (Figura 25), a tensão terminal com a utilização do controle LgV sofre uma queda. Portanto, demanda maior tempo até convergir ao novo ponto de operação.

5.1.2 Controle *Backstepping* para situação A

A lei de controle foi adicionada ao script de resolução do sistema no MatLab. Para gerar gráficos, deve-se atribuir valores a λ , α e σ . Para maior facilidade de correspondência e comparação entre estes parâmetros de controle, eles são renomeados. Desta maneira, $\sigma = k_1$, $\alpha = k_2$ e $\lambda = k_3$. Reescrevendo a lei de controle em termos de k_1 , k_2 e k_3 :

$$u = \frac{1}{g} \left\{ -k_1 \left[x_3 - k_2(x_2 + k_3 x_1) + \frac{ax_2 - bP_m}{c \sin(x_1)} \right] - f \cos(x_1) \right. \\ \left. + (k_2 + a)^2 (-ax_2 + P_m - cx_3 \sin(x_1)) + ex_3 + k_2 k_3^2 x_1 + \right. \\ \left. \frac{1}{c} (ax_2 - bP_m) (k_3 x_1 \cot(x_1) \csc(x_1)) \right\} \quad (5.4)$$

Onde, de acordo com a equação anterior, k_1 está relacionada com o controle em geral como um coeficiente que influencia diretamente todo o sinal de x_1 , x_2 e x_3 . O parâmetro de controle k_2 está mais relacionado com as variáveis x_1 e x_2 . Finalmente o parâmetro de controle k_3 está diretamente relacionado com o sinal da variável x_1 .

A escolha inicial para os valores dos parâmetros de controle é: $k_1 = k_2 = k_3 = 0.5$. O sistema diverge para esta configuração. Após alguns testes e simulações, descobriu-se que existem faixas de valores para estes parâmetros de controle para que o sistema possa convergir para o ponto de operação. Estes dados encontram-se na Tabela 4.

Tabela 4 – Valores dos parâmetros para convergência do sistema - Situação A

Parâmetro	k_1	k_2	k_3
Valor	$0.001 \leq k_1 \leq 0.01$	$0.045 \leq k_2 \leq 0.08$	$k_3 \leq 0.01$

A existência das faixas de valores da Tabela 4 não exclui a possibilidade de existência de outras faixas. A fim de se conhecer a influência de cada parâmetro de controle no resultado final, eles são avaliados da seguinte maneira: dois parâmetros são fixados enquanto o terceiro parâmetro de controle é variado.

Primeiramente k_2 foi fixado com o valor de 0.045 e k_3 com o valor de 0.0001. A variação de k_1 ocorre como mostram as Figuras 26 a 28.

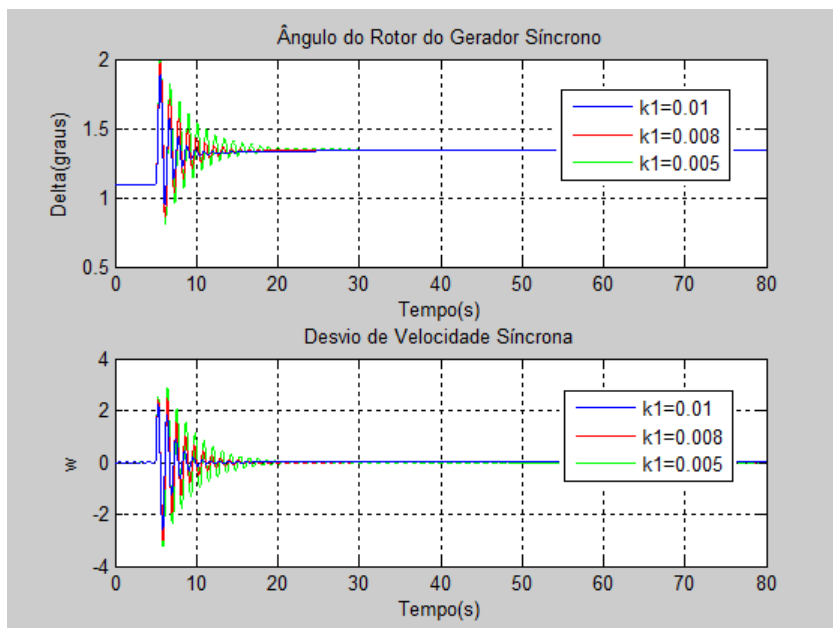


Figura 26 – Ângulo do rotor e desvio de velocidade para $t_{\text{curto}} = 0.400s$ e diferentes valores de k_1 - Situação A

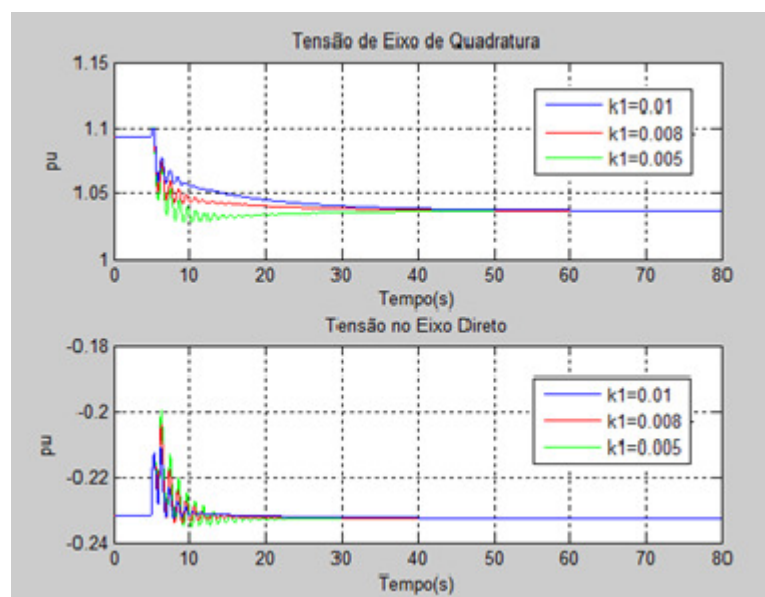


Figura 27 – Tensões nos eixos Q e D para $t_{\text{curto}} = 0.400s$ e diferentes valores de k_1 - Situação A

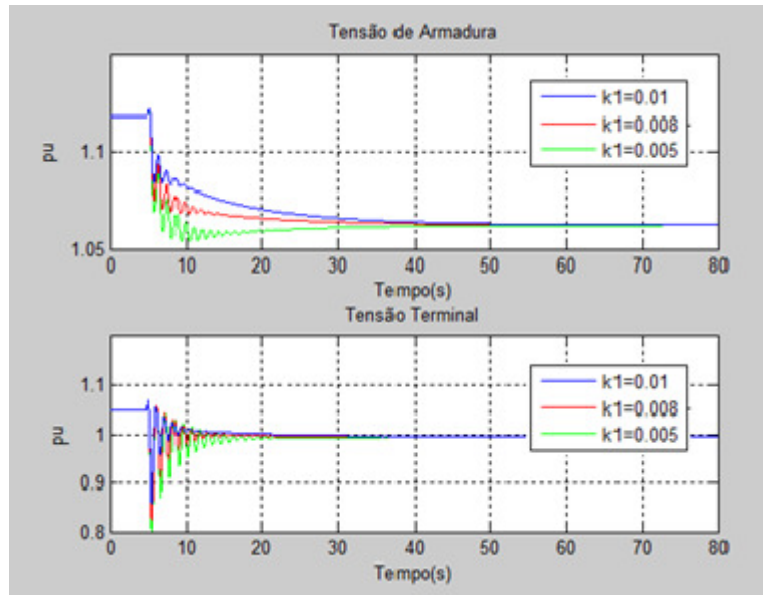


Figura 28 – Tensões de armadura e terminal para $t_{\text{curto}} = 0.400s$ e diferentes valores de k_1 - Situação A

Pode-se observar, a partir das Figuras 26 a 28, que o parâmetro de controle k_1 está diretamente relacionado com a melhoria do amortecimento. A tensão terminal converge para o mesmo ponto ótimo, $1 pu$. O melhor valor para k_1 é de 0.01 para estes intervalos propostos. k_1 está relacionada com o controle em geral como um coeficiente que influencia diretamente todo o sinal de x_1 , x_2 e x_3 .

Para descobrir-se influência de k_2 , k_1 foi fixado com o valor de 0.01 e k_3 com o valor de 0.0001. A variação de k_2 ocorre como mostram as Figuras 29 a 31.

