

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

**ANÁLISE DE SISTEMAS DE EXCITAÇÃO DE UMA
MÁQUINA SÍNCRONA**

Autor: Caio César Arneiro Soares

Orientador: Flávio H. J. R. Silva

Brasília, DF

2017



CAIO CÉSAR ARNEIRO SOARES

ANÁLISE DE SISTEMAS DE EXCITAÇÃO DE UMA MÁQUINA SÍNCRONA

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

Orientador: Flávio H. J. R. Silva

Brasília, DF

2017

CIP – Catalogação Internacional da Publicação*

Arneiro Soares, Caio Cesar.

Título da Monografia: Subtítulo / Caio Cesar Arneiro Soares.
Brasília: UnB, 2017.

Monografia (Graduação) – Universidade de Brasília

Faculdade do Gama, Brasília, 2017. Orientação: Flavio H. J. R. Silva

1. Máquina síncrona. 2. Sistema de excitação. 3. Rotor

H. J. R. Silva, Flávio.

Análise de sistema de excitação de máquinas síncronas.

CDU Classificação

**REGULAMENTO E NORMA PARA REDAÇÃO DE RELATÓRIOS DE PROJETOS DE
GRADUAÇÃO FACULDADE DO GAMA - FGA**

Caio Cesar Arneiro Soares

Monografia submetida como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia da Faculdade UnB Gama - FGA, da Universidade de Brasília, no 2º semestre de 2017 apresentada e aprovada pela banca examinadora abaixo assinada:

Prof.(Titulação): Flávio H. J. R. Silva, UnB/ FGA

Orientador

Prof.(Titulação): Luís Filomeno de Jesus Fernandes, UnB/ FGA

Membro Convidado

Prof.(Titulação): Ronni Amorim, UnB/ FGA

Membro Convidado

Brasília, DF
2017

AGRADECIMENTOS

Meu agradecimento é destinado aos meus familiares, os quais de maneira constante estiveram a par dos acontecimentos da minha vida, me guiando e dando orientações para que eu trilhasse o caminho certo, cobrando-me resultados e somando esforços para que a caminhada acadêmica se tornasse a mais proveitosa possível.

Ao meu professor e orientador Flávio Henrique, que disponibilizou tempo e ensinamentos ao me orientar, estando presente no passo a passo do desenvolvimento deste trabalho de conclusão, demonstrando um exímio domínio do tema sobre o referente manuscrito.

Aos demais professores do curso de Engenharia de Energia, que demostram total dedicação com suas respectivas matérias, permitindo que o conhecimento seja transmitido da melhor forma possível.

E por último e não menos importante, a todos meus amigos de graduação, que dividiram trabalhos e horas de estudos, auxiliando-me em dúvidas e permitindo uma caminhada conjunta e consequentemente facilitando o processo de aprendizagem. Além da minha namorada que frequentemente me cobrou dedicação total aos meus estudos e ao término de forma morosa deste trabalho.

Caio César Arneiro Soares

RESUMO

O presente trabalho aborda o funcionamento das máquinas síncronas, englobando os meios de realização da indução de tensão eletromagnética do rotor ao estator, mostrando seu funcionamento básico. Também são apresentados os diferentes tipos de sistemas de excitação englobados pela IEEE que uma máquina síncrona pode possuir, salientando as respectivas configurações de cada um destes para uma melhor visualização e comparação dentre as diferenças entre os tipos apresentados.

A etapa final do projeto consiste na simulação dos diferentes tipos de sistemas de excitação apresentados através do software MATLAB, salientando as diferenças entre os variáveis tipos de sistema de excitação e permitindo a comparação entre a simulação e a parte teórica.

Palavras-chave: Máquina síncrona, Sistema de excitação, Rotor e Simulação.

ABSTRACT

The present work deals with the operation of synchronous machines, encompassing the means of realizing the electromagnetic voltage induction of the rotor to the stator, showing its basic operation. Also presented are the different types of excitation systems included in the IEEE that a synchronous machine can have, highlighting the respective configurations of each of them for a better visualization and comparison among the differences between the presented types.

The final stage of the project consists of simulating the different types of excitation systems presented through the MATLAB software, highlighting the differences between the excitation system type variables and allowing the comparison between the simulation and the theoretical part.

Keywords: Synchronous machine, Excitation System and Simulation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Enrolamento de campo em um rotor de polos lisos. [7]	20
Figura 2 - Enrolamento de campo em um rotor de polos salientes. [7]	20
Figura 3 - Rotor de seis polos salientes de uma máquina síncrona. [5]	24
Figura 4 - Rotor de dois polos não salientes de uma máquina síncrona. [5]	24
Figura 5 - Circuito de excitatriz sem escova. [5]	26
Figura 6 - Diagrama de uma máquina CA trifásica de dois polos. [3]	27
Figura 7 - Distribuição de força magnetomotriz do enrolamento da fase A. [3]	28
Figura 8 - Representação física da transformação de Park. [4]	36
Figura 9 - À esquerda a representação da máquina original, e à direita verifica-se a representação da mesma transformada. [4]	36
Figura 10 - Diagrama fasorial para a máquina síncrona no regime transitório. [3]	39
Figura 11 - Esquema de excitação sem escovas que inclui uma excitação piloto. [5]	44
Figura 12 - Componentes do sistema de excitação.	45
Figura 13 - Excitatriz principal com controle do reostato de campo.	47
Figura 14 - Representação do sistema de excitação com retificação estática.	50
Figura 15 - Sistema de excitação com retificação rotativa.	51
Figura 16 - Representação da Excitação Estática Utilizando Tiristores. [12]	52
Figura 17 - Sistema de excitação convencional, com um amplificador acoplado ao campo de excitação. [6]	54
Figura 18 - Diagrama de blocos do sistema clássico e suas respectivas funções de transferência.	60
Figura 19 - Diagrama de bloco de um sistema de controle de excitação. [11]	61
Figura 20 - Tipo DC1A de sistema de excitação. [10]	64
Figura 21 - Tipo AC1A de sistema de excitação. [10]	65
Figura 22 - Tipo AC4A de sistema de excitação. [10]	66
Figura 23 - Tipo AC5A de sistema de excitação. [10]	67
Figura 24 - Tipo ST1A de sistema de excitação. [10]	68
Figura 25 – Simulação representada a partir de diagramas de blocos.	71
Figura 26 – Diagramas de blocos do Sistema de excitação e do Gerador síncrono, respectivamente.	71
Figura 27 – Gráfico referente a rotação por minuto do eixo da máquina em operação normal.	75
Figura 28 – Gráfico referente a rotação por minuto do eixo da máquina em curto.	76

Figura 29 – Gráfico da corrente de armadura em um sistema ideal, logo sem curto-circuito.....	78
Figura 30 – Gráfico da tensão de armadura em um sistema ideal, logo sem curto-circuito.....	79
Figura 31 – Gráfico da corrente de armadura em curto, com o sistema de excitação DC1A.....	81
Figura 32 – Gráfico da corrente de armadura em curto, com o sistema de excitação DC2A.....	81
Figura 33 – Gráfico da corrente de armadura em curto, com o sistema de excitação AC1A.....	82
Figura 34 – Gráfico da corrente de armadura em curto, com o sistema de excitação AC4A.....	82
Figura 35 – Gráfico da corrente de armadura em curto, com o sistema de excitação AC5A.....	83
Figura 36 – Gráfico da corrente de armadura em curto, com o sistema de excitação ST1A.....	83
Figura 37 – Gráfico da tensão de armadura em curto, com o sistema de excitação DC1A.....	85
Figura 38 – Gráfico da tensão de armadura em curto, com o sistema de excitação DC2A.....	85
Figura 39 – Gráfico da tensão de armadura em curto, com o sistema de excitação AC1A.....	86
Figura 40 – Gráfico da tensão de armadura em curto, com o sistema de excitação AC4A.....	86
Figura 41 – Gráfico da tensão de armadura em curto, com o sistema de excitação AC5A.....	87
Figura 42 – Gráfico da tensão de armadura em curto, com o sistema de excitação ST1A.....	87
Figura 43 – Gráfico da tensão de campo, com o sistema de excitação DC1A.....	91
Figura 44 – Gráfico da tensão de campo em curto, com o sistema de excitação DC1A.....	92
Figura 45 – Gráfico da tensão de campo, com o sistema de excitação DC2A.....	94
Figura 46 – Gráfico da tensão de campo em curto, com o sistema de excitação DC2A.....	94
Figura 47 – Gráfico da tensão de campo, com o sistema de excitação AC1A.....	96

Figura 48 – Gráfico da tensão de campo em curto, com o sistema de excitação AC1A.	97
Figura 49 – Gráfico da tensão de campo, com o sistema de excitação AC4A.	99
Figura 50 – Gráfico da tensão de campo em curto, com o sistema de excitação AC4A.	99
Figura 51 – Gráfico da tensão de campo, com o sistema de excitação AC5A.	101
Figura 52 – Gráfico da tensão de campo em curto, com o sistema de excitação AC5A.	102
Figura 53 – Gráfico da tensão de campo do sistema de excitação ST1A.	104
Figura 54 – Gráfico da tensão de campo em curto do sistema de excitação ST1A.	105
Figura 55 - Circuito elétrico acoplado magneticamente. [3].....	109
Figura 56 - Sistema de Conversão Eletromecânica de Energia. [3]	114

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Modelos simplificados e as restrições para cada caso. [9].....	41
Tabela 2 - Valores das constantes do sistema de excitação DC1A.	90
Tabela 3 - Valores das constantes do sistema de excitação DC2A.	93
Tabela 4 - Valores das constantes do sistema de excitação AC1A.	95
Tabela 5 - Valores das constantes do sistema de excitação AC4A.	98
Tabela 6 - Valores das constantes do sistema de excitação AC5A.	100
Tabela 7 - Valores das constantes do sistema de excitação ST1A.....	103

LISTA DE SÍMBOLOS

ϕ_1 : Fluxo magnético produzido pela bobina 1.

ϕ_2 : Fluxo magnético produzido pela bobina 2.

ϕ_{l1} : Fluxo de dispersão, produzido pela corrente circulando pelo enrolamento 1 e entrelaça apenas as espiras do mesmo enrolamento.

ϕ_{l2} : Fluxo de dispersão, produzido pela corrente circulando pelo enrolamento 2 e entrelaça apenas as espiras do mesmo enrolamento.

ϕ_{m1} : Fluxo de magnetização produzido pela corrente do enrolamento 1, porém entrelaça todas as espiras de ambos os enrolamentos.

ϕ_{m2} : Fluxo de magnetização produzido pela corrente do enrolamento 2, porém entrelaça todas as espiras de ambos os enrolamentos.

ψ : Enlace de Fluxo de um enrolamento.

N : Número de espiras.

i : Corrente do enrolamento.

R : Relutância do circuito magnético.

l : Comprimento médio do caminho magnético.

A : Área da secção transversal.

μ : Permeabilidade Magnética do meio.

R_{l1} e R_{l2} : Relutâncias associadas aos fluxos de dispersão dos enrolamentos 1 e 2, respectivamente.

R_m : Relutância associada aos fluxos de magnetização, sendo comum a ambos os enrolamentos.

L_{l1} e L_{l2} : Indutâncias de dispersão.

L_{m1} e L_{m2} : Indutâncias de magnetização dos enrolamentos 1 e 2, respectivamente.

L_{12} : Indutância mútua entre os enrolamentos 1 e 2.
: Tensão elétrica, ou diferença de potencial.

r : Resistência elétrica.

e_f : Queda de tensão sobre o enrolamento.

M : Massa.

D : Coeficiente de amortecimento.

K : Constante da mola.

x_0 : Posição de equilíbrio da mola.

W_e : Energia suprida pela fonte elétrica.

W_m : Energia suprida pela fonte mecânica.

H : Intensidade de Campo Magnético.

B : Densidade de Fluxo Magnético.

FMM: Força Magnetomotriz.

g : Comprimento do entreferro.

θ_s : ângulo medido em relação ao eixo magnético do enrolamento de campo (associado à posição do estator).

θ_r : ângulo medido em relação ao eixo magnético do enrolamento de campo (associado à posição do rotor).

θ_r : é a posição do rotor com relação ao estator, variando conforme a rotação do mesmo.

K_q : Sub-índice para designar enrolamentos amortecedores no eixo de quadratura, ou seja, enrolamentos curto circuitados montados no rotor.

K_d : Sub-índice para designar enrolamentos amortecedores no eixo direto, ou seja, enrolamentos curto circuitados montados no rotor.

F_d : Sub-índice para designar o enrolamento do rotor.

f_d : Tensão em regime permanente do eixo do enrolamento de campo do rotor.

E'_q : Tensão em regime transitório no eixo de quadratura.

E'_d : Tensão em regime transitório no eixo direto.

V_q : Tensão elétrica no eixo de quadratura.

V_d : Tensão elétrica no eixo direto.

R_a : Resistência elétrica de armadura.

X'_q : Reatância do eixo de quadratura em regime transitório.

X_q : Reatância do eixo de quadratura em regime permanente.

X'_d : Reatância do eixo direto em regime transitório.

X_d : Reatância do eixo direto em regime permanente.

I_q : Corrente elétrica do eixo de quadratura.

I_d : Corrente elétrica do eixo direto.

T'_{d0} : Constante de tempo transitória do eixo direto.

T_m : Torque mecânico induzido pela turbina.

T_e : Torque elétrico da máquina.

K_D : Constante de amortecimento.

ω_s : Velocidade síncrona da máquina.

ω : Velocidade angular.

V_t : Tensão Terminal.

K_R : Constante de ganho do transformador de potencial.

T_R : Constante de tempo relacionada a determinação do tempo de conversão de V_t para uma tensão contínua V_{dc} .

dc : Tensão contínua que posteriormente é amplificada para alimentação da excitatriz.

V_R : Tensão de saída amplificada para alimentação da excitatriz.

V_{fd} : Tensão do enrolamento de campo.

K_A : Constante de Ganho do amplificador.

T_A : Constante de tempo relacionada ao ganho do amplificador.

E_r : Tensão de saída do regulador.

\emptyset_F : Fluxo magnético que enlaça o enrolamento de campo.

\emptyset_{ef} : Fluxo magnético no entreferro da excitatriz.

\emptyset_{disp} : Fluxo de dispersão.

K_E : Constante de Ganho relacionada á regulagem do reostato.

T_E : Constante de tempo relacionada á regulagem do reostato.

$S'_E(v_{fd})$: Função de saturação não linear para valores de v_{fd} em regime transitório.

r_f : Resistência do enrolamento de campo do gerador.

L_f : Indutância do enrolamento de campo do gerador.

M_f : Indutância mútua entre os enrolamentos de campo e de armadura do gerador.

i_f : Corrente do enrolamento de campo do gerador.

T_B e T_C : Constantes de tempo de redução do ganho transitório a altas frequências inerentes à operação do regulador de tensão.

K_F : Constante de ganho de realimentação negativa, disposto na função de transferência de compensação.

T_F : Constante de tempo relacionada á constante de ganho K_F .

χ : Produto entre a função não linear de saturação para dado valor de tensão de saída da excitatriz, responsável por controlar a alimentação da mesma.

V_F : Tensão compensada para amenização dos desvios de fase acarretados pelo atraso nos componentes do sistema de excitação.

K_D : Fator de desmagnetização.

K_C : Fator de retificação do carregamento.

E_{fd} : Tensão de campo.

I_{fd} : Corrente de campo.

SUMÁRIO

1	Introdução	19
1.1	Contextualização.....	19
1.2	Definição do problema.	21
1.3	Objetivo geral.	21
1.4	Metodologia.....	22
2	Máquinas Síncronas.	23
2.1	Modelagem do sistema.	23
2.2	Máquinas síncronas.	23
2.2.1	Enrolamento da máquina CA e força magnetomotriz.	27
2.3	Modelo elétrico da máquina síncrona.	29
2.4	Parâmetros da máquina síncrona.	37
2.4.1	Regime transitório.	37
2.4.2	Equações mecânicas.....	40
2.4.3	Simplificação do modelo obtido.	41
3	Sistema de excitação.....	43
3.1	Configuração física dos componentes do sistema de excitação.	45
3.1.1	Regulador de Tensão.	46
3.2	Configurações típicas de sistema de excitação.	47
3.2.1	Sistema de excitação DC.	47
3.2.2	Sistema de excitação AC.....	48
3.2.2.1	Sistema de excitação AC com retificadores estáticos.....	49
3.2.2.2	Sistema de excitação AC com retificadores rotativos.	51
3.2.3	Sistema de excitação estático.	52
3.3	Modelo matemático de um sistema de excitação clássico.	54
3.3.1	Componentes e respectivas funções de transferência.	54
3.3.1.1	Transformadores de potencial e retificadores.	54
3.3.1.2	Amplificador.	55
3.4	Diagrama de blocos do sistema de excitação.....	60
3.5	Funcionamento e tipos de sistemas de excitação de acordo com a IEEE. ...	60
3.5.1	Tipo DC1A.	62
3.5.2	Tipo DC2A.	65

3.5.3	Tipo AC1A.	65
3.5.4	Tipo AC4A.	66
3.5.5	Tipo AC5A.	67
3.5.6	Tipo ST1A.....	68
4	Simulação	70
4.1	Curto-circuito.....	72
4.1.1	Função do conjunto sistema de excitação e gerador síncrono após o curto	
	73	
4.2	Resultados	74
4.2.1	Função do aumento da rotação para o sistema de excitação	74
4.2.2	Resultados dos gráficos de corrente de armadura e tensão de armadura.....	77
4.2.3	Discussão dos resultados de tensão de campo de cada sistema de excitação.....	88
5	Conclusões.....	106
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	107
A.	Circuitos Acoplados Magneticamente.....	109
B.	Conversão Eletromecânica de Energia.	114

Capítulo 1

1 Introdução

1.1 Contextualização

A geração de energia elétrica é hoje um tema de grande prioridade para o desenvolvimento sócio econômico de um país, tendo em vista que seu grau de utilização ou geração é proporcional ao crescimento econômico do país gerador e desta forma acarreta um acréscimo na receita anual deste.

Em meados do século XX, a necessidade do aumento da potência nominal gerada pelos alternadores síncronos clássicos culminou em avanços tecnológicos relacionados aos componentes do sistema de excitação das máquinas síncronas. Tendo em vista, problemas mecânicos desenvolvidos no sistema clássico de excitação ao elevar a corrente de excitação do mesmo. Com a elevação na corrente pretendia-se aumentar a capacidade nominal do gerador, o que promoveria o aumento de escovas e consequentemente no maior grau de manutenção das mesmas. [6]

O surgimento do sistema de excitação de corrente alternada, o qual permite uma regulação de tensão mais eficiente e eliminava a presença de escovas foi desenvolvido posteriormente, culminando na redução da manutenção exigida pelos componentes do sistema e elevando a capacidade nominal de geração destas máquinas síncronas. Porém, determinados componentes como anéis coletores se mantiveram em sua estrutura, os quais há a penúria de manutenções periódicas. Outro imprevisto foi o desenvolvimento de retificadores de potência capazes de suportar as tensões trifásicas que alimentam os campos da excitatriz e da máquina principal. [12]

Desta forma, pesquisas foram realizadas e apresentadas para que houvesse a redução máxima da manutenção exigida por estas máquinas e mantivessem a sua alta estabilidade e capacidade nominal. Posteriormente, sendo apresentado um sistema de excitação AC com retificação rotativa, onde excluía a necessidade dos anéis deslizantes, sendo a própria rotação apresentada no rotor responsável pela passagem de corrente entre a armadura da excitatriz e o campo do gerador. Novamente houve um

desenvolvimento tecnológico para que os retificadores suportassem a força centrífuga, a qual seriam expostos. [12]

A conversão eletromecânica de energia é dada através da geração de fluxo magnético devido à passagem de corrente contínua nos enrolamentos de campo. Ao ser rotacionado, por meio de turbinas acopladas ao rotor, o fluxo magnético passa a ser variante no tempo com relação ao entreferro, promovendo a formação da força eletromotriz que induz tensão elétrica nos enrolamentos do estator. [5]

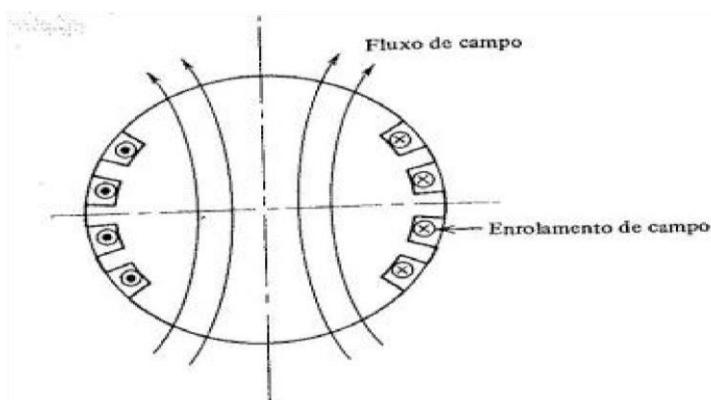


Figura 1 - Enrolamento de campo em um rotor de polos lisos. [7]

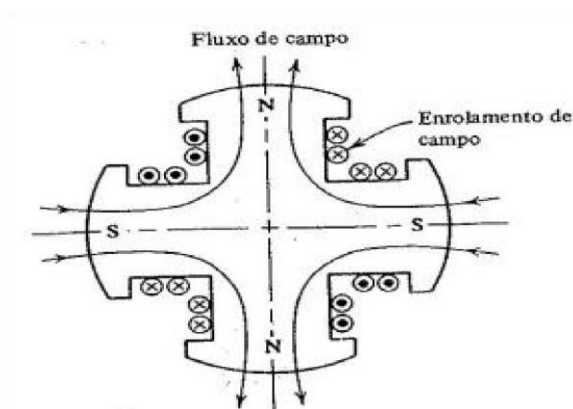


Figura 2 - Enrolamento de campo em um rotor de polos salientes. [7]

Em seguida, vários tipos de sistema de excitação foram estudados e postos em prática, promovendo a mais variada gama de maquinários, o que será abordado nos capítulos futuros. Atualmente, a grande necessidade de descoberta é a implantação de

uma máquina com um sistema auto excitado por meio de uma excitatriz piloto, cuja configuração não há presença de escovas para auxiliar na condutividade elétrica, sendo esta falta amenizada por meio do controle do disparo de tiristores através do regulador de tensão. [6]

1.2 Definição do problema.

A necessidade da melhoria do desempenho e eficiência, além da rapidez de respostas entre os componentes do rotor e estator, associados principalmente a seu grau de manutenção e tempo de vida útil de seus componentes, traz à tona, séries de pesquisas para desenvolvimento de sistemas de excitações de máquinas síncronas, objetivando justamente conciliar o aumento de desempenho com aumento de vida útil dos componentes.

1.3 Objetivo geral.

Neste trabalho é apresentado o modo de funcionamento de máquinas síncronas, contextualizando as funções de seus componentes principais, e abordando a forma geral de seu funcionamento. Além disso, englobará o sistema de excitação destas máquinas, apresentando sua definição e os tipos de sistema de excitação, mostrando o desempenho apresentado em cada tipo.

Por meio do software MATLAB é possível verificar a diferença entre os diferentes tipos de sistema de excitação, porém não evidenciando um comparativo haja vista que os valores das variáveis são alteráveis, e são exibidos os comportamentos dinâmicos das variáveis de interesse da máquina síncrona.

O viés principal deste trabalho é mostrar via simulação o retorno da estabilidade de uma rede elétrica após um curto-circuito, através do sistema interligado entre sistema de excitação e gerador síncrono.

1.4 Metodologia.

Este trabalho é estruturado sequencialmente seguindo a lógica de primeiramente apresentar os conceitos básicos de funcionamento das máquinas síncronas, mostrando suas respectivas equações inerentes a seu modelo matemático, e conceitos teóricos. Posteriormente, expõe-se os conceitos dos sistemas de excitação e seu objetivo principal de implantação em uma máquina síncrona, mostrando os tipos de sistemas de excitação quanto a sua corrente gerada e forma de alimentação da excitatriz, e posteriormente os subtipos de sistemas, englobados nas resoluções e anexos da IEEE e que estão disponíveis no software MATLAB para análise.

Na etapa final de elaboração do trabalho é apresentado os resultados entre os subtipos de sistemas de excitação encontrados no software MATLAB, observando as diferentes respostas dos mesmos e associando-as com cada função de transferência determinadas pelas próprias resoluções da IEEE.

Capítulo 2

2 Máquinas Síncronas.

2.1 Modelagem do sistema.

A proposta principal deste capítulo é inserir ao leitor os conceitos básicos de máquinas síncronas apresentando seu objetivo principal como um conversor eletromecânico de energia, além de situar o mesmo quanto às equações que demonstram o funcionamento da máquina síncrona, relacionando-a a um circuito acoplado magneticamente. Por estes motivos, é importante a leitura dos apêndices A e B para que se tenha noção de conceitos básicos relacionados à mesma.

2.2 Máquinas síncronas.

As máquinas síncronas estão entre os três tipos mais comuns de máquinas elétricas, sendo assim chamadas pelo fato de operarem com velocidade e frequência constantes em regime permanente [7]. Máquina síncrona é uma máquina de corrente alternada na qual a frequência da tensão induzida e a velocidade de rotação possuem uma relação de proporcionalidade, sendo esta $n = 60 \times \frac{f}{p}$.

As máquinas síncronas podem ser utilizadas tanto como motores, tanto como geradores. Devido a razões construtivas e ao seu custo maior em relação às máquinas de indução, elas são mais utilizadas como geradores. Como motores elas são em geral utilizadas em altas potências, acima de 600 CV, onde apresentam vantagens em relação aos motores de indução. Por outro lado, as máquinas síncronas que possuem ímãs permanentes vêm tendo uma utilização cada vez maior em baixas e médias potências especialmente quando se necessita de velocidade variável, alto rendimento e respostas dinâmicas rápidas. [1]

Os geradores e motores síncronos são constituídos pelo rotor e pelo estator. O rotor de um gerador síncrono é essencialmente um grande eletroímã, o qual há a formação de campos magnéticos. Os polos magnéticos do rotor podem ser construídos

de duas formas: salientes ou não salientes. O termo saliente significa protuberante e condiz a um polo magnético que se sobressai radialmente do rotor. Entretanto, um polo não saliente é um polo magnético com os enrolamentos encaixados e nivelados com a superfície do rotor [5]. A seguir pode ser visto ambos os casos:

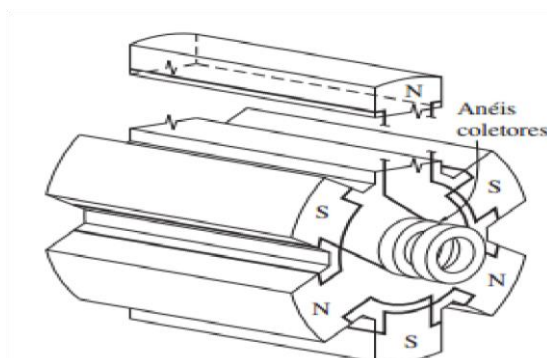


Figura 3 - Rotor de seis polos salientes de uma máquina síncrona. [5]

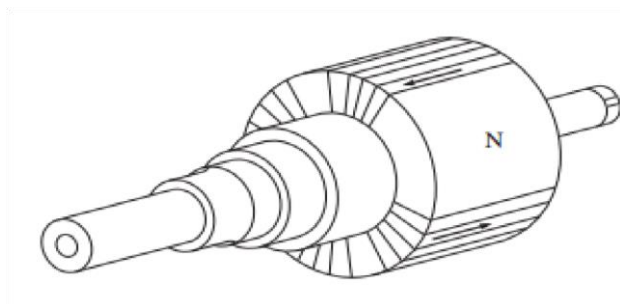


Figura 4 - Rotor de dois polos não salientes de uma máquina síncrona. [5]

No rotor está montado o enrolamento indutor que é percorrido por corrente contínua e tem como função a criação de um campo magnético intenso. No estator estão montados os enrolamentos induzidos nos quais se efetua a conversão eletromecânica de energia. [2]

O estator é constituído basicamente por uma carcaça de ferro com funções essencialmente mecânicas. Esta carcaça suporta um núcleo de material ferromagnético sob o qual, se encontram distribuídos os enrolamentos do induzido. [2]

Se o rotor for um eletroímã, uma corrente contínua deverá ser fornecida ao circuito de campo desse rotor. Como ele estará girando, por estar interligado a uma turbina rotativa ou outro dispositivo que promove sua rotação, um arranjo especial será

necessário para levar a potência CC até seus enrolamentos de campo. Há duas abordagens comuns para fornecer a potência CC, sendo essas: a partir de uma fonte de corrente contínua externa, a qual forneça a potência CC para o rotor, por meio de anéis coletores e escovas, ou através de uma fonte de potência CC especial, montada diretamente no eixo da máquina síncrona, ou conhecida como sistema de excitação. [5]

Anéis coletores são anéis de metal que envolve o eixo de uma máquina, mas estão isolados do eixo da mesma. Cada extremidade do enrolamento CC do rotor é conectada a um dos dois anéis coletores no eixo da máquina síncrona e uma escova estacionária está em contato com cada anel coletor. Uma escova é um bloco de carbono semelhante a grafite que conduz eletricidade facilmente. [1]

Se o terminal positivo de uma fonte de tensão CC for conectado a uma escova e o terminal negativo for conectado a outra, então a mesma tensão será aplicada continuamente ao enrolamento de campo, independentemente da posição angular ou da velocidade do rotor. Anéis coletores e escovas criam alguns problemas quando são usados para fornecer potência CC aos enrolamentos de campo de uma máquina síncrona. Estes aumentam o grau de manutenção exigida pela máquina, porque o desgaste das escovas deve ser verificado regularmente. Além disso, a queda de tensão nas escovas pode ser a causa de significativas perdas de potência em máquinas que operam com grandes correntes de campo. Apesar desses problemas, os anéis coletores e as escovas são utilizadas na maior parte das máquinas síncronas de menor porte, pelo fato de nenhum outro método de fornecimento de corrente CC de campo é tão efetivo do ponto de vista custo-benefício. [5]

Em geradores e motores de maior porte, excitatrizes sem escovas são usadas para fornecer a corrente CC de campo para a máquina. Uma excitatriz sem escovas é um pequeno gerador CA com seu circuito de campo montado no estator e seu circuito de armadura montado no eixo do rotor. A saída trifásica do gerador da excitatriz é convertida em corrente contínua por meio de um circuito retificador trifásico que também está montado no eixo do gerador. A seguir, essa corrente contínua alimenta o circuito CC principal de campo. Controlando a baixa corrente de campo CC do gerador da excitatriz, localizado no estator, é possível ajustar a corrente de campo na máquina principal sem usar escovas nem anéis coletores. Esse arranjo está mostrado esquematicamente na

figura abaixo. Como nunca ocorrem contatos mecânicos entre o rotor e o estator, uma excitatriz sem escovas requer muito menos manutenção. [5]

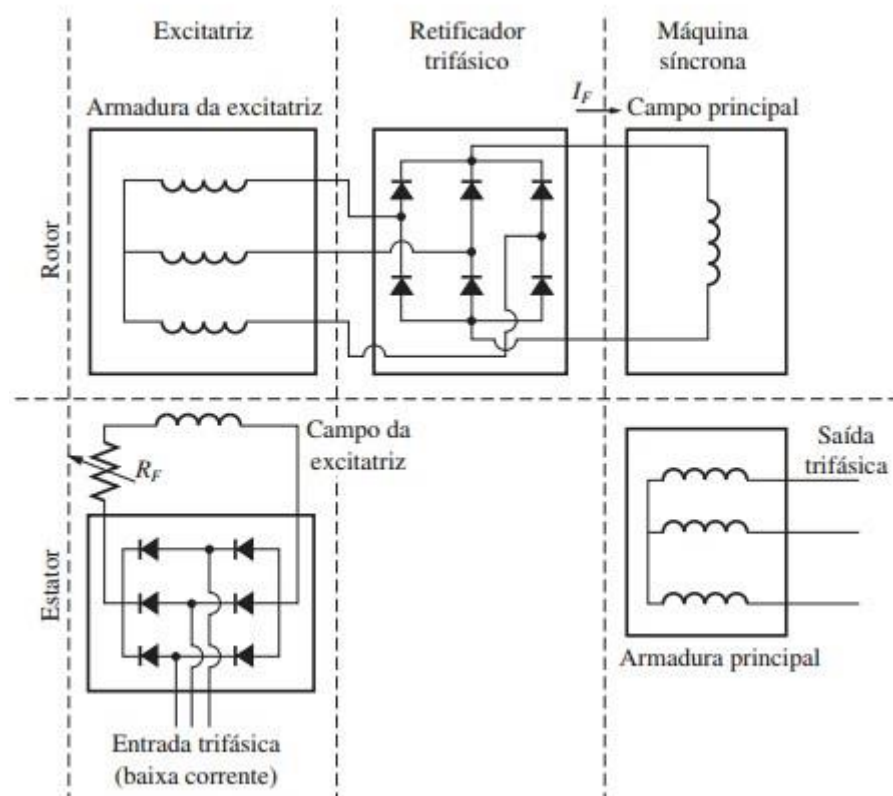


Figura 5 - Circuito de excitatriz sem escova. [5]

Nos rotores de polos salientes há um núcleo central, ao qual se ligam polos onde são dispostos os enrolamentos do indutor. Esta solução é utilizada normalmente em máquinas de elevado número de polos, ou seja, com baixa velocidade de rotação. [2]

Nas máquinas de polos lisos os condutores estão montados em cavas e distribuídos ao longo da periferia. O número de polos é reduzido, logo culmina-se em uma velocidade elevada, sendo o diâmetro destas máquinas relativamente pequeno ($D < 1,10\text{m}$). [2]

2.2.1 Enrolamento da máquina CA e força magnetomotriz.

A figura 6 apresenta abaixo um diagrama simplificado de uma máquina CA trifásica de dois polos. O enrolamento associado a cada fase tem seu eixo magnético defasado de 120° em relação aos eixos das demais fases. O enrolamento de campo está localizado no rotor e seu eixo magnético pode girar de acordo com o movimento do rotor. [3]

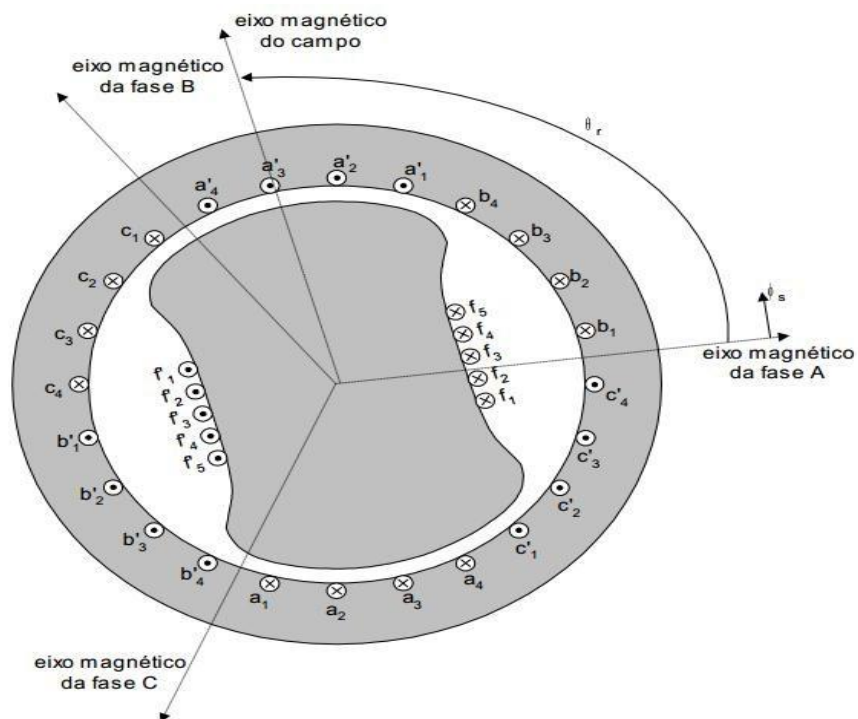


Figura 6 - Diagrama de uma máquina CA trifásica de dois polos. [3]

A força magnetomotriz, FMM, no entreferro da máquina pode ser determinada a partir da Lei de Ampère:

$$\oint_0^L \vec{H} \, d\vec{l} = i \quad (2.1)$$

Considerando-se a permeabilidade magnética do material muito maior que a do ar, a intensidade do campo magnético, H , no material é desprezível e, portanto, a integral

mostrada na equação acima pode ser calculada considerando-se apenas os trechos dos caminhos fechados correspondentes ao entreferro da máquina. [3]

Observando-se, uma distribuição uniforme dos enrolamentos das fases, cada fase ocupa um arco de 120° no estator, com duas seções de 60° em oposição de fase e defasadas 180° conforme mostrado na figura 6.

