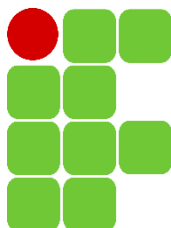


**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CÂMPUS ITUMBIARA
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**



SIMULAÇÃO DE UM MOTOR SÍNCRONO ALIMENTANDO CARGAS DIVERSAS

EDUARDO MATEUS COSTA SANTOS DE OLIVEIRA

ITUMBIARA-GO

2021



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
SISTEMA INTEGRADO DE BIBLIOTECAS

TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| ☐ Tese | ☐ Artigo Científico |
| ☐ Dissertação | ☐ Capítulo de Livro |
| ☐ Monografia – Especialização | ☐ Livro |
| ☒ TCC - Graduação | ☐ Trabalho Apresentado em Evento |
| ☐ Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor: EDUARDO MATEUS COSTA SANTOS DE OLIVEIRA

Matrícula: 20161040070031

Título do Trabalho: SIMULAÇÃO DE UM MOTOR SÍNCRONO ALIMENTANDO CARGAS DIVERSAS

Autorização - Marque uma das opções

1. ☒ Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso aberto);
2. ☐ Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG somente após a data ____/____/____ (Embargo);
3. ☐ Não autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso restrito).

Ao indicar a opção **2 ou 3**, marque a justificativa:

- ☐ O documento está sujeito a registro de patente.
☐ O documento pode vir a ser publicado como livro, capítulo de livro ou artigo.
☐ Outra justificativa: _____

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- i. o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- ii. obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- iii. cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

Itumbiara-GO, 23/07/2021.
Local Data

Eduardo Mateus Costa Santos de Oliveira

Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

SIMULAÇÃO DE UM MOTOR SÍNCRONO ALIMENTANDO CARGAS DIVERSAS

EDUARDO MATEUS COSTA SANTOS DE OLIVEIRA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à banca avaliadora do Curso de Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Itumbiara, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Rui Vagner Rodrigues da Silva (*in memoriam*) (IFG) – Orientador.

Prof. Dr. Marcos Antônio Arantes de Freitas (IFG) – Orientador.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

O48s	Oliveira, Eduardo Mateus Costa Santos de Simulação de um motor síncrono alimentando cargas diversas. / Eduardo Mateus Costa Santos de Oliveira. -- Itumbiara, 2021. 120 f. : il. color. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Elétrica) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Itumbiara, 2021. Orientador: Prof. Dr. Rui Vagner Rodrigues da Silva (<i>in memoriam</i>) Orientador: Prof. Dr. Marcos Antônio Arantes de Freitas 1. Engenharia elétrica 2. Motores síncronos 3. Máquinas - Corrente contínua. I. Título. II. Silva, Rui Vagner Rodrigues da (<i>in memoriam</i>). III. Freitas, Marcos Antônio Arantes de. IV. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás. CDD 621.46
------	---

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
Biblioteca Maria Gabriela Pacheco Pardey / Câmpus Itumbiara
Bibliotecária: Rosiane Gonçalves de Lima CRB1/1684



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CÂMPUS ITUMBIARA

Termo de Aprovação

EDUARDO MATEUS COSTA SANTOS DE OLIVEIRA

SIMULAÇÃO DE UM MOTOR SÍNCRONO ALIMENTANDO CARGAS DIVERSAS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás – Câmpus Itumbiara, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado, em 19 de julho de 2021, pela banca examinadora constituída pelos seguintes membros:

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Marcos Antônio Arantes de Freitas - Orientador

Instituto Federal de Goiás, Câmpus Itumbiara

Prof. Dr. Roberlam Gonçalves de Mendonça - Membro

Instituto Federal de Goiás, Câmpus Itumbiara

Prof. Dr. Victor Régis Bernadeli - Membro

Instituto Federal de Goiás, Câmpus Itumbiara

Documento assinado eletronicamente por:

- **Roberlam Gonçalves de Mendonça, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 20/07/2021 10:16:05.
- **Victor Regis Bernardeli, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 20/07/2021 08:44:10.
- **Marcos Antonio Arantes de Freitas, COORDENADOR - FUC1 - ITU-CCSEEL**, em 19/07/2021 19:24:58.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 18/07/2021. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifg.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 182030

Código de Autenticação: 2e72c7af41



Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

Avenida Furnas, nº 55, Bairro Village Imperial, ITUMBIARA / GO, CEP 75524-010

(64) 2103-5612 (ramal: 5612)

DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho aos meus pais, por
todo o amor, carinho e compreensão de
sempre.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, por toda a força, e por me proporcionar a oportunidade de me tornar um profissional na área da Engenharia Elétrica.

Aos meus pais, Francisco Cleber Jorge de Oliveira e Lindalva Costa Santos por sempre acreditarem em mim, e pelo apoio de sempre.

Ao meu orientador, Rui Vagner Rodrigues da Silva (*in memoriam*), por todo o conhecimento que tive a oportunidade adquirir, e por ter proposto desafios que serão fundamentais na minha vida de engenheiro. Acredito que onde estiver, deve ter ficado feliz com a conclusão deste trabalho.

Ao meu orientador na fase de conclusão, Marcos Antônio Arantes de Freitas por todos os valiosos conselhos na engenharia, e pelas orientações ao longo de duas iniciações científicas.

Ao professor Bruno Gabriel Gustavo Leonardo Zambolini Vicente por me apresentar uma abordagem da engenharia direcionada a colheita de pequenas quantidades de energia no decorrer de um projeto de iniciação científica.

Ao professor Ghunter P. Viajante por me orientar em projetos onde achei que não seria capaz, e ao professor Eric N. Chaves por conseguir transmitir conhecimentos na área de controle com facilidade. Ao professor Marcelo Escobar de Oliveira pelo incentivo constante em publicar trabalhos e por todo o conhecimento na área de sistemas elétricos de potência. Ao professor Roberlam Gonçalves de Mendonça pelas orientações e por sempre mostrar uma visão mais prática da engenharia.

RESUMO

Este trabalho apresenta uma contribuição ao estudo de máquinas síncronas (MS) operando como motor. É apresentada uma introdução teórica sobre a MS, bem como aspectos referentes a sua construção e princípio de funcionamento. Foram desenvolvidas modelagens abordadas no domínio de coordenadas de fase e em d_{q0} , através da transformada de *Park*, necessárias para o entendimento da simulação computacional da MS no *simulink*. Foi apresentado um modelo que representa uma máquina de corrente contínua operando como gerador (GCC), na qual o torque eletromagnético interno produzido pode ser controlado pela tensão aplicada ao enrolamento de campo. Em seguida foram feitas simulações no *simulink*, conectando ao GCC a MS operando como motor, submetendo a máquina a cargas mecânicas de diferentes perfis de crescimento com a velocidade. Foram mostrados gráficos e análises do desempenho do motor síncrono para cada carga mecânica.

Palavras-chave: Máquina Síncrona, Motor, Gerador de Corrente Contínua, Controle, PI, Cargas Mecânicas.

ABSTRACT

This work presents a contribution to the study of synchronous machines (MS) operating as a motor. A theoretical introduction about MS is presented, as well as aspects related to its construction and working principle. Models addressed in the domain of phase coordinates and in d_q0 were developed, through the Park transform, necessary for the understanding of the computational simulation of MS in simulink. A model that represents a direct current machine operating as a generator (GCC) was presented, in which the internal electromagnetic torque produced can be controlled by the voltage applied to the field winding. Then, simulations were performed in the simulink, connecting the GCC to MS operating as a motor, submitting the machine to mechanical loads of different growth profiles with speed. Graphs and analysis of the synchronous motor performance for each mechanical load were shown.

Keywords: Synchronous Machine, Motor, Direct Current Generator, Control, PI, Mechanical Loads.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1 - Aplicações do motor síncrono e de indução conforme potência e velocidade.	20
Figura 2-2 - Espira em movimento em um campo magnético.	23
Figura 2-3 - Efem induzida na espira.	23
Figura 2-4 - Esquemático de uma máquina hexapolar.	25
Figura 2-5 - Canais abertos.	27
Figura 2-6 - Canais semiabertos.	27
Figura 2-7 - Canais fechados.	27
Figura 2-8 – Máquina trifásica com enrolamentos em três níveis.	28
Figura 2-9 – Enrolamentos em três níveis na forma planificada.	29
Figura 2-10 – Máquina trifásica com enrolamentos em dois níveis.	29
Figura 2-11 – Máquina trifásica com enrolamentos em um único nível.	30
Figura 2-12 – Enrolamentos em um único nível na forma planificada.	31
Figura 2-13 – Alimentação do enrolamento de campo com um dínamo.	32
Figura 2-14– Controle da excitação do enrolamento de campo de um motor síncrono.	33
Figura 2-15 – Sistema de excitação típico.	34
Figura 2-16 – Esquema de sincronização entre campo girante e campo indutor.	36
Figura 3-1 – Esquema trifásico com o sistema difásico girante.	42
Figura 3-2 –Passagem de variáveis em coordenadas de fase para d-q.	52
Figura 4-1 – Esquema de uma MCC típica.	62
Figura 4-2 – Circuito elétrico de uma MCC.	63

Figura 4-3 – Diagrama de um GCC.....	65
Figura 4-4 – Esquema da ligação entre o sistema de geração de cargas e o Motor Síncrono.....	66
Figura 4-5 - Perfil de carga constante.	67
Figura 4-6 – Perfil de carga constante.	68
Figura 4-7 – Perfil de carga quadrática.	69
Figura 4-8– Perfil de carga hiperbólica.....	70
Figura 5-1 – Implementação do GCC e do Controlador PI no simulink.....	75
Figura 5-2 – Acionamento do Sistema de Geração de Cargas Mecânicas.	76
Figura 5-3 – Conjugado Produzido pelo GCC.	78
Figura 5-4 - Conjugado Produzido pelo GCC.....	78
Figura 5-5 – Corrente na Armadura do GCC.....	79
Figura 5-6 – Corrente no Enrolamento de Campo do GCC.	79
Figura 5-7 - Conjugado Produzido pelo GCC.....	81
Figura 5-8 – Corrente na armadura do GCC.	81
Figura 5-9 – Corrente no Enrolamento de Campo do GCC.	82
Figura 5-10 – Conjugado Parabólico Produzido pelo GCC.	83
Figura 5-11 – Corrente na armadura do GCC.	83
Figura 5-12 – Corrente no Enrolamento de Campo do GCC.	83
Figura 5-13 – Conjugado Hiperbólico Produzido pelo GCC.	84
Figura 5-14 – Corrente na armadura do GCC.	85
Figura 5-15 – Corrente no Enrolamento de Campo do GCC.	85
Figura 5-16 – Tensão no Enrolamento de Campo do GCC.	86

Figura 5-17 – Bloco que Representa uma Máquina Síncrona no Simulink.	87
Figura 5-18 – (a) Configurações Iniciais do Modelo. (b) Inserção dos Parâmetros Elétricos e Mecânicos no Modelo.....	89
Figura 0-19 – Bloco que Representa uma Máquina Síncrona no Simulink.	90
Figura 5-20 – Subsistema com Modelo Mecânico.....	90
Figura 5-21 – Subsistema com Modelo Elétrico.	90
Figura 5-22 – Simulação Desenvolvida no Simulink.	92
Figura 5-23 - (a) Correntes nas fases. (b) Corrente no Enrolamento de Campo.....	94
Figura 5-24 - (a) Velocidade. (b) Conjugado Eletromagnético	94
Figura 5-25 - (a) Corrente no Enrolamento Amortecedor em Eixo Direto. (b) Corrente no Enrolamento Amortecedor do Eixo em Quadratura.....	95
Figura 5-26 - (a) Fator de Potência. (b) Ângulo de Carga.	95
Figura 6-1 – Modelagem computacional das cargas mecânicas de referência.	99
Figura 6-2 – Plataforma de simulação computacional do MS conectado ao GCC..	100
Figura 6-3 - (a) Curva Conjugado por Velocidade. (b) Velocidade.....	102
Figura 6-4 - (a) Correntes nas Fases. (b) Corrente no Enrolamento de Campo.	103
Figura 6-5 - Corrente na Fase A.....	103
Figura 6-6 - Corrente na Fase B.....	104
Figura 6-7 - Corrente na Fase C	104
Figura 6-8 - (a) Conjugado Eletromagnético Interno. (b) Fator de Potência.....	105
Figura 6-9 - Ângulo de Carga.....	105
Figura 6-10 - (a) Curva Conjugado por Velocidade. (b) Correntes nas Fases	107
Figura 6-11 - Corrente na fase A.....	107