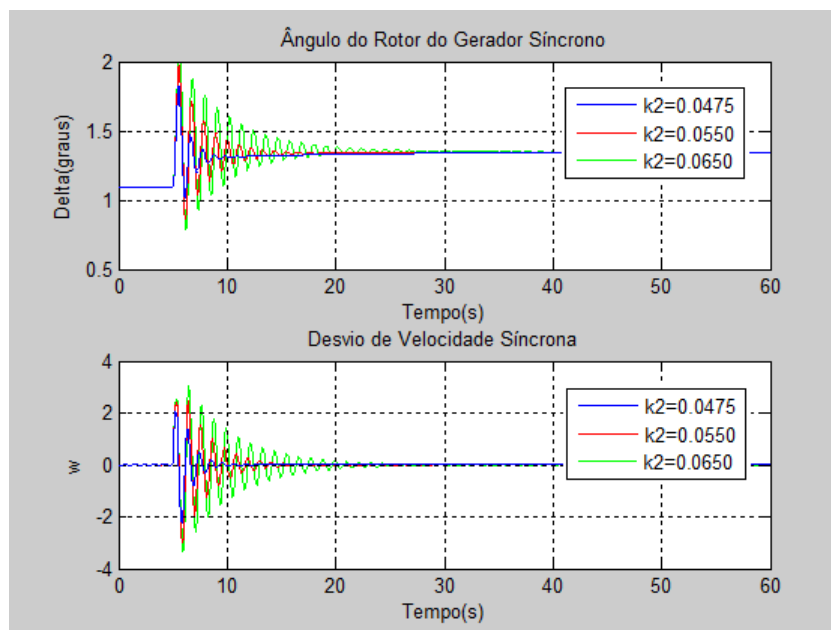


Figura 29 – Ângulo do rotor e desvio de velocidade para $t_{\text{curto}} = 0.400s$ e diferentes valores de k_2 - Situação A

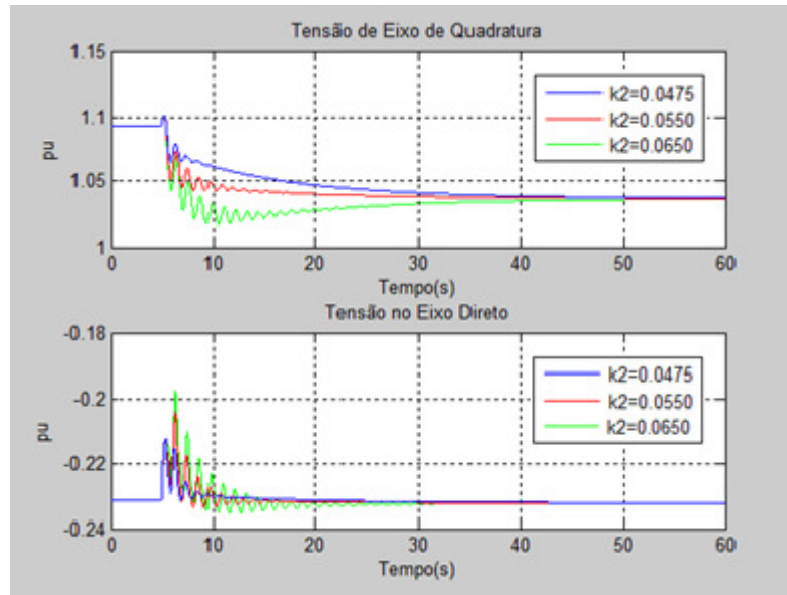


Figura 30 – Tensões nos eixos Q e D para $t_{\text{curto}} = 0.400s$ e diferentes valores de k_2 - Situação A

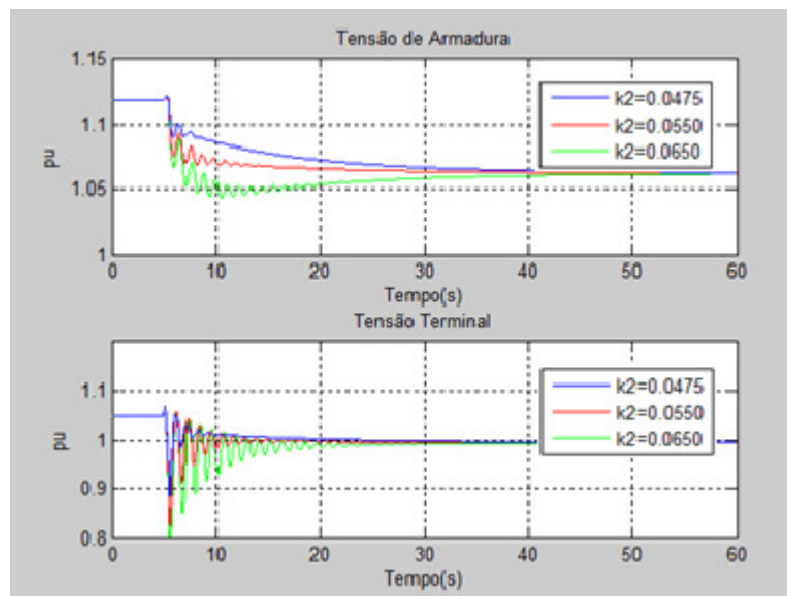


Figura 31 – Tensões de armadura e terminal para $t_{\text{curto}} = 0.400s$ e diferentes valores de k_2 - Situação A

O parâmetro de controle k_2 está relacionado com sinal das variáveis x_1 e x_2 – ângulo do rotor e desvio de velocidade síncrona. A diminuição do parâmetro k_2 melhora suas condições de estabilidade, como pode ser visto nas Figuras 29 a 31. Entretanto, há um valor mínimo conforme apresentado na Tabela 4.

Para descobrir-se influência de k_3 , k_1 foi fixado com o valor de 0.01 e k_2 com o valor de 0.045. A variação de k_3 ocorre como mostram as Figuras 32 a 34.

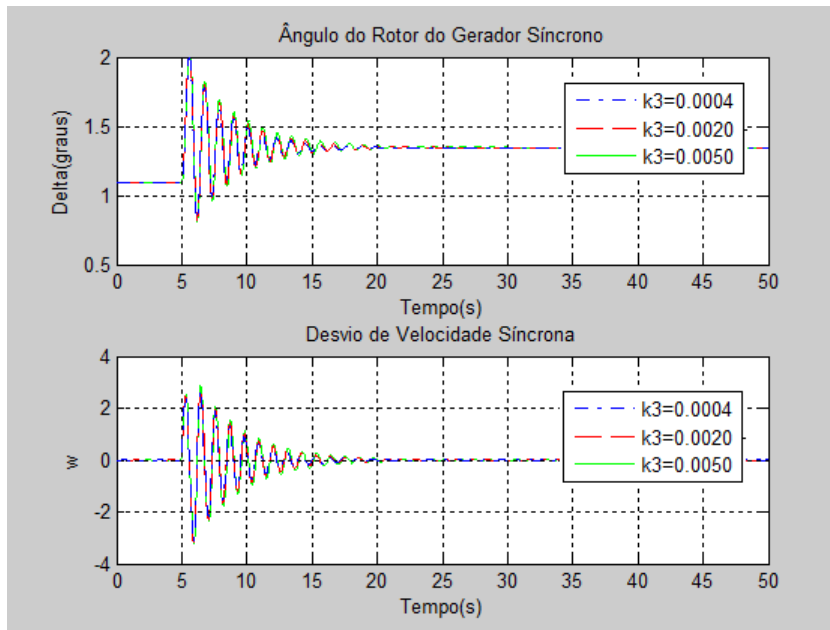


Figura 32 – Ângulo do rotor e desvio de velocidade para $t_{\text{curto}} = 0.400\text{s}$ e diferentes valores de k_3 - Situação A