A distribuição de FMM produzida pelo enrolamento da fase A, ao longo da superfície do estator, tem aproximadamente a forma mostrada na figura 7.

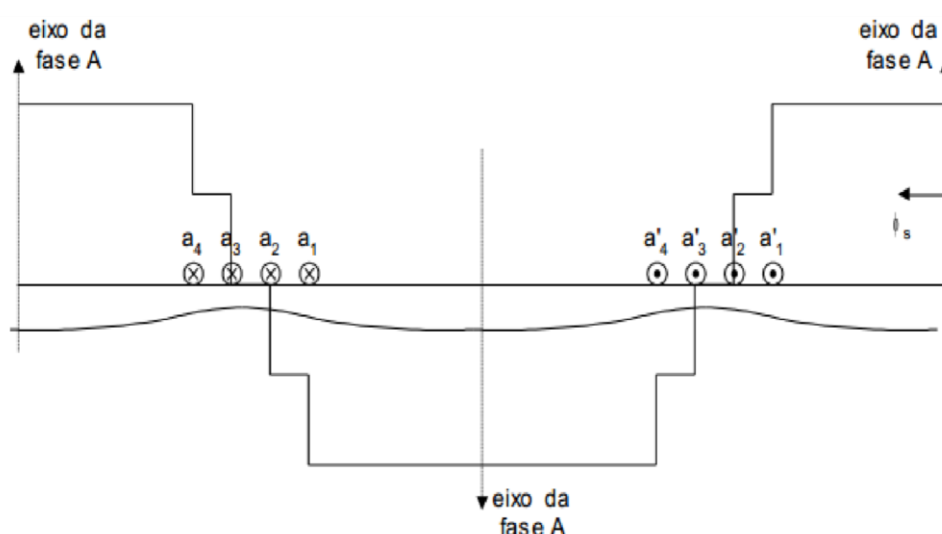


Figura 7 - Distribuição de força magnetomotriz do enrolamento da fase A. [3]

Esta forma de onda pode ser entendida como uma aproximação para uma função senoidal. Tendo em vista que o seu comportamento para o entreferro possui valores maiores no eixo direto do que se comparado com o eixo de quadratura, e a variação do campo magnético com o tempo, ocasionada pela rotação imposta no rotor pela turbina, evidencia-se mais este comportamento. [5]

O eixo magnético da fase A pode ser interpretado como o centro da região de máximo da distribuição de FMM do enrolamento. É fácil verificar que a distribuição de FMM dos enrolamentos das fases B e C têm a mesma forma que aquelas mostradas para a fase A, com defasagens de 120° em relação à fase dita como referência, ou seja, a fase A: [3]

$$FMMa = \frac{N}{2} I_a \cos \phi_s \quad (2.2)$$

$$FMMb = \frac{N}{2} I_b \cos \left(\phi_s - \frac{2\pi}{3} \right) \quad (2.3)$$

$$FMMc = \frac{N}{2} I_c \cos \left(\phi_s + \frac{2\pi}{3} \right) \quad (2.4)$$

Sendo a força magnetomotriz responsável por induzir tensão nos enrolamentos de armadura da máquina síncrona, localizados no estator. [5]

2.3 Modelo elétrico da máquina síncrona.

O modelo elétrico para a máquina síncrona é obtida a partir da determinação das indutâncias próprias e mútuas relacionadas aos diversos enrolamentos. A hipótese utilizada aqui é que o entreferro varia senoidalmente conforme a expressão abaixo: [3]

$$g(\theta_r) = \frac{1}{\alpha_1 + \alpha_2 \cos(2\theta_r)} \quad (2.5)$$

O ângulo θ_r o qual o entreferro varia, consiste na variação angular medido em relação ao eixo magnético do campo, associado à posição do rotor.

Com relação ao estator o mesmo pode ser reescrito da seguinte maneira: [3]

$$g(\theta_s - \theta_r) = \frac{1}{\alpha_1 + \alpha_2 \cos 2(\theta_s - \theta_r)} \quad (2.6)$$

O ângulo θ_r é a posição do rotor com relação ao estator, variando conforme a rotação deste. Já o ângulo θ_s é medido em relação ao eixo magnético do campo, associa-se à posição do estator.

A densidade de fluxo magnético pode ser definida a partir da força magnetomotriz como: [3]

$$B = \mu_o \frac{FMM}{g} \quad (2.7)$$

Embutindo a densidade de fluxo magnético para cada fase, temos:

$$B_a(\theta_s, \theta_r) = \mu_o \frac{N}{2} I_a \cos \theta_s [\alpha_1 + \alpha_2 \cos 2(\theta_s - \theta_r)] \quad (2.8)$$

$$B_b(\theta_s, \theta_r) = \mu_o \frac{N}{2} I_b \cos \left(\theta_s - \frac{2\pi}{3} \right) [\alpha_1 + \alpha_2 \cos 2(\theta_s - \theta_r)] \quad (2.9)$$

$$B_c(\theta_s, \theta_r) = \mu_o \frac{N}{2} I_c \cos \left(\theta_s + \frac{2\pi}{3} \right) [\alpha_1 + \alpha_2 \cos 2(\theta_s - \theta_r)] \quad (2.10)$$

A densidade de fluxo magnético, produzida a partir do enrolamento do rotor é:

$$B_{fd}(\theta r) = -\mu_0 \frac{N_{fd}}{2} I_{fd} \sin(\theta r) [\alpha_1 + \alpha_2 \cos(2\theta r)] \quad (2.11)$$

As indutâncias são relacionadas a partir da interação entre o fluxo enlaçado por um enrolamento e a corrente que cria este fluxo. Sendo estas expressas como: [3]

$$L_{aa} = L_l + L_A + L_B \cos(2\theta r) \quad (2.12)$$

$$L_{bb} = L_l + L_A + L_B \cos\left(2\theta r - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (2.13)$$

$$L_{cc} = L_l + L_A + L_B \cos\left(2\theta r + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (2.14)$$

$$L_{ab} = -\frac{1}{2}L_A - L_B \cos\left(2\theta r + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (2.15)$$

$$L_{ac} = -\frac{1}{2}L_A - L_B \cos\left(2\theta r - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (2.16)$$

$$L_{bc} = -\frac{1}{2}L_A - L_B \cos(2\theta r - \pi) \quad (2.17)$$

$$L_{afd} = L_{sfd} \cos(\theta r)$$

$$(2.18)$$

$$L_{bfd} = L_{sfd} \cos\left(\theta r - \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$(2.19)$$

$$L_{cfd} = L_{sfd} \cos\left(\theta r + \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$(2.20)$$

$$L_A = \left(\frac{N}{2}\right)^2 \pi \mu_o r l \alpha_1$$

$$(2.21)$$

$$L_B = \left(\frac{N}{2}\right)^2 \pi \mu_o r l \alpha_2$$

$$(2.22)$$

$$L_{sfd} = \left(\frac{N}{2}\right) \left(\frac{N_f}{2}\right) \pi \mu_o r l \left(\alpha_1 + \frac{\alpha_2}{2}\right)$$

$$(2.23)$$

$$L_{mfd} = \left(\frac{N_f}{2}\right)^2 \pi \mu_o r l \left(\alpha_1 + \frac{\alpha_2}{2}\right)$$

$$(2.24)$$

Sendo o r o raio médio do entreferro, e a constante l , o comprimento axial do estator.

Para cada enrolamento da máquina, pode-se escrever uma equação de tensão equivalente àquela mostrada anteriormente.

$$v_a = r_a i_a + \frac{d\psi_a}{dt} \quad (2.25)$$

$$v_b = r_b i_b + \frac{d\psi_b}{dt} \quad (2.26)$$

$$v_c = r_c i_c + \frac{d\psi_c}{dt} \quad (2.27)$$

$$v_{fd} = r_{fd} i_{fd} + \frac{d\psi_{fd}}{dt} \quad (2.28)$$

$$v_{kd} = r_{kd} i_{kd} + \frac{d\psi_{kd}}{dt} \quad (2.29)$$

$$v_{kq} = r_{kq} i_{kq} + \frac{d\psi_{kq}}{dt} \quad (2.30)$$

Sendo o enlace de fluxo magnético descrito abaixo pelas seguintes equações:

$$\psi_a = L_{aa}i_a + L_{ab}i_b + L_{ac}i_c + L_{afd}i_{fd} + L_{akd}i_{kd} + L_{akq}i_{kq} \quad (2.31)$$

$$\psi_b = L_{ab}i_a + L_{bb}i_b + L_{bc}i_c + L_{bfd}i_{fd} + L_{bkd}i_{kd} + L_{bkq}i_{kq} \quad (2.32)$$

$$\psi_c = L_{ac}i_a + L_{bc}i_b + L_{cc}i_c + L_{cfd}i_{fd} + L_{ckd}i_{kd} + L_{ckq}i_{kq} \quad (2.33)$$

$$\psi_{fd} = L_{afd}i_a + L_{bfd}i_b + L_{cfd}i_c + L_{fdfd}i_{fd} + L_{fdkd}i_{kd} \quad (2.34)$$

$$\psi_{kd} = L_{akd}i_a + L_{bkd}i_b + L_{ckd}i_c + L_{fdkd}i_{fd} + L_{kdkd}i_{kd} \quad (2.35)$$

$$\psi_{kq} = L_{akq}i_a + L_{bkq}i_b + L_{ckq}i_c + L_{kqkq}i_{kq} \quad (2.36)$$

Sendo:

kq: Subíndice para designar enrolamentos amortecedores no eixo de quadratura, ou seja, enrolamentos curto circuitados montados no rotor.

kd: Subíndice para designar enrolamentos amortecedores no eixo direto, ou seja, enrolamentos curto circuitados montados no rotor.

fd: Subíndice para designar o enrolamento do rotor.

Para simplificação dos modelos das máquinas elétricas é utilizado a transformação de Park a qual possui uma importância significativa na simplificação das equações das máquinas, introduzindo um conjunto de variáveis hipotéticas. Fisicamente, esta é encarregada de transformar a máquina bifásica com enrolamentos estatóricos fixos e enrolamentos rotóricos girantes, em enrolamentos estatóricos fixos e rotóricos pseudo-estacionários. [4]

A transformada de Park usualmente adotada para a representação de máquinas síncronas é definida por: [4]

$$\begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 1 \\ \cos(\theta - 120^\circ) & -\sin(\theta - 120^\circ) & 1 \\ \cos(\theta + 120^\circ) & -\sin(\theta + 120^\circ) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_0 \end{bmatrix} = T * X_{dq0} \quad (2.37)$$

Logo, a relação de uma variável qualquer representada no eixo direto e de quadratura, podem ser especificadas a partir da matriz inversa de T.

$$\begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - 120^\circ) & \cos(\theta + 120^\circ) \\ -\sin\theta & -\sin(\theta - 120^\circ) & -\sin(\theta + 120^\circ) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \quad (2.38)$$

Portanto, tem-se:

$$X_{dq0} = T^{-1} * X_{abc} \quad (2.39)$$

Conclua-se que a utilização da transformação de Park permite converter um conjunto de enrolamentos girantes em um conjunto de enrolamentos fixos, produzindo o mesmo efeito. As correntes dos enrolamentos fixos terão frequências diferentes das correntes dos enrolamentos girantes. Assim, esta transforma enrolamentos comuns, alimentados através de anéis, em enrolamentos alimentados através de escovas e comutador, que também são conhecidos como enrolamentos pseudo-estacionários. Desta forma a transformação de Park é realizada fisicamente, como é mostrado pela figura a seguir: [4]

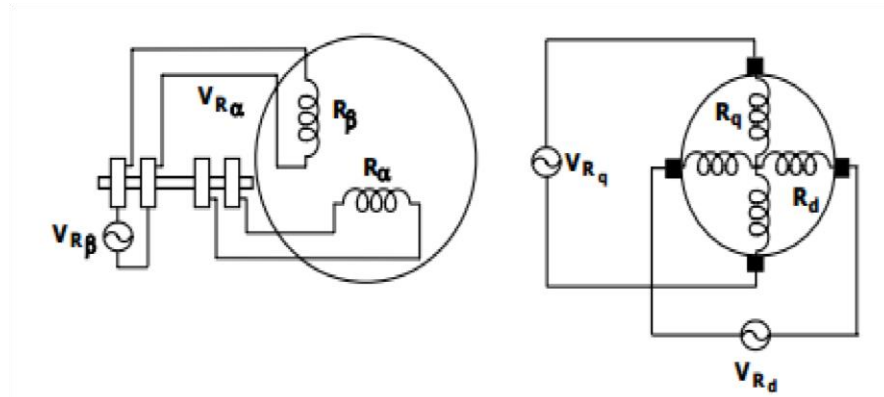


Figura 8 - Representação física da transformação de Park. [4]

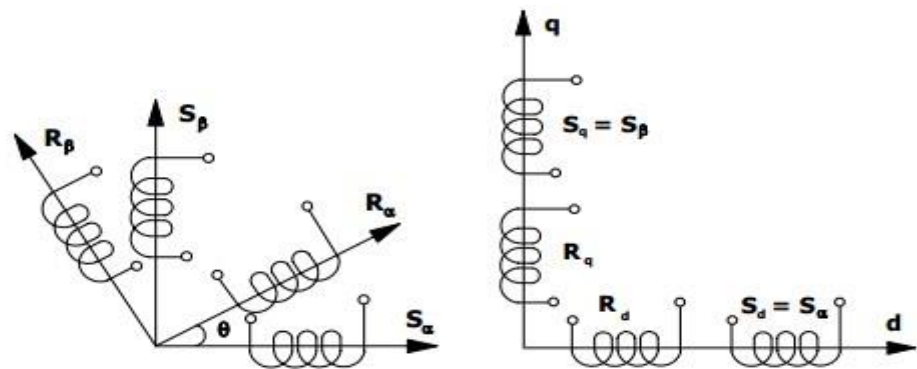


Figura 9 - À esquerda a representação da máquina original, e à direita verifica-se a representação da mesma transformada. [4]

Pode-se aplicar a transformada de Park para transformar grandezas trifásicas como tensão, corrente, carga elétrica e enlace de fluxo de suas coordenadas de fase (*abc*) para coordenadas *dq0* e vice-e-versa [3]. As tensões podem ser reescritas como se segue:

$$v_q = -r_q i_q + \omega_r \psi_d + \frac{d\psi_q}{dt} \quad (2.40)$$

$$v_d = -r_d i_d + \omega_r \psi_q + \frac{d\psi_d}{dt} \quad (2.41)$$

$$v_o = -r_o i_o + \frac{d\psi_o}{dt} \quad (2.42)$$

$$v_{fd} = r_{fd} i_{fd} + \frac{d\psi_{fd}}{dt} \quad (2.43)$$

$$v_{kd} = r_{kd} i_{kd} + \frac{d\psi_{kd}}{dt} \quad (2.44)$$

$$v_{kq} = r_{kq} i_{kq} + \frac{d\psi_{kq}}{dt} \quad (2.45)$$

2.4 Parâmetros da máquina síncrona.

Neste tópico são apresentados os parâmetros transitórios e subtransitórios da máquina síncrona, e suas equações diferenciais envolvidas.

2.4.1 Regime transitório.

Para mudanças mais rápidas nas condições externas da máquina síncrona, as relações de regime permanente não são mais válidas. Os enlaces de fluxo podem variar instantaneamente e, conseqüentemente, torna-se necessário o uso de equações diferenciais que descrevam esta variação. Isto é feito definindo-se as tensões transitórias através da reatância transitória tal que: [9]

$$E'_q - V_q = R_a I_q - X'_d I_d \quad (2.46)$$

$$E'_d - V_d = R_a I_d - X'_q I_q \quad (2.47)$$

Podendo-se chegar a tais equações diferenciais:

$$\frac{dE'_q}{dt} = \frac{1}{T'_{d0}} [E_{fd} + (X_d - X'_d)I_d - E'_q] \quad (2.48)$$

$$\frac{dE'_d}{dt} = \frac{1}{T'_{d0}} [-(X_q - X'_q)I_d - E'_d] \quad (2.49)$$

Na figura 10 posta a seguir, é apresentado o diagrama fasorial correspondente à operação da máquina no estado transitório, ou seja, naquele que há variação temporal.

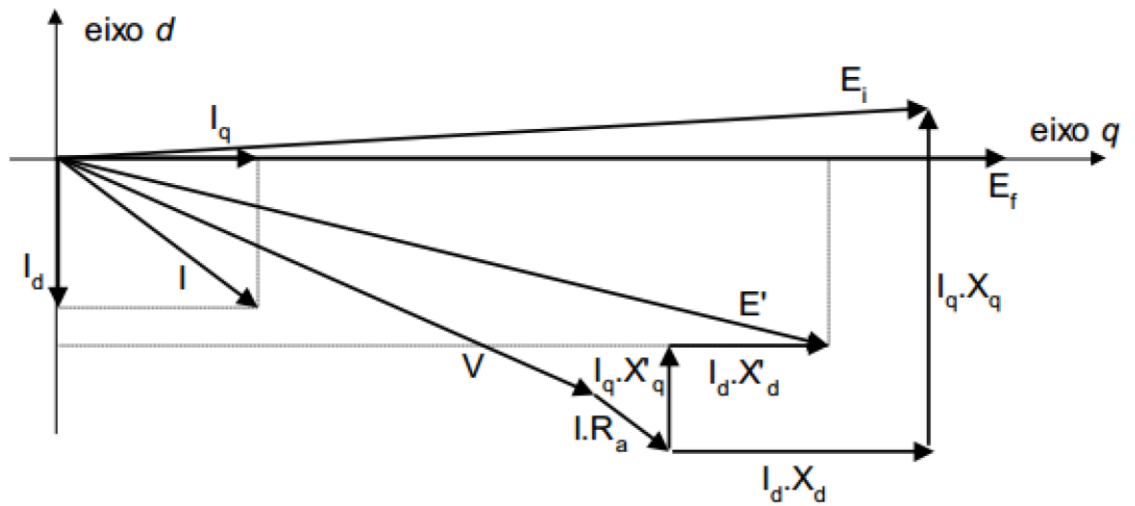


Figura 10 - Diagrama fasorial para a máquina síncrona no regime transitório. [3]

Quando necessário, devido à presença de enrolamentos amortecedores ou outros efeitos similares, pode-se considerar os efeitos sub-transitórios da máquina síncrona de maneira similar àquela utilizada para o regime transitório. As equações resultantes são dadas por: [9]

$$E_q'' - V_q = R_a I_q - X_d'' I_d \quad (2.50)$$

$$E_d'' - V_d = R_a I_d - X_q'' I_q \quad (2.51)$$

$$\frac{dE_q''}{dt} = \frac{1}{T_{d0}''} [E_{fd} + (X_d' - X_d'') I_d - E_q''] \quad (2.52)$$

$$\frac{dE_d''}{dt} = \frac{1}{T_{d0}''} [-(X_q' - X_q'') I_d - E_d''] \quad (2.53)$$

2.4.2 Equações mecânicas.

A importância das equações mecânicas para a correta modelagem do rotor é fundamental para observação da estabilidade de um sistema de potência. O modelo mais simples é baseado na Lei de Newton para movimento circular de um corpo rígido, culminando nas equações abaixo: [9]

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{2H} (T_m - T_e - K_D \omega) \quad (2.54)$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega_s (1 + \omega) \quad (2.55)$$

Sendo o torque mecânico produzido pela turbina, T_m , o torque elétrico da máquina visualizado na equação (2.54), T_e , a constante de amortecimento, K_D , a constante de Inércia da máquina, H , medida em W.s/VA e a velocidade síncrona do sistema, ω_s , dado por $2\pi f$. E ω , é o desvio de velocidade da máquina em relação à velocidade síncrona.

O torque mecânico T_m é o torque de saída da turbina e, na verdade, pode ser ajustado a partir do sistema de controle de velocidade da máquina. Contudo, devido às inércias envolvidas no problema, as constantes de tempo típicas dos reguladores de velocidade são de cerca de alguns segundos. Por este motivo é usualmente considerado que o torque mecânico é constante e igual ao valor de regime permanente. [3]

2.4.3 Simplificação do modelo obtido.

A simplificação do modelo obtido na seção anterior é convenientemente considerado como casos especiais com modificações de parâmetros das máquinas síncronas. O intuito principal é fazer com que haja a redução do número de equações diferenciais do regime transitório de duas para uma. Há alguns modelos simplificados das máquinas síncronas, onde em todos há a consideração de que as reatâncias dos eixos de quadratura e direto são igualados em alguns casos. [9]

Tabela 1 - Modelos simplificados e as restrições para cada caso. [9]

Modelo Simplificado	Restrições
Clássico (0,0)	$x_q = x'_q = x'_d$
1.0 (Caso Transitório)	$x_q = x'_q = x'_d$
1.1 (Caso Transitório)	$x'_q = x'_d$
2.1 (Caso Subtransitório)	$x''_q = x''_d$
2.2 (Caso Subtransitório)	$x''_q = x''_d$

Optando-se pela simplificação clássica, de caso transitório, tem-se com a mesma alteração da equação diferencial do regime transitório, a qual se manifestará da seguinte forma:

$$\frac{dE'_d}{dt} = -\frac{1}{T'_{d0}} E'_d \quad (2.56)$$

Com a condição inicial, ou seja, no tempo igual a zero, E'_d permanece com valor zero, pois seu valor analisando por este parâmetro e neste espaço de tempo, equivale à:

$$E'_{d0} = -(x_q - x'_q) i_{q0} \quad (2.57)$$

Tomando como referência a simplificação clássica ou como visualizada na tabela o modelo 1.0, temos que $x_q = x'_q = x'_d$, culminando em uma resultante nula, logo a

equação diferencial da tensão do eixo direto torna-se nula. A simplificação é utilizada, tendo em vista que a redução na quantidade de equações diferenciais é primordial pela capacidade de tornar o problema mais simples, logo o regime transitório da máquina passa de duas equações diferenciais para uma única. [9]

$$\frac{dE'_d}{dt} = -\frac{1}{T'_{d0}}E'_d \quad (2.58)$$

Sendo inicialmente $E'_d = E'_{d0}$, logo:

$$\frac{dE'_d}{dt} = -\frac{1}{T'_{d0}}E'_d = 0 \quad (2.59)$$

Capítulo 3

3 Sistema de excitação.

O sistema de excitação das máquinas síncronas tem por objetivo estabelecer a tensão interna do gerador, e por consequência, o mesmo é responsável pela tensão de saída da máquina e também pelo fator de potência e pela magnitude da corrente gerada. Os sistemas de excitação estão em constante avanço tecnológico e em pouco tempo atrás a excitatriz da maioria dos sistemas era um gerador de corrente contínua montado no eixo do gerador, porém, com tal avanço, sistemas mais rápidos e que exigem uma menor preocupação quanto à sua manutenção começaram a aparecer como substitutos do sistema clássico de excitação mencionado acima. [12]

Se o rotor for um eletroímã, uma corrente CC deverá ser fornecida ao circuito de campo desse rotor. Como ele está girando, um arranjo especial será necessário para levar a potência CC até seus enrolamentos de campo. O modelo clássico como já mencionado no capítulo anterior é obtido por uma fonte CC externa, a qual fornece potência CC para o rotor através de escovas e anéis coletores, ou também, por uma espécie de uma fonte CC de potência especial, montada diretamente no eixo do gerador síncrono. Estes são exemplos mais utilizados para máquinas síncronas de pequeno porte, tendo em vista que seu custo benefício ainda é vantajoso para estas, para casos de médio e alto porte seu custo já não é compensado relacionado ao gasto em manutenção das escovas e anéis. [7]

Para casos em que a máquina síncrona possui um porte maior, desenvolveu-se um sistema de excitação sem escovas, o qual promoveria uma redução no custo de manutenção do equipamento haja vista que não teria contato da escova e dos anéis coletores. A excitatriz sem escovas é um pequeno gerador CA, que como já dito, com seu circuito de campo posto no rotor e seu circuito de armadura no estator, como visto na figura 5. Uma corrente trifásica de baixa intensidade é retificada e utilizada para alimentar o circuito de campo da excitatriz no estator. A saída do circuito de armadura da excitatriz no rotor é então retificada e usada para fornecer a corrente de campo da máquina principal. [5]

Para tornar a excitação de um gerador completamente independente de quaisquer fontes de potência externas, uma pequena excitatriz piloto é frequentemente incluída no sistema. Uma excitatriz piloto é um pequeno gerador CA com ímãs permanentes montados no eixo do rotor e um enrolamento trifásico no estator. Ela produz a potência para o circuito de campo da excitatriz, a qual por sua vez controla o circuito de campo da máquina principal. Se uma excitatriz piloto for incluída no eixo do gerador síncrono, nenhuma potência elétrica externa será necessária para fazer funcionar o gerador. [5]

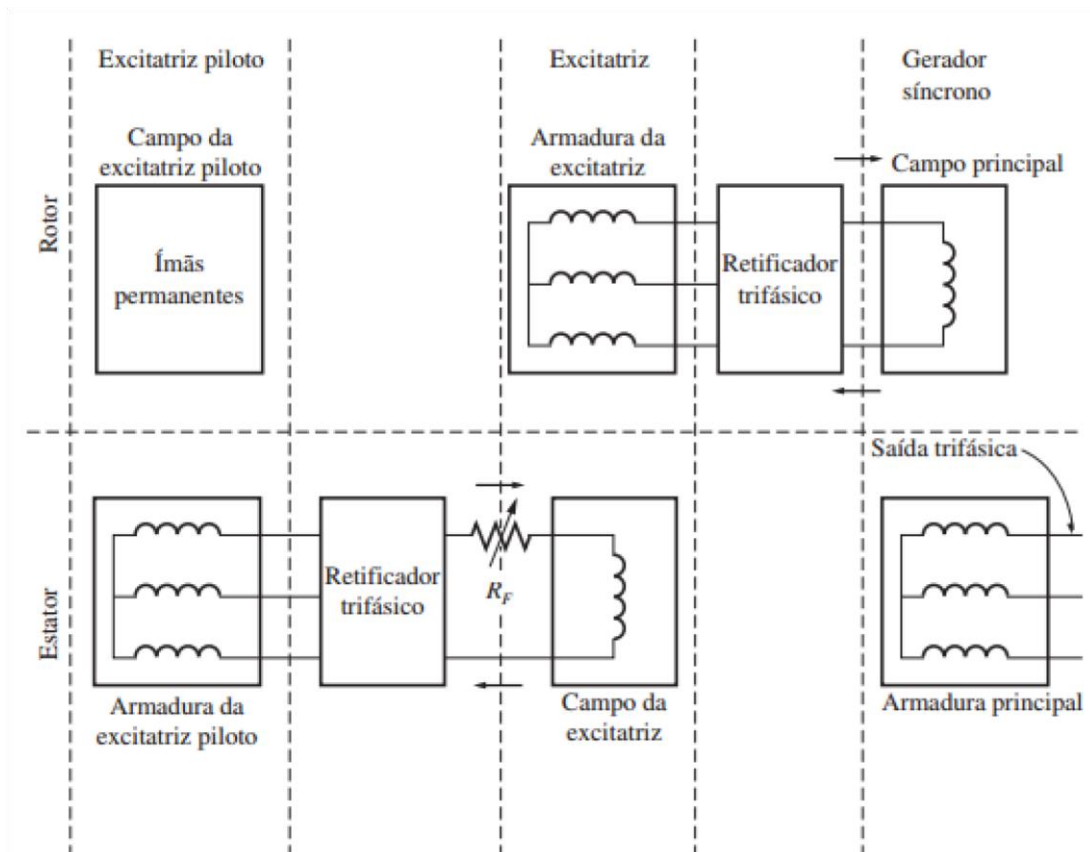


Figura 11 - Esquema de excitação sem escovas que inclui uma excitação piloto. [5]

3.1 Configuração física dos componentes do sistema de excitação.

Até bem recentemente, a excitatriz da maioria dos sistemas era um gerador de corrente contínua montado no eixo do gerador. Atualmente, outros sistemas mais rápidos e que exigem menos manutenção vão aos poucos substituindo o sistema clássico. Com isso há uma relação de componentes diversos, excitatriz e gerador, os quais serão apresentados na figura abaixo:

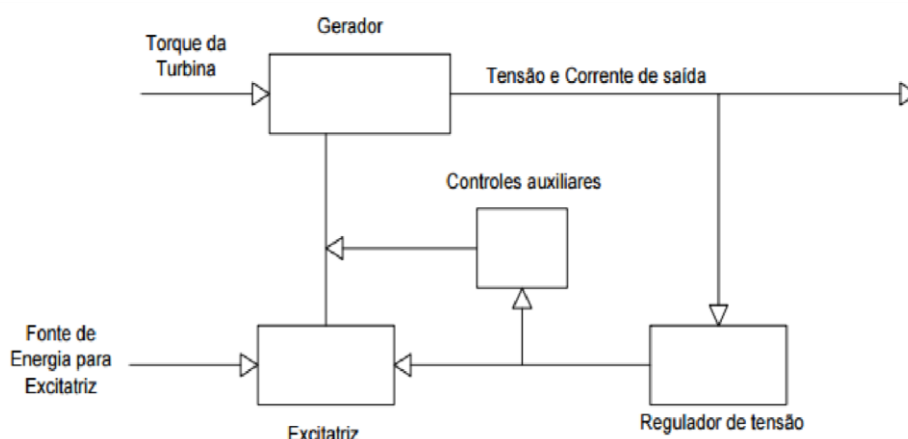


Figura 12 - Componentes do sistema de excitação.

A função do regulador de tensão é controlar a saída da excitatriz tal que a tensão gerada e a potência reativa variem da maneira desejada. Em sistemas primitivos, o operador desempenhava o papel do regulador de tensão, observando a tensão de saída e ajustando o reostato de campo da excitatriz de modo a obter as condições de saída desejadas. Atualmente, o regulador de tensão é um controlador que observa a tensão, e possivelmente outras grandezas, por exemplo, potência ativa e corrente, de saída do gerador e então inicia a ação corretiva através da variação do controle da excitatriz. A velocidade de ação do regulador é fundamental do ponto de vista da estabilidade do sistema de potência. [6]

O bloco denominado “Controles Auxiliares” inclui funções como adição de amortecimento ao sistema de controle, compensação de corrente reativa, estabelecimento de limites de sobre e sub-excitação. [6]

3.1.1 Regulador de Tensão.

O regulador de tensão possui cinco características principais, sendo essas enumeradas abaixo: [6]

1. Controlar a tensão terminal da máquina, dentro dos limites prescritos;
2. Regular a divisão de potência reativa entre máquinas que operam em paralelo, particularmente quando estas estão em barra comum, gerando a mesma tensão terminal, isto é, sem transformador;
3. Controlar de perto a corrente de campo, para manter a máquina em sincronismo com o sistema, quando esta opera a fator de potência unitário ou adiantado;
4. Aumentar a excitação sobre condições de curto-circuito no sistema, para manter a máquina em sincronismo com os demais geradores do sistema;
5. Amortecer oscilações de baixa frequência que podem trazer problemas de estabilidade dinâmica.