Figura 6-12 - Corrente na fase B.....	107
Figura 6-13 - Corrente na fase C.....	108
Figura 6-14 - (a) Perfil do Conjugado Eletromagnético Interno. (b) Ângulo de Carga.	108
Figura 6-15 - Fator de Potência.....	109
Figura 6-16 - (a) Curva Conjugado por Velocidade. (b) Correntes nas Fases.	110
Figura 6-17 – Corrente na fase A.....	110
Figura 6-18 – Corrente na fase B.....	111
Figura 6-19 – Corrente na fase C.....	111
Figura 6-20 - (a) Conjugado Eletromagnético Interno. (b) Ângulo de Carga.	112
Figura 6-21 - Fator de Potência.....	112
Figura 6-22 - (a) Curva Conjugado por Velocidade. (b) Correntes nas Fases.	113
Figura 6-23 – Corrente na fase A.....	114
Figura 6-24 – Corrente na fase B.....	114
Figura 6-25 – Corrente na fase C.....	115
Figura 6-26 - Conjugado Eletromagnético Interno.....	115

LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1 – Tabela com Informações e Aplicações da Máquina Síncrona.....	21
Tabela 5-1 – Parâmetros da Máquina CC.....	74

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SIMBOLOS

MS	Motor Síncrono
RPM	Revoluções por Minuto
f_{em}	Força Eletromotriz
n	Número de Par de Polos
ω	Número De Rotações Por Segundo
f	Frequência dos Sinais Gerados
MSPS	Máquina Síncrona de Polos Salientes
MSPL	Máquina Síncrona de Polos Lisos
SCR	Silicon Controlled Rectifier (Retificador Controlado de Silício)
T_m	Torque do Motor
T_c	Torque de Carga
MSPSS	Motor Síncrono de Polos Salientes de Rotor Sólido
MSPSL	Motor Síncrono de Polos Salientes de Rotor Laminado
MCC	Máquina de Corrente Contínua
T_{em}	Torque Eletromagnético
GCC	Gerador de Corrente Contínua
PI	Proporcional Integrativo

SUMÁRIO

1	CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	16
1.1	Introdução.....	16
1.2	Objetivos Gerais.....	16
1.3	Objetivos específicos	17
1.4	Estrutura do projeto.....	17
2	CAPÍTULO 2 – MÁQUINA SÍNCRONA: PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO E ASPECTOS CONSTRUTIVOS	19
2.1	Introdução.....	19
2.2	Considerações Iniciais	21
2.3	Aspectos Construtivos da Máquina Síncrona	25
2.4	Construção do Induzido	26
2.5	Disposição das Bobinas.....	27
2.6	Excitação do Campo de um Motor Síncrono	31
2.7	Princípio de Funcionamento de um Motor Síncrono	34
2.8	Conclusão.....	39
3	CAPÍTULO 3 – MODELAGEM MATEMÁTICA.....	40
3.1	Introdução.....	40
3.2	Condições.....	41
3.3	Modelização.....	42
3.4	Equações Elétricas e mecânicas em Coordenadas de fase.....	46
3.5	Transformada de <i>Park</i>	51
3.6	Conclusão.....	59
4	CAPÍTULO 4 – SISTEMA DE GERAÇÃO DE CARGAS MECÂNICAS	60
4.1	Introdução.....	60
4.2	Modelagem Matemática da MCC.....	62

4.3	Conjugado Resistente de Carga	66
4.4	Conjugado Constante	67
4.5	Conjugado Linear	68
4.6	Conjugado Quadrático.....	69
4.7	Conjugado Hiperbólico.....	69
4.8	Conclusão.....	70
5	CAPÍTULO 5 – PLATAFORMA DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL	72
5.1	Introdução.....	72
5.2	Descrição do Modelo Computacional do Gerador CC	73
5.3	Acionamento com uma Carga em Degrau	76
5.4	Acionamento com um Triângulo de Carga	80
5.5	Acionamento com uma Carga Parabólica.....	82
5.6	Acionamento com uma Carga Hiperbólica	84
5.7	Modelo Computacional da Máquina Síncrona.....	86
5.8	Conclusão.....	96
6	CAPÍTULO 6 – SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DO MOTOR SÍNCRONO CONECTADO AO GERADOR CC	97
6.1	Introdução.....	97
6.2	Considerações Iniciais	97
6.3	Carga Hiperbólica.....	100
6.4	Carga parabólica	105
6.5	Carga Linear	109
6.6	Carga em Degrau.....	113
6.7	Conclusão.....	116
7	CAPÍTULO 7 – CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	117
7.1	Conclusões.....	117

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	119
--	------------

1 CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

1.1 Introdução

Uma característica do motor síncrono (MS) é funcionar em sincronismo com o sistema que fornece energia. Tal característica, em conjunto com outras, vem sendo objeto de pesquisa por parte da comunidade acadêmica, onde aspectos construtivos, princípio de funcionamento, robustez e velocidade constante estão entre os temas mais abordados.

É possível observar a crescente participação do motor síncrono em ambientes industriais, fortalecida sobretudo pelo fato de que o mesmo pode operar como compensador síncrono e corrigir o fator de potência fabril que sofre muita variação devido à grande quantidade de cargas indutivas. Outra explicação para esta crescente participação no ambiente fabril é o alto rendimento que este tipo de máquina entrega, onde um alto conjugado pode ser empregado, além de mostrar um baixo custo de manutenção.

Estas características representam vantagens econômicas e operacionais do motor síncrono frente a outros tipos de máquinas, em aplicações de alta potência.

1.2 Objetivos Gerais

Este projeto, em sua totalidade, aborda uma gama de segmentos no ramo da engenharia elétrica. Serão utilizados conhecimentos adquiridos na área de máquinas elétricas, eletromagnetismo, eletrônica de potência, eletrônica digital, além de usar teorias de sistemas de controle para realizar a modelagem de alguns elementos recorrentes neste projeto. Deste modo, este projeto objetiva desenvolver uma plataforma computacional útil para estudos dos segmentos mencionados acima, consolidando o desenvolvimento científico e tecnológico.

1.3 Objetivos específicos

- Entender o princípio de funcionamento da máquina síncrona operando como motor.
- Entender o princípio de funcionamento da máquina de corrente contínua operando como gerador.
- Entender a modelagem matemática que representa o motor síncrono.
- Entender a modelagem matemática que representa o gerador de corrente contínua.
- Desenvolver uma simulação computacional com base na modelagem matemática que represente o motor síncrono.
- Desenvolver uma simulação computacional com base na modelagem matemática que represente o gerador de corrente contínua.
- Desenvolver uma plataforma computacional que inclua tanto o motor síncrono quanto o gerador de corrente contínua.
- Gerar resultados através da plataforma computacional que mostre o comportamento do motor síncrono frente à implementação de cargas diversas.

1.4 Estrutura do projeto

O trabalho foi estruturado da seguinte forma:

No **capítulo 2**, inicialmente, a máquina síncrona foi abordada estabelecendo suas principais aplicações e foi comparada a outras máquinas elétricas. Também foi feita uma descrição detalhada dos aspectos construtivos, assim como das principais formas de acionamento.

No **capítulo 3** foi desenvolvida uma modelagem matemática que se aplica tanto a máquina de polo saliente sólido, assim como de polo saliente laminado. Foi feita

uma abordagem da transformada de park, e no fim foi possível apresentar as principais equações elétricas e mecânicas da máquina.

O **capítulo 4** descreve as cargas mecânicas que variam com a velocidade e mostra como foram produzidas por um gerador de corrente contínua.

O **capítulo 5** Apresenta a simulação computacional desenvolvida com base na modelagem matemática do capítulo 3 e 4.

O **capítulo 6** Apresenta os resultados obtidos com a simulação do motor síncrono conectado a um gerador de corrente contínua produzindo cargas de perfis variados.

O **capítulo 7** apresenta a conclusão e sugestões para trabalhos futuros.

2 CAPÍTULO 2 – MÁQUINA SÍNCRONA: PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO E ASPECTOS CONSTRUTIVOS

2.1 Introdução

Raramente são empregados motores síncronos abaixo de 50HP, pois os custos relacionados ao sistema de dupla excitação colocam o motor de indução em vantagem para esta faixa de potência. No acionamento do motor síncrono é necessário um mecanismo de excitação do campo e um sistema de controle capaz de atuar e interromper transitórios eletromecânicos danosos ao sistema elétrico e a máquina. Estes custos iniciais não existem caso uma máquina de indução seja escolhida para a aplicação. No entanto, existem valores de potência e velocidade em que é mais interessante o uso de uma máquina síncrona, pois as desvantagens relacionadas aos custos iniciais desaparecem quando comparadas aos custos de uma máquina de indução que entrega a mesma potência. Em aplicações de baixa velocidade e alta potência é mais viável o uso de motores síncronos, devido à grande quantidade de ferro necessário em um motor de indução para que a densidade de fluxo não ultrapasse 0,7T no entreferro. A dupla excitação do motor síncrono permite uma densidade de fluxo com o dobro do valor mencionado, devido aos dois canais de fluxo, conforme [1]. A figura 2.1 mostra as faixas de aplicação do motor síncrono e indução de acordo com velocidade e potência.

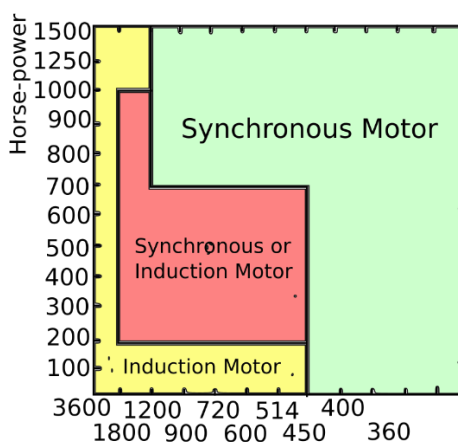


Figura 2-1 - Aplicações do motor síncrono e de indução conforme potência e velocidade.

Fonte [1].

Como mencionado anteriormente a substituição de motor de indução por motor síncrono em ambiente fabril pode acontecer com o objetivo de adequar o fator de potência aos valores permitidos. A queda do fator de potência ocorre devido à natureza das cargas industriais, e pode ser intensificada pelo fator de potência extremamente baixo no caso de um motor de indução operando a vazio. O motor síncrono, além de operar como motor, absorve corrente adianta da tensão, quando trabalha de forma sobreexcitada. Quando instalado junto as cargas indutivas, o motor síncrono consegue compensar a grande quantidade de reativo consumido, trazendo o fator de potência a níveis aceitáveis e assim evitando multas pelo excesso de reativo [1,2].

Companhias de produção, transmissão e distribuição de energia elétrica também exploram essa característica do motor síncrono, que recebe o nome de compensador síncrono, e neste caso tem características especiais, além de não exercer a função de motor. O compensador síncrono em geral é encontrado em linhas de transmissão compensando a quantidade de reativo transportado, e, em alguns casos, levando o fator de potência da linha para a unidade, reduzindo as perdas e a queda de tensão. Eventualmente, o compensador pode ser sobreexcitado de modo que a corrente na linha fique adiantada da tensão. Neste caso verifica-se uma elevação da tensão em todo o sistema. Logo, o compensador síncrono pode ser empregado em uma subestação como um regulador de tensão, independente da carga ligada, atuando somente na inserção de reativos no sistema [2]. A tabela 2.1 descreve as principais características e aplicações de motores síncronos conforme sua velocidade de operação.