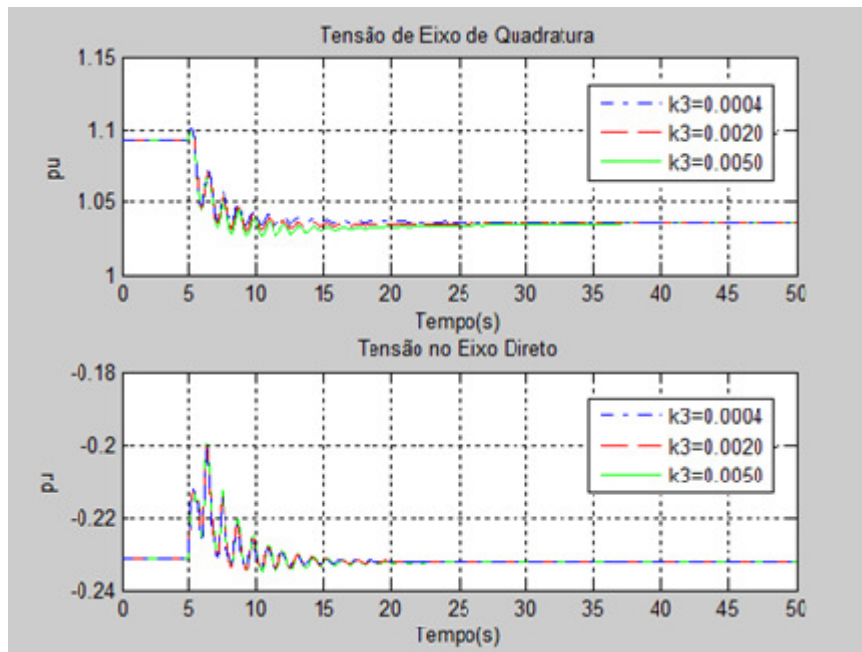


Figura 33 – Tensões dos eixos Q e D para $t_{\text{curto}} = 0.400\text{s}$ e diferentes valores de k_3 - Situação A

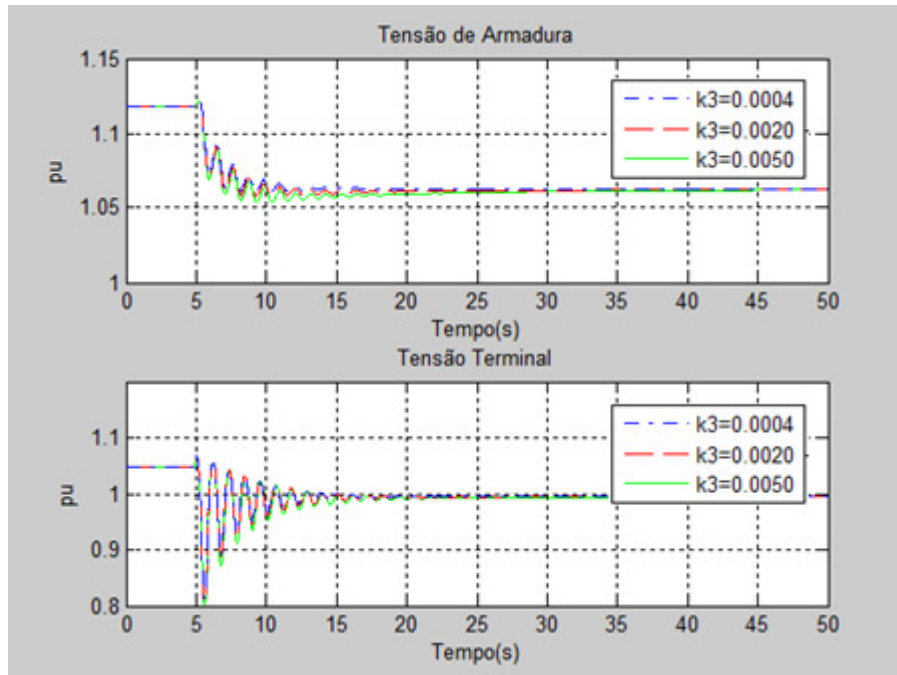


Figura 34 – Tensões de armadura e terminal para $t_{\text{curto}} = 0.400\text{s}$ e diferentes valores de k_3 - Situação A

O parâmetro de controle k_3 está diretamente relacionado com o sinal da variável x_1 – ângulo do rotor. O parâmetro de controle k_3 não amortece o sistema significativamente, como pode ser visto nas Figuras 32 a 34. Entretanto, deve-se escolher seu valor com cuidado, pois acima da faixa operacional, o parâmetro causa a divergência das variáveis.

A partir das figuras apresentadas, pode-se escolher a melhor combinação dentro das faixas de operação pré-selecionadas. Estes valores são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Valores dos parâmetros de controle - Situação A

Parâmetro	k_1	k_2	k_3
Valor	0.01	0.045	0.001

Para a configuração apresentada na Tabela 5, ocorre um aumento no tempo crítico de eliminação de falta de 0.4931 para 0.7142 segundos. Este procedimento apresentou uma alta elevação no tempo crítico, o que favorece o funcionamento do sistema sob condições mais severas e aumenta a margem de estabilidade.

Esta configuração confere ao sistema o seguinte comportamento, ilustrado nas Figuras 35 a 37.

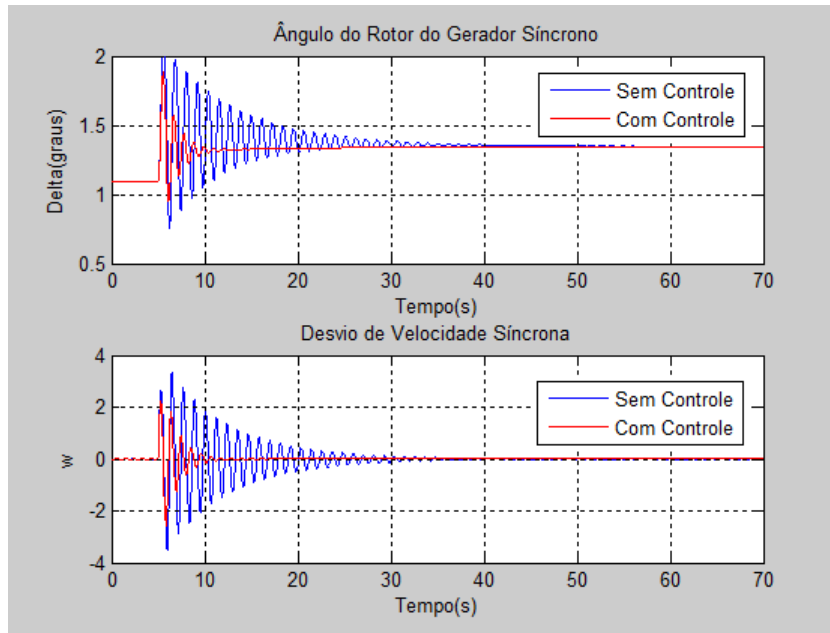


Figura 35 – Ângulo do rotor e desvio de velocidade para $t_{\text{curto}} = 0.400s$. - Situação A

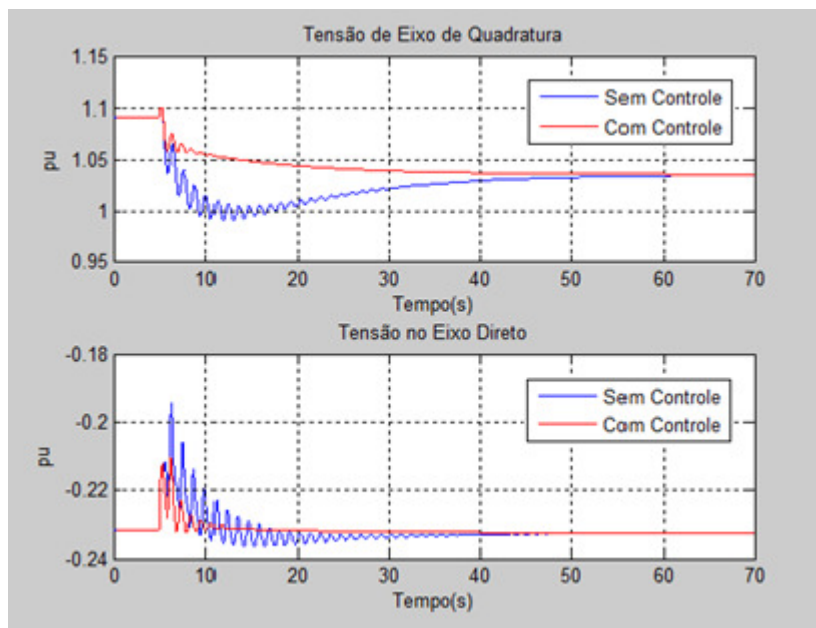


Figura 36 – Tensões nos eixos Q e D para $t_{\text{curto}} = 0.400s$ - Situação A