O regulador de tensão possui uma tarefa a ser efetuada em diferentes equipamentos, em caso de compensadores síncronos sua finalidade é do controle da tensão, no caso de hidrogeradores sua função é de manter a tensão com um valor baixo em casos de perdas repentinas de carga e consequente aumento de velocidade angular do eixo por perda de estabilidade e da mesma forma em turbogeradores. Os reguladores de tensão promovem a estabilidade dos geradores síncronos. [6]

3.2 Configurações típicas de sistema de excitação.

Há diversas formas para disponibilização de um sistema de excitação. As principais serão abordadas neste tópico, sendo estas em uso, ou em fase de testes procurando mostrar o seu funcionamento e possíveis ajustes na mesma.

3.2.1 Sistema de excitação DC.

A configuração típica deste tipo de sistema é apresentada abaixo:

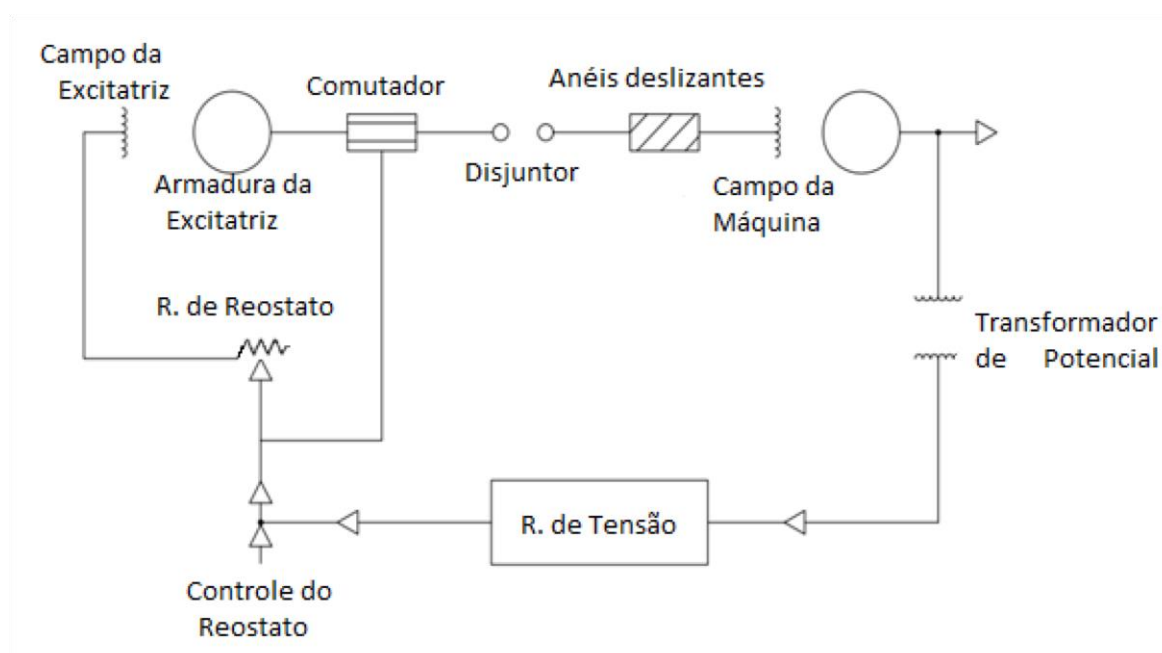


Figura 13 – Representação do sistema de excitação.

O regulador do sistema da figura 13 detecta o nível de tensão, compara-o com uma referência e, se necessário, aciona um dispositivo mecânico para controlar a resistência do reostato. Um grau maior de sofisticação foi atingido com o uso de amplificadores rotativos. Estes amplificadores permitiram o uso de reguladores de tensão estáticos, cuja saída de baixa potência pode ser amplificada de modo a induzir respostas ainda mais rápidas. [6]

Com o aumento da capacidade nominal dos geradores síncronos, o uso de excitatrizes de corrente contínua começaram a exibir problemática quanto a sua implantação, sendo essas: [12]

1. Altas correntes de excitação a baixa tensão, exigindo muitas escovas;
2. Dificuldades inerentes ao comutador, provocando faiscamento durante súbitas variações de carga;
3. Dificuldades de acoplar grandes máquinas CC ao eixo do gerador, que gira a altas velocidades no caso de turbo-geradores.

As razões citadas intensificaram os estudos de um sistema de excitação usando uma excitatriz de corrente alternada e retificadores. Hoje, usam-se excitatrizes CC diretamente acopladas ao eixo do gerador para geradores de até 50 MW e excitatrizes CC de baixa velocidade, acionadas através de engrenagens pelo eixo do gerador, até geradores de 275 MW. A partir desta capacidade nominal, há de se usar tão somente excitatrizes de corrente alternada com retificadores. [6]

3.2.2 Sistema de excitação AC.

Inicialmente, a substituição de uma excitatriz de corrente contínua por uma excitatriz de corrente alternada e retificadores trouxe, não só um pequeno aumento de custo, como também o problema técnico que se tinha com o fato dos primeiros sistemas usarem retificadores com díodos de germânio, cuja baixa tensão máxima inversa seria insuficiente para ser capaz de realizar a retificação em potências elevadas. Porém, havia a certeza de que mesmo com a necessidade de melhoria de determinados dispositivos, como o surgimento de díodos de silício que elevou a máxima tensão inversa para limites desejados, a redução da necessidade de manutenção de equipamentos como escovas, traria uma vantagem financeira significativa. [12]

No sistema de excitação AC, a corrente é produzida por um gerador de corrente alternada e esta, por sua vez, é, posteriormente, transformada em corrente contínua para alimentar o enrolamento do campo da máquina principal através de retificadores de potência, os quais podem ser controlados ou não controlados. Caso os retificadores

sejam não controlados (retificadores com díodos), o controle do sistema é efetuado a partir de uma ou mais bobinas de campo da excitatriz AC. [12]

Tendo em conta determinadas características, tais como a combinação dos retificadores, o método utilizado para o controle da saída da excitatriz e a fonte de excitação utilizada, pode-se catalogar os sistemas de excitação AC em dois tipos básicos: sistemas de excitação AC com retificação estática, onde os díodos não estão acoplados no eixo do rotor, e os sistemas de excitação AC com retificação rotativa, onde há acoplado no eixo do rotor os retificadores de potência. [6]

3.2.2.1 Sistema de excitação AC com retificadores estáticos.

Esta configuração é apresentada na figura 14, porém sem a representação da excitatriz piloto, responsável pela geração de corrente alternada que alimenta o seu próprio circuito de armadura no estator, e posteriormente chegará ao campo do excitador principal até que alcance o campo do gerador síncrono e haja o efeito de indução de tensão pela força magnetomotriz. As entradas auxiliares verificadas no regulador AC são principalmente a tensão advinda da excitatriz piloto, a tensão advinda do estabilizador, responsável por remover ou minimizar as oscilações no sistema elétrico de energia, ocasionadas por desvio da velocidade do rotor e de frequência, a tensão advinda do transdutor, componente responsável por medir a tensão terminal retificá-la e filtrá-la para uma corrente contínua para que se chegue a uma tensão terminal desejável, e as tensões advindas dos circuitos de proteção e limitação, os quais garantem que os valores das variáveis intrínsecas do sistema de excitação e do gerador síncrono se mantenham adequadas. [12] [6] [10]

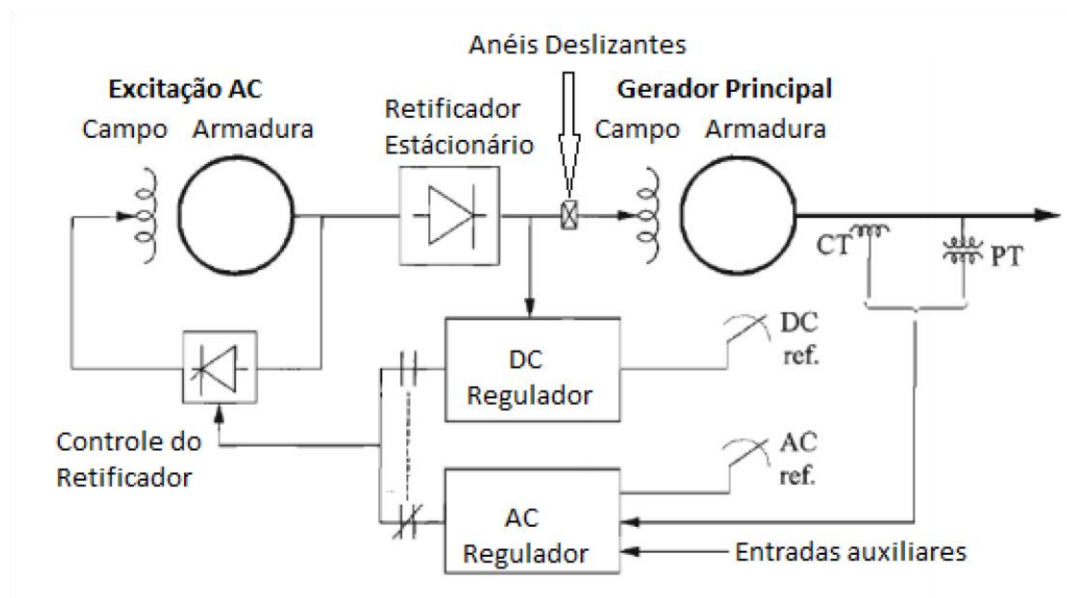


Figura 14 - Representação do sistema de excitação com retificação estática.

Na figura 14, uma ponte de tiristores controla a excitação da excitatriz principal. Obtêm-se resposta rápida graças à excitatriz de alta frequência e tensão constante. Como o regulador de tensão controla o disparo dos tiristores, a resposta do sistema de excitação é muito rápida. [6]

Este tipo de excitação promove a extinção da utilização de comutadores e escovas associadas à excitatriz de corrente contínua, reduzindo desta forma a manutenção exigida por estes equipamentos. Porém, mantêm-se os anéis deslizantes do gerador, os quais necessitam de manutenção periódica. A necessidade da presença dos anéis deslizantes, formados por pistas cilíndricas, no eixo do gerador é dada principalmente, pois sua disposição entre divisórias isolantes evita o curto circuito entre as pistas cilíndricas energizadas. [12]

Por este motivo, de ainda haver a necessidade do emprego de anéis deslizantes em seus componentes, projetou-se então o sistema de excitação AC com retificação rotativa visto que eliminava, em definitivo, os anéis deslizantes e as escovas a eles associados.

3.2.2.2 Sistema de excitação AC com retificadores rotativos.

Com os sistemas de excitação com excitatriz de corrente alternada mais retificadores, a potência de excitação deve ser transferida de um equipamento, sendo ou excitatriz CC ou o retificador, para o campo do gerador, exigindo para isto anéis coletores e escovas. A função destes dispositivos torna-se mais difícil com o aumento de potência de excitação necessária ou, em outras palavras, com o aumento da capacidade nominal dos geradores. Para solucionar o problema satisfatoriamente, pensou-se em eliminar definitivamente os anéis coletores e as escovas a eles associados. [12]

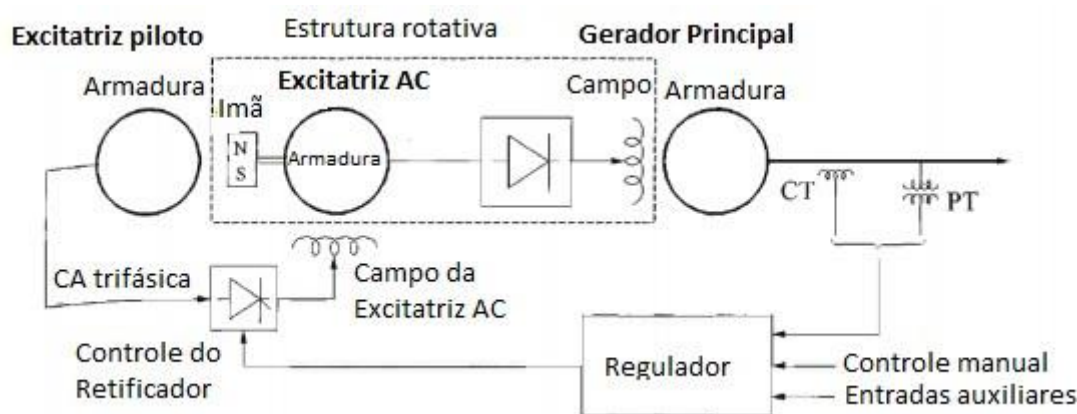


Figura 15 - Sistema de excitação com retificação rotativa.

O sistema mostrado consiste de uma excitatriz de corrente alternada e um retificador rotativo montado no mesmo eixo do turbo-gerador. Há também montado no mesmo eixo, o gerador a ímã permanente, cujo sinal de saída é retificado e posteriormente comparado no regulador de tensão, com o sinal retificado da tensão terminal. A saída da armadura rotativa da excitatriz de corrente alternada é conduzida ao longo do eixo para o retificador rotativo, a saída do qual, por sua vez, alimenta o campo do gerador, ainda ao longo do eixo. [6]

O problema principal para que fosse implantado este tipo de sistema foi a intensidade dos esforços centrífugos ocasionados pela rotação do eixo do turbogerador, o qual os equipamentos como retificadores, regulador de tensão, gerador a ímã permanente estariam sujeitos, promovendo uma degradação dos mesmos, ao serem postos neste tipo de ambiente. O desenvolvimento da tecnologia dos retificadores a

semicondutores tornou possível a fabricação de retificadores capazes de resistir aos esforços rotacionais. Além disso, o uso de frequências mais altas para as excitatrizes CA aumentou o nível da tensão de excitação e reduziu a constante de tempo. [12]

Quando aplicado em geradores de alta rotação, nomeadamente em centrais térmicas, torna-se bastante vantajoso, desde que a corrente de campo não seja demasiado elevada, caso contrário, verificar-se-ia uma inflação do custo e excesso de peso do conjunto sistema de excitação. [12]

3.2.3 Sistema de excitação estático.

O uso de tiristores reduziu consideravelmente o tempo de resposta do sistema de excitação e a transistorização do sistema de regulação de tensão melhorou as qualidades da força do campo. A figura 16 mostra um diagrama de blocos do sistema. A rapidez de resposta do sistema é devida ao fato de que os únicos retardamentos existentes são na filtragem da tensão terminal e no disparo dos tiristores, sendo que um valor típico de atraso para este último equipamento é 3.3 ms a 50 Hz. Outra vantagem é a redução do comprimento total da unidade geradora, pois não há excitatrizes piloto ou principal. Isto diminui o problema mecânico de alinhamento de eixos e mancais. Por outro lado, permanecem os problemas inerentes à presença dos anéis deslizantes do rotor do gerador. [6]

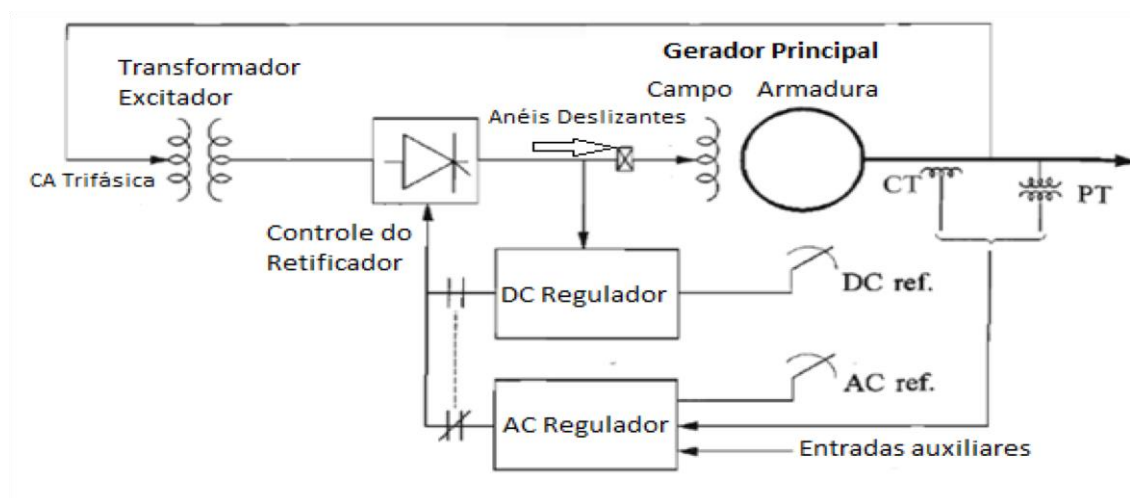


Figura 16 - Representação da Excitação Estática Utilizando Tiristores. [12]

No sistema de excitação estático, todos os componentes principais são estáticos. A alimentação do campo do gerador síncrono é realizada diretamente por retificadores estáticos controlados, sendo os mesmos alimentados ou pelos terminais do gerador ou pelo barramento auxiliar da central elétrica. [6]

O sistema de excitação estático apresenta vantagem em relação ao rotativo, na medida em que diminuiu o tempo de resposta na regulação, pois atua diretamente no enrolamento de campo do gerador síncrono, reduzindo, desta forma, o comprimento total da unidade por supressão das excitatrizes. Todavia, estes sistemas apresentam, também, um inconveniente decorrente do fato do fluxo de corrente ser controlado por impulsos dos semicondutores de potência, os quais introduzem deformações na corrente, o que provoca distorção da tensão gerada pelo alternador. Além disso, o seu sistema possui acoplado anéis deslizantes para que efetuem a conexão de corrente elétrica entre o excitador transformador e o campo do gerador síncrono. [12]

O sistema de excitação estático poderá ser aplicado em centrais hidroelétricas ou termoelétricas, pois tem várias vantagens, nomeadamente:

- Possibilidade de reduzir o tempo de resposta de recuperação da tensão do conjunto gerador e sistema de excitação, pois não existe uma componente de atraso na malha de excitação;
- Permite a proteção de falha à terra do rotor, a qual só é possível com o acesso ao enrolamento do rotor, tal como acontece no sistema de excitação estática;
- Aumento da capacidade de controle de oscilações (tensão e potência), através da introdução de um sinal suplementar;
- Permite modificar os parâmetros que influenciam a resposta do sistema com o gerador em serviço, caso o mesmo contenha um regulador micro processado;

3.3 Modelo matemático de um sistema de excitação clássico.

O sistema de excitação convencional com um amplificador acoplado pode ser visualizado na figura abaixo, o qual o gerador possui um conjunto de transformadores de potencial juntamente com retificadores com a função principal de emitir tensão contínua ao sinal do regulador que passará a verificar e comparar com a tensão do campo excitatório.

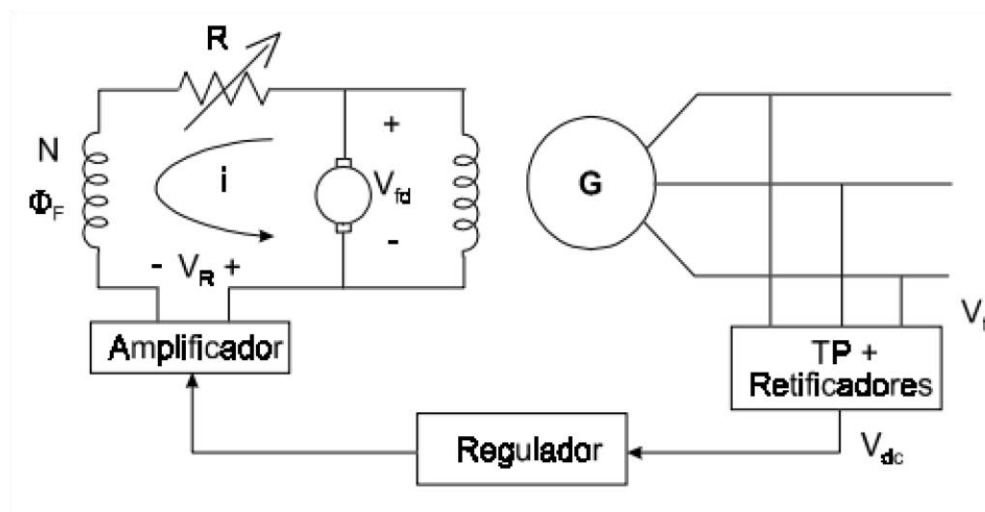


Figura 17 - Sistema de excitação convencional, com um amplificador acoplado ao campo de excitação.

[6]

3.3.1 Componentes e respectivas funções de transferência.

Neste subtópico será apresentando as funções principais de cada componente apresentada na figura 17 e sua forma matemática para melhor entendimento do mesmo.

3.3.1.1 Transformadores de potencial e retificadores.

O conjunto de transformador de potencial juntamente com retificadores é conhecido como filtro, o qual terá como entrada a tensão terminal do gerador e sua saída será uma tensão contínua retificada pelo bloco vigente. A função de transferência deste conjunto será considerada como sendo de primeira ordem, ou seja, caracterizada como um ganho e uma constante de tempo. A tensão contínua localizada na saída do filtro é proporcional à tensão terminal disposta na entrada do mesmo. Logo, temos: [6]

$$V_t K_R = V_{dc} + V_{dc} \frac{dT_R}{dt} = V_{dc} \left(1 + \frac{dT_R}{dt} \right) \quad (3.1)$$

A constante K_R é um ganho, geralmente sendo este unitário, o ganho é dado através do transformador de potencial, e T_R é uma constante de tempo, a qual determina o tempo de conversão de V_t para uma tensão contínua V_{dc} , geralmente seu valor varia de 0 a 0,06 segundos. A equação acima pode ser disposta com relação á transformada de Laplace, assim pode-se obter a relação entre a tensão contínua e a tensão terminal. [6]

$$\frac{V_{dc}(s)}{V_t(s)} = \frac{K_R}{(1 + sT_R)} \quad (3.2)$$

3.3.1.2 Amplificador.

Um amplificador rotativo típico é em geral representado por uma função de transferência de primeira ordem, cujo ganho será representado por K_A e cuja constante de tempo será denotada por T_A . Em geral, a constante de ganho varia entre 25 e 50, e a constante de tempo entre 0,06 e 0,20 segundos. O funcionamento do amplificador depende essencialmente da saída do regulador, o qual deve produzir saídas que não excedam sinais de erro. [6]

$$Er K_A = V_R + V_R \frac{dT_A}{dt} = V_R \left(1 + \frac{dT_A}{dt} \right) \quad (3.3)$$

Passando-se para o formato em transformada de Laplace, temos:

$$\frac{V_R(s)}{E_r(s)} = \frac{K_A}{(1 + sT_A)} \quad (3.4)$$

- Excitatriz.

Com a aplicação da Lei de Kirchhoff ao circuito de campo da excitatriz, temos:

$$N \frac{d\phi_F}{dt} + Ri = v_{fd} + v_R \quad (3.5)$$

Onde ϕ_F é o fluxo magnético que enlaça o enrolamento de campo. Na equação acima, estão presentes quatro variáveis, mas estamos interessados em relacionar apenas a variável de entrada v_R com a tensão da armadura da excitatriz, v_{fd} . Isto é, torna-se necessário expressar as demais variáveis em termos de v_{fd} .

Considerando a velocidade de rotação do eixo constante, a relação entre v_{fd} e ϕ_F é:

$$v_{fd} = k\phi_{ef} \quad (3.6)$$

Sendo ϕ_{ef} é o fluxo magnético no entreferro da excitatriz. Sabendo-se que há um fluxo de dispersão, podemos escrever o fluxo magnético que envolve o enrolamento de campo, como:

$$\phi_F = \phi_{ef} + \phi_{disp} \quad (3.7)$$

Faremos a consideração que o fluxo de dispersão pode ser determinado como uma fração constante do fluxo de campo, independentemente da condição de operação. Logo:

$$\Phi_F = \sigma \Phi_{ef} \quad (3.8)$$

$$\Phi_F = \frac{\sigma}{k} v_{fd} \quad (3.9)$$

Definindo $T_E = N \frac{\sigma}{k}$, a equação obtida realizando a Lei de Kirchhoff na malha do campo da excitatriz, torna-se:

$$T_E \frac{dv_{fd}}{dt} + Ri = v_{fd} + v_R \quad (3.10)$$

Na equação acima, resta ainda expressar a corrente em termos de v_{fd} . A relação entre estas duas variáveis é dada pela característica de saturação da excitatriz. Seja $S'_E(v_{fd})$, a função não-linear tal que $S'_E(v_{fd}) \times v_{fd}$, representa o acréscimo de corrente de campo, delta i , exigido pela saturação para se produzir a tensão da armadura v_{fd} . Então, se R_{ef} é a inclinação da linha do entreferro da máquina, a corrente total necessária para produzir a tensão de armadura da excitatriz será dada por: [6]

$$i = \frac{1}{R_{ef}} \times v_{fd} + S'_E(v_{fd}) \times v_{fd} \quad (3.11)$$

Sendo: $K_E = \frac{R}{R_{ef}} - 1$, tem-se:

$$T_E \frac{dv_{fd}}{dt} + K_E v_{fd} = v_R - RS'_E(v_{fd}) \times v_{fd} \quad (3.12)$$

Aplicando-se a transformada de Laplace na equação obtida, temos:

$$v_{fd}(s) = \frac{[v_R - RS'_E(v_{fd})]}{K_E + sT_E} \quad (3.13)$$

- Gerador.

Considere a máquina operando a vazio. Sendo r_f e L_f , respectivamente, a resistência e a indutância do enrolamento de campo do gerador, ao qual está aplicada a tensão da armadura da excitatriz, e que é percorrido pela corrente i . A equação das tensões no circuito de campo do gerador fornece:

$$v_{fd} = r_f i_f + L_f \frac{di_f}{dt} \quad (3.14)$$

Por outro lado, sabe-se que, á vazio, a tensão terminal da máquina é igual à tensão interna que nestas condições é dada por:

$$v_t = E_q = \omega M_f i_f \quad (3.15)$$

Onde ω é a velocidade da máquina e M_f é a indutância mútua entre os enrolamentos de campo e de armadura do gerador. Explicitando i_f na equação acima e definindo:

$$T_G = \frac{L_f}{r_f} \quad (3.16)$$

$$K_G = \frac{\omega M_f}{r_f} \quad (3.17)$$

Multiplicando-se ambos os lados da equação da tensão no circuito de campo do gerador, por K_G , temos:

$$T_G \frac{dv_t}{dt} + v_t = K_G v_{fd} \quad (3.18)$$

Obtendo-se a função de transferência do gerador síncrono por meio da transformada de Laplace imposta na equação acima:

$$\frac{v_t(s)}{v_{fd}(s)} = \frac{K_G}{1 + sT_G} \quad (3.19)$$

3.4 Diagrama de blocos do sistema de excitação.

A partir dos modelos de função de transferência desenvolvidos acima para cada um dos componentes do sistema de excitação, é possível desenhar o diagrama de blocos do sistema de excitação mostrado na figura 18, como segue-se abaixo:

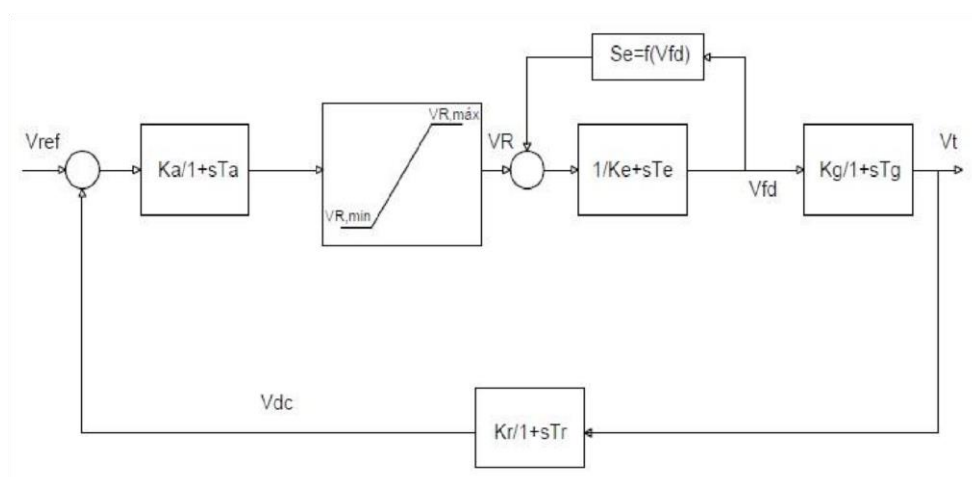


Figura 18 - Diagrama de blocos do sistema clássico e suas respectivas funções de transferência.

3.5 Funcionamento e tipos de sistemas de excitação de acordo com a IEEE.

Como visto anteriormente, há diferentes tipos de sistema de excitação, sendo estes responsáveis pela geração de diferentes correntes, sendo essas contínuas no caso de sistemas DC de excitação e alternadas utilizando-se retificadores para alimentar os enrolamentos de campo da excitatriz e do gerador, sendo neste caso os sistemas AC de excitação. Também foi apresentado o sistema estacionário alimentado por meio de um transformador, e onde todos os equipamentos do mesmo mantinham-se estacionários no sistema, com uma alimentação direta para o campo do gerador.

É importante salientar que há um diagrama de blocos que representa qualquer tipo de sistema de controle de excitação, sendo este geral para sistemas de excitação DC, AC e Estáticos. O bloco segue-se abaixo:

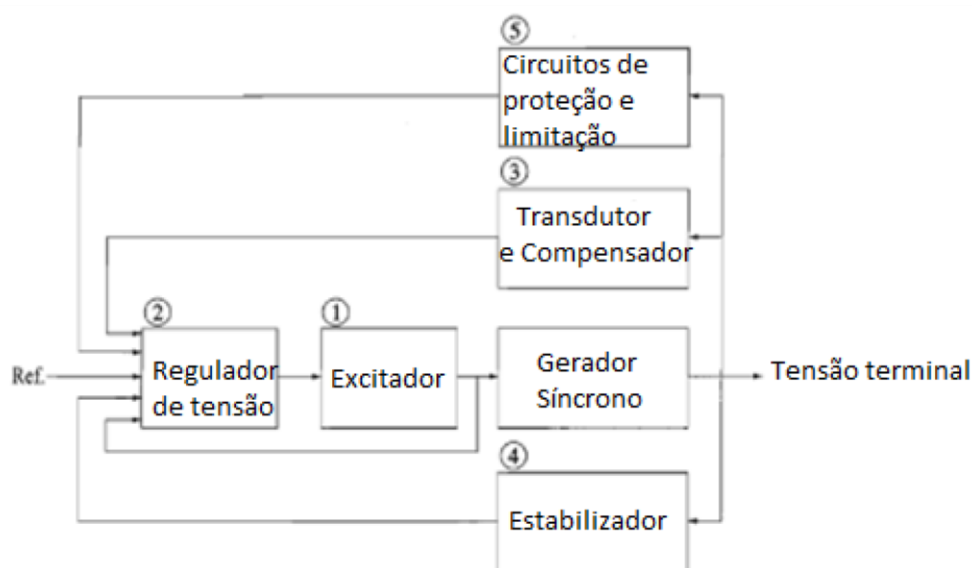


Figura 19 - Diagrama de bloco de um sistema de controle de excitação. [11]

A excitatriz tem como função fornecer corrente contínua ao enrolamento de campo do gerador síncrono e é definida como a etapa de alta tensão do sistema de excitação. Por sua vez, o regulador de tensão consiste no tratamento e amplificação dos sinais de entrada do sistema, até ao nível e forma considerados apropriados pelo controle do sistema de excitação, sendo que neste bloco estão definidas funções de estabilização da regulação da excitação (diagrama de blocos do tipo

“feedback” e diagrama de bloco de redução do ganho transitório). O estabilizador fornece ao regulador um sinal adicional de entrada, de forma a remover oscilações no sistema elétrico de energia. Alguns dos sinais de entrada mais usados, para este bloco, são o desvio da velocidade do rotor, a potência de aceleração e o desvio da frequência. [11]

O transdutor de tensão elétrica terminal do gerador síncrono mede a tensão elétrica nos terminais deste gerador, retifica e, posteriormente, filtra essa medida para uma quantidade de corrente contínua e compara essa quantidade com uma referência que representa o valor desejável da tensão elétrica nos terminais do gerador síncrono. [12]

No sistema de excitação pode estar incluído um compensador de carga, com o objetivo de manter constante a tensão elétrica num dado ponto do sistema de excitação, mantendo desta forma a tensão terminal padronizada. [12]

Os circuitos de proteção e de limitação incluem uma grande variedade de funções de controle e de proteção, que garantem que as limitações do sistema de excitação e respectivo gerador síncrono não sejam excedidas. Algumas das funções mais usadas são as limitações da corrente de campo, a limitação de sobreexcitação, a limitação da tensão elétrica terminal do gerador síncrono, o regulador e a proteção de tensão elétrica/frequência elétrica. Estes são circuitos distintos e as suas saídas podem ser aplicadas em diferentes locais do diagrama de blocos do sistema de excitação, como bloco de soma ou “gate” de entrada. [12]

Neste tópico serão apresentados os tipos relacionados a cada grupo de sistema de excitação, os quais serão utilizados na simulação por meio do MATLAB, haja vista que o programa mencionado não possui todos os tipos designados pela IEEE.