Tabela 2-1 – Tabela com Informações e Aplicações da Máquina Síncrona.

Característica	Síncrono com velocidade acima de 500 rpm	Síncrono com velocidade abaixo de 500 rpm
Torque de partida (% do nominal)	Até 120	Abaixo de 40
Torque máximo (%)	Até 200	Até 180
Corrente de partida (%)	500-700	200-350
Escorregamento	Zero	Zero
Fator de potência	Elevado, mas varia com a carga e com a excitação.	Elevado, mas varia com a carga e com a excitação.
Rendimento (%)	Maior entre todos os motores, 92-96.	Maior entre todos os motores, 92-96.
Aplicações típicas	Ventiladores, tubocompressores, geradores de cc, eixos de transmissão, bombas alternativas e compressores. Útil para a correção de fator de potência. Velocidade constante. Conversores de frequência.	Cargas de baixa velocidade, diretamente conectadas, como compressores centrífugos quando com partida sem carga, geradores de cc, laminadores, moinhos de esferas, moinhos de esteiras, bombas. Útil para controle de fator de potência. Velocidade constante. Usado para cargas pulsantes.

2.2 Considerações Iniciais

A máquina síncrona pode ser definida pela dependência que existe entre a ação mecânica, número de rotações por segundo imposta sobre o rotor, e a frequência na qual a força eletromotriz (E_{fem}) é induzida no estator, no caso de ação geradora. Operando na ação motora existe uma relação entre a frequência de alimentação por parte da rede elétrica, e o número de rotações por segundo do rotor do MS [2].

O princípio físico que explica o funcionamento de uma máquina elétrica é baseado no fenômeno da indução eletromagnética. Com base neste fenômeno, qualquer

condutor ou espira submetidos a uma variação de fluxo magnético experimenta sobre si a indução de uma E_{fem} [3,4,5,6]. A indução pode ser observada variando o condutor na presença de um campo magnético indutor fixo, ou alterando a posição, assim como a intensidade do fluxo magnético diante de uma espira mantida fixa. Os resultados produzidos com as duas formas de variar o fluxo são equivalentes. Baseado nisso, existem dois tipos de máquinas elétricas operando como gerador, indutor fixo/induzido variável e indutor variável/induzido fixo [2].

Considerando uma espira $p\ k$ em movimento circular constante, com velocidade ω na presença de um campo magnético $\vec{B}$, conforme Figura 2.2, será induzida nos terminais da espira uma E_{fem} que pode ter seu valor descrito instantaneamente com base na equação 1.

$$E_{fem} = 2 \cdot 10^{-8} \cdot B \cdot l \cdot \omega \cdot \sin \alpha \quad (1)$$

De acordo com a equação (1), a força eletromotriz induzida varia periodicamente e foi plotada na Figura 2.3. A E_{fem} assume valor positivo máximo quando a espira está nos pontos 2 e 4 (p no ponto 2 e k no ponto 4), assim como o valor negativo máximo é alcançado quando a espira chegar aos pontos 4 e 2 (p no ponto 4 e k no ponto 2). No instante em que a espira encontra-se nos pontos 1 e 3, a E_{fem} é igual a zero.

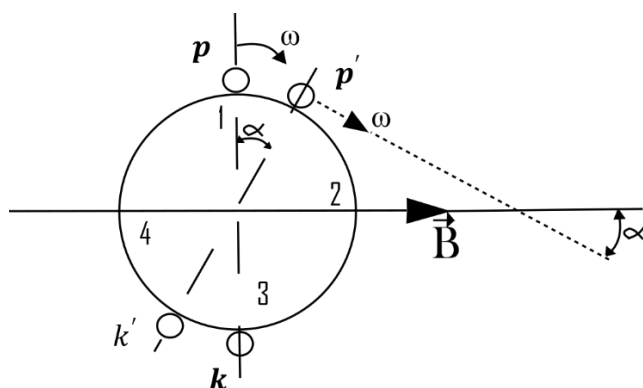


Figura 2-2 - Espira em movimento em um campo magnético.

Fonte autor.

Este processo acontece ciclicamente, onde a E_{fem} varia desde seu valor positivo máximo até um valor negativo mínimo. O experimento foi realizado com uma espira apenas, no entanto pode ser feito com uma bobina, onde a E_{fem} vai ter um ganho que depende da quantidade de espiras. No caso de um enrolamento de uma determinada fase, distribuído nas ranhuras do estator, serão induzidos harmônicos. Os enrolamentos devem ser distribuídos da melhor forma, com o objetivo de reduzir tais harmônicos.

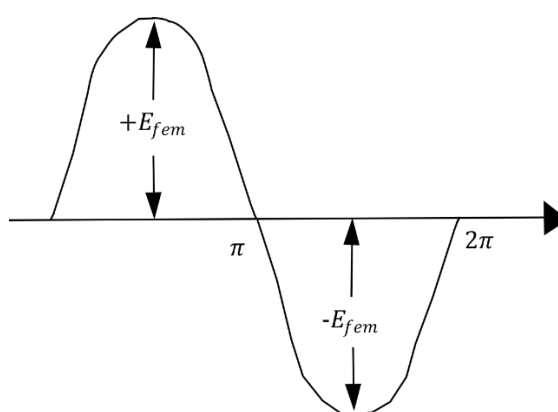


Figura 2-3 - Efem induzida na espira.

Fonte autor.

No caso do sistema bipolar da Figura 1, a E_{fem} gerada na espira tem o mesmo período de rotação do enrolamento induzido. Assim, em um ciclo completo de oscilação da E_{fem} , a espira também é girada completamente, como foi provado anteriormente. Desse modo, uma quantidade de rotações por segundo deve ser imposta sobre a espira conforme a frequência que pretende-se obter.

No caso de um sistema tetrapolar, tal relação é diferente. Em uma volta completa da espira cada condutor passa por quatro polos, implicando em duas oscilações da E_{fem} para cada volta completa do induzido. Com base nisto, faz-se necessário que o induzido tenha uma relação de rotações por segundo igual a metade da frequência demandada.

Em um sistema hexapolar, como ilustrado na Figura 2.4, é intuitivo entender que em uma volta completa da espira, a E_{fem} vai oscilar três vezes. Desse modo, uma relação matemática pode ser concebida das conclusões anteriores, entre a quantidade de polos, frequência dos sinais gerados, e a quantidade de rotações por segundo do induzido. Seja n o número de par de polos, ω a quantidade de rotações por segundo, e f a frequência dos sinais gerados. As três grandezas podem ser relacionadas, conforme a equação (1.1) [2].

$$\omega = \frac{f}{n} \quad (1.1)$$

Onde ω pode ser dado em RPM, com a seguinte modificação:

$$\omega = \frac{60f}{n} \quad (1.2)$$

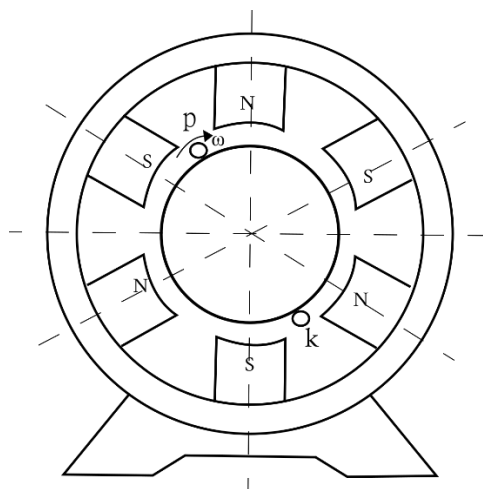


Figura 2-4 - Esquemático de uma máquina hexapolar.

Fonte autor.

2.3 Aspectos Construtivos da Máquina Síncrona

A máquina síncrona apresenta as seguintes estruturas:

- **Estator:** O estator da máquina síncrona é constituído pelo enrolamento de armadura, que opera com alimentação de corrente alternada para produzir o campo magnético girante. Além de ser formado por lâminas de aço silício prensadas entre si com o objetivo de reduzir a indução de correntes parasitas, e o conjunto fixado a uma viga, que contribui para uma maior resistência mecânica do estator [7]. Assim, por apresentar elevados níveis de tensão, consequentemente demandar um maior espaço para isolamento, o enrolamento de armadura é inserido em ranhuras ao longo da periferia interna das laminais.
- **Rotor:** O rotor da máquina síncrona pode ser classificado em polos lisos e polos salientes, que podem ser usados dependendo de cada aplicação. No caso da máquina síncrona de polos salientes (MSPS), o rotor é constituído

de sapatas polares, eixo, enrolamento de campo e enrolamento amortecedor. Na máquina síncrona de polos lisos (MSPL) o rotor é composto por eixo, enrolamento de campo e enrolamento de amortecedor. O eixo é fabricado de aço forjado e usinado conforme especificações da aplicação. As sapatas polares são concebidas distribuindo chapas de aço laminado ao longo do eixo e fixadas através de barras de aço soldadas nas extremidades. O enrolamento de campo é feito de bobinas de fio de cobre esmaltado e o enrolamento amortecedor é obtido através de barras curto-circuitadas nas extremidades, localizadas na superfície externa dos polos. No caso do rotor liso, tais barras são inseridas nas ranhuras externas que existem na estrutura rotórica. Assim, o enrolamento amortecedor atua na partida do MS e contribui para a estabilidade da máquina em regime permanente, no caso de transitórios de carga [7].

- **Mancais:** Em função da aplicação, os mancais aplicados em MS podem ser de lubrificação a graxa ou a óleo. Tal lubrificação pode ocorrer de forma natural ou forçada.

2.4 Construção do Induzido

A construção do induzido (estator) se dá pela junção de lâminas de aço silício que em geral têm 0,5 mm de espessura. São feitos furos ao longo da sua periferia interna, que após a formação de uma coroa de lâminas é possível obter as ranhuras nas quais podem ser inseridas as bobinas. A forma das ranhuras pode ser aberta, Figura 2.5 semiaberta, Figura 2.6, e fechada, Figura 2.7.

No caso dos canais abertos podem ser inseridas bobinas pré-moldadas e a conexão entre as mesmas da respectiva fase é feita de forma simples. Em canais semiabertos devem ser colocados fios de cada vez formando bobinas posteriormente. Para os fechados deve ser inserido um fio por vez no furo, mostrando-se o mais

inconveniente frente aos demais. Além disso é o menos aplicado na prática, pois fornece um caminho fechado para o fluxo magnético em volta de cada furo contribuindo para as perdas.

A quantidade de furos ao longo da periferia depende da aplicação da máquina, quantidade de polos, e quantidade de fases. Em geral são empregados de 3 a 5 furos por fase e por polo.

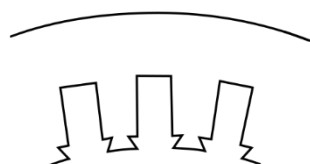


Figura 2.4

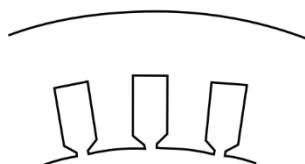


Figura 2.5

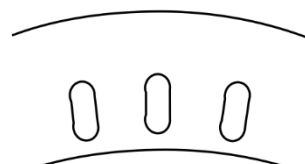


Figura 2.6

Figura 2-5 - Canais abertos.

Figura 2-6 - Canais semiabertos.

Figura 2-7 - Canais fechados.

Fonte autor.

2.5 Disposição das Bobinas

As bobinas devem ser arranjadas de tal forma que na saída dos canais o contato entre fases não ocorra. Desse modo, existem maneiras de evitar que esse contato não aconteça. Em seguida serão mostradas as principais, encontradas em máquinas trifásicas que operam em tensões elevadas.

- **Bobinas em três ordens:** Nesta disposição cada fase apresenta um nível de saliência na saída dos canais, como está ilustrado na Figura 2.8. A Fase 1 apresenta a menor saliência, em seguida a Fase 2 mostra-se

intermediária, e na Fase 3 é possível observar a maior saliência. Na Figura 2.9, as três fases com bobinas em três ordens são mostradas na forma planificada. Esse arranjo é o mais empregado em máquinas de elevada tensão, pois mostra um maior espaçamento entre as fases.