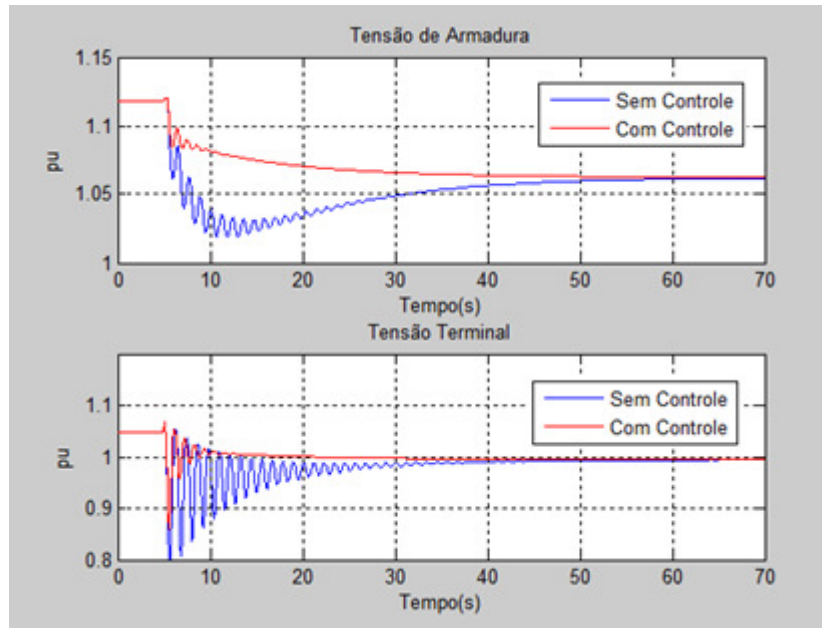


Figura 37 – Tensões de armadura e terminal para $t_{\text{curto}} = 0.400s$ - Situação A

De acordo as Figuras 35 a 37 e o novo tempo crítico, observa-se que esta metodologia de controle apresentou bom amortecimento e aumento na margem de estabilidade.

Neste ponto, é importante mencionar que a comparação entre as duas metodologias de controle (*LgV* e *Backstepping*) em um mesmo gráfico não se mostra adequada, pois é possível modificar os parâmetros de controle C , k_1 , k_2 e k_3 das metodologias de forma que uma apresente melhores resultados do que a outra.

5.2 Situação B: Curto nas Proximidades do Barramento Infinito

Nesta situação, a perturbação do sistema também possui caráter transitório e ocorre por meio de um curto-circuito em linha simples de transmissão nas proximidades do barramento infinito (Figuras 38 e 39). O sistema estava anteriormente em regime permanente e o curto ocorre em $t = 5s$.

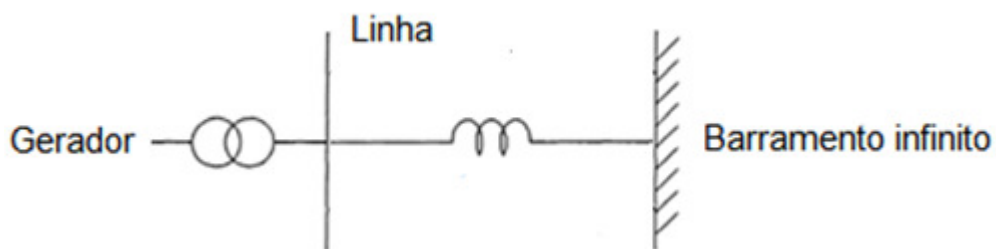


Figura 38 – Configuração anterior e posterior ao curto - Situação B

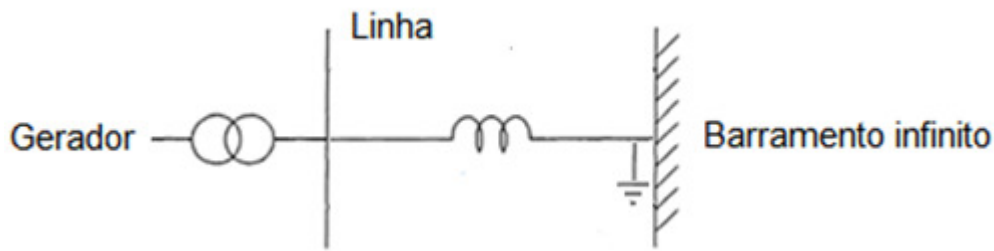


Figura 39 – Representação do curto-circuito próximo ao barramento - Situação B

Para representar esta perturbação em uma simulação, basta modificar o valor da tensão no barramento infinito para zero no tempo em que a falta ocorre, conforme a Tabela 6.

Tabela 6 – Configurações para simulação - Situação B

Período	Tensão no Barramento (pu)
Pré-falta	1.0
Durante a falta	0.0
Pós-falta	1.0

A trajetória do sistema diante desta falta pode ser visualizada na Figura 40:

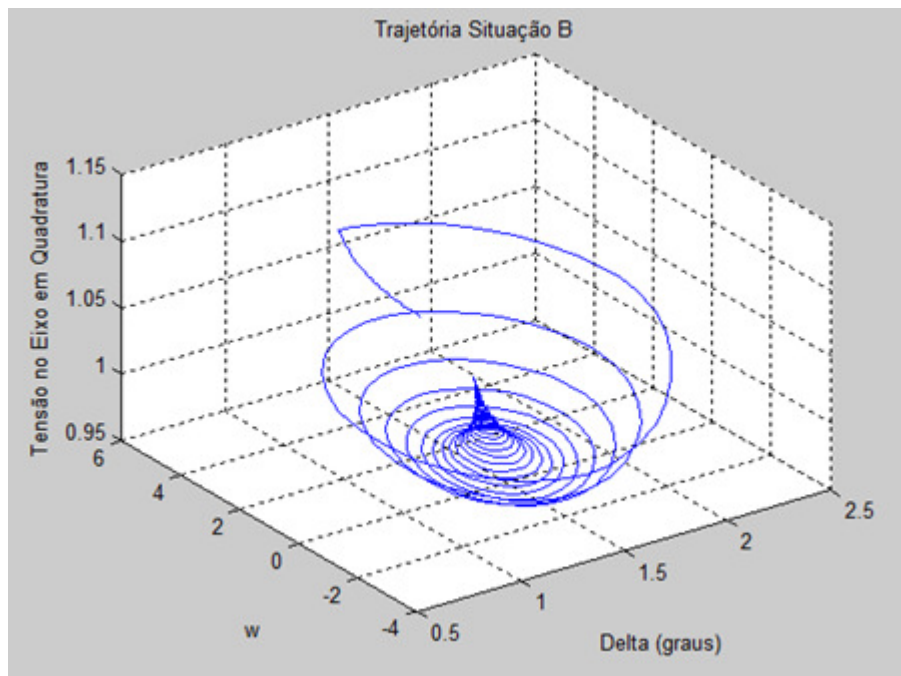


Figura 40 – Trajetória do Sistema para $t_{\text{curto}} = 0.100s$ - Situação B

A trajetória do sistema diante da perturbação B foi esboçada na Figura 40 para um tempo de curto $t_{\text{curto}} = 0.100s$. Para este tempo de duração da falta, o sistema converge ao ponto de equilíbrio estável. Pode-se notar também a queda de tensão no eixo de quadratura no momento da perturbação. À medida que o sistema vai se aproximando

do ponto de equilíbrio estável, a tensão vai subindo até o valor de cerca de $1.03 pu$. Para a avaliação da eficiência do controle, os gráficos seguintes são esboçados para cada variável algébrica em função do tempo.

O amortecimento natural do sistema foi avaliado de maneira similar à situação A. D toma valores de 0.00, 0.01 e 0.02. O resultado pode ser visualizado a seguir:

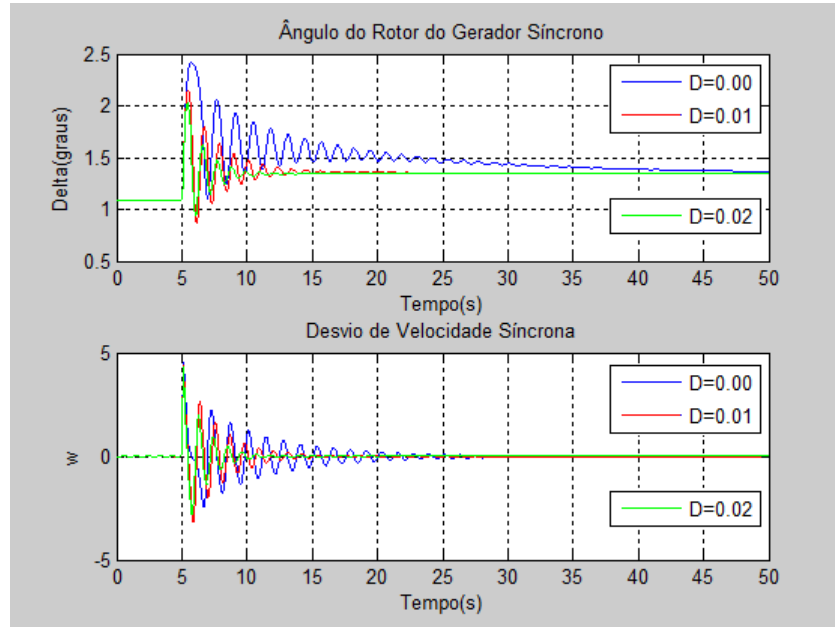


Figura 41 – Ângulo do rotor e desvio de velocidade para $t_{\text{curto}} = 0.100s$ - Situação B