3.5.1 Tipo DC1A.

Este modelo, descrito pelo fluxograma da figura 20, é utilizado para representar o sistema de excitação DC, com reguladores de tensão agindo continuamente, especialmente o de resistência de reostato de ação direta, o amplificador rotativo e tipos de amplificadores magnéticos. Uma vez que este modelo tem sido amplamente aplicado pela indústria, em alguns momentos é usado para representar outros tipos de sistemas quando os dados detalhados para estes não estão disponíveis ou quando um modelo simplificado é necessário. [10]

A principal contribuição para este modelo é a saída, VC, do transdutor de tensão terminal e do modelo compensador de carga. Na junção da soma, tensão terminal do transdutor de saída, VC, é subtraído do ponto de referência do conjunto, VREF. O feedback de estabilização, VF, é subtraído e o sinal de estabilização do sistema de potência, VS, é adicionado para produzir uma tensão de erro. No estado estável, estes últimos dois sinais são iguais à zero, deixando apenas o sinal de erro de tensão terminal. [10]

O sinal resultante é amplificado no regulador. O regulador de tensão é constituído por um compensador “lead-lag” ou bloco de redução do ganho transitório, e um amplificador. O bloco designado “HV gate” corresponde a um bloco de função de maximização que poderá ser utilizado, como alternativa, para entrada do sinal “Vuel”,

sendo este parte do circuito de proteção e de limitação do sistema. O regulador de tensão utiliza, normalmente, fontes de alimentação que não são afetadas por efeitos transitórios rápidos com origem no gerador síncrono ou nos barramentos auxiliares. O bloco de redução de ganho transitório ou “lead-lag” utiliza os parâmetros T_B e T_C como constantes de tempo de redução do ganho transitório a altas frequências inerentes à operação do regulador de tensão. Todavia, estas constantes são, frequentemente, tão pequenas que podem ser negligenciadas ou definidas com valor nulo. [12]

O bloco amplificador do regulador de tensão consegue garantir ganhos elevados e baixas constantes de tempo. Este é representado por uma função de transferência de primeira ordem, cujo ganho é representado pelo parâmetro K_A e cuja constante de tempo se encontra definida pelo parâmetro T_A . [12]

O sinal de saída do regulador, V_R , é utilizado para controlar a excitatriz. O termo “SE [EFD]” é uma função não linear de saturação com os valores definidos em dois ou mais valores escolhidos de EFD. A saída deste bloco de saturação, V_X , é o produto da entrada, EFD, e o valor da função não linear “SE [EFD]” nesta tensão de excitação. [12]

Quando a excitatriz é do tipo de excitação separada, o ajuste do reóstato de campo do gerador de corrente contínua é realizado remotamente. Nas excitatrizes de excitação separada o valor típico de K_E é unitário. Ambos os tipos de excitatrizes têm sempre associada uma constante de tempo designada por T_E . [10]

O sinal de tensão V_F deriva da tensão elétrica do enrolamento de campo do gerador síncrono e é representado por um ganho de realimentação negativa, K_F , e uma constante de tempo T_F . O ajuste dos parâmetros do bloco de compensação/estabilização do sinal V_F permite minimizar os desvios de fase introduzidos pelos atrasos nos diversos elementos do sistema de excitação.

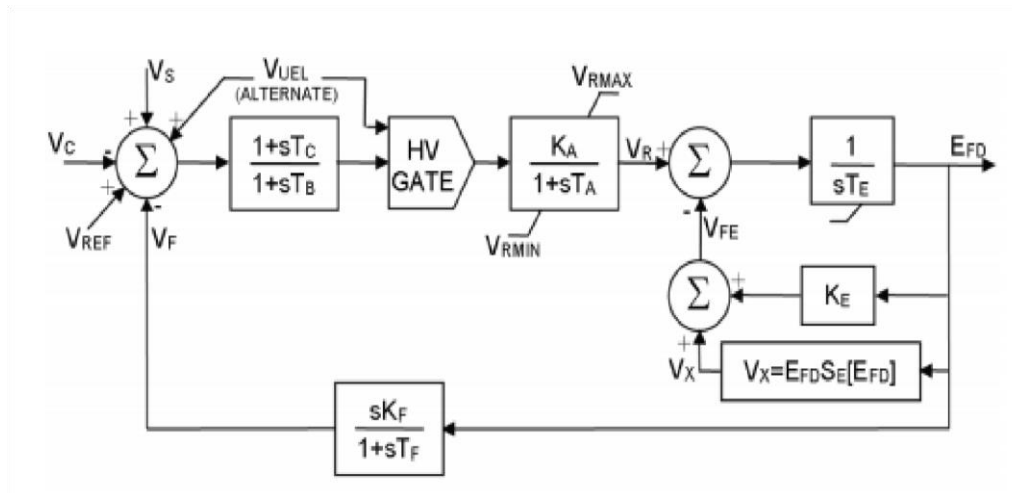


Figura 20 - Tipo DC1A de sistema de excitação. [10]

Logo, resumidamente, o primeiro bloco, posterior ao somatório das tensões implicadas no sistema, que possui as constantes de tempo T_B e T_C , reduzem o ganho transitório da tensão resultante da soma, e mantém a estabilidade dinâmica do sistema. Posteriormente, o bloco que contém a constante de ganho K_A e a de tempo T_A é responsável pela regulação de tensão, realizando a amplificação do sinal da tensão em padrões de tensão terminais desejados. Os blocos relacionados com as constantes de ganho K_E e de tempo T_E culminam na excitatriz que promove a saída da tensão de campo do rotor, e controla a própria alimentação do excitador. O último bloco, que contém a constante de realimentação negativa K_F e a constante de tempo T_F , é designado como estabilizador, pois o mesmo ajusta e estabiliza o sinal de V_F promovendo a redução dos desvios de fase devido aos atrasos nos elementos do sistema de excitação. Os circuitos de proteção e de limitação consistem nos blocos designados como GATES e somatórios, sendo estes responsáveis em garantir que não haja exceções nos valores de tensões e corrente de campo no sistema de excitação.

3.5.2 Tipo DC2A.

Difere-se do sistema de excitação DC1A apenas nos limites de saída no regulador de tensão, que agora são proporcionais a tensão terminal, V_T . [10]

Logo, a representação da figura 20 apenas altera-se no bloco composto pela constante de ganho, K_A , sendo no limite apresentados, uma relação do produto da tensão terminal e a tensão de saída V_R do regulador.

3.5.3 Tipo AC1A.

O modelo que será mostrado na figura posterior representará o sistema de excitação AC1A. Esse sistema de excitação consiste de um alternador principal excitado com um retificador não controlado. O excitador não emprega auto excitação, e o regulador de tensão de alimentação é definido por meio de uma fonte, a qual não é afetada por efeitos transientes externos. A característica do diodo na saída do excitador impõe um limite inferior de zero da tensão de saída do excitador, como mostrado na figura 21.

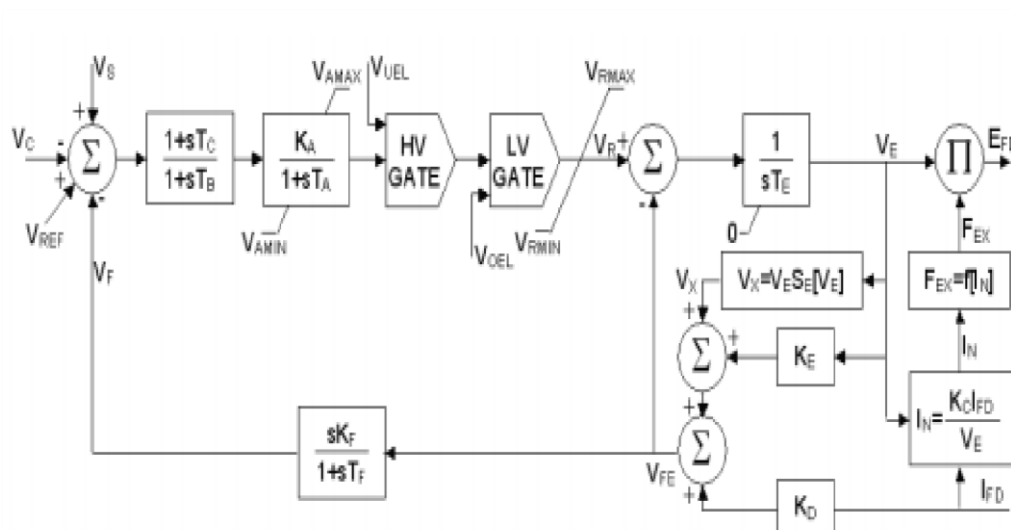


Figura 21 - Tipo AC1A de sistema de excitação. [10]

A resultante do somatório das tensões é obtido através da diferença entre a da tensão terminal de referência, V_{ref} , e a soma do sinal da tensão medido nos terminais do gerador, V_C , e do sinal de tensão de estabilização, V_F . Caso haja um estabilizador de sistema, ainda é somado o sinal do estabilizador, V_S . Esta resultante passa por um controlador avanço-atraso, com as constantes T_B e T_C que envia um sinal de controle para o regulador de tensão. A tensão do regulador é limitada de acordo com as especificações do sistema com limite superior e inferior, V_{AMAX} e V_{AMIN} respectivamente. Caso os limitadores de sobre-excitação e sub-excitação estiverem configurados, o sinal de tensão do regulador V_R pode ser limitado pelos valores V_{OEL} e V_{UEL} . A tensão V_R ainda é limitada pelos valores V_{RMIN} e V_{RMAX} , proporcionais à tensão nominal da excitatriz CA. Em seguida, ocorre uma subtração de V_R por uma parcela de V_{FE} , proporcional a corrente de excitação de campo I_{FD} multiplicado pelo termo de desmagnetização K_D somado a tensão de saída V_E por $K_E + S_E[V_E]$, no qual $S_E[V_E]$ representa a saturação da excitatriz, descrita em (IEEE Std 421.5 2005). A tensão de excitação do gerador principal é dado pela multiplicação de V_E por F_{EX} . As variáveis F_{EX} , I_N , e K_C representam uma reação de armadura do gerador principal na excitatriz, gerando um fluxo oposto ao imposto pelo regulador de tensão.

3.5.4 Tipo AC4A.

O sistema de excitação controlador-retificador alternador do tipo AC4A ilustrado na figura 22 difere-se dos outros sistemas de corrente alternada. Este sistema de excitação de alta resposta inicial utiliza uma ponte de tiristor completa no circuito de saída do excitador.

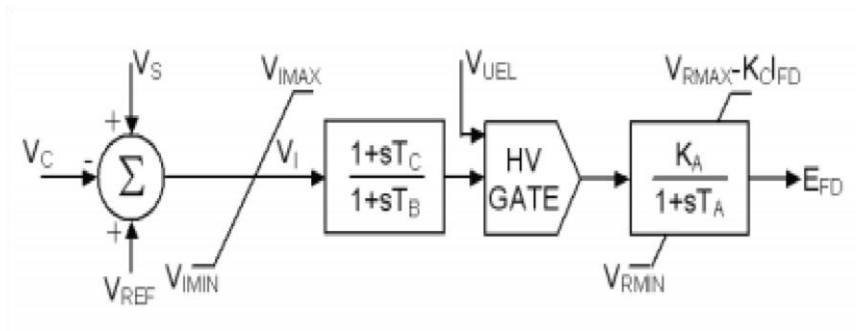


Figura 22 - Tipo AC4A de sistema de excitação. [10]

O regulador de tensão controla o acionamento das pontes de tiristores. O excitador utiliza um regulador de tensão independente para controlar a sua voltagem de saída para um valor constante. Esses efeitos não são modelados. Contudo, efeitos de carregamento de transitórios no alternador de excitação estão incluídos. Os efeitos de carregamento podem ser contabilizados usando a corrente de carga do excitador e comutação de reatância para modificar limites de excitação. A estabilização do sistema de excitação é frequentemente realizada em sistemas de tiristores por uma série de redes. Os tempos constantes, T_B e T_C , permitem a simulação desta função de controle. O ganho equivalente global e o tempo constante associada ao regulador e / ou disparo dos tiristores são simuladas por K_A e T_A , respectivamente. [10]

3.5.5 Tipo AC5A.

O modelo mostrado na figura 23, designado como AC5A, é um modelo simplificado para o sistema de excitação AC com retificação rotativa, o qual não utiliza anéis coletores e escovas em seus componentes. O regulador é fornecido a partir de uma fonte, tal como um gerador de ímã permanente, o qual não está afetado por perturbações no sistema. [10]

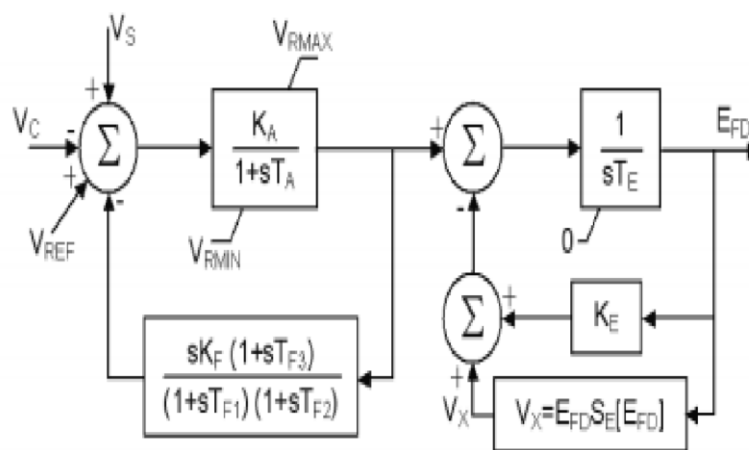


Figura 23 - Tipo AC5A de sistema de excitação. [10]

3.5.6 Tipo ST1A.

O modelo computacional do tipo ST1A sistema de excitação fonte de potência controlador retificador mostrado na figura 24 destina-se a representar os sistemas em que a potência de excitação é fornecida através de um transformador dos terminais do gerador e é regulada por um retificador controlado de forma direta. A máxima tensão de excitação disponível a partir de tais sistemas está diretamente relacionada com a tensão terminal do gerador. [10]

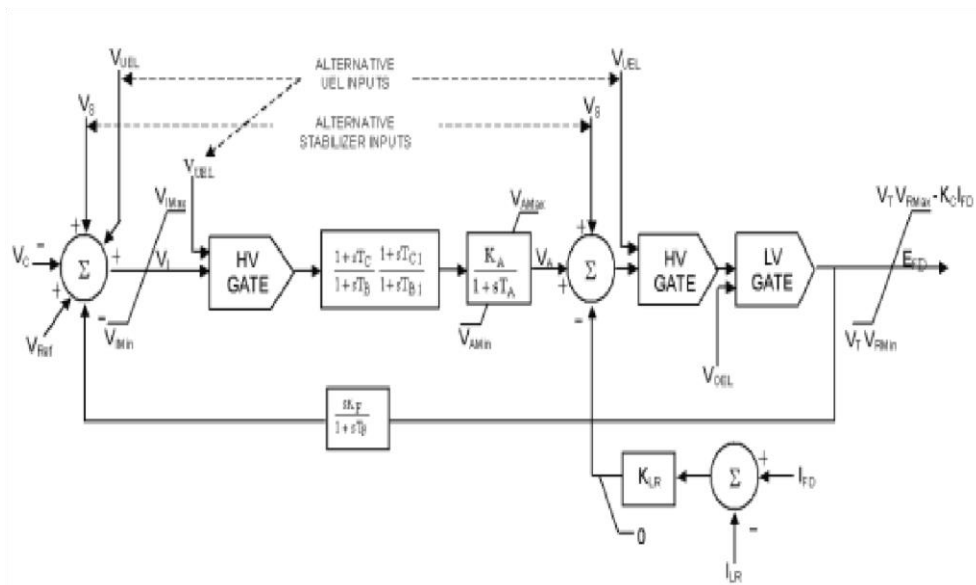


Figura 24 - Tipo ST1A de sistema de excitação. [10]

Neste tipo de sistema, as constantes de tempo excitadoras inerentes são muito pequenas, e a estabilização de excitação pode não ser requerida. O modelo apresentado é suficientemente versátil para representar a redução de ganho transiente aplicados, quer no caminho para frente através de constantes de tempo, T_B e T_C (em cujo caso K_F seria normalmente definido como zero), ou no caminho de feedback por escolha adequada dos parâmetros de retorno da taxa, K_F e T_F . Ganho no regulador de tensão e qualquer constante de tempo inerente no sistema de excitação são representados por K_A e T_A , respectivamente. [10]

Em muitos casos, os limites internos sobre V_I pode ser negligenciado. Os limites de voltagem de campo que são funções de ambos, tensão terminal e corrente de campo da máquina síncrona deve ser modelado. A representação do limite positivo da tensão

de campo como uma função linear da corrente de campo da máquina síncrona é possível porque a operação da ponte retificadora em tais sistemas é confinado à região. Os limites negativos têm uma característica dependente da corrente semelhante, mas o sinal do termo poderia ser tanto positivo ou negativo dependendo se um ângulo de disparo ou ângulo de extinção constante é escolhida para o limite. Como corrente de campo é normalmente baixo sob esta condição, o termo não está incluído no modelo. [10]

Como resultado da capacidade elevada forçante destes sistemas, um campo limitador de corrente é, por vezes, empregue para proteger o rotor do gerador e do excitador. A definição do limite de início é definido por ILR e o ganho é representado por KLR. Para permitir que este limite deva ser ignorado, é necessário prever para permitir KLR como zero. Enquanto que para a maioria destes sistemas de excitação, uma ponte totalmente controlada é utilizada, o modelo é também aplicável a sistemas em que apenas metade da ponte é controlada, no caso de a tensão de campo negativa que limite é definido para zero ($VRMIN = 0$). [10]

Capítulo 4

4 Simulação

A simulação, realizada no software MATLAB, consiste da análise de diferentes gráficos comparando-os com os demais gráficos dos diferentes tipos de sistemas de excitação. É importante frisar que os parâmetros de cada sistema de excitação são definidos pelo próprio MATLAB, e sua modificação levaria a possíveis mudanças indesejáveis dos valores da função de transferência do sistema de excitação em si. Na simulação, utilizou-se uma ferramenta do software MATLAB designada como Simulink, a qual possui exemplos que simulam situações reais com geradores síncronos acoplados a sistemas de excitação, sendo a escolha para tal projeto a referente à conexão de ambos a um sistema, o qual em determinado momento haverá uma falha trifásica.

Por conseguinte, a simulação será dotada de um gerador trifásico de 200 MVA, 13,8 kV, 112,5 rpm é conectado a uma rede de 230 kV, 10.000 MVA através de um transformador Delta-Estrela de 210 MVA. Em $t = 0,1$ s, ocorre uma falha trifásica ao terra no barramento de 230 kV. Esta falha pode ser ocasionada por inúmeros fatores, porém motivos de força maior como descargas elétricas são comumente as causas para tais eventos. Ela é apagada após 6 ciclos ($t = 0,2$ s). Enquanto ocorre a falha, o gerador síncrono trifásico é responsável por alimentar a rede respectiva. Nesta etapa, pode-se observar o comportamento do sistema, ou seja, o que ocorre com cada parâmetro, por exemplo, os valores de tensão e corrente possuem uma característica própria, as quais serão visualizadas a seguir.

A figura abaixo retrata a simulação e os blocos referentes a simulação realizada. A simulação foi modificada em alguns pontos, pois em alguns casos houve a adição de determinados blocos, por exemplo, para obter valores em módulo de tensão e corrente, os quais estavam sendo obtidos valores senoidais.

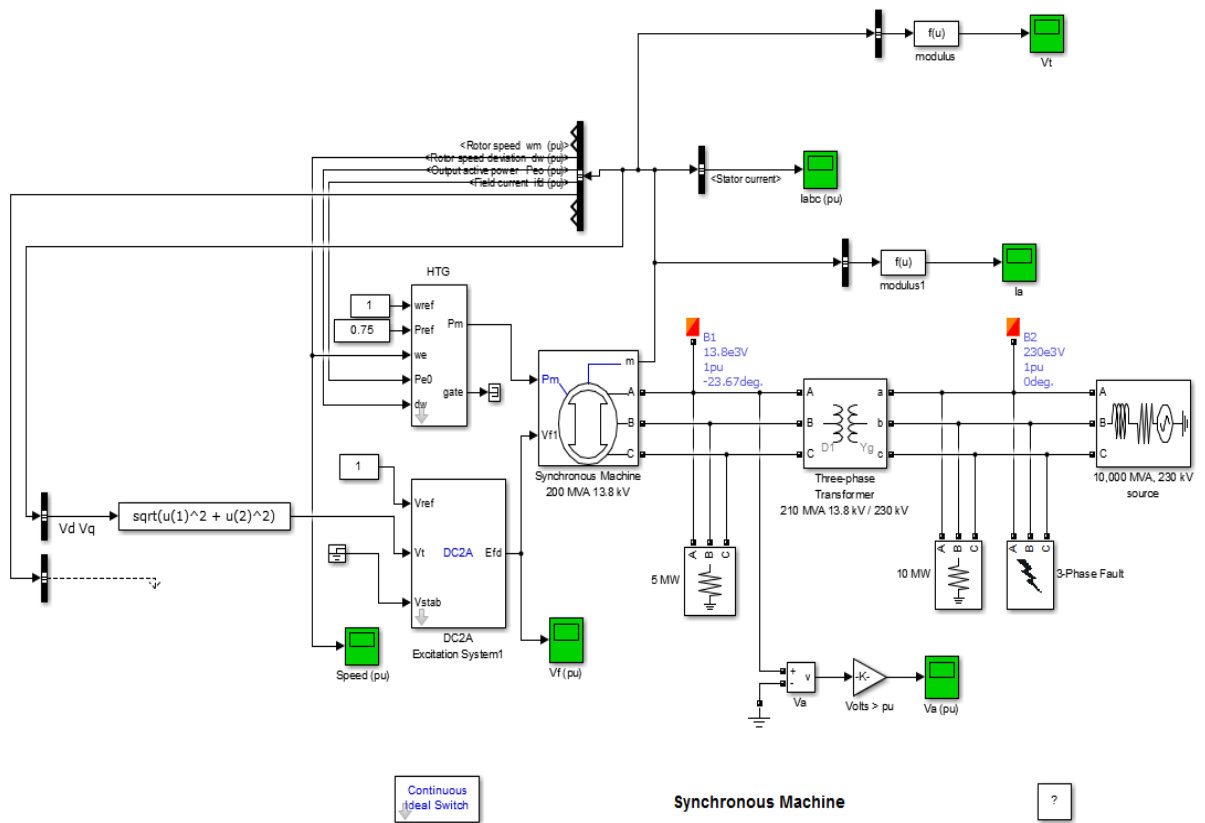


Figura 25 – Simulação representada a partir de diagramas de blocos.

Os principais blocos deste simulador, e onde está o principal foco do trabalho, consiste no gerador síncrono e no sistema de excitação. Sendo estes visualizados abaixo:

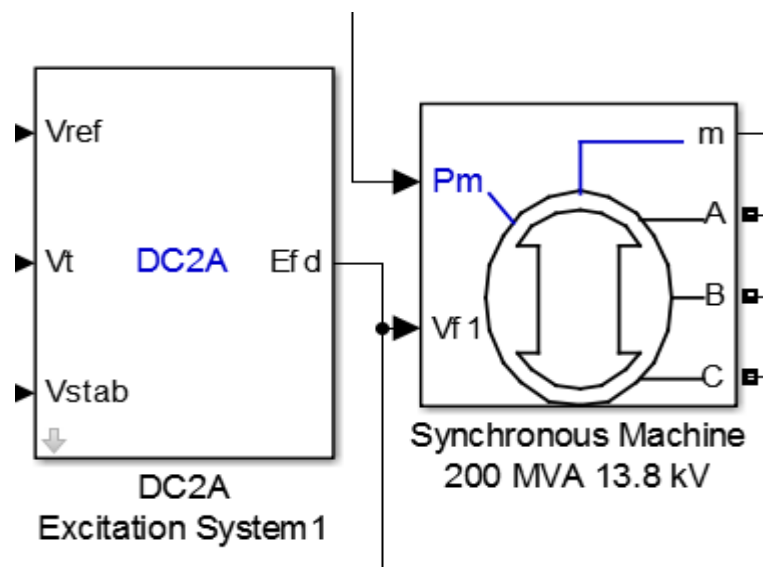


Figura 26 – Diagramas de blocos do Sistema de excitação e do Gerador síncrono, respectivamente.

Cada espécie de sistema de excitação possui suas respectivas variáveis de entradas, o que em alguns casos deve-se adicionar novas entradas, indisponíveis na figura 25, para que tal tipo tenha sua funcionalidade adequada. A finalidade destes sistemas supracitados é de induzir tensão na armadura das máquinas síncronas, também chamadas de máquinas principais, tendo sua variável definida como V_f , sendo esta a entrada da máquina síncrona. Esta tensão diz muito sobre o sistema de excitação implementado, pois a partir de seu módulo e forma de estabilidade com que este é obtido, podemos obter diferentes valores de tensão terminal nos geradores trifásicos.

Observa-se que a falha, representada por um sinal elétrico ao lado da carga de 10 MW na figura 25, interrompe por um período de tempo de 0,2 segundos a alimentação por parte do sistema principal de 10.000 MVA e 230 kV. Esta interrupção faz com que o nível de tensão de campo fornecida ao gerador síncrono se eleve consideravelmente para que a partir do curto-elétrico, haja a alimentação absoluta das cargas expostas na figura 25 por parte do gerador síncrono.

4.1 Curto-circuito

Um curto-circuito consiste em um contato entre condutores sob potenciais diferentes. Tal contato pode ser direto (franco ou através de impedância) ou indireto (através de arco voltaico). Os curtos-circuitos são geralmente chamados “defeitos” ou “faltas” (faults) e ocorrem de maneira aleatória nos sistemas elétricos. Suas consequências podem ser extremamente danosas aos sistemas elétricos, se não forem prontamente eliminados pelos dispositivos de proteção. O principal efeito de um curto, é o aumento exacerbado da corrente e a diminuição da tensão elétrica.

Nos sistemas diversos há diferentes curtos referentes ao tempo de sua permanência sendo estes os curtos temporários que são caracterizados por desaparecerem após a atuação da proteção e imediato restabelecimento do sistema. E também há os curtos

permanentes que exigem a intervenção de equipes de manutenção antes que se possa religar com sucesso o sistema.

Há diferentes causas que acarretam os curtos-circuitos, o mais comuns são as descargas atmosféricas e a fadiga ou envelhecimento dos materiais, porém ações de animais também acarretam curtos, além de queimadas em zonas de distribuição de energia.

Nesta simulação será operado um curto elétrico temporário, sendo este simétrico as três fases do sistema em questão, para sua análise de estabilização e como o sistema de excitação operará para suprir a rede elétrica e alimentar as cargas.

4.1.1 Função do conjunto sistema de excitação e gerador síncrono após o curto

Durante o curto elétrico, há a perda da rede elétrica que alimenta as cargas do sistema em questão. Antes do curto elétrico há valores de corrente de armadura e tensão de armadura nominais. A função do sistema de excitação e do gerador síncrono será reestabelecer estes valores em um dado período de tempo, para que as cargas continuem sendo alimentadas, mesmo com a falta no sistema. Para que isto ocorra, a tendência natural é que o sistema de excitação eleve sua indução eletromagnética ao estator do gerador síncrono e este reestabeleça os valores nominais antes do curto elétrico.

O fato é que cada sistema de excitação terá um comportamento diferente quanto a sua tensão de campo, que é a responsável pela indução de tensão no estator do gerador, a partir da força magnetomotriz produzida pela corrente elétrica que passa nos enrolamentos indutivos localizados no rotor deste.

As análises junto aos resultados serão apresentados a seguir.

4.2 Resultados

Através da simulação obteve-se alguns resultados importantes para análise do sistema em questão, inclusive sobre o comportamento de cada sistema de excitação apresentado neste trabalho anteriormente. Os pontos relevantes destacados para este projeto foi a velocidade de rotação do rotor da máquinas síncrona antes e após o curto-elétrico, as tensões de campo fornecidas ao gerador síncrono por parte do sistema de excitação, as tensões terminais ou tensões de armadura, as quais estão localizadas na saída do gerador síncrono e, finalmente, as correntes de armadura do gerador síncrono. Posteriormente, a discussão se embasará na comparação entre os diferentes tipos de sistema de excitação, a partir dos resultados observados e as teorias já estudadas.

4.2.1 Função do aumento da rotação para o sistema de excitação

Antes do curto-circuito a rotação do rotor da máquina síncrona possui em todos os sistemas de excitação, rotações na casa de 1 pu, ou seja, operam no seu valor nominal, o que é algo normal e esperado que aconteça. O fato é que com a ocorrência do curto-circuito há a alteração da frequência da rede elétrica ocasionada por este distúrbio no sistema vigente. Com o curto-elétrico trifásico há a elevação da frequência da rede no sistema, e esta está intrinsicamente relacionada com a rotação da rotor da máquina principal. Elevando-se este valor de rotação, acarreta o aumento da produção de campos magnéticos variantes no tempo com relação ao entreferro da respectiva máquina, produzindo desta forma uma tensão de campo maior e consequentemente conseguindo suprir e reestabelecer o valor nominal de corrente de armadura e tensão de armadura respectivamente no sistema.

Antes do curto a rotação do eixo da máquina possui o gráfico abaixo:

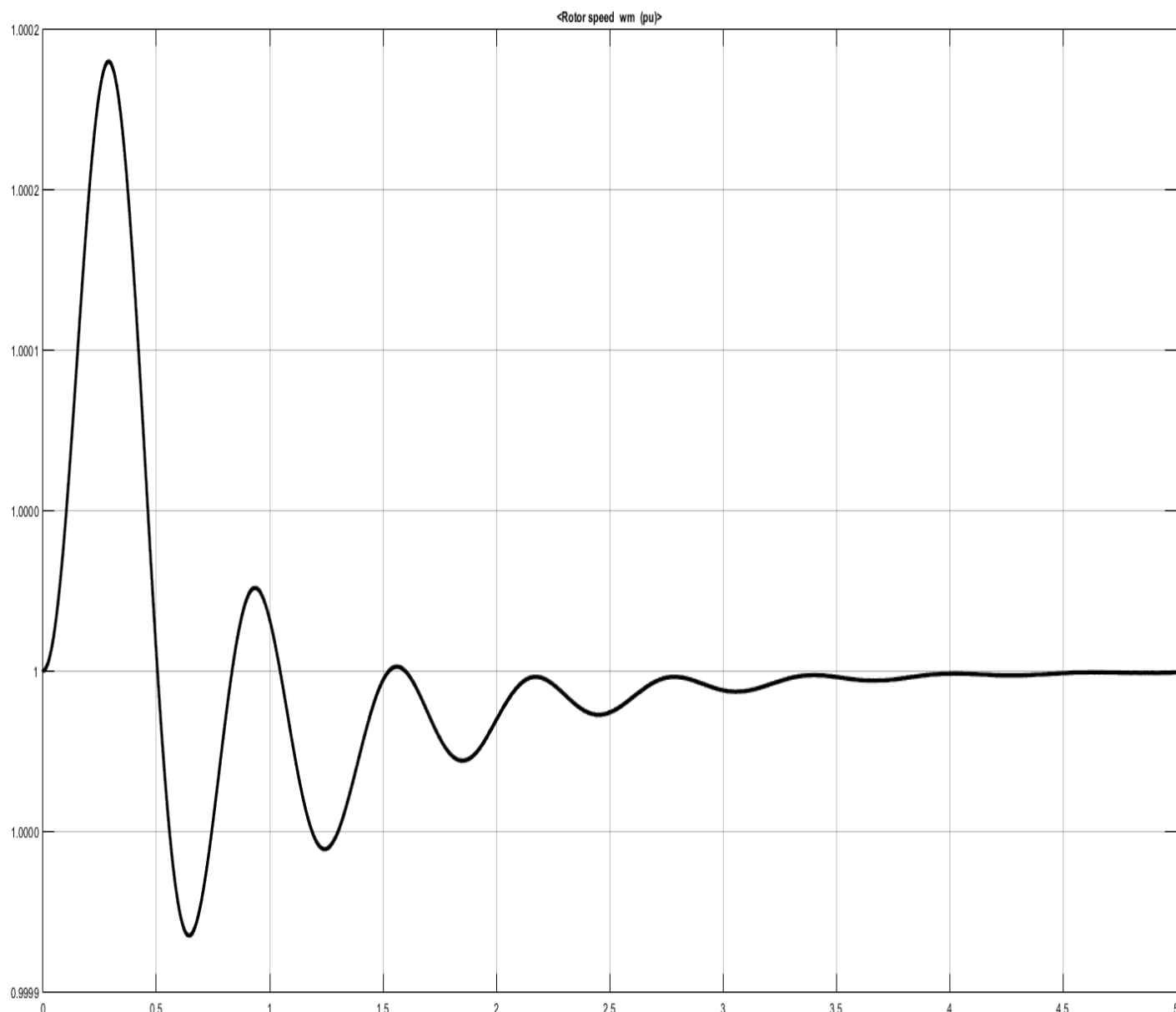


Figura 27 – Gráfico referente a rotação por minuto do eixo da máquina em operação normal.

A figura acima, mostra uma linha com elevação significativa em seu gráfico, porém visualiza-se que na verdade a variação foi na casa de 0,002 em seu máximo, pois seu intervalo está muito curto. Logo, aumentando-se minimamente a escala do valor em pu o gráfico seria uma reta com seu valor em 1 pu, aproximadamente.