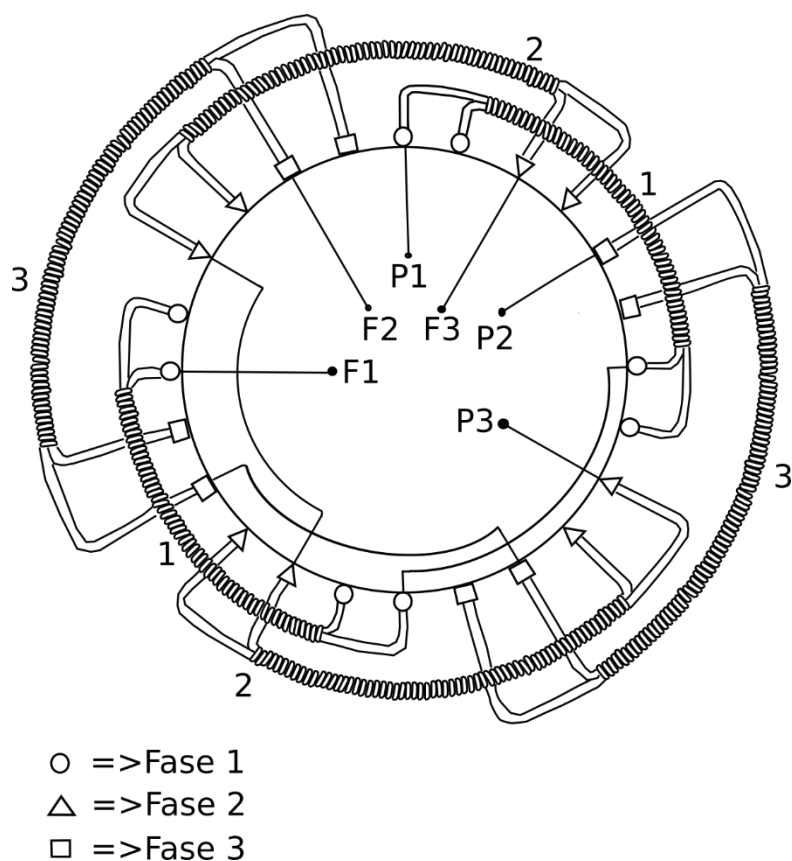


Figura 2-8 – Máquina trifásica com enrolamentos em três níveis.

Adaptado de [2]

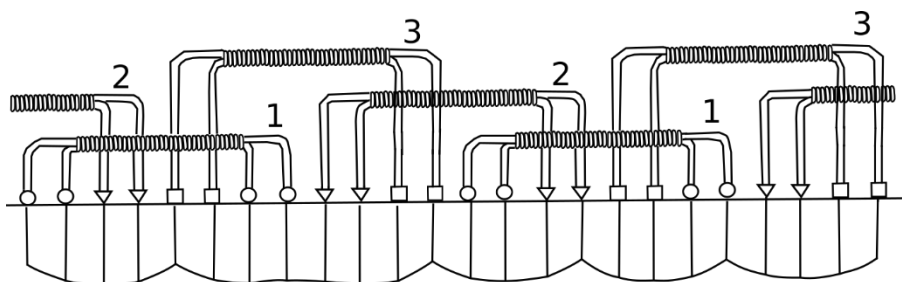


Figura 2-9 – Enrolamentos em três níveis na forma planificada.

Adaptado de [2].

- **Bobinas em duas ordens:** Nesta configuração as fases apresentam dois níveis de saliência na saída de cada canal. Como mostrado na Figura 2.10, as saliências alternam de nível de forma sequencial nas três fases possibilitando o distanciamento mínimo. Pode-se observar que as fases apresentam Bobinas em dois níveis de saliência: metade na primeira ordem e a outra metade na segunda ordem.

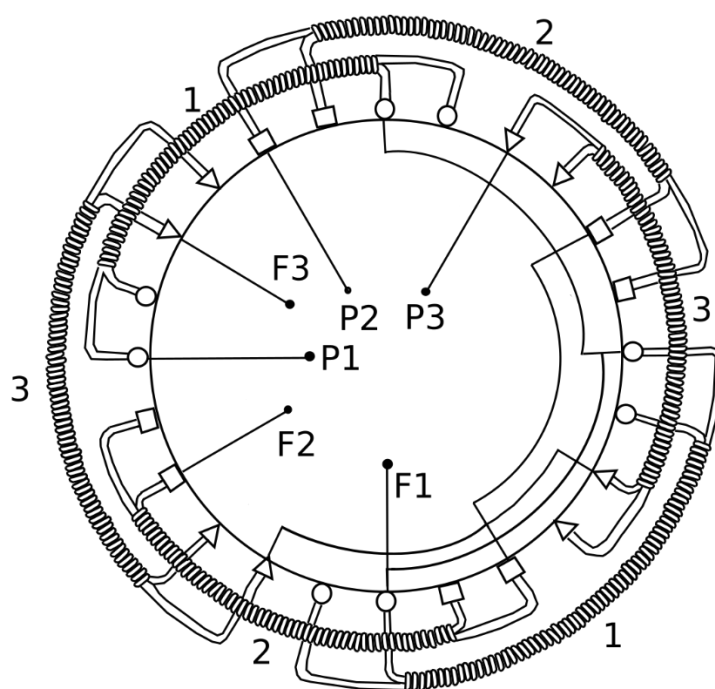


Figura 2-10 – Máquina trifásica com enrolamentos em dois níveis.

Adaptado de [2].

- **Bobinas em ordens iguais:** É um arranjo no qual as bobinas são torcidas, conforme Figura 2.11, e na saída dos canais apresentam o mesmo nível de saliência. É recomendável em máquinas que operam em tensões reduzidas. Na Figura 2.12 os enrolamentos estão na forma planificada.

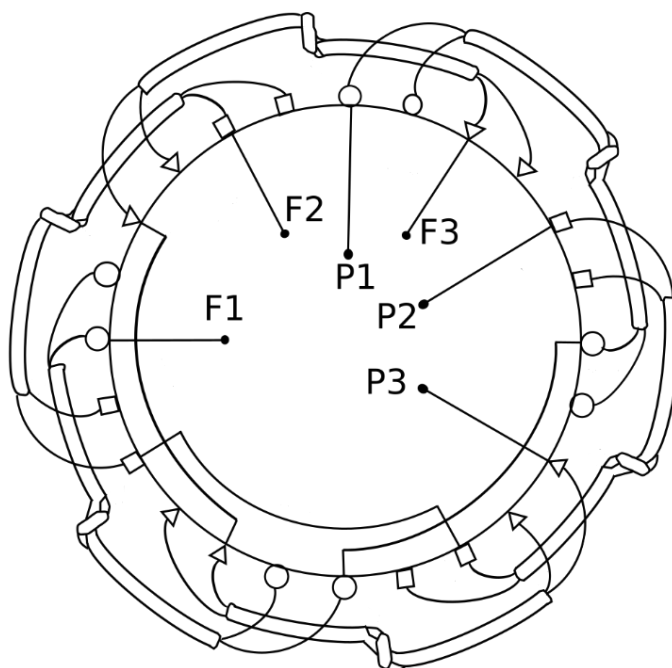


Figura 2-11 – Máquina trifásica com enrolamentos em um único nível.

Adaptado de [2].

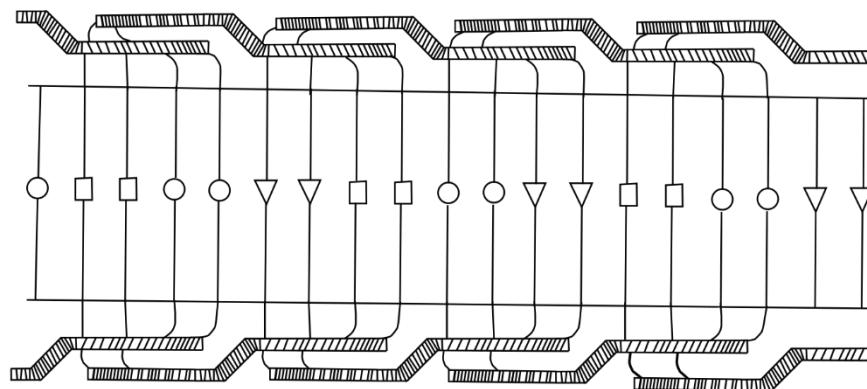


Figura 2-12 – Enrolamentos em um único nível na forma planificada.

Adaptado de [2].

2.6 Excitação do Campo de um Motor Síncrono

A potência necessária para excitar o campo indutor rotativo de uma máquina síncrona em geral é 5% da potência nominal de operação [2]. Desse modo, antes do desenvolvimento da eletrônica avançada e de dispositivos semicondutores como transistores, equipamentos eletromecânicos como dínamos foram empregados na função de alimentar o enrolamento de campo de motores síncronos [8]. Conforme a Figura 2.13, os terminais do enrolamento de campo são ligados aos anéis coletores L e L', que apoiam sobre si as escovas K e K', conectadas ao dínamo excitador. O dínamo é acoplado ao eixo da máquina, que fornece a energia mecânica utilizada na conversão. Existem duas formas de fazer o controle de excitação neste tipo de mecanismo. A primeira é controlar o reostato R_D , limitando assim a corrente fornecida pelo dínamo ao enrolamento indutor e a segunda consiste em controlar a excitação do campo do dínamo. Entre as duas maneiras, a segunda é a mais aplicada, pois o nível de corrente a ser controlada é inferior a corrente gerada no dínamo.

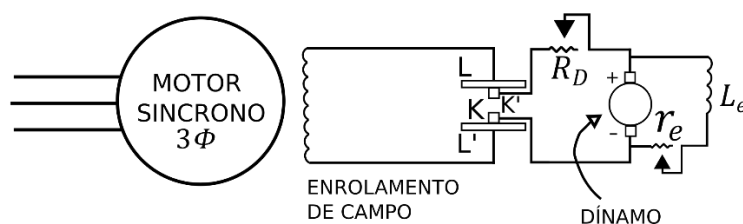


Figura 2-13 – Alimentação do enrolamento de campo com um dínamo.

Fonte autor.

Uma fonte de potência constante também pode ser utilizada para alimentar o enrolamento de campo. Isso pode ser feito através de um transformador, que deriva para um retificador de onda completa, obedecendo os requisitos do enrolamento indutor. Uma fonte fixa é uma solução de baixo custo que funciona razoavelmente bem, se a carga e a tensão de alimentação da armadura manterem-se constantes ao longo do funcionamento da máquina. No caso de ampla variação da carga, ou queda significativa na tensão de alimentação gerada na partida de diversos motores em um barramento, por exemplo, a fonte de alimentação constante pode ser incapaz de manter a máquina em sincronismo resultando em escorregamento de polo e operação assíncrona. Eventos de escorregamento de polo mostram-se extremamente danosos a componentes da máquina, pois geram transientes com elevada tensão que podem exceder a classificação de tensão inversa de pico de dispositivos semicondutores, além de induzir grandes correntes que fluem no sentido inverso da corrente de excitação do campo [9]. Outro ponto a ser mencionado é que o uso de uma fonte fixa não permite o controle do fator de potência, ou da tensão de barramento através da injeção de reativos (Controle Var), produzidos pelo motor síncrono.

Uma forma de contornar os transientes de tensão no barramento de alimentação, assim como controlar o fator de potência e a tensão de barramento é aplicar um controle automático sobre a alimentação do enrolamento de campo. Tal mecanismo de controle não tem escovas e consiste em atuar no tempo de condução de SCR's. A impedância rotórica, assim como a frequência de escorregamento são

parâmetros utilizados pela lógica de controle para a correta atuação na sincronização da máquina por meio dos SCR's, operando sobre o campo principal. A Figura 2.14 mostra que o controle recebe informações sobre tensão e corrente, calcula o fator de potência e, com base em um setpoint recebido externamente, atua em SCR's alimentados por uma fonte externa. A figura 2.15 ilustra um sistema de excitação típico.