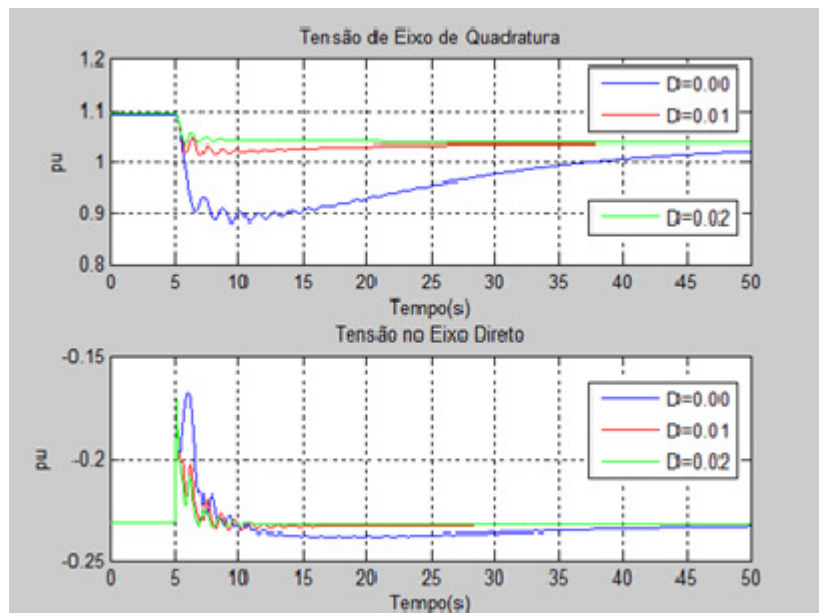


Figura 42 – Tensões nos eixos Q e D para $t_{\text{curto}} = 0.100s$ - Situação B

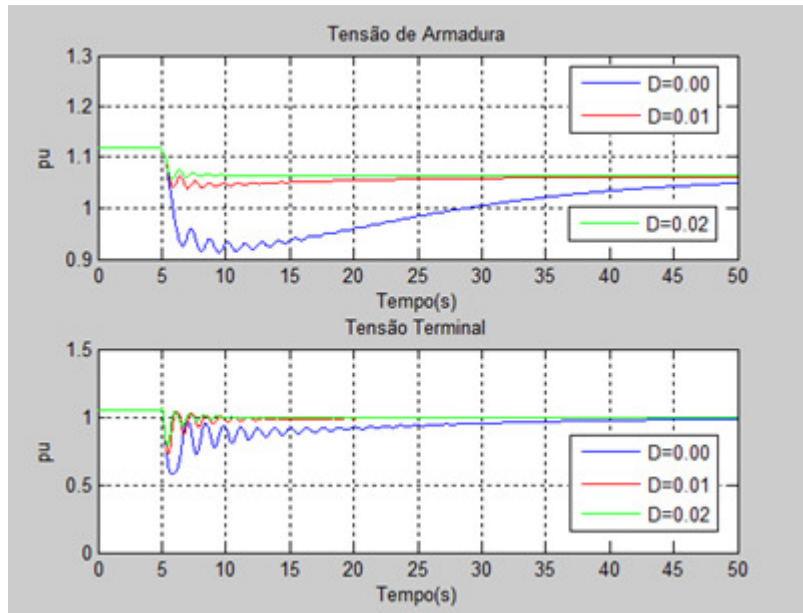


Figura 43 – Tensões de armadura e terminal para $t_{\text{curto}} = 0.100s$ - Situação B

Mais uma vez o amortecimento natural mostrou-se como fator com forte influência no comportamento do sistema a partir de 5 segundos, quando ocorre a falta. Os valores dos tempos críticos de eliminação de falta foram aferidos e encontram-se na Tabela 7.

Tabela 7 – Aumento do tempo crítico do amortecimento - Situação B

Constante de Amortecimento (pu)	0.00	0.01	0.02
Tempo crítico (s)	0.1065	0.1179	0.1292

Observa-se da Tabela 7 que o tempo crítico aumenta com a constante de amortecimento D .

Para a simulação de controle da situação B (subseções 5.2.1 e 5.2.2), um tempo de curto de $0.100s$ e amortecimento de $0.00 pu$ são utilizados.

5.2.1 Controle LgV para situação B

Várias similaridades ocorrem diante do controle da situação B em relação à situação A. Os valores do parâmetro C são estudados a seguir.

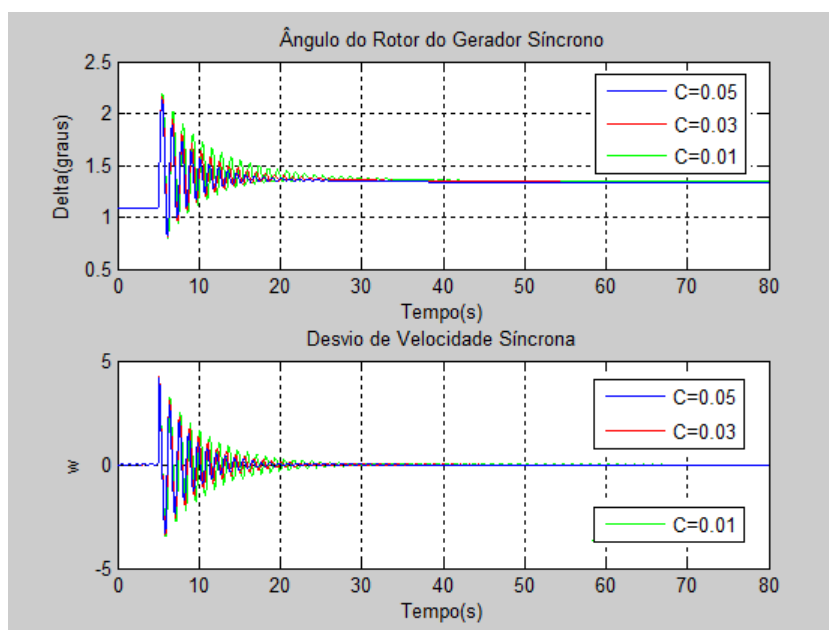


Figura 44 – Ângulo e desvio de velocidade para diferentes valores de C - Situação B