Sequencialmente, no momento do curto ou da falha o gráfico adquire tal forma, como será apresentado na figura abaixo:

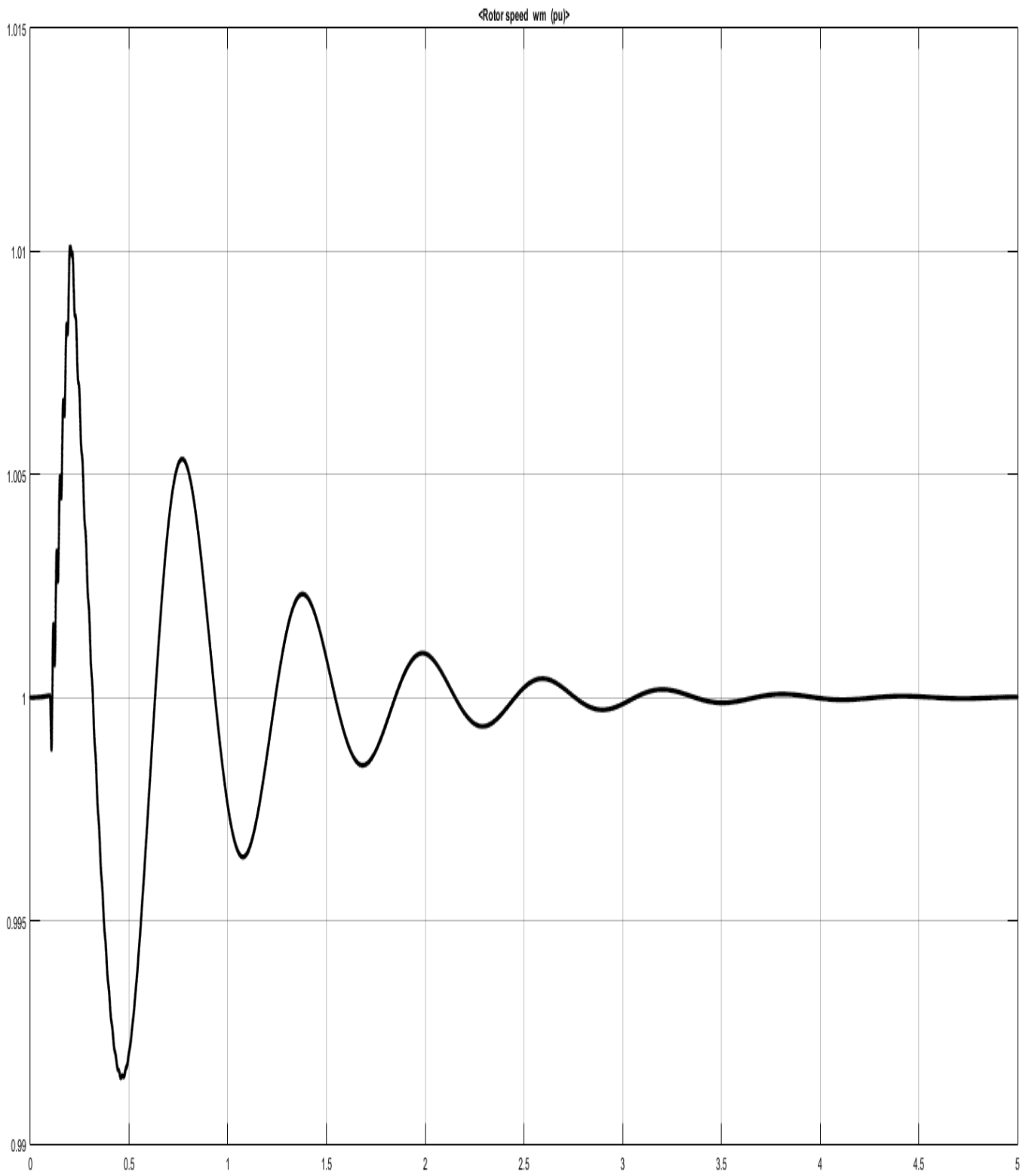


Figura 28 – Gráfico referente a rotação por minuto do eixo da máquina em curto.

Observa-se que agora o valor máximo, o qual ocorre no momento do curto é de 1,01, logo conclui-se que a frequência do sistema elevou-se para manter a alimentação das cargas dispostas neste. Com uma pequena variação da frequência e da respectiva velocidade de rotação, o sistema de excitação eleva de forma extrema sua tensão de campo para que consiga suprir a falta da rede elétrica que sofreu o curto-elétrico.

É de suma importância ter em mente que a frequência, em todos os tipos de sistemas de excitação analisados, terá uma variação semelhante, ao ponto de alguns casos variar apenas as formas de ondas para que se chegue ao equilíbrio. Isso é explicado, pois é a resposta dada pelo sistema ao curto e não um parâmetro próprio de cada sistema de excitação.

4.2.2 Resultados dos gráficos de corrente de armadura e tensão de armadura.

Os gráficos de tensão de armadura e corrente de armadura são sempre semelhantes, seja qual for o sistema de excitação, tendo em vista que estes não se relacionam intrinsecamente com a excitatriz, e sim com a própria rede e suas cargas. A função do sistema de excitação é promover que a respectiva tensão e a corrente de armadura retornem ao seu valor nominal, através da tensão e corrente de campo produzida pelo determinado sistema de excitação, após o curto-circuito. O fato de serem semelhantes não significa que serão idênticos, o que torna um diferente do outro são os parâmetros utilizados e o tempo de retorno a estabilidade antes auferida, além da forma da linha disposta no gráfico.

Primeiramente será apresentado o gráfico antes do curto-circuito da corrente de armadura, o que demonstra sua permanência em um estado nominal, ou seja, é o valor que o sistema elétrico que foi simulado via Simulink opera em qualquer que seja o sistema de excitação imposto. A seguir, mostra-se tal gráfico:

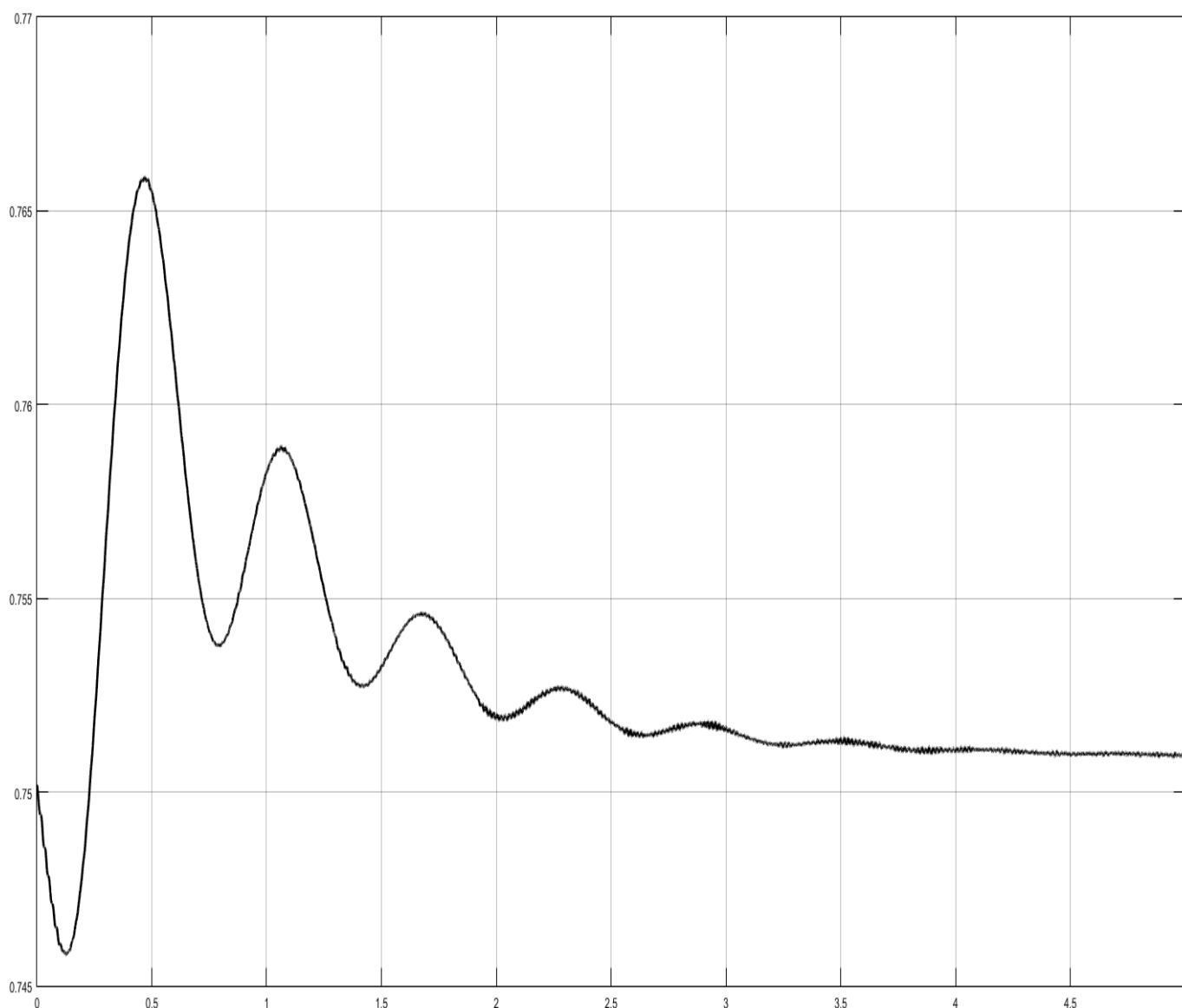


Figura 29 – Gráfico da corrente de armadura em um sistema ideal, logo sem curto-circuito.

O comportamento da corrente de armadura na rede vigente é praticamente linear. As variações verificadas no gráfico da figura 29 são ocasionadas pelo fato do eixo Y ter leves flutuações de valores, na ordem da segunda casa decimal. Verifica-se que os valores estão entre 0,745 a aproximadamente 0,765 pu. É importante destacar que o comportamento visto é o esperado, já que a rede elétrica está em perfeito equilíbrio, sendo alimentada pela rede principal juntamente ao sistema de excitação e o gerador síncrono sem nenhuma falha.

Abaixo, mostra-se o gráfico referente à tensão de armadura na mesma condição do gráfico anterior, ou seja, com a rede elétrica trabalhando em sua situação ideal:

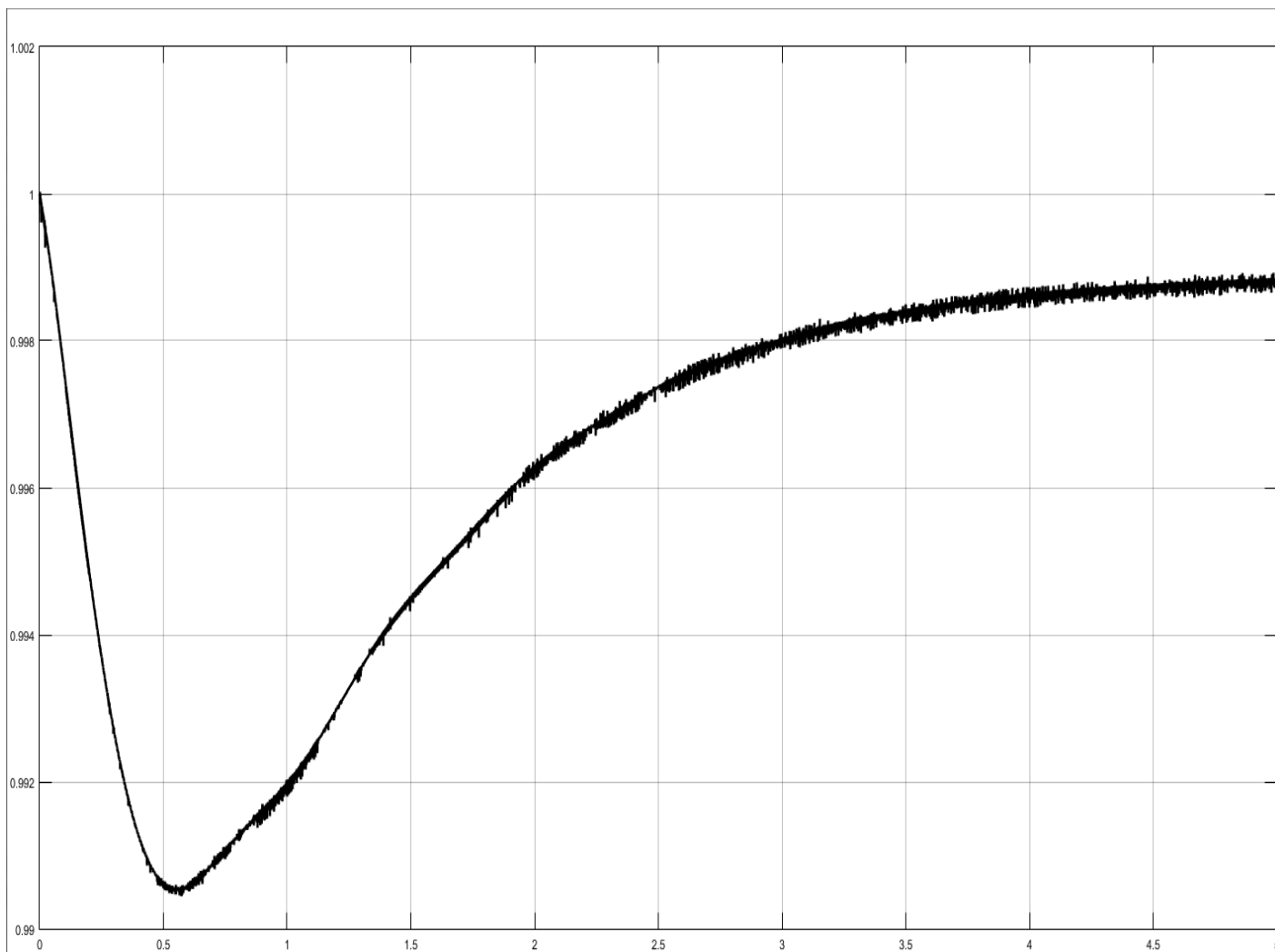


Figura 30 – Gráfico da tensão de armadura em um sistema ideal, logo sem curto-circuito.

Na figura 30, tem-se a representação do comportamento da tensão trifásica na rede elétrica, sem o fenômeno do curto-elétrico. Por conseguinte, da mesma forma que na corrente de armadura, em todos os sistemas de excitação visualiza-se comportamentos praticamente idênticos a este, pois nesta situação sua resposta é dada, principalmente, em virtude da rede que alimenta ambas as cargas de 5MW e de 10MW, o que configura uma característica intrínseca da rede em questão.

No momento do curto-elétrico, a tendência da rede que alimenta este sistema por completo é de se tornar uma linha, ou seja, é eliminada pelo menos enquanto o curto se manifesta na rede. Neste momento, o conjunto sistema de excitação e gerador síncrono entram em ação para suprir a falta da rede que mantinha um fluxo de corrente elétrica no sistema representado, e alimentava, desta forma, as cargas postas e representadas na figura 25. O principal objetivo deste conjunto mencionado é de reestabelecer a operação

linear, durante o curto-elétrico, a partir da elevação da corrente de campo do sistema de excitação e desta forma ter uma maior produção de campo magnético e consequentemente induzir uma tensão maior na rede trifásica determinada.

As figuras abaixo farão menção as correntes de armadura durante a falha elétrica, e o comportamento que estas se caracterizam para retornarem ao valor linear visto acima na figura 29. A corrente elétrica em curto trifásico se eleva de forma brusca, isso é dado pelo fato de que durante a manifestação de uma falha elétrica no sistema, a resistência elétrica no ponto desta falha torna-se nula ou praticamente nula, o que faz com que a corrente elétrica não tenha obstáculos para seu controle, elevando-se consideravelmente. Este comportamento se diferencia da tensão de armadura, pois justamente esta possui o efeito contrário, sendo que seu valor sofre uma queda brusca. A partir deste momento de elevação, para a corrente, e de queda, para a tensão, atua-se no sistema o sistema de excitação já mencionado que reestabelece a operação linear. Cada sistema de excitação trará uma forma diferente de obtenção desta linearidade, a depender das funções de transferências de cada, e logo do comportamento dos gráficos de tensão de campo destes. Logo, tem-se as figuras mencionadas no começo deste parágrafo, que demonstrarão em síntese o comportamento da corrente de armadura durante o curto elétrico, e a forma como esta retorna ao valor nominal ou linear, a depender do sistema de excitação empregado:

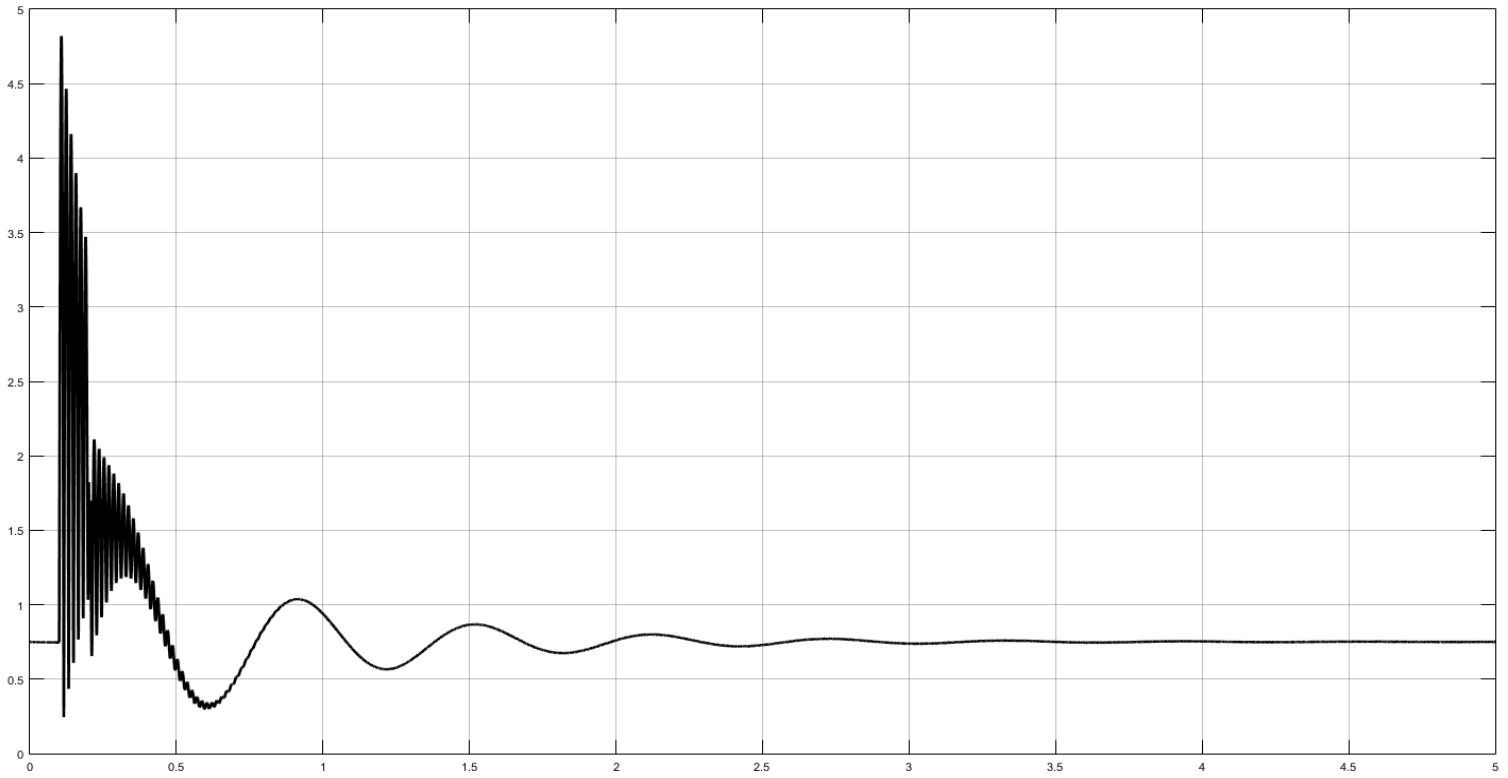


Figura 31 – Gráfico da corrente de armadura em curto, com o sistema de excitação DC1A.

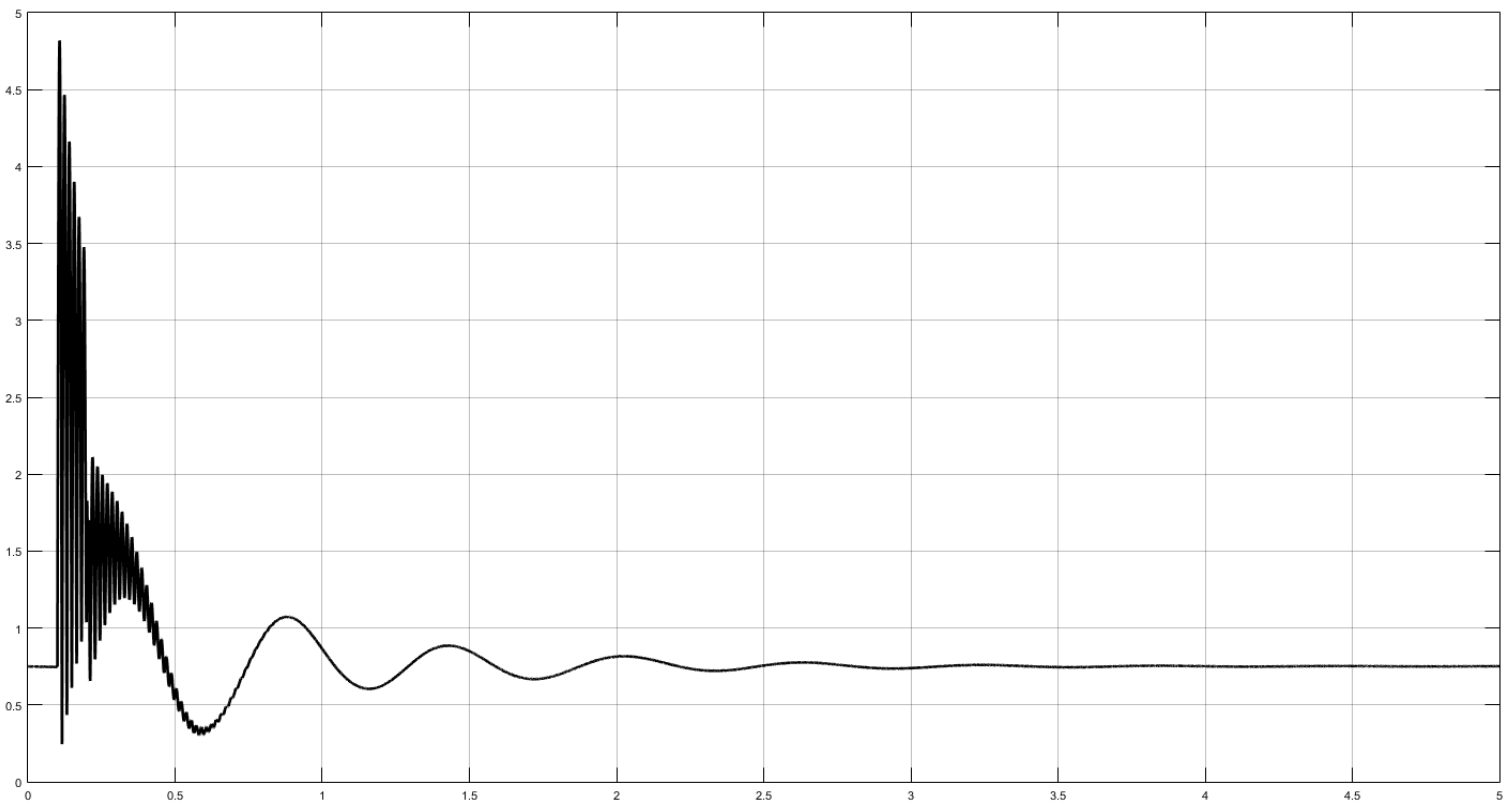


Figura 32 – Gráfico da corrente de armadura em curto, com o sistema de excitação DC2A.

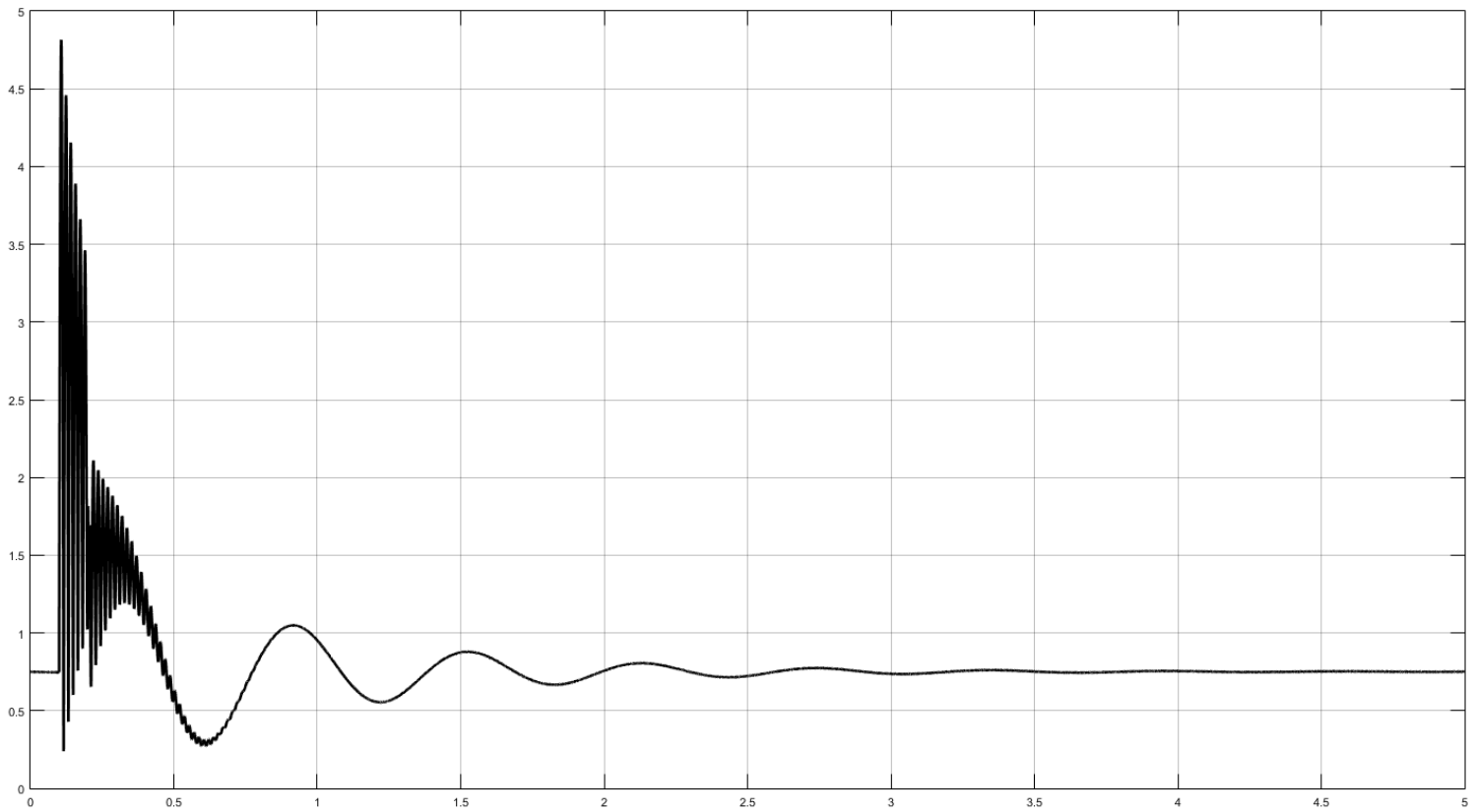


Figura 33 – Gráfico da corrente de armadura em curto, com o sistema de excitação AC1A.

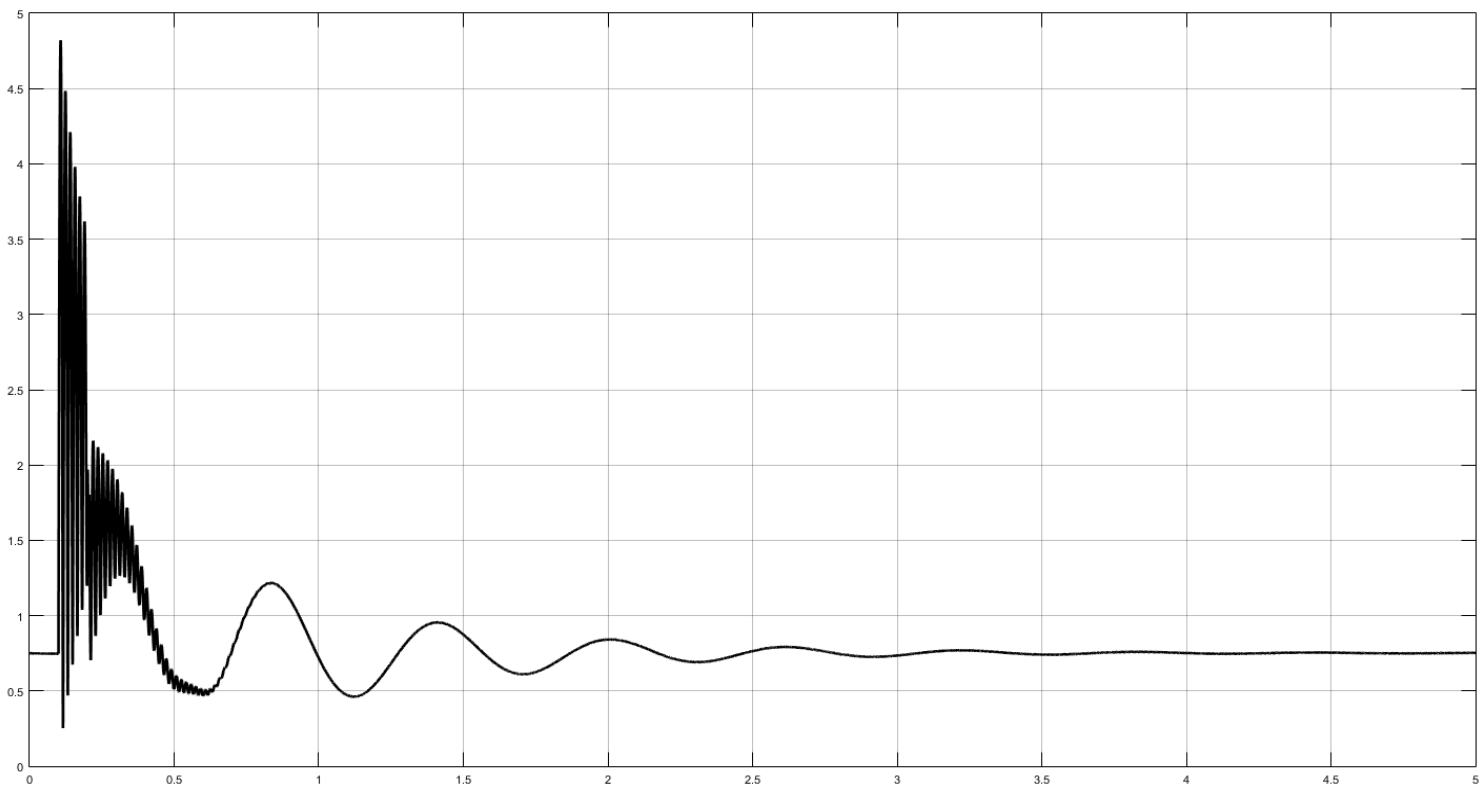


Figura 34 – Gráfico da corrente de armadura em curto, com o sistema de excitação AC4A.

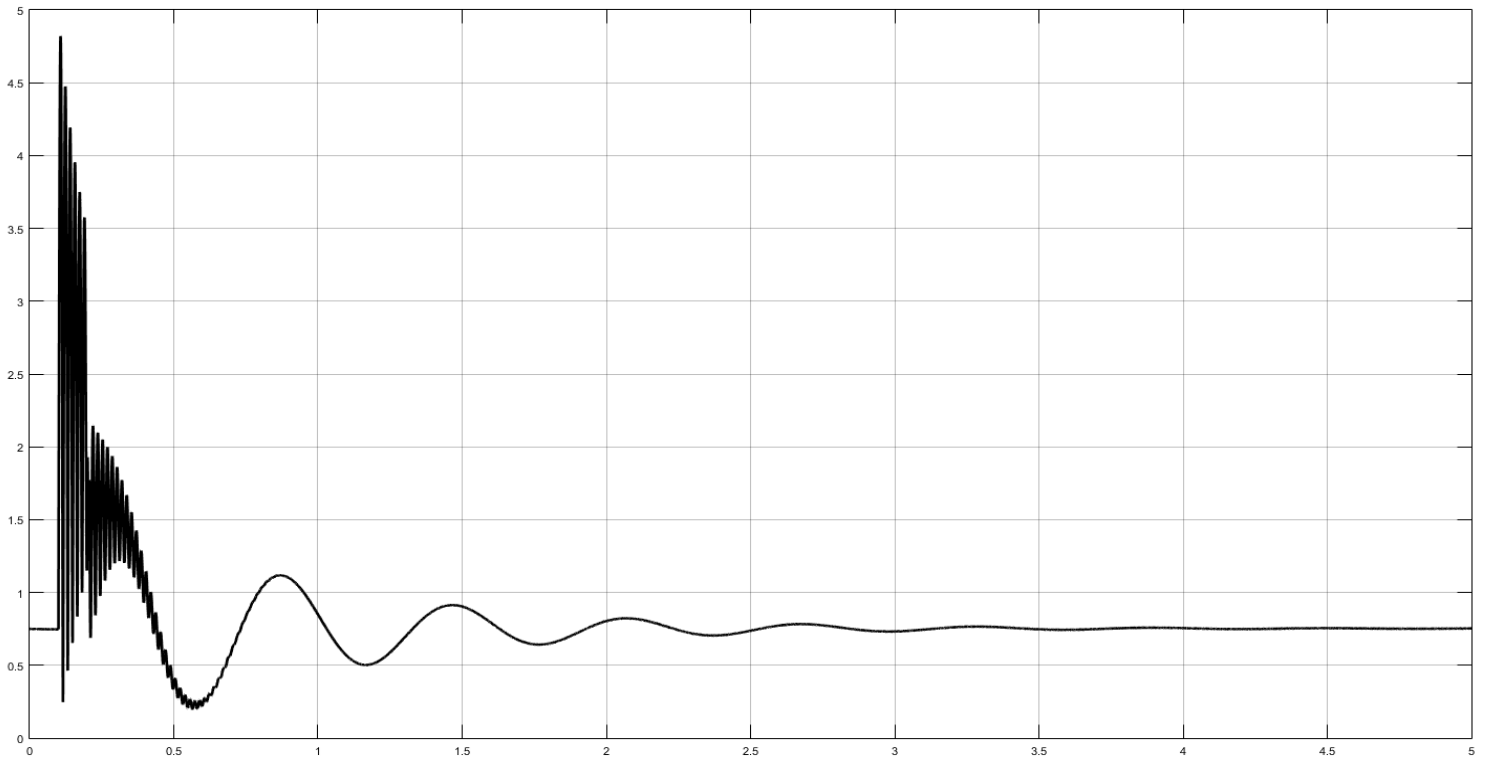


Figura 35 – Gráfico da corrente de armadura em curto, com o sistema de excitação AC5A.