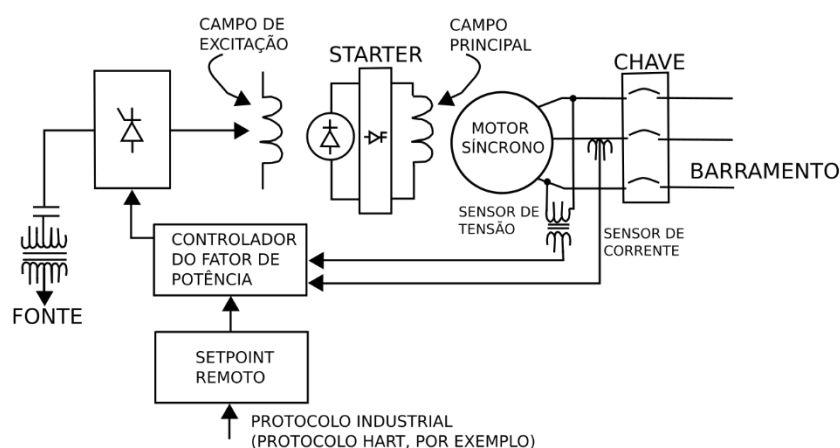


Figura 2-14– Controle da excitação do enrolamento de campo de um motor síncrono.

Adaptado de [9].

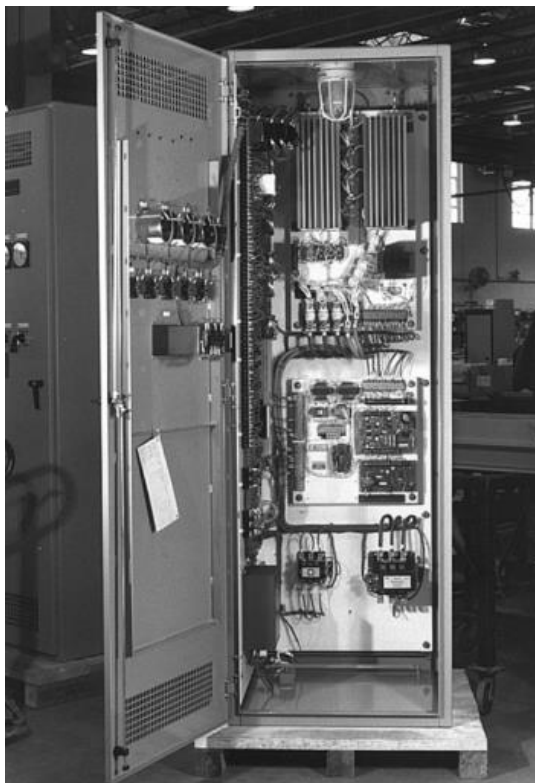


Figura 2-15 – Sistema de excitação típico.

Fonte [9].

2.7 Princípio de Funcionamento de um Motor Síncrono

O motor síncrono apresenta como característica principal a velocidade rotórica constante, no caso de uma frequência de alimentação invariável no enrolamento de armadura. Tal característica é útil sobretudo em aplicações que exigem um regime de operação constante da velocidade, como é o caso de compressores, ventiladores, bombas de petróleo, refinarias, siderúrgicas e usinas de energia [10,11,12,13,14,15].

A máquina operando como motor não consegue partir sozinha, sem auxílio de um agente externo para colocar o rotor em movimento até o mesmo atingir uma velocidade próxima a síncrona. Considerando a Figura 2.16, no momento em que

forem aplicadas correntes elétricas nos enrolamentos estatóricos, será induzido um dipolo magnético que gira a uma velocidade que depende da frequência f e do número de par de polos n , conforme a equação (1.2). Devido à alta inércia da carga conectada ao eixo da máquina, a massa rotórica, e ao binário de atrito resistente devido as perdas nos mancais, o rotor não entra em movimento para acompanhar o dipolo girante. Isso ocorre, pois, o campo do enrolamento indutor tende a buscar o alinhamento com o dipolo girante, baseando-se no princípio da conservação de energia [10]. Uma vez girando em um sentido arbitrário, o dipolo arrasta o rotor em um sentido, devido a conexão magnética entre os dois campos, instantes depois arrasta o rotor em um sentido oposto ao inicial, desconstruindo o movimento. Esse processo se repete e o que se observa é o rotor vibrando.

Com base nisso esforços foram feitos com o objetivo de desenvolver métodos de arranque para motores síncronos. Conforme [16], o arranque de um motor síncrono divide-se nas seguintes etapas:

- **Início do arranque (*breakway*):** No início do arranque a máquina precisa vencer todo o atrito nos seus mancais e o atrito relacionado aos mancais da carga. Uma solução para diminuir o atrito relacionado aos mancais da carga é injetar óleo pressurizado com o objetivo de lubrificar e diminuir as perdas.

No caso de uma máquina que vai partir ligada à rede inicialmente, sem a possibilidade de poder alterar as características da rede, pode-se aprofundar as ranhuras que acomodam o enrolamento amortecedor. Outra forma de superar os binários resistentes inicialmente é ligar um enrolamento próprio a um sistema de anéis-escovas, e posteriormente conectar a um resistor variável. Tal estratégia possibilita a máquina partir com conjugado máximo em um escorregamento igual a um.

- **Aceleração até à velocidade de sincronismo (*run up*):** Para que a máquina acelere até a velocidade de sincronismo é necessário que o torque
-

do motor seja maior que o de carga $T_m > T_c$. Assim, durante o período de aceleração, a máquina utiliza os enrolamentos amortecedores para funcionar como motor assíncrono. São induzidas correntes no enrolamento de campo conectado a um resistor que regula o perfil da curva *velocidade x conjugado* da máquina.

- **Sincronização com a rede de alimentação (*pull in*):** Considerando que a máquina atinge uma velocidade pouco superior ou inferior à de sincronismo, no instante de entrar em paralelo com a rede, a velocidade deve corresponder a um valor de frequência do sistema de alimentação. Além da frequência, as tensões de linha devem ser iguais na rede elétrica e na máquina, assim como as fases. No momento em que a máquina conectar com a rede irá circular uma corrente sincronizante nos enrolamentos. Essa corrente é responsável por produzir um binário sincronizante que contribuirá para que a máquina funcione nas condições que satisfazem o sincronismo de fase com a rede.

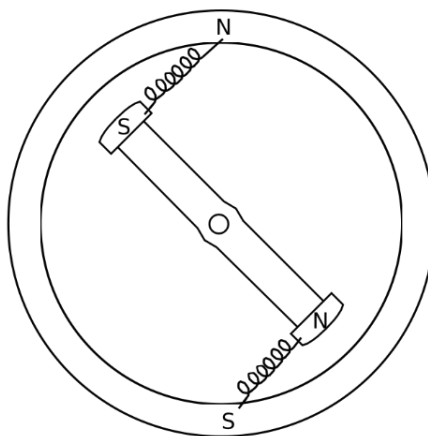


Figura 2-16 – Esquema de sincronização entre campo girante e campo indutor.

Fonte: autor.

Existem diferentes métodos de partida do motor síncrono, que devem ser usados de acordo com cada aplicação. Cada esquema apresenta vantagens e desvantagens e um arranjo mecânico-elétrico diferente, que funciona de acordo com a máquina síncrona em análise.

Inicialmente, o motor de indução, devido as suas características, pode ser utilizado no arranque do motor síncrono. No entanto, existe uma particularidade no funcionamento do mesmo que requer atenção. No caso de um motor de indução que tem o mesmo número de polos do motor síncrono e se estiver sendo alimentado pela mesma rede, a velocidade rotórica será inferior à de sincronismo, devido ao escorregamento. Desse modo, uma solução para aumentar a velocidade rotórica para próxima a de sincronismo é diminuir a quantidade de par de polos do motor de indução, conforme a equação (1.2). Outra vantagem no uso de um motor de indução é poder arrancar sempre com o máximo conjugado, variando a resistência no enrolamento do rotor, no caso de uma máquina de rotor bobinado.

Outra forma é o arranque síncrono, que utiliza uma fonte de frequência variável para levar o motor do repouso até o instante de conexão com a rede sempre em sincronismo com a fonte variável. Tal maneira de arranque pode ser executada com o auxílio de uma outra máquina síncrona ou um conversor estático de frequência. No primeiro tipo de arranque síncrono, a máquina auxiliar é movida por uma turbina e está acoplada ao eixo do motor síncrono, além de fornecer a potência elétrica necessária. Quando a tensão nominal da máquina auxiliar difere da tensão do motor pode ser utilizado um transformador auxiliar. Assim, no instante em que a tensão do motor se mostrar igual à da rede o sincronismo é alcançado e a máquina é ligada em paralelo. No caso de um inversor estático de frequência, o mesmo é alimentado pelo sistema de energia e converte a potência de entrada a valores de frequência solicitados para que a máquina síncrona acelere suavemente [16]. Esta foi a estratégia de partida definida no presente projeto para o MS.

Uma característica particular do motor síncrono é operar com a velocidade de sincronismo para uma faixa de valores aceitáveis de carga. No entanto, se o conjugado freante for maior do que a máquina pode suportar, o rotor vai sofrer um significativo atraso. Se o atraso do rotor superar um passo polar em relação ao campo girante, o mesmo sofrerá um impulso violento contrário ao sentido de rotação. Caso um novo atraso maior que um passo polar ocorra o rotor recebe um outro impulso, agora a favor do movimento. Isso se repete periodicamente com menores intensidades até a máquina parar. Nestes instantes a máquina perde o sincronismo com a rede e são gerados picos de corrente que geram golpes danosos a máquina, mecanicamente e termicamente [2].

Para explicar as oscilações livres e forçadas que existem no interior da máquina entre os campos magnéticos no instante em que é inserida uma carga é importante que seja feita uma analogia com movimento pendular. Considerando o motor síncrono da figura 2.16, seja a ligação feita entre os campos do induzido e do indutor através de molas. No caso de uma mola simples, ao se aplicar uma massa m a mesma irá deformar até a força da mola entrar em equilíbrio com o peso da massa. Aplicando uma massa $2m$ a mola vai sofrer uma nova deformação. Tal deformação recebe o nome de oscilação forçada, pois é provocada por um agente externo. Contudo, se for inserida a massa $2m$ instantaneamente na ponta da mola a mesma vai oscilar até entrar em equilíbrio, dissipando toda a energia na troca entre a massa e a mola. Esse tipo de deformação é denominada oscilação livre. Adotando a mesma ideia no caso do motor síncrono, ao inserir uma carga no eixo, o rotor vai sofrer um atraso em relação ao dipolo girante esticando as molas da figura 2.16. No caso da inserção gradativa de carga, a mola vai esticando aos poucos, diferentemente de uma aplicação instantânea. Inserir uma carga considerável no eixo da máquina instantaneamente irá fazer com que as molas oscilem até encontrarem um ponto de equilíbrio entre os campos eletromagnéticos, dissipando a energia em forma de perdas nos enrolamentos amortecedores, como oscilações livres [16].

Um ponto que há de se observar é quando as oscilações livres são acompanhadas de oscilações forçadas. No caso da mola simples este fenômeno acontece todos os instantes em que a mola está deformada ao máximo e um agente externo força ainda mais a sua expansão. O resultado final é que a mesma pode sofrer danos permanentes. Levando esse raciocínio para o motor síncrono, no momento em que a mola que liga os campos estiver buscando um equilíbrio e um agente externo forçar uma expansão maior que a capacidade máxima, a mesma sofrerá problemas. Neste segundo, a máquina pode perder um passo polar e o rotor sofrer impulsos em seguida parar. Uma carga com essas características é encontrada em um compressor de pistão. A carga gerada pelo compressor é constante, mas em formato de impulsos. Caso o ritmo desses impulsos coincida com as oscilações livres, ambos entrarão em ressonância gerando sérios problemas para a máquina assim como para o sistema de alimentação [10].