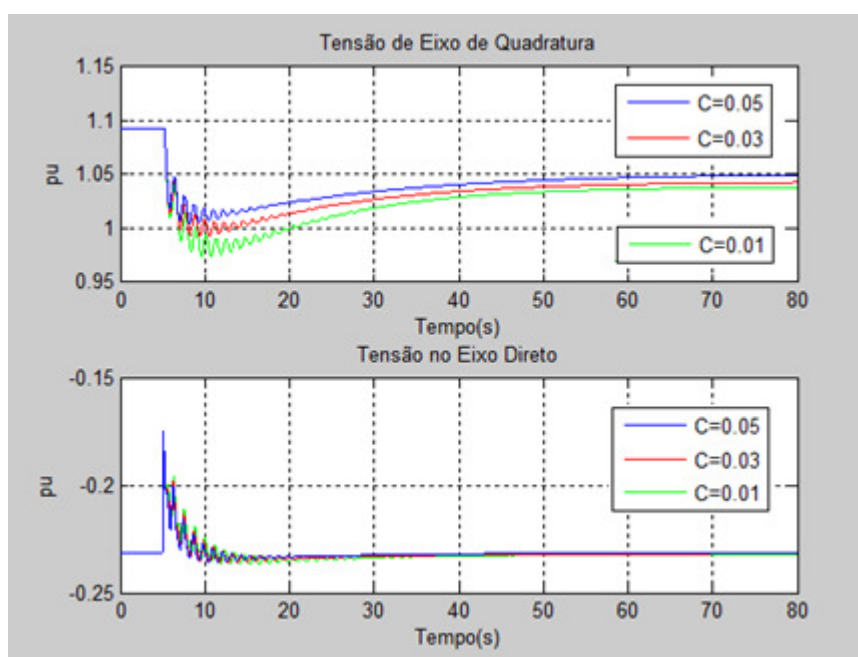


Figura 45 – Tensões nos eixos para valores de C - Situação B

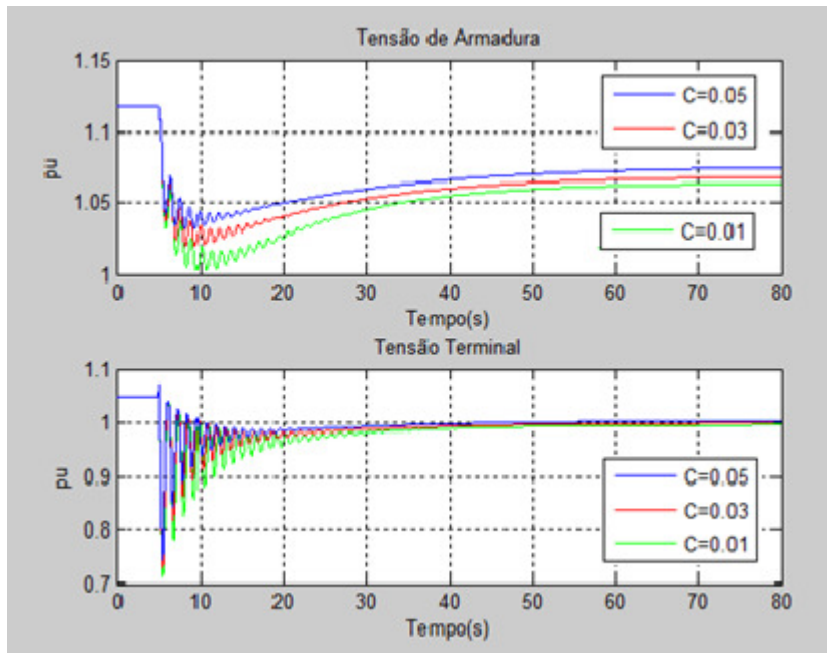


Figura 46 – Tensões de armadura e terminal para valores de C - Situação B

As Figuras 44 a 46 mostram um comportamento semelhante ao da situação A. A Tabela 8 informa os valores dos tempos críticos.

Tabela 8 – Tempos críticos para diferentes parâmetros de controle LgV - Situação B

Parâmetro de controle C	0.05	0.03	0.01
Tempo crítico (s)	0.1120	0.1087	0.1065

De acordo com a Tabela 8, o aumento do tempo crítico é muito pequeno para que seja um fator decisivo na escolha dos parâmetros de controle. As tensões terminais em todos os casos se fixam em $1pu$. O parâmetro de controle $C = 0.5$ mostrou-se ligeiramente melhor em relação ao amortecimento das oscilações e na melhora do tempo crítico. Por este motivo, ele é colocado em comparação com o sistema sem controle.

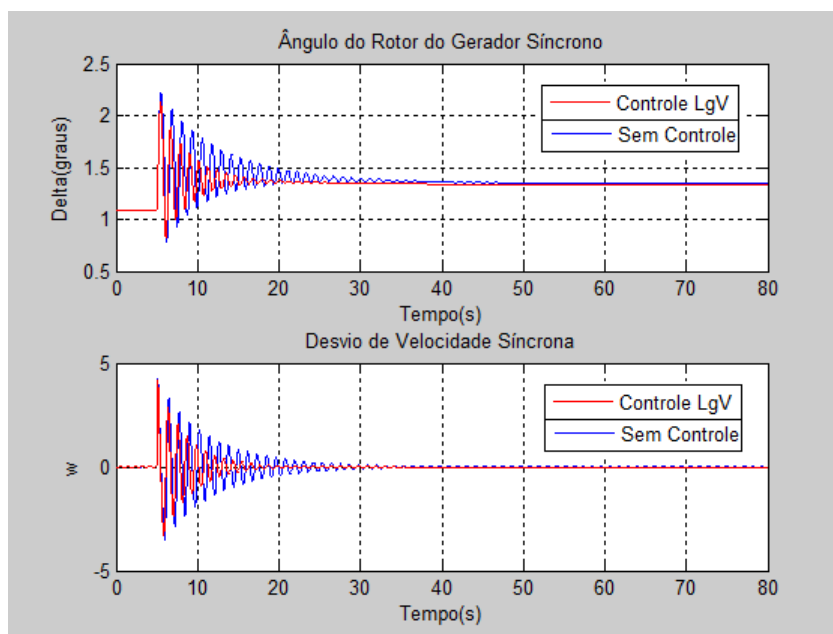


Figura 47 – Ângulo e desvio de velocidade síncrona para $C = 0.05$ e $t_{\text{curto}} = 0.100s$ - Situação B

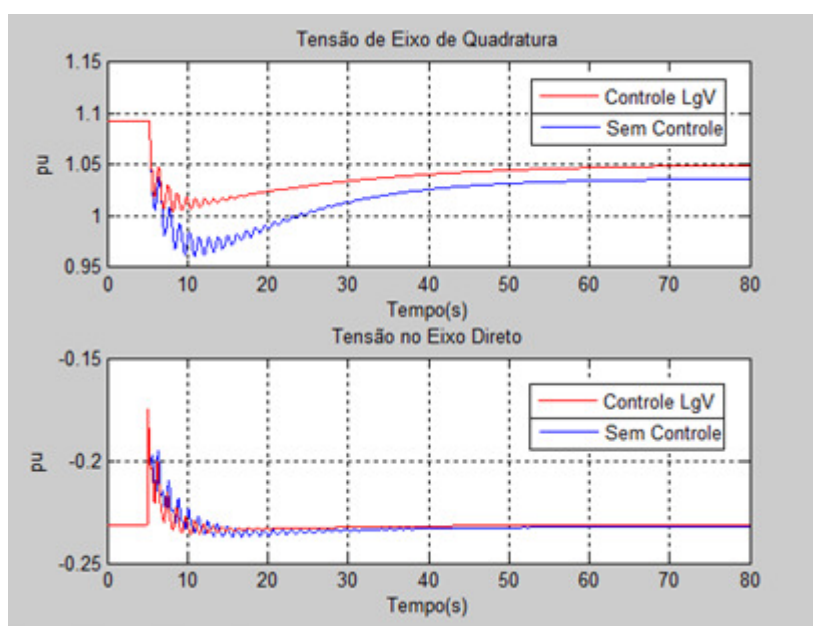


Figura 48 – Tensões nos eixos Q e D para $C = 0.05$ e $t_{\text{curto}} = 0.100s$ - Situação B

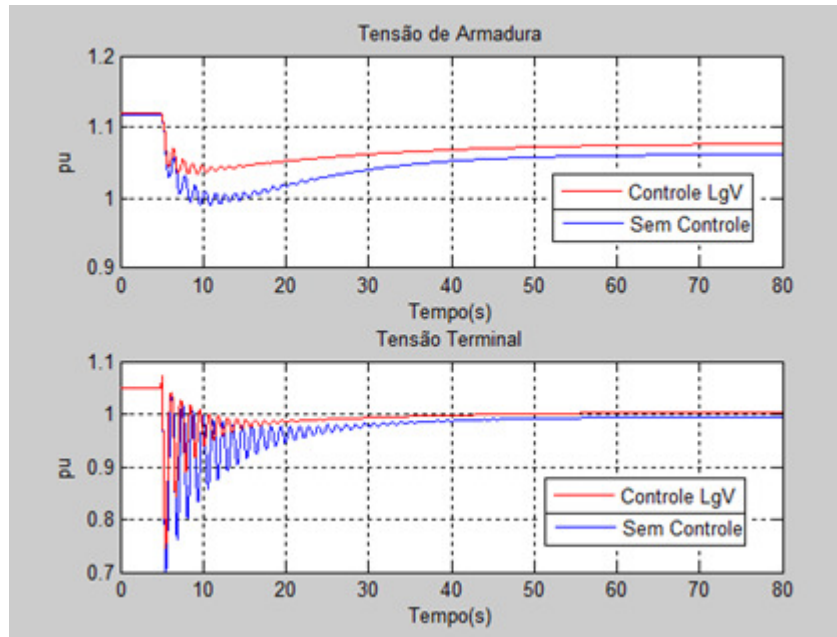


Figura 49 – Tensões de armadura e terminal para $C = 0.05$ e $t_{\text{curto}} = 0.100s$ - Situação B

5.2.2 Controle *Backstepping* para situação B

Para esta situação, uma metodologia semelhante de obtenção dos parâmetros de controle foi feita. Os parâmetros de controle apresentaram comportamento similar ao comportamento visualizado na situação A com a utilização do controle *Backstepping*. As variáveis k_1 e k_2 têm maior influência no amortecimento das oscilações. Assim como na situação A, existem faixas de valores de operação para que o controle faça o sistema convergir. As Tabelas 9 e 10 mostram, respectivamente, as faixas dos parâmetros de controle k_1 , k_2 e k_3 e seus melhores valores obtidos dentro dessas faixas.