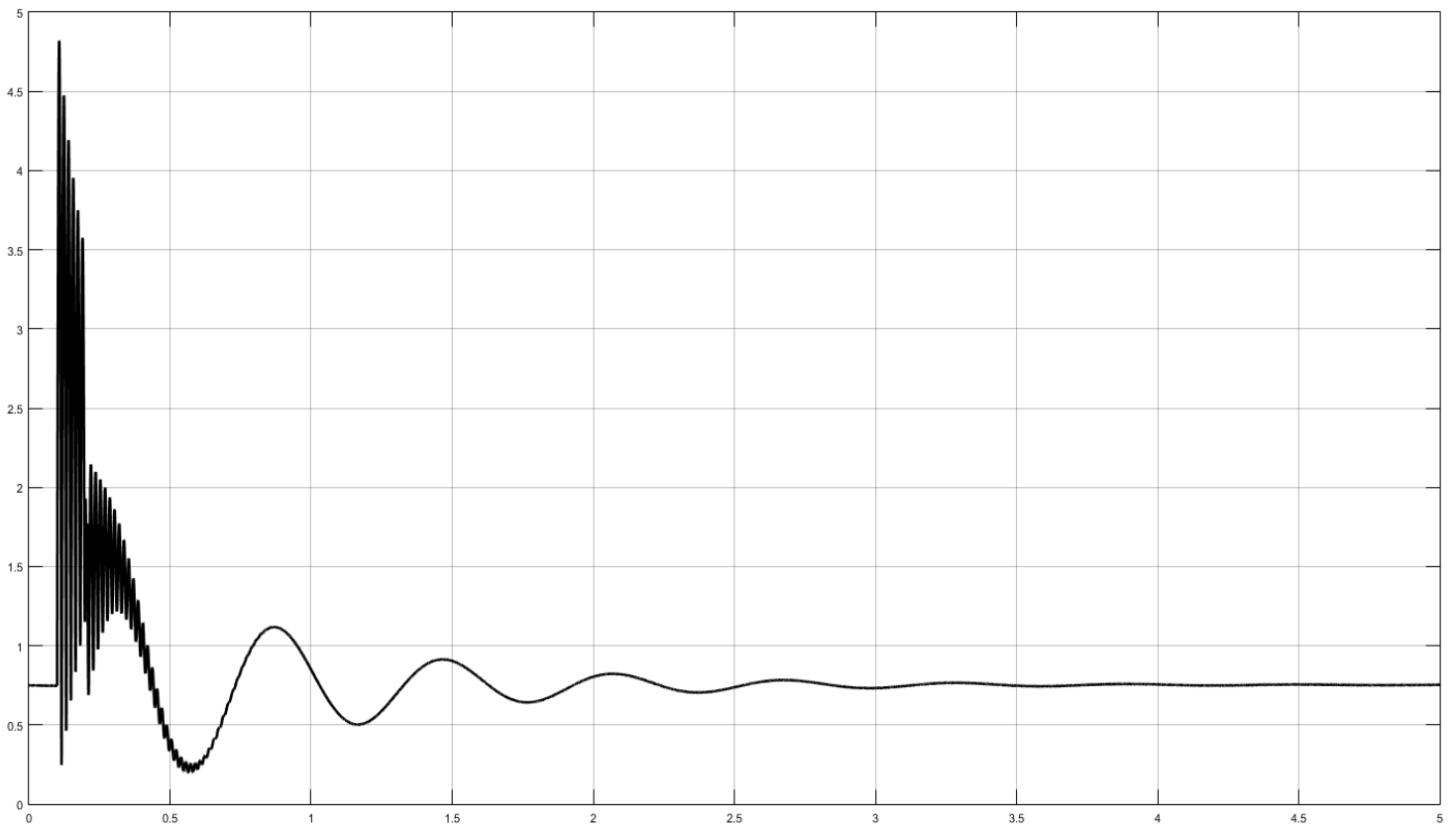


Figura 36 – Gráfico da corrente de armadura em curto, com o sistema de excitação ST1A.

Primeiramente, observa-se que o sistema que antes estava em sua corrente nominal, em torno de 0,75 pu, mantém-se estável por volta de 0,2 segundos, sendo neste momento a comprovação da ocorrência do curto elétrico que promove a elevação da corrente elétrica em um pico de 4,8 pu, a qual temporariamente vai se regularizando pela atuação do sistema de excitação juntamente ao gerador síncrono que reestabelece a operação nominal do sistema. Este comportamento é verificado em todos os gráficos, sendo estes muito parecidos ao ponto de serem quase idênticos. As diferenças constatadas são referentes as variações que as ondas possuem até chegar a sua estabilização plena, dada pelo efeito que cada sistema de excitação tem em particular.

Nos sistemas de excitação DC1A e DC2A, há semelhança entre os desempenhos dos respectivos gráficos, porém visualiza-se que em determinados pontos, por exemplo, o sistema DC2A apresentou uma estabilização um pouco mais rápida, na casa dos milissegundos, o que pode fazer uma diferença significativa numa rede elétrica real. É importante destacar que não se está avaliando qual sistema de excitação é melhor ou pior, pois os parâmetros são modificáveis, sendo utilizados os parâmetros com valores já referenciados pelo MATLAB. O fato é que essa diferença mínima, contudo bastante significativa é dada principalmente ao fato do comportamento da tensão e corrente de campos de cada sistema de excitação.

Como já visualizadas as correntes de armadura dos respectivos sistema de excitação na iminência da falha elétrica, tem-se também as tensões de armadura respectivas, que como já explicados a tendência desta é de seu valor cair consideravelmente, visto que a resistência durante o curto será nula ou quase nula, logo se tem:

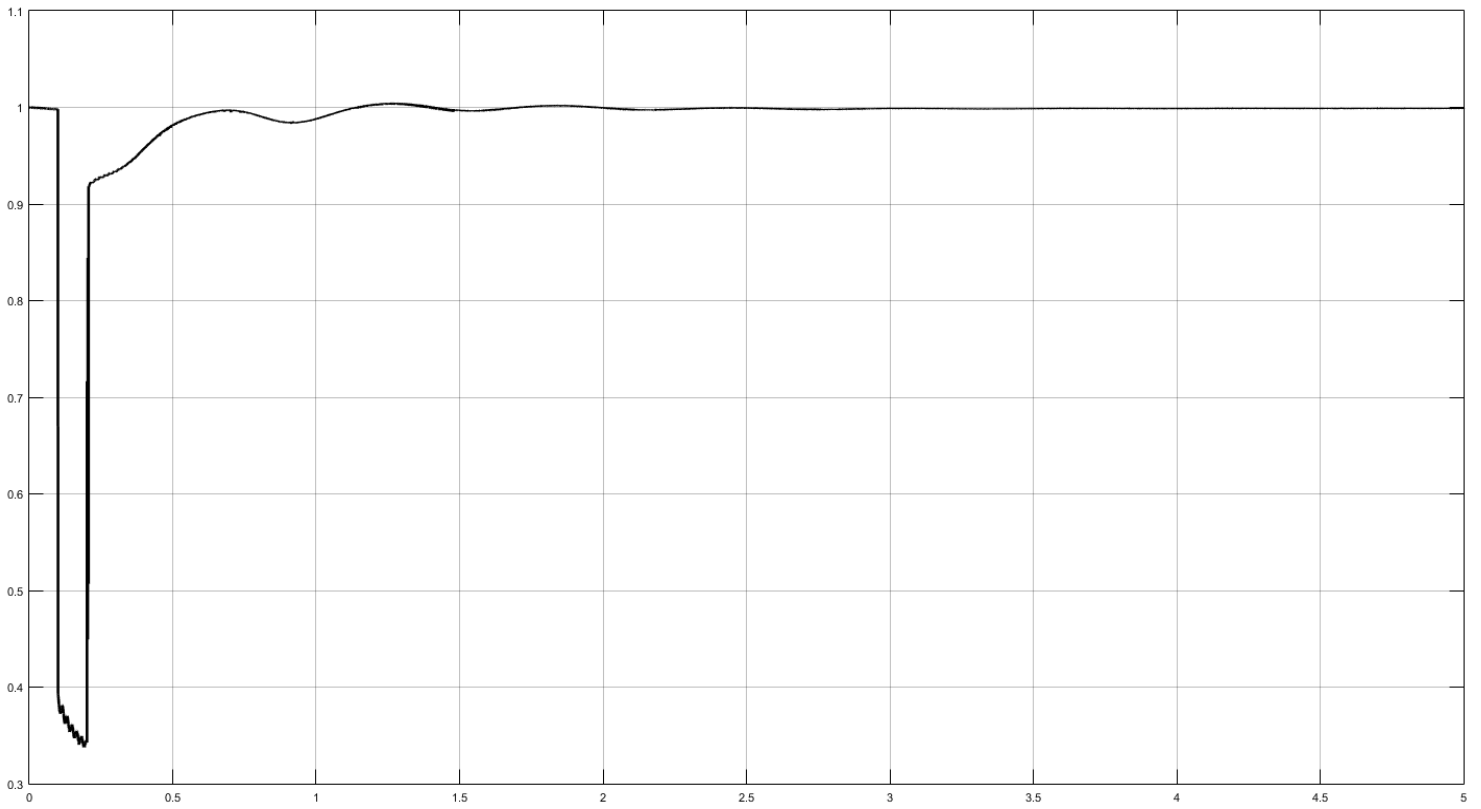


Figura 37 – Gráfico da tensão de armadura em curto, com o sistema de excitação DC1A.

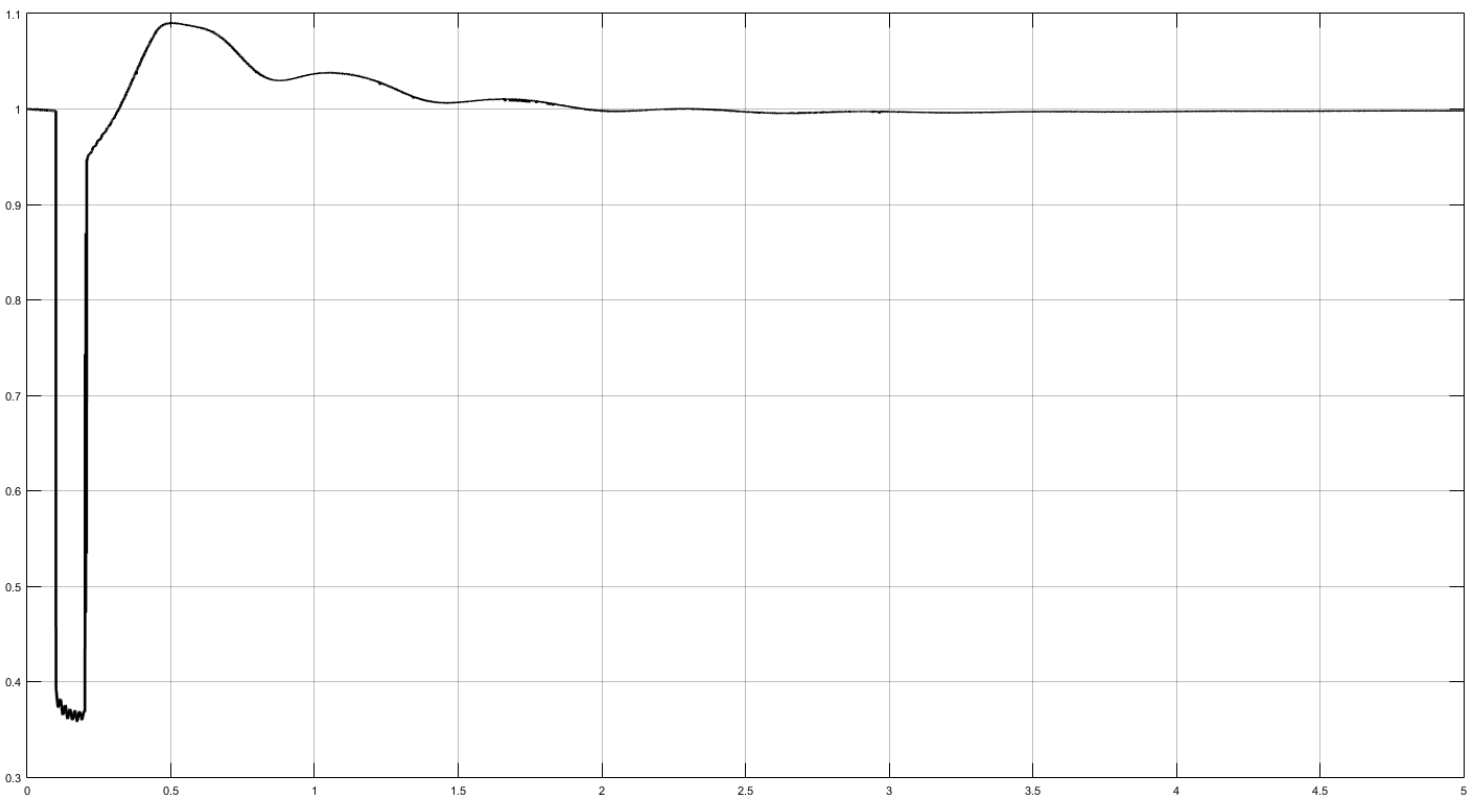


Figura 38 – Gráfico da tensão de armadura em curto, com o sistema de excitação DC2A.

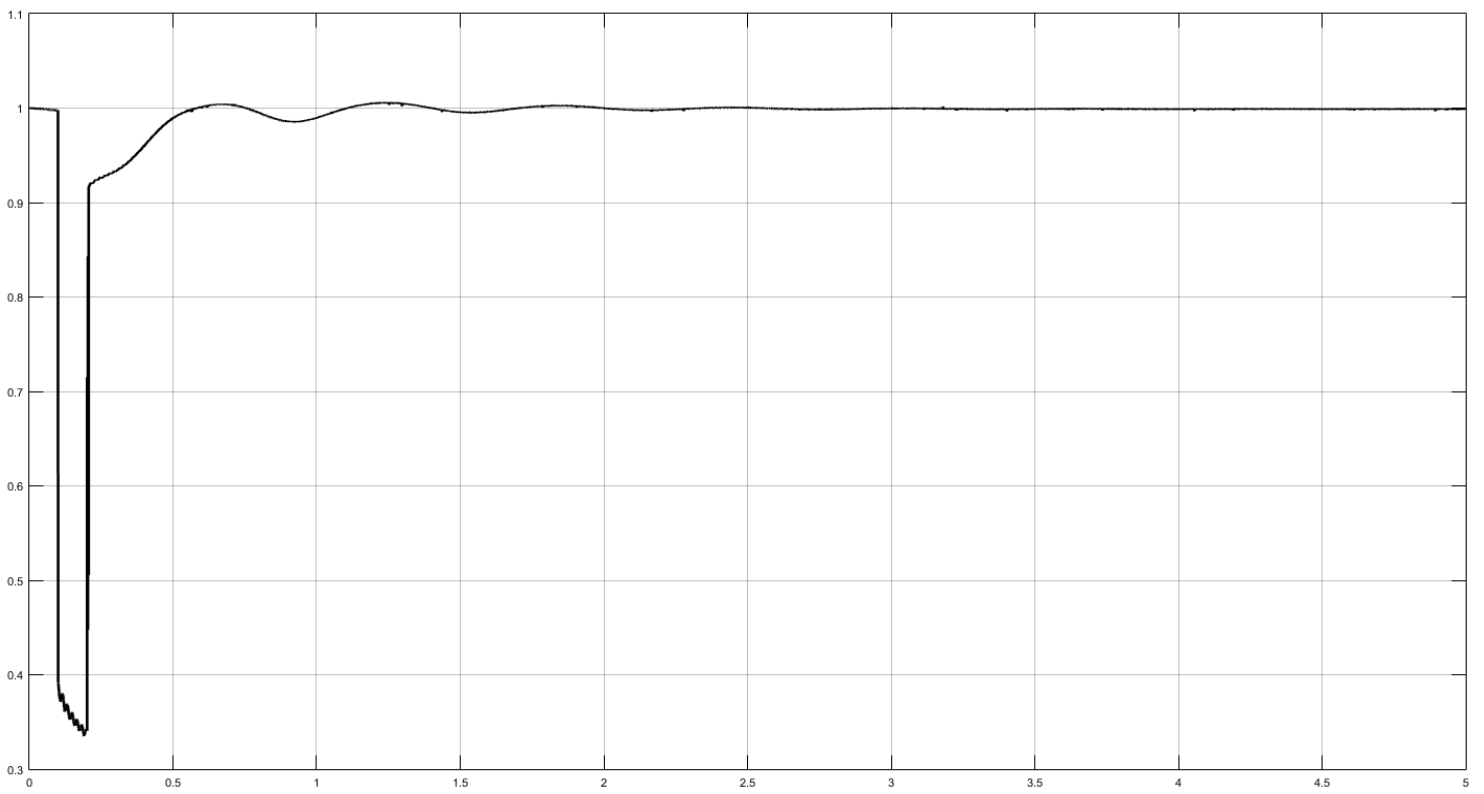


Figura 39 – Gráfico da tensão de armadura em curto, com o sistema de excitação AC1A.

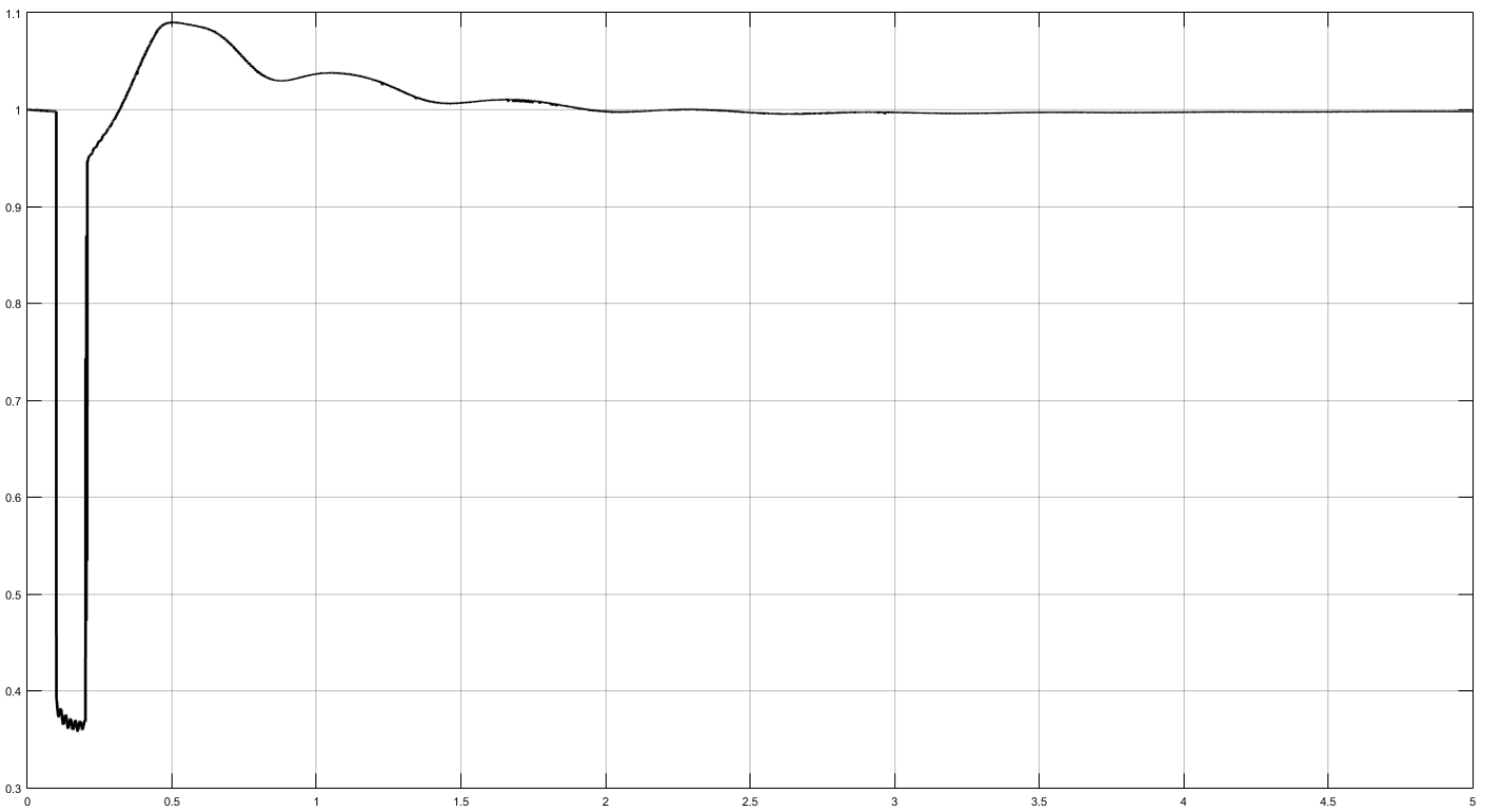


Figura 40 – Gráfico da tensão de armadura em curto, com o sistema de excitação AC4A.

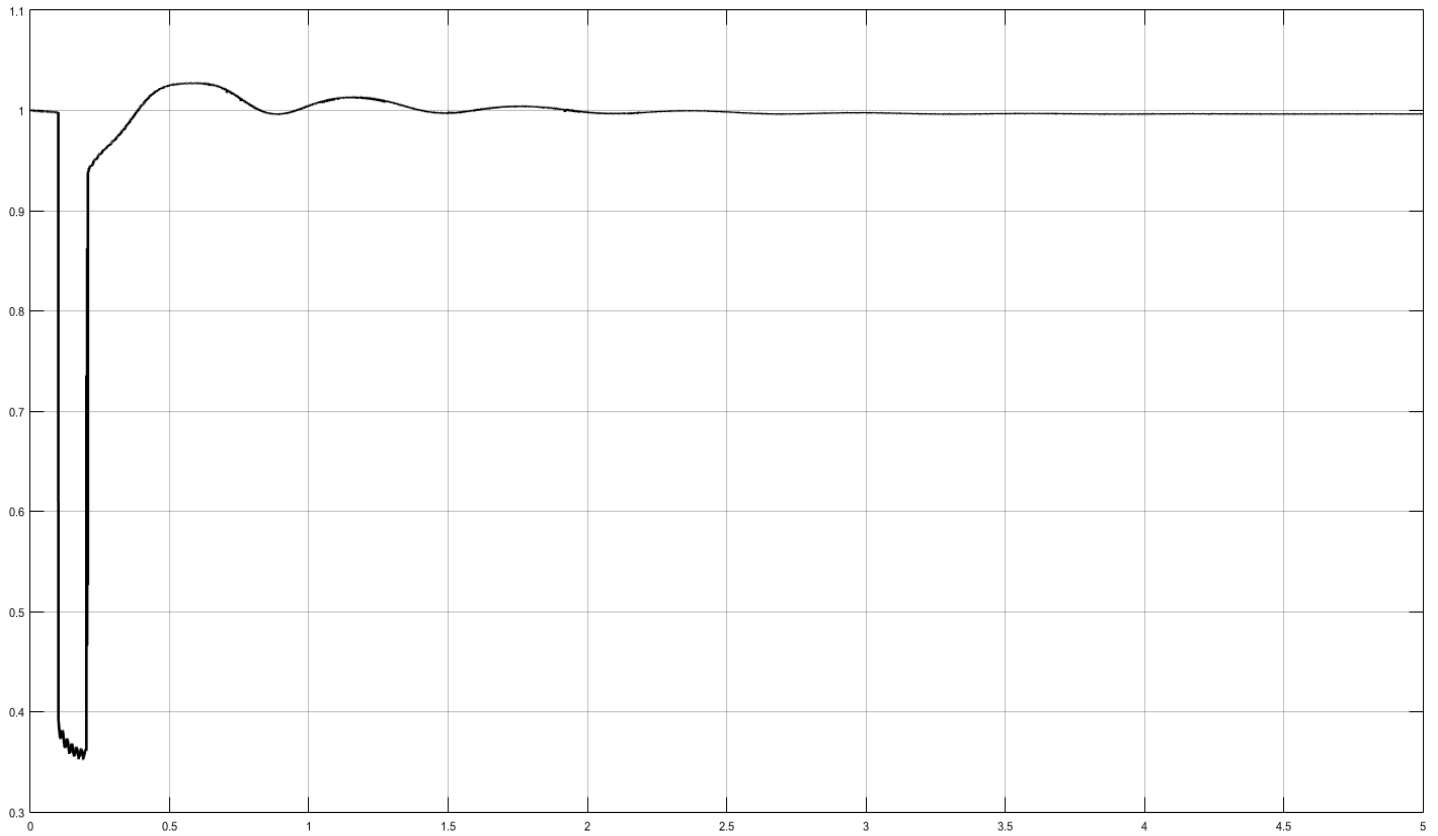


Figura 41 – Gráfico da tensão de armadura em curto, com o sistema de excitação AC5A.

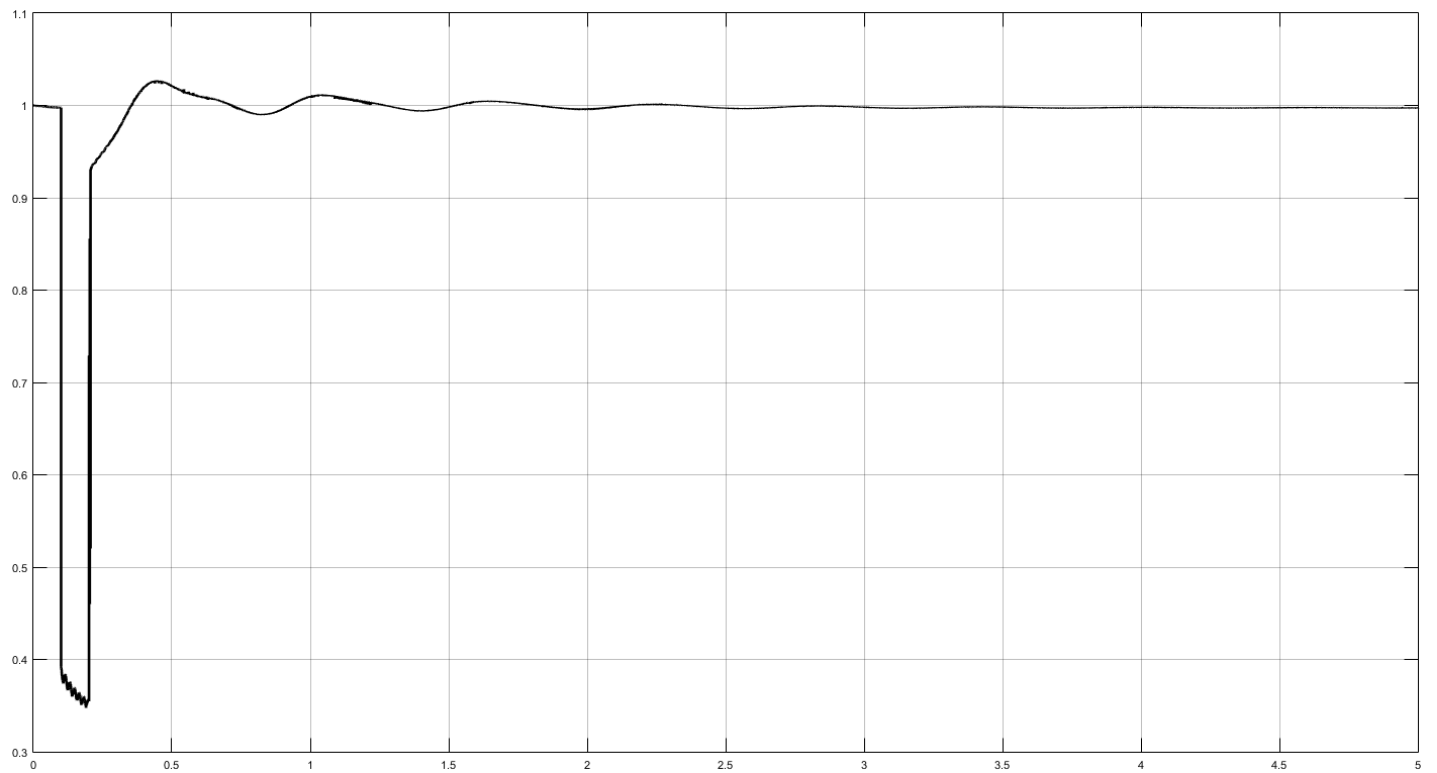


Figura 42 – Gráfico da tensão de armadura em curto, com o sistema de excitação ST1A.

A priori, antes do curto elétrico, tem-se o valor de 1 pu para a tensão de armadura, a mesma verificada no gráfico que mostra o sistema trabalhando perfeitamente, sem falhas elétricas, a partir do momento 0,2 segundos o curto se manifesta e acarreta a queda da tensão trifásica de armadura, chegando-se a um valor mínimo de 0,35 pu, nesta etapa começa os trabalhos para repor o sistema elétrico vigente em seus valores nominais por parte do sistema de excitação e do gerador síncrono. Desta forma este conjunto mencionado, consegue elevar novamente a tensão de armadura até o momento que esta se reestabelece, sendo este momento, embora bem parecidos em ambos os gráficos acima, diferentes para cada devido aos parâmetros de trabalho e as próprias configurações de cada sistema de excitação.

4.2.3 Discussão dos resultados de tensão de campo de cada sistema de excitação.

Cada sistema de excitação possui seu respectivo comportamento devido a suas funções de transferências específicas. Estas diferenças podem ser observadas e comprovadas diante dos gráficos de corrente de campo e tensão de campo. Neste trabalho, por limitações do software MATLAB, apenas obteve-se o comportamento da tensão de campo, porém se sabe que há uma interdependência da tensão de campo com a corrente de campo, sendo aquela intimamente determinada por esta. A tensão de campo é determinada pela seguinte equação: [13]

$$V_f = 4,44 f \phi_F N k_w \quad (4.1)$$

Na equação (4.1), as variáveis que definem a tensão de campo são as seguintes: “f” faz referência a frequência da rede elétrica que é proporcional à velocidade de rotação do motor ω ; ϕ_F é o fluxo produzido pela corrente de campo; N é o número de espiras do enrolamento do estator e, por último, k_w é o coeficiente de distribuição dos enrolamentos do estator.

O fluxo magnético é proporcional a corrente; a constante de proporcionalidade, que depende da geometria e das propriedades magnéticas do meio, é chamada de indutância (ou auto-indutância) do circuito, denotada pela letra L. Essa definição de

indutância foi dada por Oliver Heaviside em 1886, o qual também foi o criador dos termos impedância, condutância, permeabilidade e eletreto. De acordo com essa definição: [14]

$$\Phi_F = L * I_F \quad (4.2)$$

Como já discutido neste trabalho em capítulos anteriores, o sistema de excitação nada mais é do que um gerador de corrente elétrica para o gerador síncrono. Sendo que esta corrente alimentará o campo da máquina principal que induzirá uma tensão na armadura do gerador determinado. Com esta sequência de acontecimentos há os parâmetros elétricos para alimentar cargas dispostas no sistema. Outro fato também já mencionado neste trabalho e que tem grande importância para análise do comportamento da tensão de campo antes e após o curto-circuito é de que o regulador de tensão realiza o controle da corrente de campo, para manter a máquina em sincronismo com o sistema, quando esta opera a fator de potência unitário ou adiantado, além disso aumenta a excitação sob condições de curto-circuito no sistema, para manter a máquina em sincronismo com os demais geradores do sistema. [6]

Após dadas revisões e apontamentos, a análise consistirá de observar a tensão de campo antes do curto e após este, em cada um dos sistemas de excitação estudados, sendo a análise em sequência dos sistemas de excitação DC1A, DC2A, AC1A, AC4A, AC5A e ST1A. Todos os sistemas de excitação terão características semelhantes, sendo estas que no momento do curto-elétrico a rotação do rotor irá se elevar pela elevação da frequência da rede e a corrente de campo aumentará para suprir o sistema que antes alimentava as cargas e para mantê-la em sincronismo com os demais geradores do sistema.

Primeiramente, observa-se os respectivos gráficos de tensão de campo antes e depois do curto do sistema DC1A, porém sendo apresentado os parâmetros utilizados em suas variáveis neste sistema pelo software MATLAB:

Tabela 2 - Valores das constantes do sistema de excitação DC1A.