2.8 Conclusão

Neste capítulo foi feita uma abordagem da máquina síncrona direcionada aos seus aspectos construtivos, e princípio de funcionamento. Foi feita uma descrição detalhada das principais metodologias de partida do MS, assim como uma análise dentro período de acionamento, desde o instante que a máquina sai do repouso até o sincronismo.

O capítulo é importante para o entendimento da máquina em regime permanente e transitório, e dá o apoio necessário para a compreensão dos resultados que serão mostrados adiante.

3 CAPÍTULO 3 – MODELAGEM MATEMÁTICA

3.1 Introdução

O torque de partida produzido por um motor síncrono durante a partida depende de sua construção. Mencionando o motor síncrono de polos salientes existem dois tipos de máquinas: rotor sólido (MSPSS) e rotor laminado (MSPSL). O MSPSS tem polos em uma peça de massa sólida, feita de aço fundido, forjado ou liga de aço [17]. Tal construção proporciona alta robustez mecânica em alta velocidade, comparado com motores síncronos tradicionais de rotores laminados, cujo torque de partida é desenvolvido a partir de barras de amortecimento em formato de gaiola de esquilo no rotor [18].

O desempenho transitório durante a partida, como corrente de partida, torque, o tempo de aceleração e o fator de potência são difíceis de prever. Esses estudos requerem parâmetros e modelos mais precisos quando se trata de máquinas de polos salientes [19]. Desse modo, estudos têm sido realizados para entender essa dinâmica inicial, como o descrito em [20], onde foi desenvolvido um mecanismo de controle de conjugado frente a falta de fase em uma máquina polifásica síncrona. Ou como as investigações feitas em [18], que consistem em modelar o MSPSS em um modelo de circuito duplo e investigar os indicadores da máquina síncrona ao longo do período de arranque.

Observa-se, com base em todo o levantamento bibliográfico, a necessidade de existir uma modelagem matemática que se aplique ao modelo eletromecânico da máquina síncrona de polos salientes (MSPSS e MSPSL). Ao longo deste capítulo será feita uma abordagem do motor em coordenadas de fase, assim como da transformada d_{q0} .

3.2 Condições

Com base nos princípios eletromagnéticos e mecânicos que regem o funcionamento do MS é possível desenvolver um modelo de circuito elétrico que apresenta as mesmas características. Para que tal representação seja feita corretamente algumas convenções devem ser estabelecidas [21,22,23,24]:

- Apesar de existir saturação é considerado que a relação entre a corrente e o fluxo gerado por esta é sempre constante. As análises serão feitas no segmento retilíneo da curva de magnetização do material. Considerando os circuitos magnéticos presentes na máquina, não existe saturação independentemente do valor de fluxo.
 - A distribuição de força magnetomotriz tem distribuição quase senoidal no entreferro da máquina, com o valor máximo segundo o eixo polar do rotor. São desprezados os harmônicos gerados pela variação da relutância do entreferro, devido às saliências.
 - A permeância possui uma componente constante e outra que varia senoidalmente com o ângulo elétrico α desde o eixo direto. Embora tais considerações pareçam restritivas, elas são a base da teoria de transformação d_{q0} e fornecem resultados satisfatórios em uma gama de aplicações.
 - É considerado que os enrolamentos amortecedores presentes nos polos podem ser decompostos e representados por dois enrolamentos que estão virtualmente na direção polar d e na direção interpolar q . São representados pelas bobinas K_d e K_q como está mostrado na Figura 3.1. Assim, além do enrolamento amortecedor, o enrolamento de campo também deve ser representado segundo esse sistema difásico apresentado. O enrolamento de campo f está na mesma direção do eixo polar. É importante notar que
-

esse novo sistema, que agora representa os circuitos rotóricos, gira com a velocidade de sincronismo.

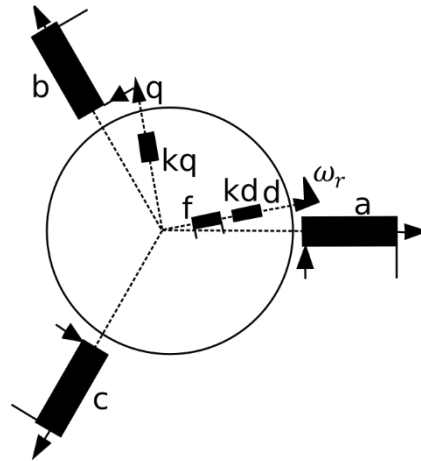


Figura 3-1 – Esquema trifásico com o sistema difásico girante.

Adaptado de [21].

3.3 Modelização

Os circuitos da máquina devem ser caracterizados por parâmetros que mantenham uma correspondência com os valores reais. Assim, para simplificação inicialmente admite-se que as bobinas do induzido têm seus valores de resistência constante, desprezando o efeito pelicular, assim como da temperatura [21].

Considerando um circuito trifásico no estator, e que as resistências das três fases são idênticas $R_a = R_b = R_c$, a matriz R_s pode representar as resistências na forma matricial:

$$R_s = \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 \\ 0 & 0 & R_c \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Inserindo os parâmetros dos circuitos presentes no rotor em (3.1): R_f (Resistência do enrolamento de campo), R_{kd} (Resistência do enrolamento amortecedor no eixo direto) e R_{kq} (Resistência do enrolamento amortecedor em quadratura). Resulta na seguinte matriz identidade:

$$R_s = \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_c & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_{kd} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_{kq} \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Devido a anisotropia presente no entreferro do motor de polos salientes, a indutância apresenta uma forte dependência da posição rotórica, expressa em ângulos elétricos α_r ($\alpha_r = p \theta_r$). Através de demonstrações matemáticas laboriosas que estão descritas em [24], o termo geral que define a indutância própria das fases, assim como a mútua pode ser representado a seguir:

$$L(\alpha_r) = L_A \cos(\beta) + L_B \cos(2\alpha_r) \quad (3.3)$$

No qual o termo β é o ângulo do eixo da respectiva fase, 0, $2\pi/3$ ou $-2\pi/3$. Substituindo na equação (3.3), a indutância própria e a mútuas podem ser obtidas para a fase a:

$$L_{aa} = L_A + L_{A1} + L_B \cos(2\alpha_r) \quad (3.4)$$

$$M_{ab} = -L_A/2 + L_B \cos(2\alpha_r - 2\pi/3) \quad (3.5)$$

$$M_{ac} = -L_A/2 + L_B \cos(2\alpha_r + 2\pi/3) \quad (3.6)$$

Onde, analisando a equação (3.4), L_{A1} simboliza a indutância do fluxo de dispersão do enrolamento, L_A corresponde a indutância da componente de permeância constante, e L_B é o valor da indutância devido a permeância de entreferro que varia senoidalmente com o ângulo do rotor.

Com base na figura 3.1, a indutância própria, equação (3.4), apresenta valor máximo quando o eixo direto está alinhado com o enrolamento da respectiva fase. A indutância mútua, por sua vez, apresenta valor máximo quando o eixo direto está a meio caminho das duas fases em análise. Isso acontece, pois, o eixo direto é o caminho de mínima relutância no rotor (máxima permeância), que facilita a condução do fluxo magnético [22].

Expandindo o mesmo conceito para as fases restantes b e c observando a distância angular que existe entre os enrolamentos, a matriz a seguir representa o conjunto de indutâncias mútuas e próprias das bobinas presentes no estator [21,24]:

$$L_{ss} = \begin{bmatrix} L_A + L_{A1} + L_B \cos(2\alpha_r) & -L_A/2 + L_B \cos(2\alpha_r - 2\pi/3) & -L_A/2 + L_B \cos(2\alpha_r + 2\pi/3) \\ -L_A/2 + L_B \cos(2\alpha_r - 2\pi/3) & L_A + L_{A1} + L_B \cos(2\alpha_r + 2\pi/3) & -L_A/2 + L_B \cos(2\alpha_r) \\ -L_A/2 + L_B \cos(2\alpha_r + 2\pi/3) & -L_A/2 + L_B \cos(2\alpha_r) & L_A + L_{A1} + L_B \cos(2\alpha_r - 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

No caso das indutâncias dos circuitos presentes no rotor é adotado que apresentam valores constantes, independentemente da posição rotórica, pois a relutância dos circuitos magnéticos tem um valor sempre constante, independente do rotor estar girando. L_f , L_{kd} e L_{kq} representam a indutância própria do enrolamento indutor, indutância do enrolamento amortecedor projetado no eixo direto, e indutância do enrolamento amortecedor projetado em quadratura, respectivamente. É conveniente aceitar que o circuito tem propriedades magnéticas lineares, sendo possível afirmar que a indutância mútua entre os enrolamentos espacialmente em quadratura é igual a zero. Em vista disso a indutância entre o enrolamento

amortecedor em eixo direto e em quadratura é igual a zero, $M_{kdkq} = 0$, tal como as indutâncias envolvendo o enrolamento indutor [21].

A matriz de indutâncias rotórica segue a seguinte configuração:

$$L_{rr} = \begin{bmatrix} L_f & L_{fkd} & 0 \\ L_{kdf} & L_{kd} & 0 \\ 0 & 0 & L_{kq} \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

Os enrolamentos no rotor conseguem interatuar magneticamente com as fases no estator. Dessa forma é necessário para a completa modelagem que exista indutância dos enrolamentos no estator em relação aos do rotor. Devido ao entreferro ser anisotrópico, as indutâncias dependem da posição instantânea do rotor. tal como definido anteriormente, as indutâncias mútuas seguem um padrão geral, $m_{af} = M_{af} \cos(\alpha_r)$, $m_{akd} = M_{akd} \cos(\alpha_r)$ e $m_{akq} = -M_{akq} \sin(\alpha_r)$. Aplicando o mesmo conceito às fases restantes e arranjando na forma matricial:

$$M_{sr} = \begin{bmatrix} M_{af} \cos(\alpha_r) & M_{akd} \cos(\alpha_r) & -M_{akq} \sin(\alpha_r) \\ M_{af} \cos(\alpha_r - 2\pi/3) & M_{akd} \cos(\alpha_r - 2\pi/3) & -M_{akq} \sin(\alpha_r - 2\pi/3) \\ M_{af} \cos(\alpha_r + 2\pi/3) & M_{akd} \cos(\alpha_r + 2\pi/3) & -M_{akq} \sin(\alpha_r + 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

Analogamente, uma vez que foi estabelecido que a máquina tem propriedades magnéticas lineares pode ser observado que a matriz de indutâncias do rotor devido ao estator é a transposta da matriz (3.9), $M_{rs} = M_{sr}^T$.