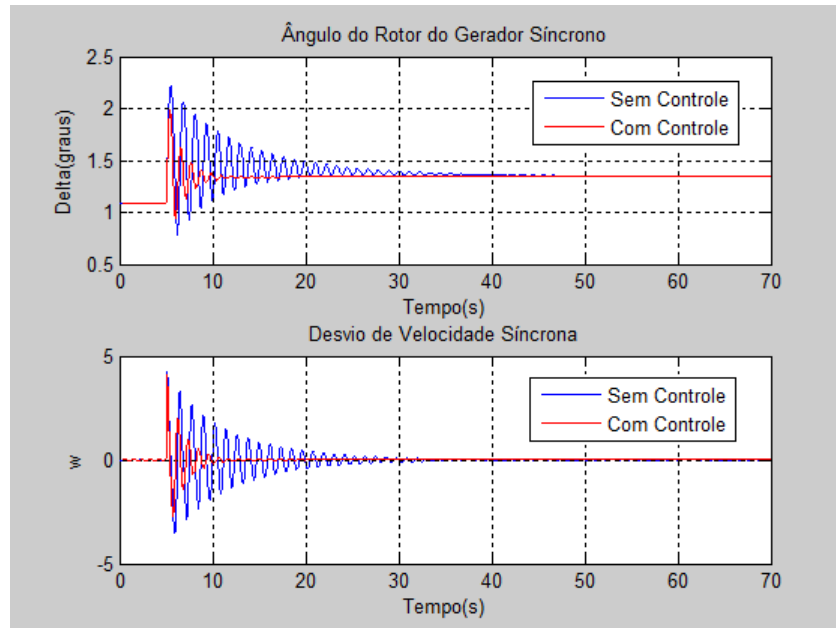
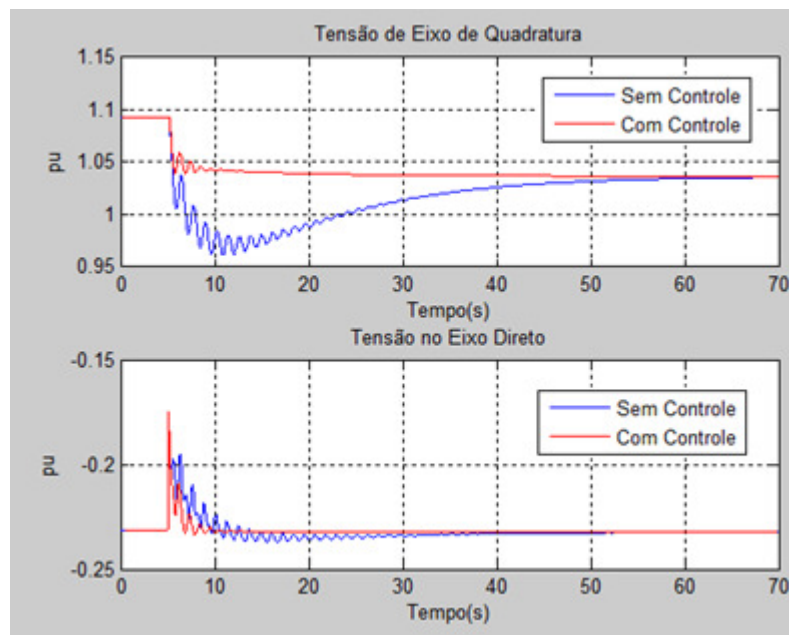
Tabela 9 – Valores dos parâmetros para convergência do sistema - Situação B

Parâmetro	k_1	k_2	k_3
Valor	$0.003 \leq \sigma \leq 0.01$	$0.05 \leq \alpha \leq 0.1$	$\lambda \leq 0.01$

Tabela 10 – Melhores valores dos parâmetros nas faixas selecionadas - Situação B

Parâmetro	k_1	k_2	k_3
Valor	0.01	0.055	0.001

Para a configuração da Tabela 10, o aumento na margem de estabilidade sobre de 0.1065 para 0.1269 segundos. O comportamento das variáveis de estado pode ser observados nas Figuras 50 a 52.

Figura 50 – Ângulo do rotor e desvio de velocidade para $t_{\text{curto}} = 0.100s$ - Situação BFigura 51 – Tensões nos eixos Q e D para $t_{\text{curto}} = 0.100s$ - Situação B

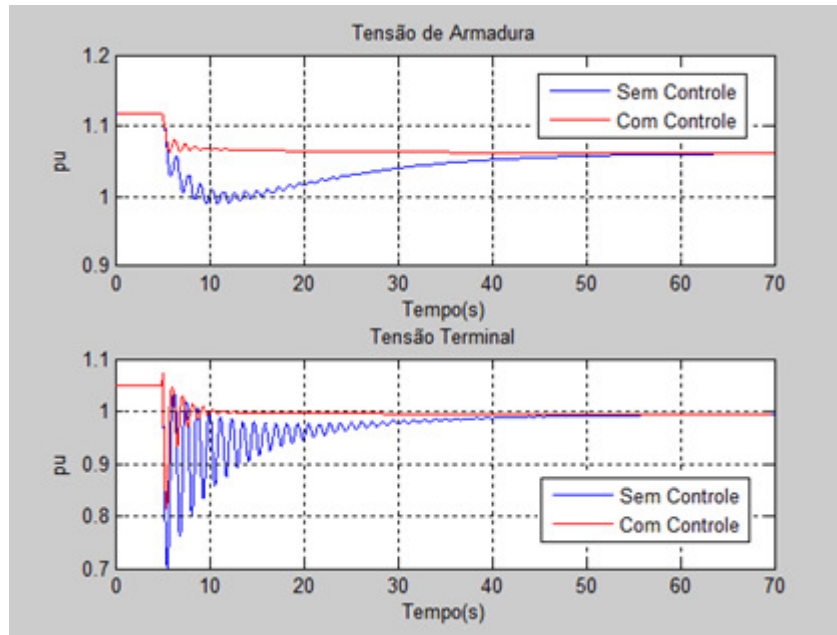


Figura 52 – Tensões de armadura e terminal para $t_{\text{curto}} = 0.100s$ - Situação B

O controle *Backstepping* conferiu um amortecimento semelhante ao da situação A, conforme as Figuras 35 a 37 e 50 a 52.

Assim como para a situação A, a comparação entre as duas metodologias de controle (LgV e *Backstepping*) em um mesmo gráfico não é esboçada, pois é possível modificar os parâmetros de controle C , k_1 , k_2 e k_3 das metodologias de forma que uma apresente melhores resultados do que a outra.

5.3 Considerações Finais

Existem várias semelhanças nas duas metodologias de obtenção de lei de controle abordados. As duas partem do princípio da não linearização dos sistemas. Além disso, ambos são métodos recursivos em malha fechada, o que favorece a desativação do sinal, caso o sistema já esteja em um ponto de equilíbrio estável. Em adição, os dois projetos de controladores são baseados na existência da função de Lyapunov, garantindo a estabilidade transitória assintótica do sistema.

Entretanto, há várias diferenças na metodologia de cada controlador. Estas diferenças estão presentes na obtenção da lei de controle e também nos resultados.

5.3.1 Comparação Da Obtenção Da Lei De Controle

A Tabela 11 resume, de maneira geral, as diferenças e semelhanças na aplicação da metodologia de controle entre os dois métodos.

Tabela 11 – Comparação da obtenção da lei de controle

	LgV	Backstepping
Necessidade de existência de função de Lyapunov	Sim	Sim
Necessidade de se conhecer a função de Lyapunov	Sim	Não
Utilização de parâmetros de controle arbitrários	Sim: 1	Sim: 3
Necessidade de se conhecer os parâmetros internos da máquina: correntes, tensões e ângulo interno	Sim	Sim
Necessidade de se conhecer do ponto de operação	Sim	Não

A partir da Tabela 11, pode se inferir que a metodologia de controle LgV demandou maior conhecimento sobre a função de Lyapunov, elevando a dificuldade de sua utilização. Além disso, essa metodologia requer o conhecimento do ponto de operação inicial.

É importante ressaltar também que a metodologia *Backstepping* aplicada ao contexto deste trabalho requer a utilização de três parâmetros de controle para sua utilização, o que pode aferir a esta metodologia uma maior gama de resultados, uma vez que é possível fixar um parâmetro e variar os outros. Entretanto, deve-se tomar maior atenção ao escolhê-los, pois a má escolha do valor de um dos parâmetros de controle pode ocasionar a divergência do sistema.