Constante do Sistema de Excitação	Valores (p.u)
Ka (Constante de Ganho de tensão do Regulador)	46
Ta (Constante de tempo do Regulador)	0,06
VRmín VRmáx (Tensão de Saída do Regulador)	-0,9 1,0
Kf (Constante de Ganho de Amortecimento do Filtro)	0,05
Tf (Constante de tempo do Amortecimento)	1,5
Tb Tc	0,0 0,0
Ke (Constante de ganho da excitatriz)	0,05
Te (Constante de tempo da excitatriz)	0,46
Efd1 Edf2 (Tensão do enrolamento de campo)	3,1 2,3

Se[Efd1] Se[Efd2] (Função de saturação não linear da tensão de campo)	0,33 0,10
--	-------------

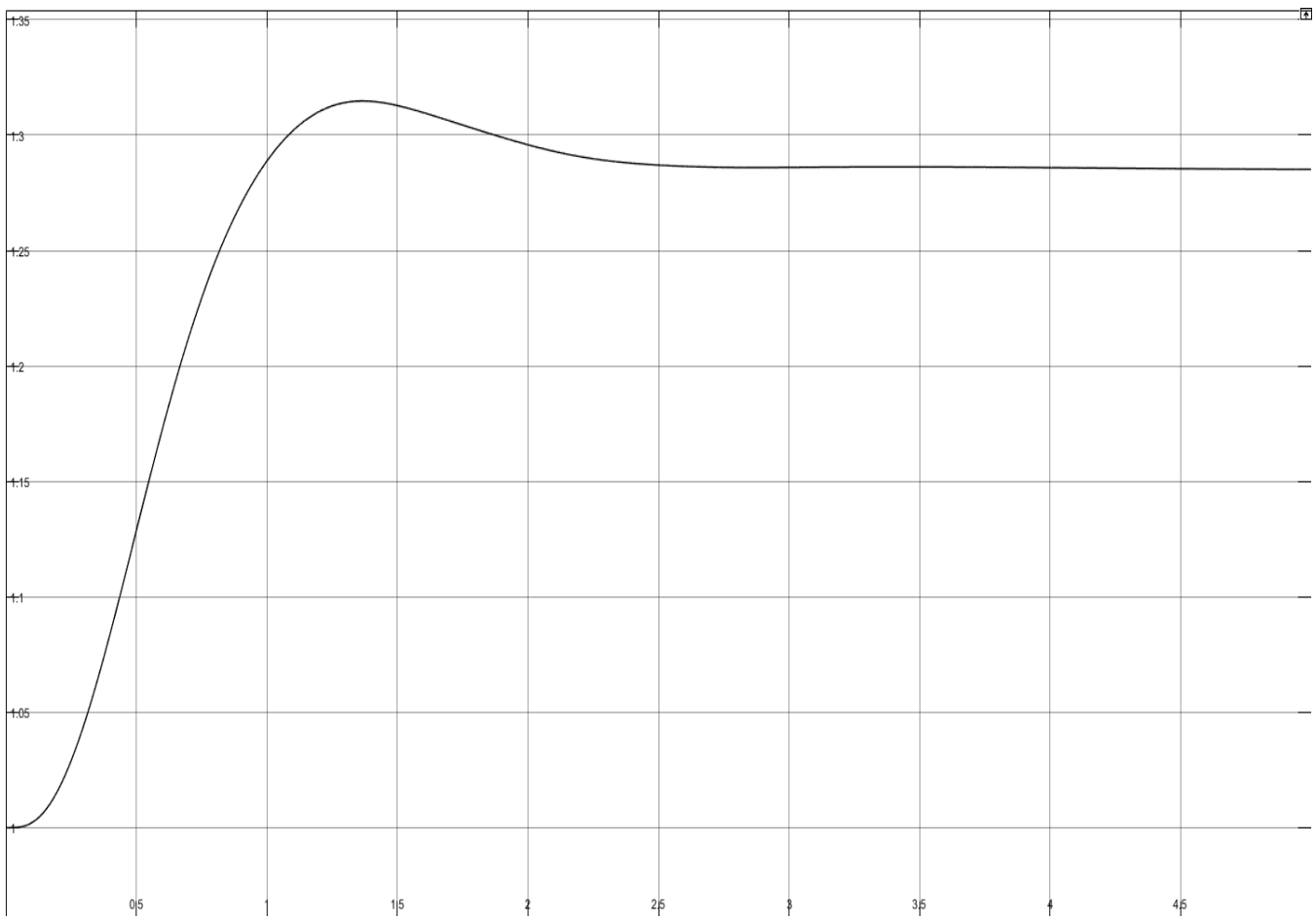


Figura 43 – Gráfico da tensão de campo, com o sistema de excitação DC1A.

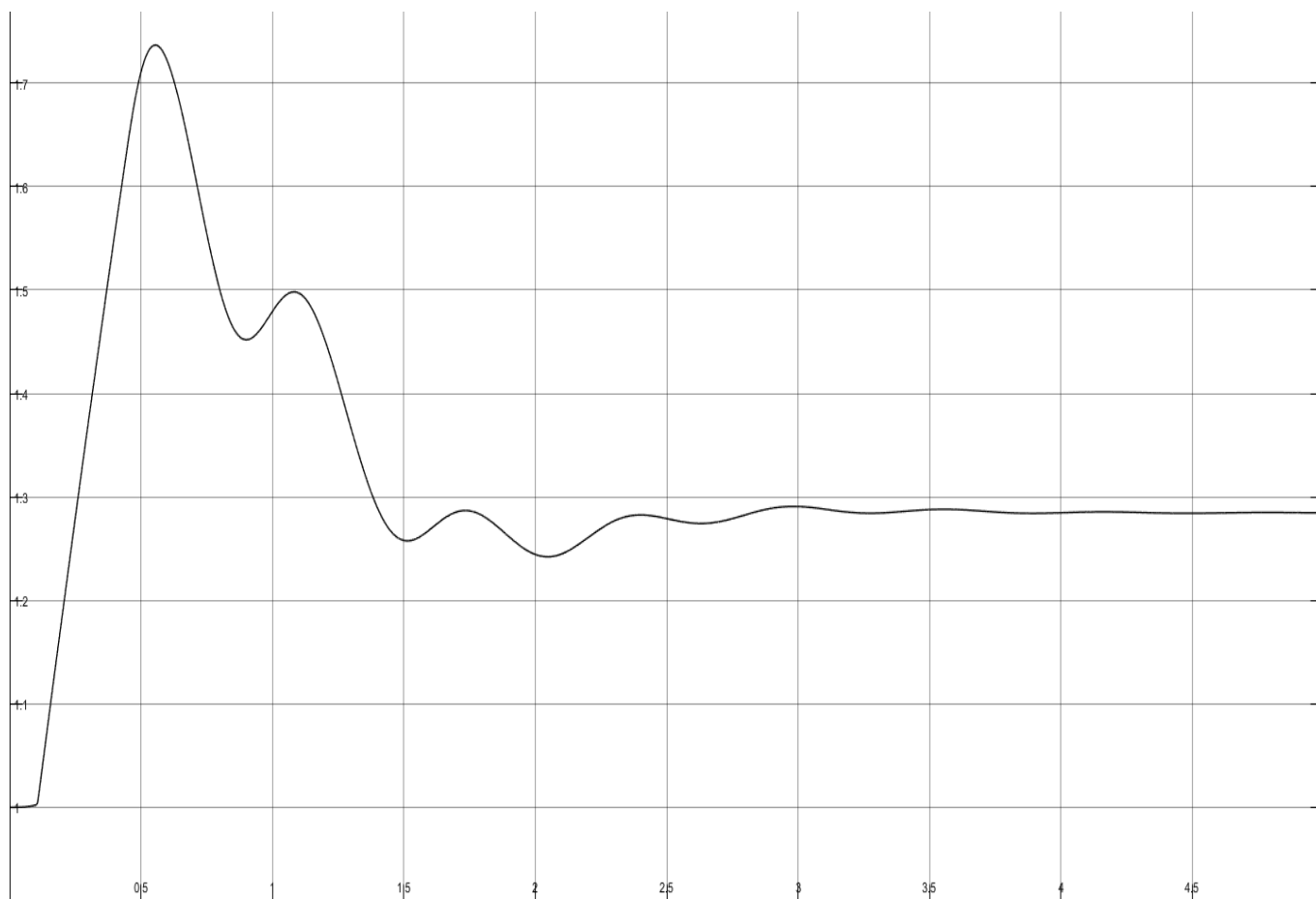


Figura 44 – Gráfico da tensão de campo em curto, com o sistema de excitação DC1A.

Como explicado no parágrafo anterior, os sistemas de excitação, sem exceções, no momento do curto-elétrico promovem a elevação da corrente de campo para que justamente haja uma tensão de campo mais elevada que induzirá tensão na armadura do gerador síncrono. Antes do curto elétrico, ou seja, em um sistema elétrico ideal, sem falhas, a tensão de campo se estabiliza em 1,28 pu em 2,5 segundos, valor este que significa que a partir deste momento a tensão de campo mantém um sincronismo com a tensão que a rede elétrica vigente emite, e possui um valor de pico de 1,32 pu. No momento em que ocorre o curto, a tendência é que a rotação do eixo da máquina principal se eleve, aumentando a variação de fluxo magnético entre o entreferro da máquina, e que a corrente de campo também tenha um valor maior, alterado pelo regulador de tensão, promovendo uma tensão de campo maior em módulo mantendo o sincronismo do sistema e suprimindo a ausência deste, a fim de alimentar as cargas dispostas, logo os valores da tensão de campo chega a ter um pico de 1,75 pu e se estabiliza em 1,28 pu em torno de 3,5 segundos.

Agora, a análise será do sistema DC2A, apresentando-se seus parâmetros dispostos no software MATLAB:

Tabela 3 - Valores das constantes do sistema de excitação DC2A.

Constante do Sistema de Excitação	Valores (p.u)
Ka (Constante de Ganho de tensão do Regulador)	46
Ta (Constante de tempo do Regulador)	0,06
VRmín VRmáx (Tensão de Saída do Regulador)	-4,9 4,95
Kf (Constante de Ganho de Amortecimento do Filtro)	0,05
Tf (Constante de tempo do Amortecimento)	1,5
Tb Tc	0,0 0,0
Ke (Constante de ganho da excitatriz)	0,05
Te (Constante de tempo da excitatriz)	0,46
Efd1 Edf2 (Tensão do enrolamento de campo)	3.05 2,29
Se[Efd1] Se[Efd2] (Função de saturação não linear da tensão de campo)	0,279 0,117

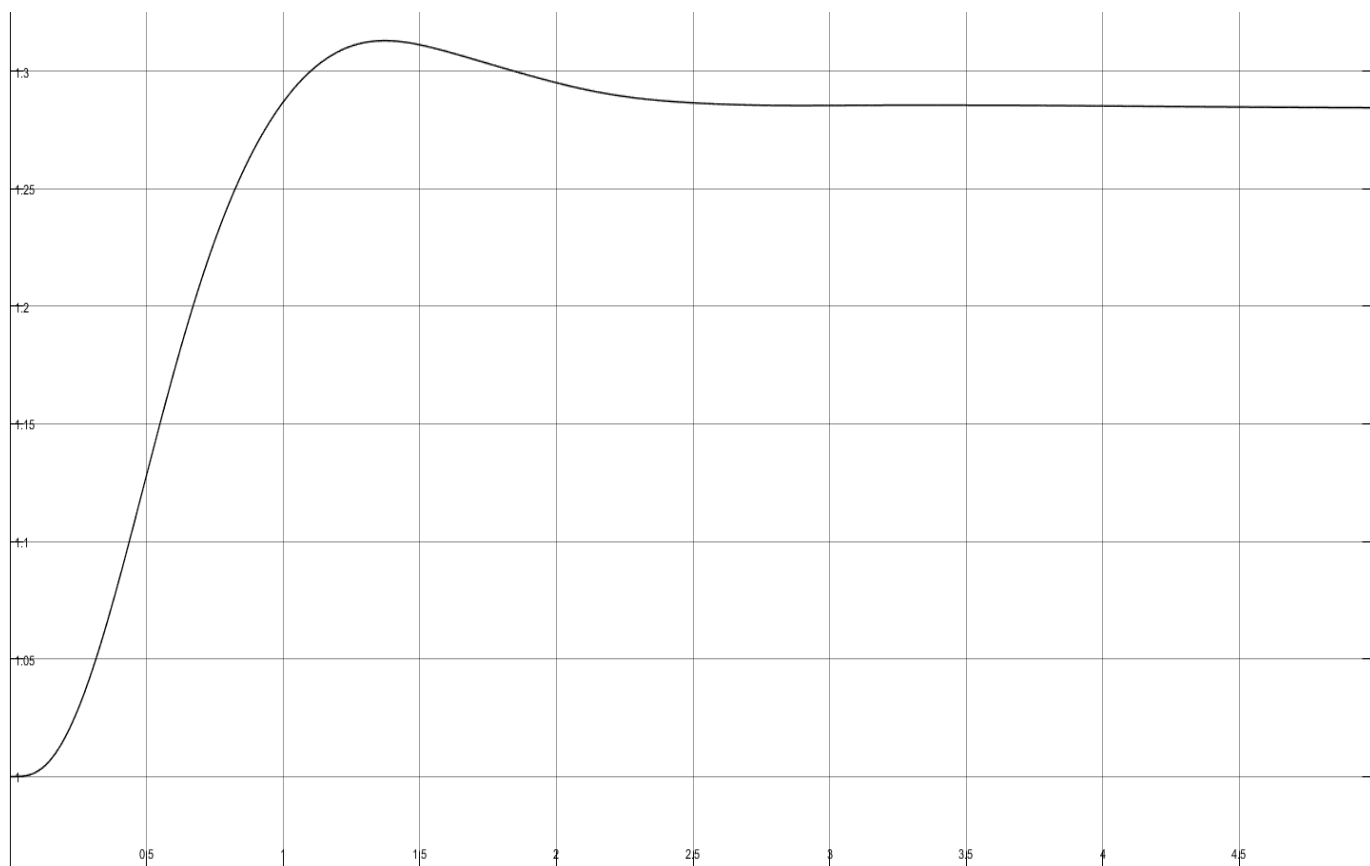


Figura 45 – Gráfico da tensão de campo, com o sistema de excitação DC2A.

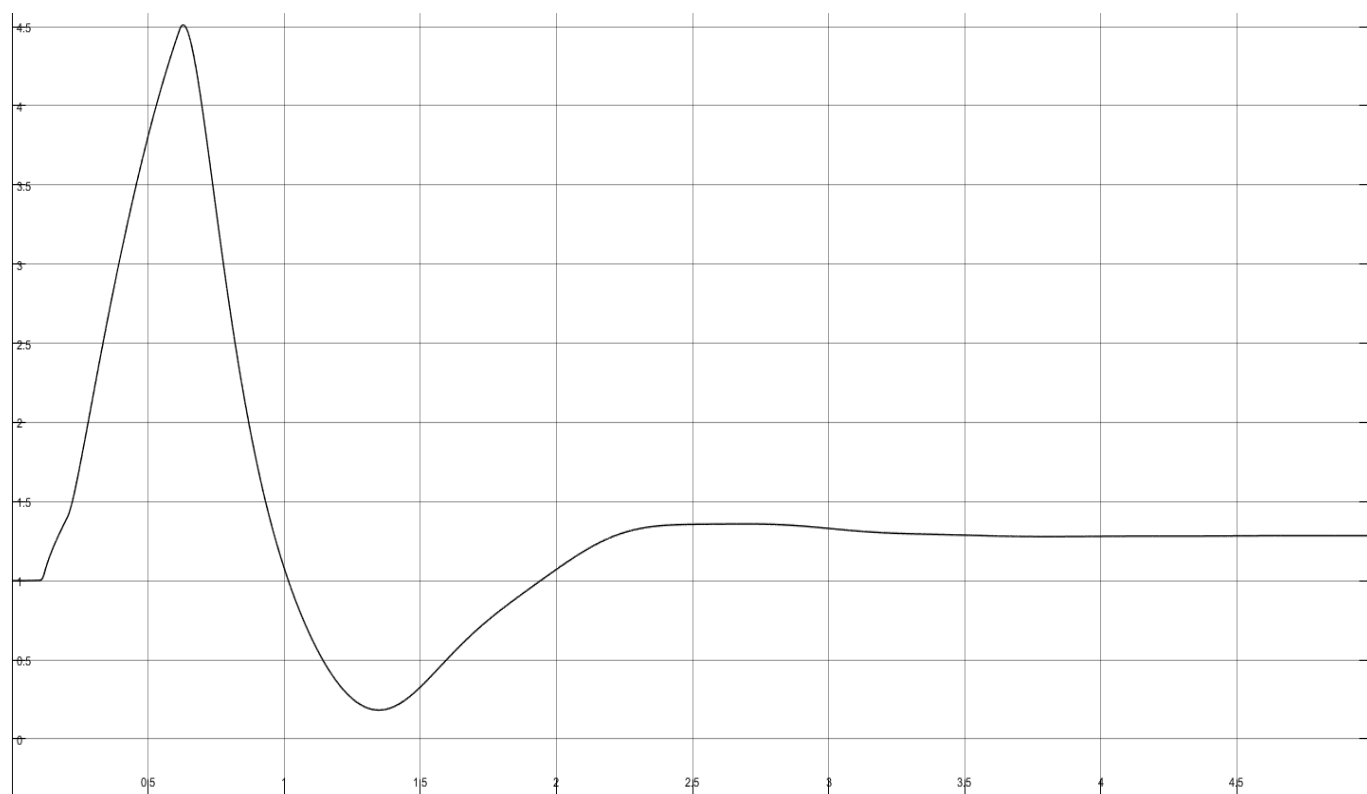


Figura 46 – Gráfico da tensão de campo em curto, com o sistema de excitação DC2A.

Pelos mesmos motivos elencados no caso do sistema de excitação DC1A são verificados no sistema DC2A, o fato é que neste sistema em específico com os parâmetros determinados pelo software MATLAB, a tensão de campo sai de um valor nominal de 1,28 pu, o qual se estabiliza em 2,5 segundos, com um valor de pico de 1,32 pu, semelhante ao sistema DC1A operando em um sistema sem falhas, para uma tensão de campo com um pico de 4,5 pu no momento do curto-circuito, sendo que sua estabilização em 1,28 pu ocorre em 2,5 segundos, mais rápido que no caso do sistema DC1A.

Logo em seguida a análise consistirá do sistema AC1A, com a apresentação dos seus respectivos valores de cada variável, além dos gráficos de tensão de campo:

Tabela 4 - Valores das constantes do sistema de excitação AC1A.

Constante do Sistema de Excitação	Valores (p.u)
Ka (Constante de Ganho de tensão do Regulador)	400
Ta (Constante de tempo do Regulador)	0,02
VAmín VAmáx (Limites de Tensão Interna do Regulador)	-14,5 14,5
VRmín VRmáx (Limites de Tensão de Saída do Regulador)	-5,43 6,03
Kf (Constante de Ganho de Amortecimento do Filtro)	0,03
Tf (Constante de tempo do Amortecimento)	1,0
Tb Tc	0,0 0,0

Ke (Constante de ganho da excitatriz)	1,0
Te (Constante de tempo da excitatriz)	0,8
Ve1 Ve2 (Tensão Alternada da Excitatriz)	4,18 3,14
Se[Ve1] Se[Ve2] (Função de Saturação da Excitatriz)	0,10 0,03
Kd (Fator de Desmagnetização)	0,38

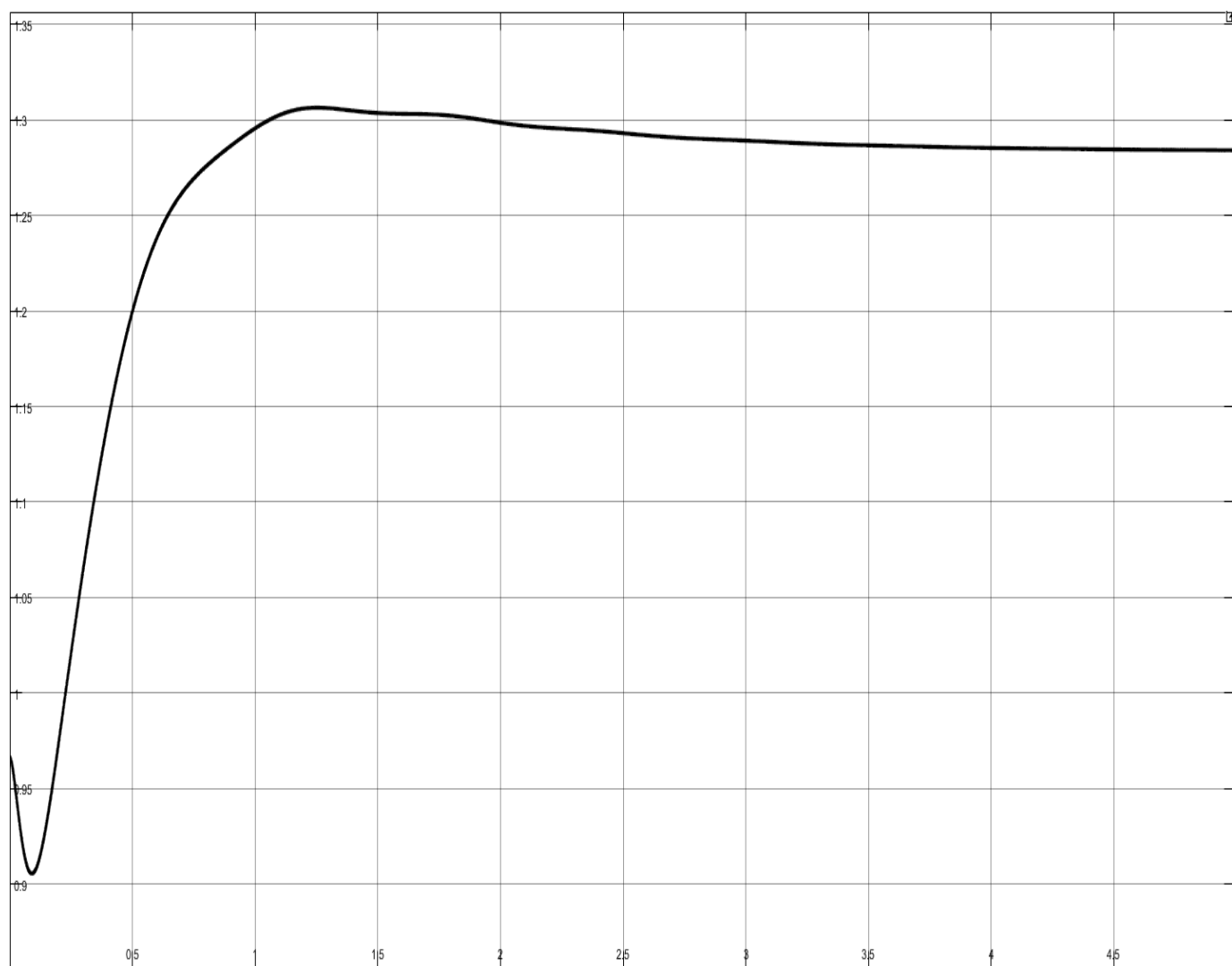


Figura 47 – Gráfico da tensão de campo, com o sistema de excitação AC1A.

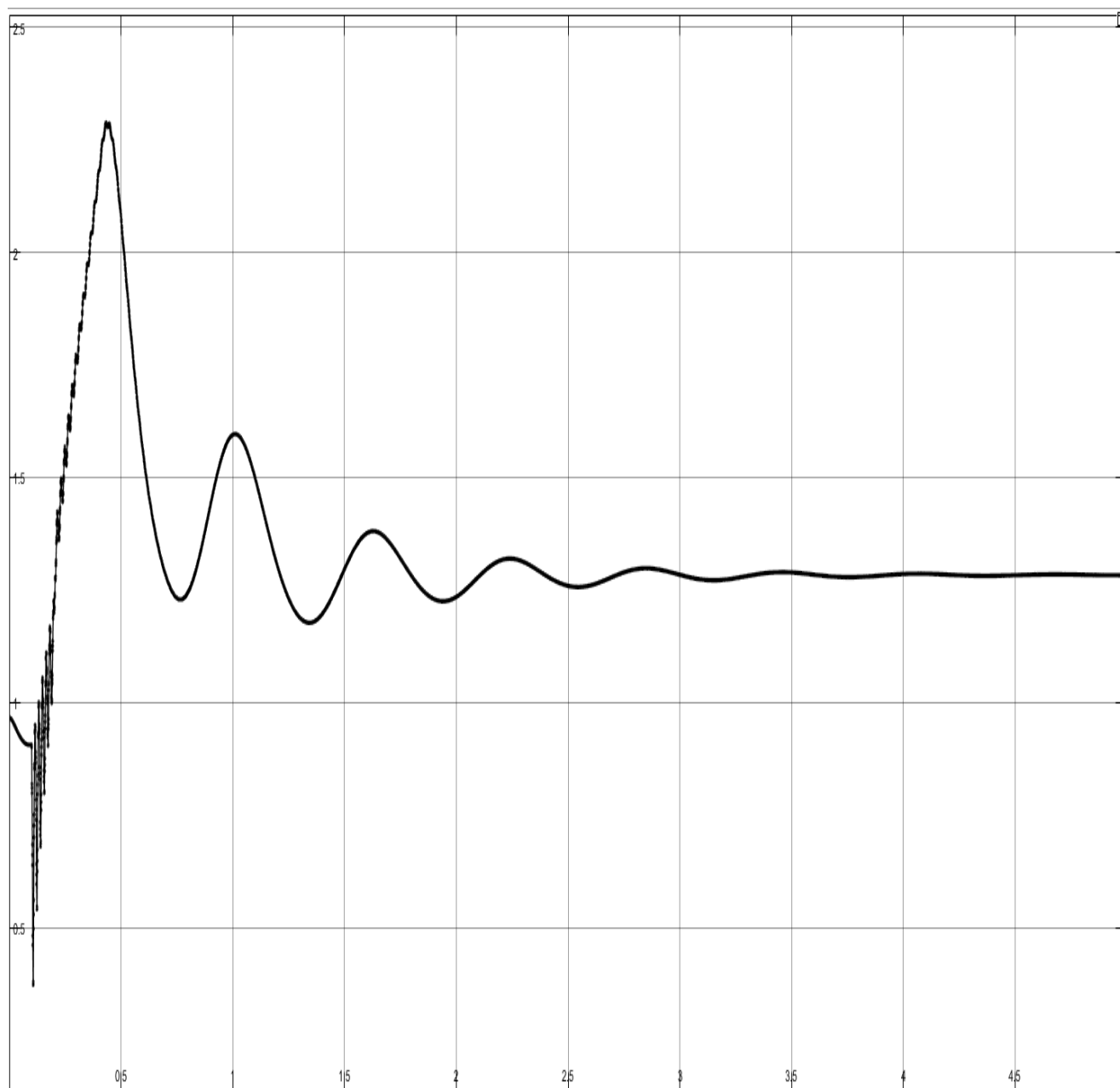


Figura 48 – Gráfico da tensão de campo em curto, com o sistema de excitação AC1A.

No sistema AC1A, antes do curto elétrico o comportamento da tensão de campo é vista na figura 47, sua tensão nominal é de 1,28 pu, igualmente verificada nos outros sistemas de excitação estabilizando-se com variações pequenas em 2,5 segundos. No momento do curto seu valor de pico chega a um valor próximo de 2,25 pu e se estabiliza em 1,28 pu após os 2,5 segundos, verificando-se pequenas variações após este período.

A próxima análise consistirá do sistema AC4A, o qual obteve-se os seguintes gráficos de tensão de campo, sendo a priori disposto a tabela referente aos valores utilizados em cada variável no software MATLAB para este sistema:

Tabela 5 - Valores das constantes do sistema de excitação AC4A.

Constante do Sistema de Excitação	Valores (p.u)
Ka (Constante de Ganho de tensão do Regulador)	200
Ta (Constante de tempo do Regulador)	0,015
Vl _{mín} Vl _{máx} (Limites de Tensão de Entrada do Regulador)	-10 10
VR _{mín} VR _{máx} (Limites de Tensão de Saída do Regulador)	-4,53 5,64
Tb Tc	10 1,0

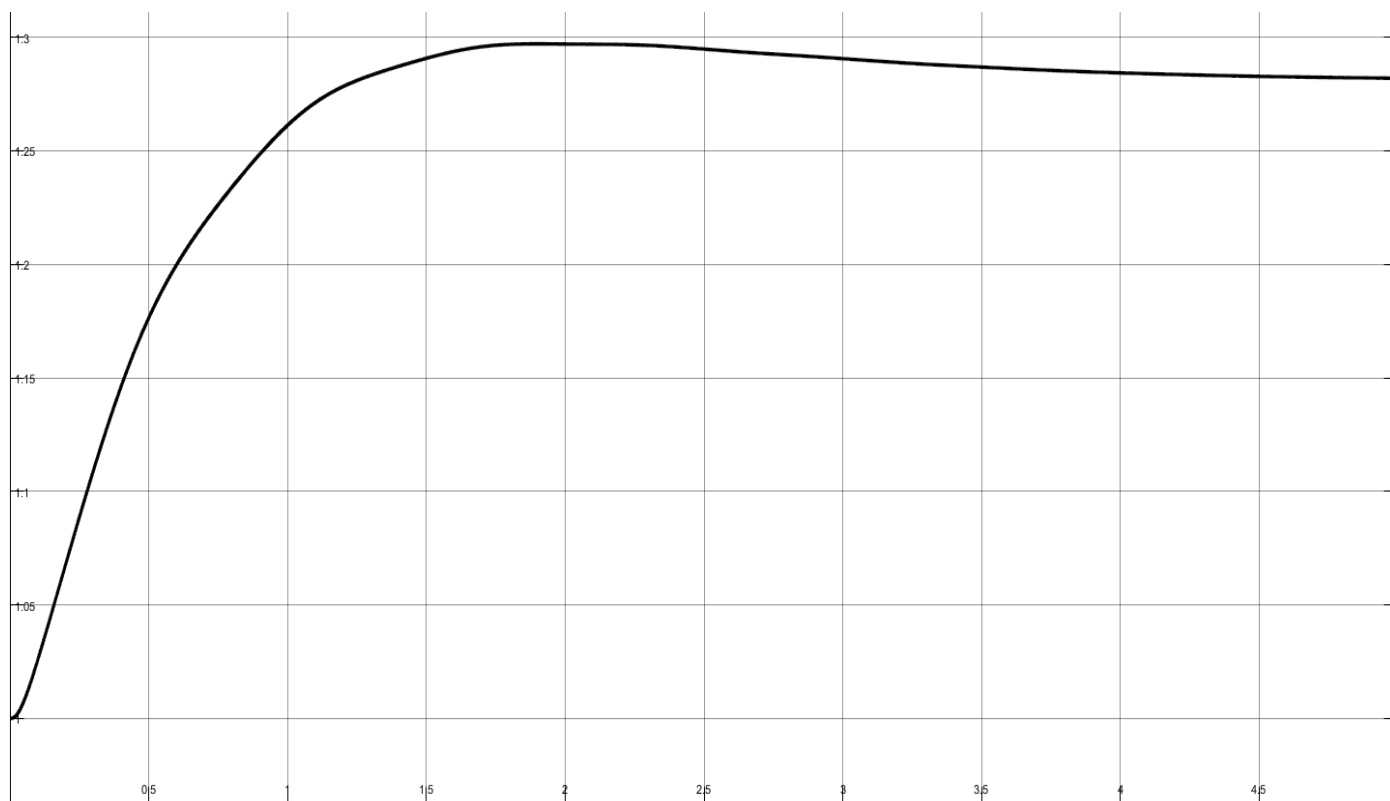


Figura 49 – Gráfico da tensão de campo, com o sistema de excitação AC4A.

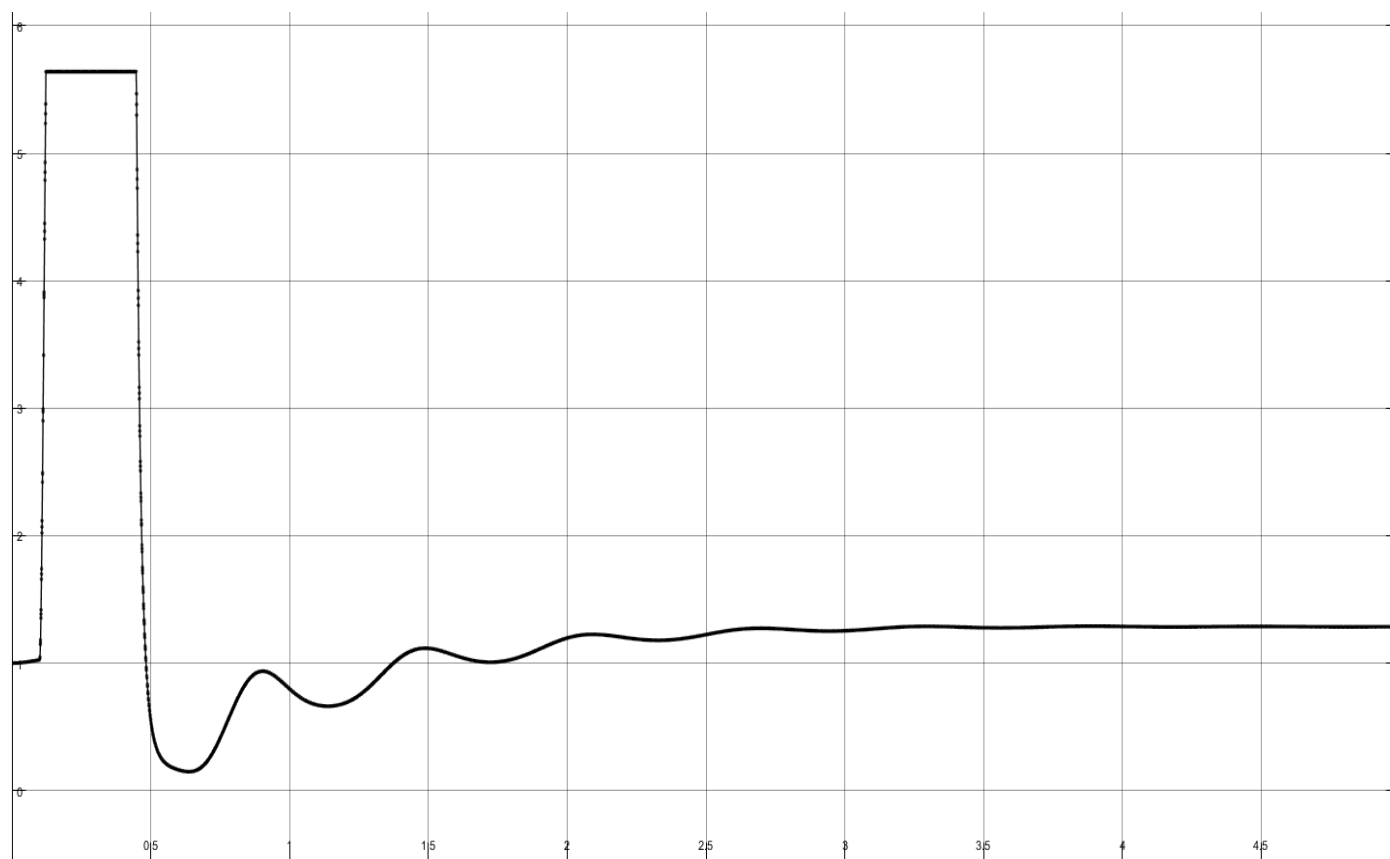


Figura 50 – Gráfico da tensão de campo em curto, com o sistema de excitação AC4A.

Da mesma forma que nos sistemas de excitação anteriores o comportamento da tensão de campo se assemelha, pois o sistema está sem falhas, logo tendo um valor nominal em torno de 1,28 pu. Quando ocorre o curto elétrico o valor de tensão de campo se eleva devido aos mesmos motivos elencados anteriormente e chega a um valor de pico em torno de 5,6 pu se reestabelecendo nominalmente a partir de 2,5 segundos no valor nominal de 1,28 pu.

A análise posterior consistirá do sistema AC5A, o qual obteve-se os seguintes gráficos de tensão de campo, sendo a priori mostrado abaixo a tabela referente aos valores dispostos no MATLAB para este sistema:

Tabela 6 - Valores das constantes do sistema de excitação AC5A.