Uma matriz geral de indutâncias pode ser concebida a partir das submatrizes definidas:

$$L = \begin{bmatrix} L_{ss} & M_{sr} \\ M_{rs} & L_{rr} \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Substituindo (3.7), (3.8), (3.9) e a transposta de (3.9) em (3.10):

$$= \begin{bmatrix} L_A + L_{A1} + L_B \cos(2\alpha_r) & -L_A/2 + L_B \cos(2\alpha_r - 2\pi/3) & -L_A/2 + L_B \cos(2\alpha_r + 2\pi/3) & M_{af} \cos(\alpha_r) & M_{akd} \cos(\alpha_r) & -M_{akq} \sin(\alpha_r) \\ -L_A/2 + L_B \cos(2\alpha_r - 2\pi/3) & L_A + L_{A1} + L_B \cos(2\alpha_r + 2\pi/3) & -L_A/2 + L_B \cos(2\alpha_r) & M_{af} \cos(\alpha_r - 2\pi/3) & M_{akd} \cos(\alpha_r - 2\pi/3) & -M_{akq} \sin(\alpha_r - 2\pi/3) \\ -L_A/2 + L_B \cos(2\alpha_r + 2\pi/3) & -L_A/2 + L_B \cos(2\alpha_r) & L_A + L_{A1} + L_B \cos(2\alpha_r - 2\pi/3) & M_{af} \cos(\alpha_r + 2\pi/3) & M_{akd} \cos(\alpha_r + 2\pi/3) & -M_{akq} \sin(\alpha_r + 2\pi/3) \\ M_{af} \cos(\alpha_r) & M_{af} \cos(\alpha_r - 2\pi/3) & M_{af} \cos(\alpha_r + 2\pi/3) & L_f & L_{fkd} & 0 \\ M_{akd} \cos(\alpha_r) & M_{akd} \cos(\alpha_r - 2\pi/3) & M_{akd} \cos(\alpha_r + 2\pi/3) & L_{kdf} & L_{kd} & 0 \\ -M_{akq} \sin(\alpha_r) & -M_{akq} \sin(\alpha_r - 2\pi/3) & -M_{akq} \sin(\alpha_r + 2\pi/3) & 0 & 0 & L_{kq} \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

3.4 Equações Elétricas e mecânicas em Coordenadas de fase

Definidos os parâmetros elétricos necessários, o conjunto de equações elétricas do motor síncrono podem ser definidas. Ponderando que a tensão $v_{kd} = v_{kq} = 0$, uma matriz geral de tensões do motor síncrono pode ser escrita:

$$v = [v_a \quad v_b \quad v_c \quad v_f \quad v_{kd} \quad v_{kq}]^T \quad (3.12)$$

Analogamente, uma matriz de valores instantâneos de corrente:

$$i = [i_a \quad i_b \quad i_c \quad i_f \quad i_{kd} \quad i_{kq}]^T \quad (3.13)$$

O fluxo criado por uma corrente que passa por uma bobina pode ser definido por [22]:

$$\Psi = L \cdot i \quad (3.14)$$

Aplicando a equação (3.14) para encontrar o fluxo magnético em todos os circuitos da máquina, sempre considerando que os circuitos magnéticos em estudo

apresentam propriedades magnéticas lineares, operando na região retilínea da curva de magnetização[24]:

O fluxo devido à indutância própria, compreendendo também a indutância de dispersão, no caso da fase a é:

$$\Psi_{aa} = [L_A + L_{A1} + L_B \cos(2\alpha_r)]i_a \quad (3.15)$$

De forma similar, o fluxo na fase a relacionado à indutância mútua com as fases b e c:

$$\Psi_{ab} = [-L_A/2 + L_B \cos(2\alpha_r - 2\pi/3)]i_b \quad (3.16)$$

$$\Psi_{ac} = [-L_A/2 + L_B \cos(2\alpha_r + 2\pi/3)]i_c \quad (3.17)$$

A contribuição dos circuitos rotóricos seguem conforme a seguir:

$$\Psi_{af} = M_{af} \cos(\alpha_r) i_f \quad (3.18)$$

$$\Psi_{akd} = M_{akd} \cos(\alpha_r) i_{kd} \quad (3.19)$$

$$\Psi_{akq} = -M_{akq} \sin(\alpha_r) i_q \quad (3.20)$$

Logo, a expressão matemática para o fluxo total que permeia a fase a segue o seguinte aspecto:

$$\Psi_a = \Psi_{aa} + \Psi_{ab} + \Psi_{ac} + \Psi_{af} + \Psi_{akd} + \Psi_{akq} \quad (3.21)$$

Substituindo as expressões de (3.15) a (3.20) em (3.21):

$$\begin{aligned} \Psi_a = [L_A + L_{A1} + L_B \cos(2\alpha_r)]i_a + [-L_A/2 + L_B \cos(2\alpha_r - 2\pi/3)]i_b + [-L_A/2 + \\ L_B \cos(2\alpha_r + 2\pi/3)]i_c + M_{af} \cos(\alpha_r) i_f + M_{akd} \cos(\alpha_r) i_{kd} + M_{akq} \sin(\alpha_r) i_q \end{aligned} \quad (3.22)$$

Expandindo para os circuitos restantes, no formato da equação (3.21):

$$\Psi_b = \Psi_{ba} + \Psi_{bb} + \Psi_{bc} + \Psi_{bf} + \Psi_{bkd} + \Psi_{bkq} \quad (3.23)$$

$$\Psi_c = \Psi_{ca} + \Psi_{cb} + \Psi_{cc} + \Psi_{cf} + \Psi_{ckd} + \Psi_{ckq} \quad (3.24)$$

$$\Psi_f = \Psi_{fa} + \Psi_{fb} + \Psi_{fc} + \Psi_{ff} + \Psi_{fkd} + \Psi_{fkq} \quad (3.25)$$

$$\Psi_{kd} = \Psi_{kda} + \Psi_{kdb} + \Psi_{kdc} + \Psi_{kdf} + \Psi_{kdkd} + \Psi_{kdkq} \quad (3.26)$$

$$\Psi_{kq} = \Psi_{kqa} + \Psi_{kqb} + \Psi_{kqc} + \Psi_{kqf} + \Psi_{kqkd} + \Psi_{kqkq} \quad (3.27)$$

O fluxo que permeia o circuito em análise é responsável por criar uma força contra eletromotriz internamente, assumindo a conversão de que o fluxo de potência entra na máquina e ela opera como motor. Dessa forma, as tensões do vetor em (3.12), podem ser escritas:

$$v_a = R_a i_a + \frac{d\Psi_a}{dt} \quad (3.28)$$

$$v_b = R_b i_b + \frac{d\Psi_b}{dt} \quad (3.29)$$

$$v_c = R_c i_c + \frac{d\Psi_c}{dt} \quad (3.30)$$

$$v_f = R_f i_f + \frac{d\Psi_f}{dt} \quad (3.31)$$

$$v_{kd} = R_{kd} i_{kd} + \frac{d\psi_{kd}}{dt} \quad (3.32)$$

$$v_{kq} = R_{kq} i_{kq} + \frac{d\psi_{kq}}{dt} \quad (3.33)$$

Escrevendo as expressões (3.21) e de (3.23) à (3.27) na forma matricial com o auxílio de (3.11) e (3.13), a seguinte equação de matrizes é formada:

$$[\Psi] = [L][i] \quad (3.34)$$

Atendendo as equações (3.28) à (3.33) da mesma forma, a equação matricial é formada. Sabendo que $[v]$ e $[i]$ dependem do tempo, e $[\Psi]$ da posição rotórica:

$$[v] = [R_s] \cdot [i] + \frac{d[\Psi]}{dt} \quad (3.35)$$

Substituindo (3.34) em (3.35):

$$\begin{aligned} [v] &= [R_s] \cdot [i] + \frac{d\{[L] \cdot [i]\}}{dt} \\ [v] &= [R_s] \cdot [i] + \frac{d[L]}{dt} \cdot [i] + \frac{d[i]}{dt} \cdot [L] \\ [v] &= [R_s] \cdot [i] + \omega_r \cdot \frac{d[L]}{d\alpha_r} \cdot [i] + \frac{d[i]}{dt} \cdot [L] \end{aligned} \quad (3.36)$$

Como a modelagem está sendo desenvolvida no domínio do tempo a potência elétrica instantânea, na qual os termos constituintes são matrizes, é dada por:

$$P = [i]_T \cdot [v] \quad (3.37)$$

Substituindo (3.36) em (3.37):

$$P = [i]_T \cdot [R_s] \cdot [i] + [i]_T \cdot \omega_r \cdot \frac{d[L]}{d\alpha_r} \cdot [i] + [i]_T \cdot \frac{d[i]}{dt} \cdot [L] \quad (3.38)$$

Onde $[i]_T \cdot [R_s] \cdot [i]$ é responsável pelas perdas por efeito *joule*, $\frac{1}{2} \cdot [i]_T \cdot \omega_r \cdot \frac{d[L]}{d\alpha_r} \cdot [i] + [i]_T \cdot \frac{d[i]}{dt} \cdot [L]$ é usada na variação da energia magnética no espaço da máquina e $\frac{1}{2} \cdot [i]_T \cdot \omega_r \cdot \frac{d[L]}{d\alpha_r} \cdot [i]$ é aproveitada na conversão de potência elétrica para potência mecânica [21,24].

$$P_{mec} = \frac{1}{2} \cdot [i]_T \cdot \omega_r \cdot \frac{d[L]}{d\alpha_r} \cdot [i]$$

Como a potência é o produto entre a velocidade angular e o conjugado eletromagnético gerado internamente:

$$T_{em} = \frac{1}{2} \cdot p \cdot [i]_T \cdot \frac{d[L]}{d\alpha_r} \cdot [i]$$

Derivando a matriz de indutância e multiplicando as matrizes resulta na seguinte expressão que é de difícil entendimento:

$$T_{em} = \frac{p}{2} \cdot \sum_{i=a,b,c} \sum_{j=f,k,q,kd} \frac{dL_{i,j}}{d\alpha_r} \cdot i_i \cdot i_j \quad (3.39)$$

As equações (3.11), (3.38) e (3.39) representam as grandezas eletromecânicas da máquina em todos os instantes, desde o regime transitório até entrar no permanente. No entanto, são expressões que estão no domínio do tempo, além de serem complicadas e de difícil resolução manual. É necessário um demasiado esforço computacional com um algoritmo adequado para que possa gerar resultados adequados. Dessa forma, a modelagem criada por R. H. Park (1929) surgiu como uma

alternativa para essa questão, tornando o equacionamento mais simples, transferindo todas as variáveis para um sistema fixo ao rotor, que gira com na velocidade síncrona [23].

3.5 Transformada de *Park*

Como já exposto, uma das dificuldades inerentes à descrição do comportamento da maioria das máquinas elétricas rotativas é que as indutâncias da máquina são uma função dos ângulos mecânicos da máquina. Para simplificar esse processo, *R.H. Park* desenvolveu uma transformação que tornou a análise de máquinas elétricas mais direta, transformando as equações do motor em um quadro de referência que está girando sincronizadamente com os campos da máquina [23]. A transformada de Park pode ser escrita como:

$$C_p = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \alpha_r & \cos(\alpha_r - 2\pi/3) & \cos(\alpha_r + 2\pi/3) \\ -\sin \alpha_r & -\sin(\alpha_r - 2\pi/3) & -\sin(\alpha_r + 2\pi/3) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \quad (3.40)$$

Ou, de uma forma mais compacta,

$$f_{d_{q0}} = C_p \cdot f_{a,b,c} \quad (3.41)$$

Onde $f_{a,b,c}$ representa a variável a ser transformada, tal como tensão, corrente ou fluxo magnético. O argumento desta transformação $\alpha_r = \omega_r \cdot t$ pode ser escolhido arbitrariamente. Uma escolha útil para máquinas é o ângulo elétrico das tensões aplicadas nos enrolamentos do estator. Neste caso, as variáveis medidas são transformadas no sistema de referência que está girando em sincronia com as tensões de acionamento [20].

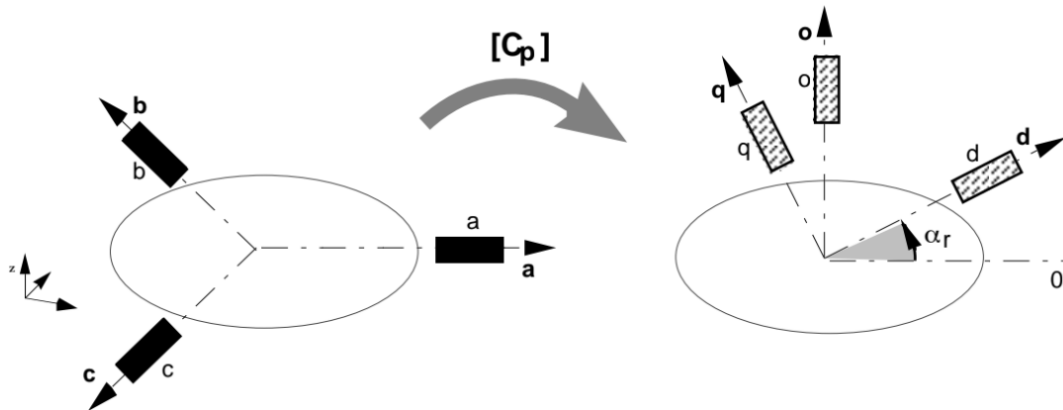


Figura 3-2 –Passagem de variáveis em coordenadas de fase para d-q.