5.4 Comparação dos Resultados de Cada Metodologia

A Tabela 12 mostra, em geral, as diferenças e semelhanças na aplicação da metodologia de controle entre os dois métodos.

Tabela 12 – Comparação entre os resultados dos métodos

	LgV	Backstepping
Amortecimento das oscilações	Sim	Sim
Aumento na margem de estabilidade (Tempo crítico)	Irrelevante	Sim
Existência de faixa ou valor específico dos parâmetros de controle para convergência dos resultados	Sim	Sim

Verifica-se na Tabela 12 que as duas metodologias de obtenção de leis de controle apresentam resultados satisfatórios quanto ao amortecimento de oscilações. Entretanto, a lei de controle obtida pelo método *Backstepping* aumenta consideravelmente o tempo crítico de eliminação de faltas, melhorando a margem de estabilidade do sistema.

6 Conclusões

A comparação dos métodos foi executada de maneira a englobar o maior número de possibilidades de perturbações. Entretanto, é muito difícil comparar diretamente dois métodos que requerem parâmetros de controle ajustáveis. Estes parâmetros de controle conferem aos métodos a possibilidade de um melhor desempenho em uma outra região de validade não discutida no presente trabalho. Além disso, é possível que um método que se mostrou inferior nos resultados tenha um rendimento superior ou similar, desde que operado com diferentes parâmetros.

Apesar da dificuldade, existem alguns pontos que podem ser mencionados na comparação das metodologias LgV e *Backstepping*. Considerando o melhor caso abordado de parâmetros em cada tipo de perturbação, o amortecimento do *Backstepping* se mostrou bastante perceptível. Além disso, a margem de estabilidade só é aumentada de maneira significativa com a utilização desse controlador.

A metodologia LgV apresentou um pequeno aumento de tempo crítico e requer que o conhecimento da função de Lyapunov e sua manipulação sejam de domínio do usuário, o que acrescenta dificuldade ao método.

A necessidade de conhecimento dos parâmetros internos do gerador e das variáveis algébricas para realimentação são fatores também limitadores para as duas metodologias.

As duas metodologias estudadas requerem grande cuidado na sua utilização. Isso ocorre porque pequenas mudanças de projeto têm grandes proporções em relação ao resultado. A convergência depende de vários fatores, como a escolha dos parâmetros de controle, as características do gerador, o tempo de eliminação de falta e a natureza destas.

Referências Bibliográficas

ARRILLAGA, J. , ARNOLD, C.P. ,. HARKER, B.J. Computer Modeling of Electrical Power Systems. John Wiley & Sons, EUA, 1983.

BAZANELLA, A. S. Métodos Analíticos para Síntese de Controlados em Sistema de Potência. Universidade Federal de Santa Catarina, 1997.

BAZANELLA, AS ; KOKOTOVIC, PV ; SILVA, A dynamic extension for LgV controllers ASE IEEE Transactions On Automatic Control, Vol.44(3), pp.588-592 1991.

BESSA, W. M., BARRÊTO, R. S. S. Controle por Modos Deslizantes Nebuloso Adaptativo de Sistemas Incertos Não-Lineares. SBA: Controle & Automação. Sociedade Brasileira de Automática, 2010.

CHIANG, H., HIRSCH, M. and WU, F. Stability regions of nonlinear autonomous dynamical systems, IEEE Transactions on Automatic Control, 1988.

COSTA, A.; SILVA, A. Controle de Estabilidade de Sistemas Elétricos. Escola de Engenharia de São Carlos – USP, São Paulo, 2000.

FREEMAN R. A., PRIMBS J. A.. Control Lyapunov Functions. Department of Electrical and Computer Engineering Northwestern University – Technological Institute and Control and Dynamic Systems – California Institute of Technology. 2001.

HINGORANI, N. G., “Flexible AC Transmission,” IEEE Spectrum, pp. 40-44, April 1993.

JANKOVIC, M. Constructive lyapunov stabilization of nonlinear cascade systems. IEEE Transactions on Automatic Control [0018-9286] vol:41 iss:12 pg:1723 -1735, 1996.

JOHANSSON, A. Nonlinear observers with applications in the steel industry. Tese de Doutorado, Universidade Tecnológica de Lulea, Suécia, 2001.

JORDÃO, Rubens G. Máquinas síncronas. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 1980.

KARIMI, Ali. Power System Damping Controllers Design using a Backstepping Control Technique. West Virginia University, 2008.

KHALIL, H. K. Nonlinear Systems. New Jersey: Prentice Hall, 2002.

KUNDUR, P. Power System Stability and Control. New York: MacGrawHill, 1994.

NEMMOUR, A. L., MEHAZZEMB, F., KHEZZARA, A., HACILA, M., LOUZEIA,

L., ABDESSEMED, R. Advanced Backstepping controller for induction generator using multi-scalar machine model for wind power purposes Renewable energy, 2010.

MACHOWSK, P; BIALEK; BUMBY. Power System Dynamics: Stability and Control. [S.l.]: John Wiley Sons, 2008.

PADIYAR, K. R. Power Systems Dynamics: Stability and Control. John Wiley & Sons 1996.

PRALY, L ; ORTEGA, R ; KALIORA, Stabilization of nonlinear systems via forwarding mod LgV G IEEE Transactions On Automatic Control, Vol.46(9), pp.1461-1466, 2001.

SIQUEIRA, D. S. Controle Não Linear Aplicado A Dispositivos FACTS em Sistemas Elétricos de Potência. Escola de Engenharia de São Carlos – USP, São Paulo, 2012.

SONTAG, E. D. A Lyapunov-like characterization of asymptotic controllability. SIAM J. Control Optim., 21(3):462-471, 1983.

TERREL, W. J. Stability and Stabilization: An Introductio. Princeton University Press, New Jersey, 2009.

TOROGHI M. K., GOFFAUX , G., PERRIER, M., Observer-Based Backstepping Controller for Microalgae Cultivatio. Department of Chemical Engineering, École Polytechnique Montréal, Montréal, Canada, 2013.

ZAMANI, M ; TABUADA, P, Backstepping Design for Incremental Stability IEEE Transactions On Automatic Control, 2011, Vol.56(9), pp.2184-2189.

ZHU, C., ZHOU, R., WANG, Y. A New Nonlinear Voltage Controller for Power Systems. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 1997.

Apêndices

APÊNDICE A – Parâmetros do Gerador

Os parâmetros utilizados neste trabalho para o gerador síncrono foram retirados de *Power System Dynamics – Stability and Control* de K. R. Padiyar (1995). No capítulo 6 do livro, Padiyar ilustra o modelamento da máquina e fornece os seguintes valores, em *pu*:

Tabela 13 – Constantes Internas do Gerador Utilizadas

Parâmetro	Valor (pu)
x_l	1.5845
x_d	1.7572
x_q	1.77
x'_d	0.4245
x'_q	1.04
T'_{d0}	6.66 s
T'_{q0}	0.44 s
M	$3.542/60\pi$
δ	1.0884 rad
E'_q	1.0933
E'_d	-0.2313
E_{fd}	2

Para a função de Lyapunov e utilização do controle LgV, foram utilizados os valores provenientes do trabalho *Métodos Analíticos para Síntese de Controlados em Sistema de Potência*, de Bazanella, nas Equações 4.5 a 4.10. Estes parâmetros são indicados como segue:

$$b_1 = \frac{1}{2H(x'_D + x_l)} > 0, \quad b_2 = \frac{x_D - x'_D}{T'_{d0}(x'_D + x_l)} > 0, \quad b_3 = \frac{x_D + x'_D}{T'_{d0}(x'_D + x_l)} > 0$$

$$a = \frac{D\pi f}{2H}$$

$$b = \frac{\pi f}{2H}$$

$$c = \frac{\pi f}{2H} \cdot \frac{1}{x_{ld} + x_l}$$

$$d = \frac{\pi f}{2H} \cdot \frac{x_{ld} - x_q}{(x_{ld} + x_l)(x_l + x_q)}$$

$$e = \frac{1}{T_d} \left(\frac{x_d - x_{ld}}{x_{ld} + x_l} - 1 \right)$$

$$f = \frac{1}{T_d} \cdot \frac{x_d - x_{ld}}{x_{ld} + x_l}$$

$$g = 1$$

$$h = \frac{1}{T_q} \left(\frac{x_q - x_{lq}}{x_{lq} + x_l} - 1 \right)$$

$$i = \frac{1}{T_q} \cdot \frac{x_q - x_{lq}}{x_{lq} + x_l}$$