Constante do Sistema de Excitação	Valores (p.u)
Ka (Constante de Ganho de tensão do Regulador)	100
Ta (Constante de tempo do Regulador)	0,02
VRmín VRmáx (Tensão de Saída do Regulador)	-7,3 7,3
Kf (Constante de Ganho de Amortecimento do Filtro)	0,03
Tf (Constante de tempo do Amortecimento)	1,0
Ke	

(Constante de ganho da excitatriz)	1,0
Te (Constante de tempo da excitatriz)	0,02
Efd1 Edf2 (Tensão do enrolamento de campo)	5,6 4,2
Se[Efd1] Se[Efd2] (Função de saturação da Excitatriz)	0,86 0,50

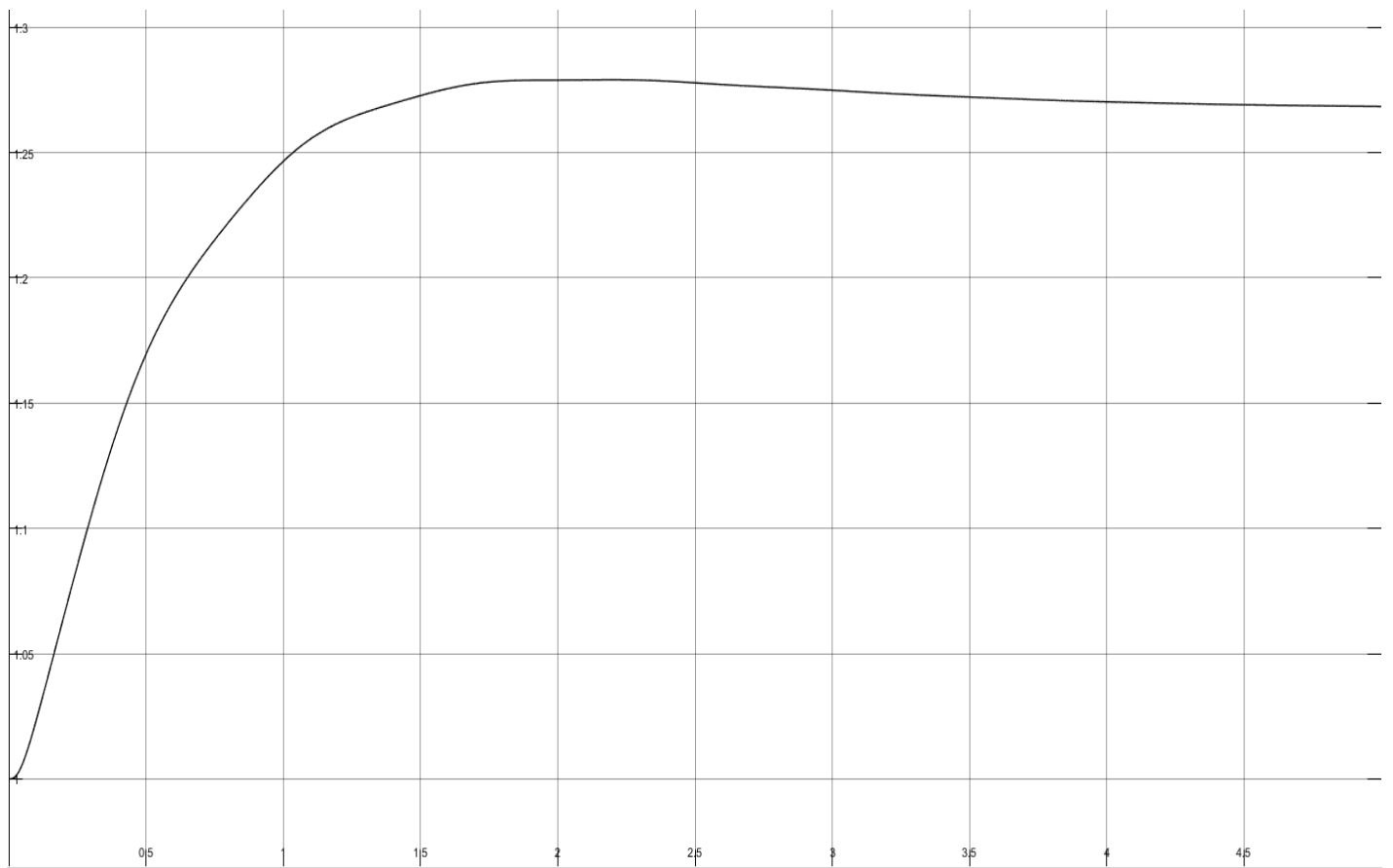


Figura 51 – Gráfico da tensão de campo, com o sistema de excitação AC5A.

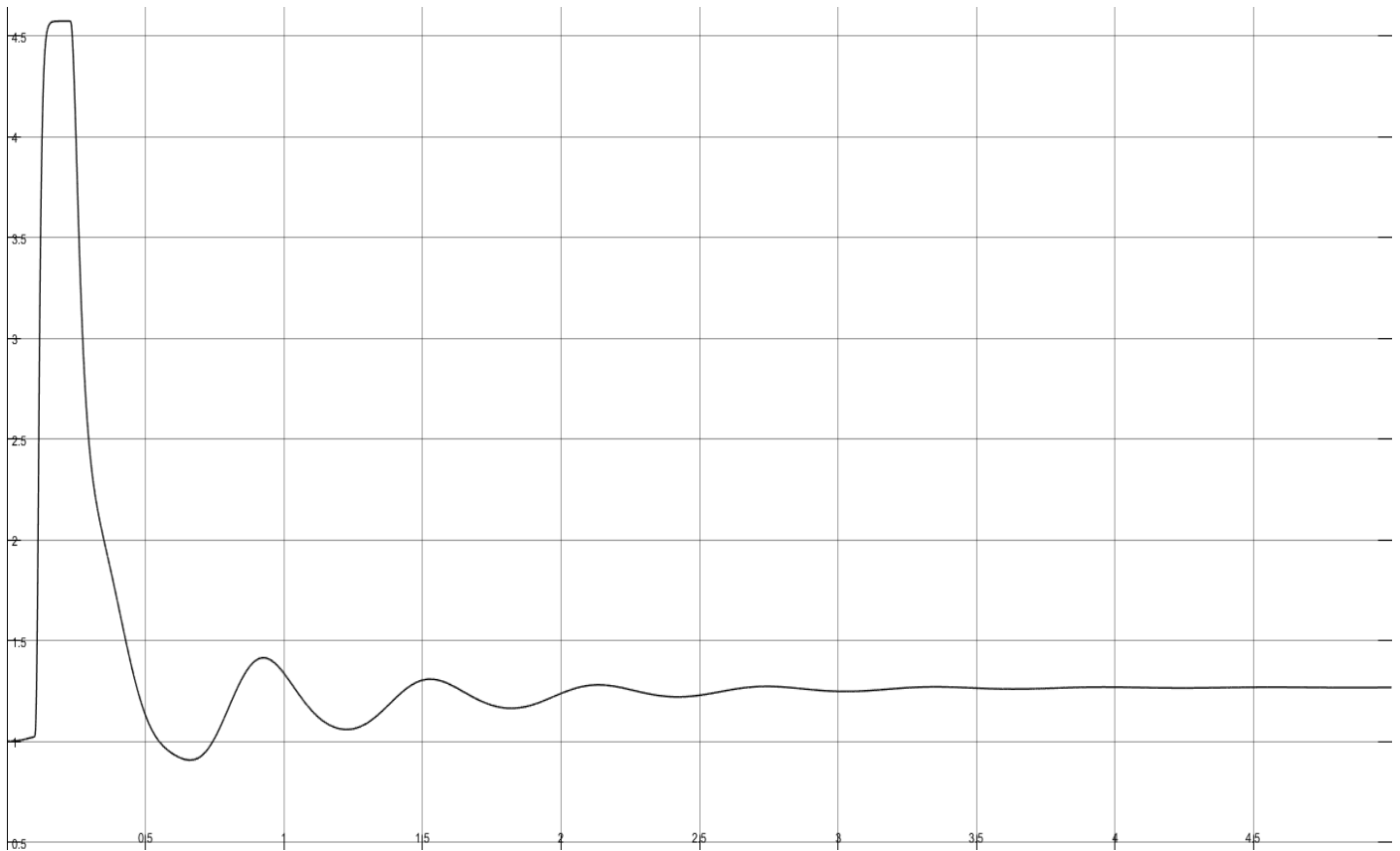


Figura 52 – Gráfico da tensão de campo em curto, com o sistema de excitação AC5A.

No sistema AC5A, a tensão de campo possui da mesma forma que os demais sistemas de excitação, uma tensão nominal de 1,28 pu. No momento do curto elétrico seu valor de pico chega a um valor próximo de 4,6 pu e se estabiliza em 1,28 pu a partir de 2,5 segundos.

Por fim, tem-se os gráficos da tensão de campo do sistema de excitação ST1A, apresentados abaixo:

Tabela 7 - Valores das constantes do sistema de excitação ST1A.

Constante do Sistema de Excitação	Valores (p.u)
Ka (Constante de Ganho de tensão do Regulador)	210
Ta (Constante de tempo do Regulador)	0,001
Vl _{mín} Vl _{máx} (Limites de Tensão Inicial)	-999 +999
VA _{mín} VA _{máx} (Limites de Tensão Interna do Regulador)	-999 +999
VR _{mín} VR _{máx} (Limites de Tensão de Saída do Regulador)	-6,0 6,43
Kf (Constante de ganho de amortecimento do filtro)	0,001
Tf (Constante de tempo do amortecimento)	1,0
Tb Tc	0,0 0,0
KLR (Ganho limitador de corrente de saída da excitatriz)	1,0

ILR (Referência limite de corrente de saída da excitatriz)	2,0
Kc (Fator de retificação do carregamento)	0,038

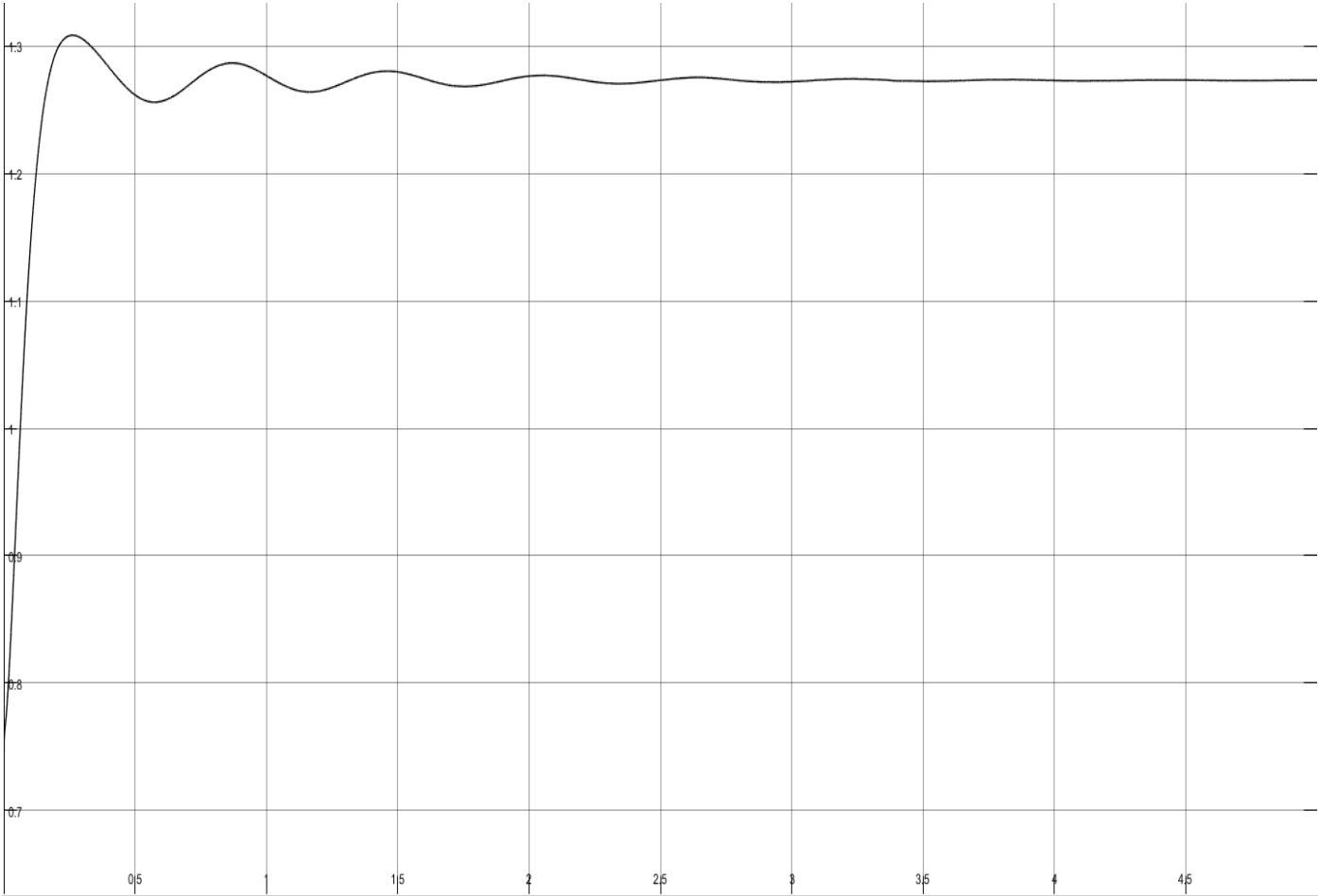


Figura 53 – Gráfico da tensão de campo do sistema de excitação ST1A.

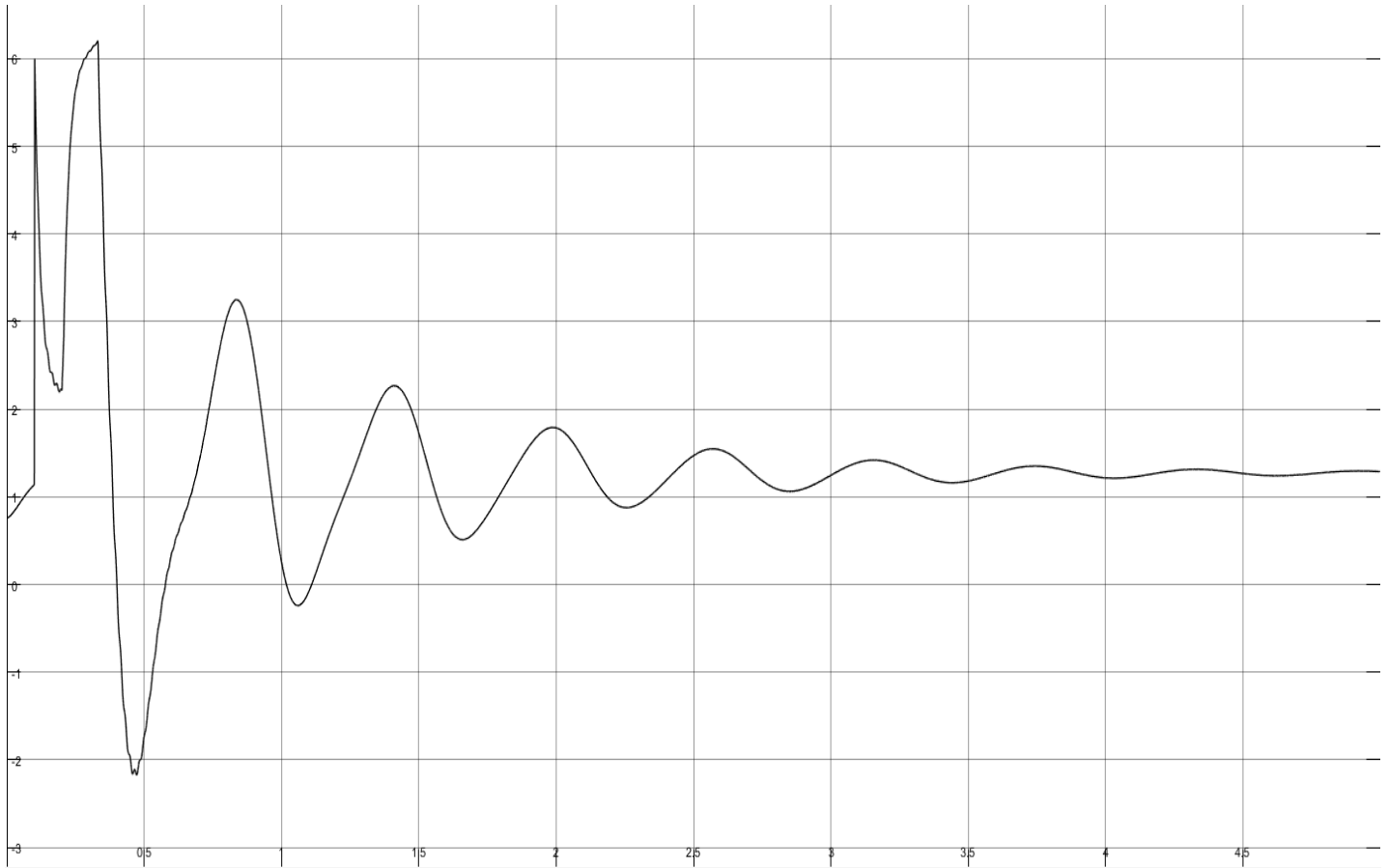


Figura 54 – Gráfico da tensão de campo em curto do sistema de excitação ST1A.

No sistema ST1A, a tensão de campo possui da mesma forma que os demais sistemas de excitação, uma tensão nominal de 1,28 pu. No momento do curto elétrico seu valor de pico chega a um valor superior à 6 pu e se estabiliza em 1,28 pu a partir de 4 segundos, sendo este sistema o que possui maiores variações até o período de estabilização.

5 Conclusões.

Inicialmente, foram analisados alguns tipos de sistema de excitação inclusos no software MATLAB e associados ao IEEE, englobando todas as funções de transferências e suas respectivas funcionalidades dentro do sistema determinado.

Das análises teóricas, percebe-se que a necessidade da implementação de sistemas de excitação de corrente alternada para máquinas síncronas era de extrema importância, devido ao sistema clássico de excitação exigir uma manutenção periódica e de elevado custo para seus equipamentos primordiais de funcionamento, como os anéis coletores e escovas que permitiam o fluxo de corrente contínua no sistema. Outro fator importante era a necessidade de elevação da potência nominal produzida pelos sistemas de excitação, tendo em vista que para elevadas correntes de excitação, ou seja, para maiores níveis de capacidade nominal da máquina, o sistema clássico apresentava maior necessidade de manutenção, tendo em vista que há maior emprego de escovas em casos em que a corrente de excitação é maior e até mesmo problemas operacionais quanto ao comutador, responsável pela interrupção da corrente em casos de surtos elétricos, ou curto-circuito, acarretando faíscas e problemas em seu funcionamento.

Em segundo plano, as análises advindas das simulações via Simulink, proporcionou a visualização da efetiva funcionalidade de cada sistema de excitação, tendo em vista que cada sistema de excitação possui suas próprias variáveis como dispostas nas tabelas anteriores, e estes parâmetros podem ser modificados o que torna o efeito de uma comparação ineficaz, visto que alterando estes valores tem-se variações em suas respostas. O principal objetivo alcançado foi comprovar a real proposta de implementação de sistemas de excitação junto a um gerador síncrono, que consiste em reestabelecer os valores nominais de uma rede elétrica após falhas que acarretam curtos-circuitos. Outro ponto de suma importância observado nas simulações foram os comportamentos da corrente de armadura e tensão de armadura respectivamente, sendo que ambos possuem tais comportamentos inversos, sendo que a corrente durante o curto eleva-se exponencialmente e a tensão sofre uma queda brusca.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- [1] BARBOSA, G. *Introdução á Máquina Síncrona*. Universidade Federal de Minas Gerais, 2012. Disponível em:
<<http://www.cpdee.ufmg.br/~gbarbosa/Disiplina%20de%20M%E1quinas%20El%E9tricas/Disiplina%20de%20M%C3%A1quinas%20El%C3%A9tricas/apost02.pdf>>. Acesso em: 14 maio. 2016, 20:30.
- [2] FITZGERALD, A. E. KINGSLEY, C. KUSKO, A. *Máquinas Elétricas*. [S.I.]: McGrawHill do Brasil LTDA, 1975.
- [3] TARANTO, G. N. *Dinâmica e Controle de Sistemas de Potência*. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2008.
- [4] BARBI, Ivo. *Teoria Fundamental do Motor de Indução*.
- [5] CHAPMAN, J. Stephen. *Fundamentos de Máquinas Elétricas 5ª Edição*. [S.I.]: McGraw-Hill do Brasil LTDA, 2013.
- [6] SIMÕES, D. *Sistemas de Excitação de Geradores Síncronos*. Universidade Federal de Santa Catarina, 2011. Disponível em:
<<http://www.labspot.ufsc.br/~simoed/dincont/dc-cap5.pdf>>. Acesso em: 27 maio. 2016, 18:00.
- [7] NASAR, S. A. *Máquinas Elétricas*. [S.I.]: McGraw-Hill do Brasil, LTDA, 1984.
- [8] JORDÃO, Rubens Guedes. *Máquinas Síncronas*. [S.I.]: Livros técnicos e científicos
- [9] SAUER, W. PETER. *Power System Dynamics and Stability*. [S.I.]: McGraw-Hill, 1998.
- [10] *IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies*. Disponível em: <<http://www.igmc.ir/Portals/0/bazare%20bargh/darkhast%20sodor%20parvane%20tolid/IEEE%20Std%20421.5-2005.pdf>>. Acesso em: 18 abril. 2016, 9:30.
- [11] KUNDUR, P. *Power System Stability and Control*. [S.I.]: McGraw Will, 1993.
- [12] MARQUES, Victor Emanuel L. *Ajuste de parâmetros para modelos típicos de sistemas de excitação, recorrendo à resposta em frequência do modelo*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2011. Disponível em:
<<https://repositorioaberto.up.pt/bitstream/10216/63431/1/000149243.pdf>>. Acesso em: 21 abril. 2016.

- [13] CARMARGO, IVAN. MÁQUINAS SÍNCRONAS Disponível em: <<http://www.gsep.ene.unb.br/osem/ivan/maquina/M%C1QUINAS%20S%CDNCRO NAS.pdf>>. Acesso em: 31 maio. 2017, 15:15.
- [14] INSTITUTO FÍSICO DE SÃO CARLOS. LEI DA INDUÇÃO DE FARADAY. Disponível em: <<http://www.ifsc.usp.br/~strontium/Teaching/Material2010-2%20FFI0106%20LabFisicaIII/11-LeideInducaodeFaraday.pdf>>. Acesso em: 31 maio. 2017, 15:30.

ANEXOS

A. Circuitos Acoplados Magneticamente.

Circuitos Elétricos acoplados magneticamente descrevem a base do funcionamento de máquinas elétricas, e associa-se intrinsecamente a conversão eletromecânica de energia. No caso das máquinas elétricas, o acoplamento magnético ocorre entre circuitos que se movimentam em relação uns aos outros, visando a transferência de energia entre os sistemas mecânicos e elétricos. [3]

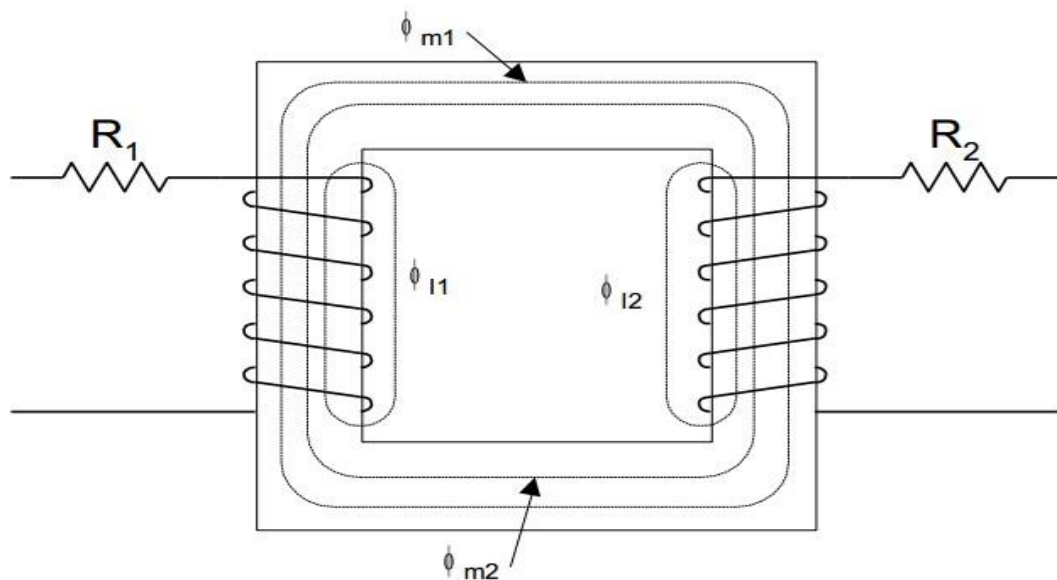


Figura 55 - Circuito elétrico acoplado magneticamente. [3]

O fluxo magnético que entrelaça cada bobina pode ser descrito da seguinte forma:

$$\Phi_1 = \Phi_{l1} + \Phi_{m1} + \Phi_{m2} \quad (\text{A.1})$$

$$\Phi_2 = \Phi_{l2} + \Phi_{m1} + \Phi_{m2} \quad (\text{A.2})$$

Sendo que:

ϕ_1 : Fluxo magnético produzido pela bobina 1.

ϕ_2 : Fluxo magnético produzido pela bobina 2.

ϕ_{l1} : Fluxo de dispersão, produzido pela corrente circulando pelo enrolamento 1 e entrelaça apenas as espiras do mesmo enrolamento.

ϕ_{l2} : Fluxo de dispersão, produzido pela corrente circulando pelo enrolamento 2 e entrelaça apenas as espiras do mesmo enrolamento.

ϕ_{m1} : Fluxo de magnetização produzido pela corrente do enrolamento 1, porém entrelaça todas as espiras de ambos os enrolamentos.

ϕ_{m2} : Fluxo de magnetização produzido pela corrente do enrolamento 2, porém entrelaça todas as espiras de ambos os enrolamentos.

O enlace de um fluxo de um enrolamento é definido como:

$$\psi = N\phi \quad (\text{A.3})$$

Sendo:

N: Número de espiras no enrolamento.

Pode-se escrever o fluxo magnético em função do número de espiras, da corrente do enrolamento e da geometria do problema.

$$Ni = R\phi \quad (\text{A.4})$$

Por conseguinte, o produto entre o número de espiras e a corrente do enrolamento é a força magnetomotriz do enrolamento e R é a relutância do circuito magnético.

$$R = \frac{l}{\mu A} \quad (\text{A.5})$$

Sendo:

l : Comprimento médio do caminho magnético.

A : Área da secção transversal.

μ : Permeabilidade Magnética do meio.

A partir da equação (A.4) e associando-a com as equações (A.1) e (A.2), temos dividindo a força magnetomotriz pela relutância, a força magnética de um circuito acoplado magneticamente.

$$\phi_1 = \frac{N_1 i_1}{R_{l1}} + \frac{N_1 i_1}{R_m} + \frac{N_2 i_2}{R_m} \quad (\text{A.6})$$

$$\phi_2 = \frac{N_2 i_2}{R_{l2}} + \frac{N_1 i_1}{R_m} + \frac{N_2 i_2}{R_m} \quad (\text{A.7})$$

Os enlaces de fluxos serão dados, portanto, como visto na equação (A.3), como:

$$\psi_1 = \frac{N_1^2 i_1}{R_{l1}} + \frac{N_1^2 i_1}{R_m} + \frac{N_1 N_2 i_2}{R_m} \quad (\text{A.8})$$

$$\psi_2 = \frac{N_2^2 i_2}{R_{l2}} + \frac{N_2^2 i_2}{R_m} + \frac{N_1 N_2 i_1}{R_m} \quad (\text{A.9})$$

A indutância de um circuito é definida como sendo a relação entre o enlace de fluxo e a corrente.

$$L_{11} = \frac{N_1^2}{R_{l1}} + \frac{N_1^2}{R_m} = L_{l1} + L_{m1} \quad (\text{A.10})$$

$$L_{22} = \frac{N_2^2}{R_{l2}} + \frac{N_2^2}{R_m} = L_{l2} + L_{m2} \quad (\text{A.11})$$

$$L_{12} = L_{21} = \frac{N_1 N_2}{R_m} \quad (\text{A.12})$$

Sendo:

R_{l1} e R_{l2} : Relutâncias associadas aos fluxos de dispersão dos enrolamentos 1 e 2, respectivamente.

R_m : Relutância associada aos fluxos de magnetização, sendo comum a ambos os enrolamentos.

L_{l1} e L_{l2} : Indutâncias de dispersão.

L_{m1} e L_{m2} : Indutâncias de magnetização dos enrolamentos 1 e 2, respectivamente.

Tendo como base as equações (A.8) e (A.10), e sucessivamente (A.9) e (A.11), obtemos uma relação do enlace de fluxo, com a indutância e a corrente elétrica que passa nos enrolamentos.

$$\psi_1 = L_{11}i_1 + L_{12}i_2 \quad (\text{A.13})$$

$$\psi_2 = L_{22}i_2 + L_{12}i_1 \quad (\text{A.14})$$

A tensão terminal de cada circuito pode ser escrita, da seguinte forma, considerando uma resistência elétrica ligada aos fios de ambos circuitos, como mostrado na figura 55:

$$v = ri + \frac{d\psi}{dt} \quad (\text{A.15})$$

A equação acima, só é válida para sistemas magnéticos lineares. No caso dos equipamentos elétricos, por exemplo, transformadores e máquinas, é usual a existência de saturação magnética e da histerese (equipamentos em CA), possuindo efeitos nitidamente não-lineares. [3]

B. Conversão Eletromecânica de Energia.

Os equipamentos utilizados para a conversão de energia mecânica em energia elétrica (geradores) e para a conversão de energia elétrica em energia mecânica (motores) utilizam um campo magnético como meio comum de interação entre os sistemas mecânico e elétrico. A lógica para que haja a conversão eletromecânica é que tenha uma interação mútua entre o sistema elétrico, campo magnético e o sistema mecânico das máquinas síncronas, sendo estas gerador ou motor.

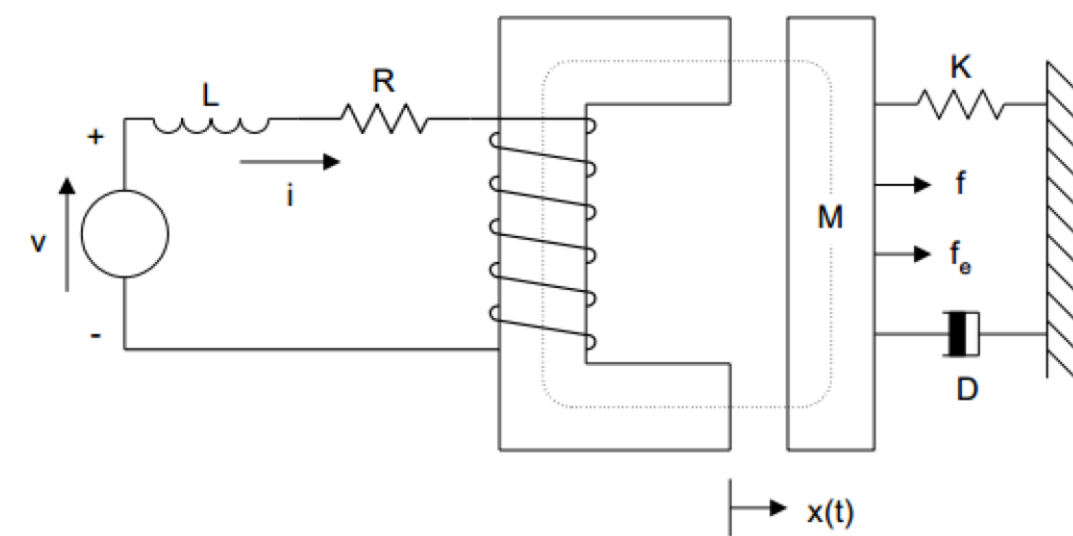


Figura 56 - Sistema de Conversão Eletromecânica de Energia. [3]

A modelagem do sistema é dada pelas seguintes equações:

Equação do Sistema Elétrico:

$$v = ri + L \frac{di}{dt} + ef \quad (\text{B.1})$$

Equação do Sistema Mecânico:

$$f = M \frac{d^2x}{dt^2} + D \frac{dx}{dt} K(x - x_0) fe \quad (\text{B.2})$$

Sendo destas equações:

e_f : Queda de tensão sobre o enrolamento.

M : massa.

D : Coeficiente de amortecimento.

K : Constante da mola.

x_0 : Posição de equilíbrio da mola.

A energia suprida pela fonte elétrica é dada pela integral abaixo:

$$W_e = \int v i dt = \int (ri + L \frac{di}{dt} + e_f) i dt \quad (B.3)$$

O primeiro termo representa as perdas por efeito Joule, enquanto o segundo termo representa a energia magnética armazenada pela indutância do circuito. O último termo corresponde à energia transferida da fonte elétrica para o campo magnético.

Para o sistema mecânico, a energia é calculada como:

$$W_m = \int f dx = M \int \frac{d^2x}{dt^2} dx + D \int \frac{dx}{dt} dx + K \int (x - x_0) dx - \int f_e dx \quad (B.4) \quad (B.4)$$

O primeiro termo corresponde à energia cinética associada à massa do corpo, enquanto o terceiro termo corresponde à energia potencial armazenada na mola. O segundo termo corresponde à perdas por atrito e, portanto, a energia mecânica total transferida para o campo magnético é dada pelo último termo da equação acima. Logo, podemos expressar a energia armazenada no campo magnético como a soma da energia transferida da fonte elétrica para o campo magnético e a energia mecânica total transferida para o campo magnético, sendo esta:

$$W_{armazenada} = \int e f_i dt - \int f e dx \quad (\text{B.5})$$