Fonte [21].

Através da transformada de *park*, uma componente em eixo direto é introduzida, d , tal como uma componente em quadratura q , e uma componente homopolar (o), que é adicionada observando a reversibilidade das variáveis [21].

Prosseguindo com a modelagem, agora com o intuito de representar as variáveis estatóricas no sistema $d - q$, o vetor de tensões da equação (3.12), bem como o de correntes da equação (3.13) podem ser escritos conforme demonstrado detalhadamente em [21, 23, 24]:

$$[u]' = [z]'[i]'$$

A matriz de indutâncias (11) segue o seguinte padrão para a transformada de *park*:

$$[L'] = [C_p]L[C_p]^{-1}$$

Contudo, as indutâncias rotóricas embutidas na equação (3.11) já estão expressas no sistema $d - q$. Atentando-se a isso, a matriz de indutâncias (3.11) no sistema $d - q$ é composta por:

$$[L'] = \begin{bmatrix} [C_p] & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & [1] \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} [L_{ss}] & [M_{sr}] \\ [M_{rs}] & [M_{rr}] \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} [C_p]^{-1} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & [1] \end{bmatrix}$$

Realizando as multiplicações matriciais:

$$[L'] = \begin{bmatrix} [C_p] \cdot [L] \cdot [C_p]^{-1} & [C_p] \cdot [M_{sr}] \\ [M_{rs}] \cdot [C_p]^{-1} & [M_{rr}] \end{bmatrix} \quad (3.42)$$

Onde,

$$[C_p] \cdot [L] \cdot [C_p]^{-1} = L'_{ss} = \begin{bmatrix} L_d & 0 & 0 \\ 0 & L_q & 0 \\ 0 & 0 & L_0 \end{bmatrix} \quad (3.43)$$

No qual L_d , L_q e L_0 , como descrito em [21]:

$$L_d = \frac{3}{2}(L_A + L_B) + L_{A1} = L_{md} + L_{A1} \quad (3.44)$$

$$L_q = \frac{3}{2}(L_A - L_B) + L_{A1} = L_{mq} + L_{A1} \quad (3.45)$$

$$L_0 = L_{A1} \quad (3.46)$$

Na matriz (3.43) observa-se o efeito da transformada de *park*, na qual os locais de indutância mútua, comparando com a matriz (3.7), são iguais a zero, anulando a relação magnética entre as fases que tinha sentido somente no sistema em coordenadas de fase. Há de se observar que as equações de (3.44) à (3.46)

contemplam tanto a indutância devido ao fluxo de magnetização quanto a indutância relacionada ao fluxo de dispersão.

As matrizes de indutância mútua entre estator e rotor $[M_{sr}]$ e entre rotor e estator $[M_{rs}]$ condizentes com o que foi estabelecido na matriz (3.42), no sistema $d - q$:

$$[M_{sr}]' = [C_p] \cdot [M_{sr}]$$

Ou,

$$[M_{sr}]' = \begin{bmatrix} M_{af} & M_{akd} & 0 \\ 0 & 0 & M_{akq} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.48)$$

Para a matriz $[M_{rs}]'$:

$$[M_{rs}]' = [M_{rs}] \cdot [C_p]^{-1}$$

Ou,

$$[M_{rs}]' = \begin{bmatrix} 3/2 M_{af} & 0 & 0 \\ 3/2 M_{akd} & 0 & 0 \\ 0 & 3/2 M_{akq} & 0 \end{bmatrix} \quad (3.49)$$

Unificando as matrizes (3.43), (3.48) e (3.49) assim como foi feito anteriormente, a matriz geral de indutâncias assume o seguinte aspecto, representada no sistema de coordenadas $d - q$:

$$[L]' = \begin{bmatrix} L_d & 0 & 0 & M_{af} & M_{akd} & 0 \\ 0 & L_q & 0 & 0 & 0 & M_{akq} \\ 0 & 0 & L_0 & 0 & 0 & 0 \\ 3/2M_{af} & 0 & 0 & L_f & L_{fkd} & 0 \\ 3/2M_{akd} & 0 & 0 & L_{kdf} & L_{kd} & 0 \\ 0 & 3/2M_{akq} & 0 & 0 & 0 & L_{kq} \end{bmatrix} \quad (3.50)$$

Como é observado na matriz (3.50), as indutâncias não dependem da posição rotórica e conseqüentemente também independem do tempo. Aplicando a transformada de *Park* na equação magnética (3.14):

$$[\Psi]' = [L]' \cdot [i]' \quad (3.51)$$

Diferentemente do que foi definido anteriormente, o vetor de fluxo agora representa um conjunto de fluxos no sistema $d - q$, $[\Psi]' = [\Psi_d \ \Psi_q \ \Psi_0 \ \Psi_f \ \Psi_{kd} \ \Psi_{kq}]T$, que, com o apoio do vetor de correntes $[i]' = [i_d \ i_q \ i_0 \ i_f \ i_{kd} \ i_{kq}]T$, serão organizados da seguinte maneira [21]:

- *Fluxo segundo o eixo direto*: Faz a relação entre o fluxo no eixo direto e as correntes que o produzem no eixo direto.

$$\begin{bmatrix} \Psi_d \\ \Psi_f \\ \Psi_{kd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & 0 & 0 & M_{af} & M_{akd} & 0 \\ 3/2M_{af} & 0 & 0 & L_f & L_{fkd} & 0 \\ 3/2M_{akd} & 0 & 0 & L_{kdf} & L_{kd} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_d \\ i_f \\ i_{kd} \end{bmatrix} \quad (3.52)$$

- *Fluxo segundo o eixo em quadratura*: Faz a relação entre o fluxo no eixo em quadratura e as correntes que o produzem no eixo em quadratura.

$$\begin{bmatrix} \Psi_q \\ \Psi_{kq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & L_q & 0 & 0 & 0 & M_{akq} \\ 0 & 3/2M_{akq} & 0 & 0 & 0 & L_{kq} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_q \\ i_{kq} \end{bmatrix} \quad (3.53)$$

- *Fluxo homopolar*: Faz a relação entre o fluxo homopolar Ψ_0 e a corrente que o produz $i_0 = (i_a + i_b + i_c)/3$. Representa o fluxo total de fugas.

$$\Psi_0 = L_0 \cdot i_0 \quad (3.54)$$

Prosseguindo com o objetivo de construir uma modelagem com as coordenadas no sistema $d - q$, as tensões v_a , v_b e v_c devem seguir o mesmo caminho, uma vez que as tensões v_f , v_{kd} e v_{kq} já estão nas coordenadas corretas, pois foram consideradas no rotor. Admitindo as seguintes condições:

$$[v_s] = [v_a \ v_b \ v_c]T \text{ e } [v_s]' = [v_d \ v_q \ v_0]T,$$

Reescrevendo a matriz de (3.1):

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_a & 0 \\ 0 & 0 & R_a \end{bmatrix} = \text{diag}[R_a \ R_b \ R_c]$$

No caso de um vetor de fluxos:

$$[\Psi_s] = [\Psi_a \ \Psi_b \ \Psi_c]T \text{ e}$$

$$[\Psi_s]' = [\Psi_d \ \Psi_q \ \Psi_0]T$$

Assim como,

$$[i_s] = [i_a \ i_b \ i_c]T$$

Aplicando a lei de *kirchhoff* das tensões nos circuitos estatóricos da máquina resulta na expressão matricial:

$$[v_s]' = [C_p] \cdot [v_s] = [C_p] \cdot [R_s] \cdot [i_s] + [C_p] \cdot \frac{d[\Psi_s]}{dt} \quad (3.55)$$

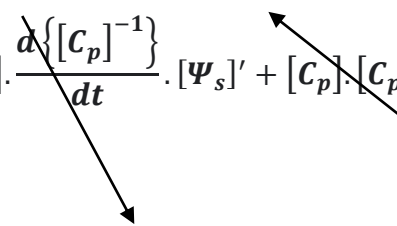
Sabendo que:

$$[i_s] = [C_p]^{-1} \cdot [i_s]' \text{ e } [\Psi_s] = [C_p]^{-1} \cdot [\Psi_s]'$$

$$[v_s]' = [C_p] \cdot [v_s] = [C_p] \cdot [R_s] \cdot [C_p]^{-1} \cdot [i_s]' + [C_p] \cdot \frac{d\{[C_p]^{-1} \cdot [\Psi_s]'\}}{dt}$$

Já que:

$$[C_p] \cdot [C_p]^{-1} = 1$$

$$[v_s]' = [C_p] \cdot [v_s] = [R_s] \cdot [i_s]' + [C_p] \cdot \frac{d\{[C_p]^{-1}\}}{dt} \cdot [\Psi_s]' + [C_p] \cdot [C_p]^{-1} \cdot \frac{d\{[\Psi_s]'\}}{dt}$$


Como demonstrado em [21,24]:

$$[C_p] \cdot \frac{d\{[C_p]^{-1}\}}{dt} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \frac{d\alpha_r}{dt} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \omega_r$$

$$\begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \omega_r \cdot [\Psi_s]' = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Psi_d \\ \Psi_q \\ \Psi_0 \end{bmatrix} \cdot \omega_r = \begin{bmatrix} -\Psi_q \\ \Psi_d \\ 0 \end{bmatrix} \cdot \omega_r$$

Reescrevendo a expressão (3.55):

$$[v_s]' = [C_p] \cdot [v_s] = [R_s] \cdot [i_s]' + [-\Psi_q \quad \Psi_d \quad 0]T \cdot \omega_r + \frac{d\{[\Psi_s]'\}}{dt}$$

Que também pode ser escrita reduzindo $\frac{d}{dt} = g$,

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \\ v_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_a & 0 \\ 0 & 0 & R_a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\Psi_q \\ \Psi_d \\ 0 \end{bmatrix} \cdot \omega_r + g \cdot \begin{bmatrix} \Psi_d \\ \Psi_q \\ \Psi_0 \end{bmatrix} \quad (3.56)$$

O conjugado eletromagnético em coordenadas de fase pode ser aproveitado na modelagem do sistema $d - q$ que aqui está sendo desenvolvido. Assim:

$$T_{em} = \frac{1}{2} \cdot p \cdot [i]_T \cdot \frac{d[L]}{d\alpha_r} \cdot [i] \quad (3.57)$$

Substituindo os vetores transformados e desenvolvidos nesta seção: $[i]'$ no lugar de $[i]$, assim como $[L]'$ no lugar de $[L]$ na equação (3.57) é possível obter T_{em} no sistema $d - q$. Neste trabalho será omitida a laboriosa demonstração matemática até chegar no termo geral de T_{em} , sendo admitida a expressão final. Mais detalhes podem ser encontrados em [21,24]. Assim,

$$T_{em} = k[(L_d - L_q)i_d i_q + M_{af} i_f i_q + (M_{akd} i_{kd} i_q - M_{akq} i_{kq} i_d)] \quad (3.58)$$

O termo geral do conjugado eletromagnético produzido pelo motor síncrono pode ser decomposto em três partes, para o melhor entendimento [21]:

- $(L_d - L_q)i_d i_q$: Conjugado de relutância devido a anisotropia do rotor, pois $L_d \neq L_q$.
- $(M_{akd} i_{kd} i_q - M_{akq} i_{kq} i_d)$: Conjugado assíncrono devido a interação entre fluxo direto e quadratura dos enrolamentos amortecedores e com as componentes em eixo direto e quadratura das correntes estatóricas.

-
- $(M_{af}i_fi_q)$: Conjugado de excitação devido a relação entre o fluxo de excitação gerado pelo enrolamento indutor com a componente em quadratura da corrente estatórica.

Portanto, o motor síncrono foi modelado aplicando a transformada de *park* às equações da máquina no sistema de coordenadas de fase. As equações (3.56) e (3.58) representam a máquina síncrona e são compostas por equações diferenciais lineares de coeficientes constantes e de fácil entendimento. A transformação para o sistema $d - q$ é a mais empregada pela literatura e os efeitos magnéticos são próximos aos da máquina em sua representação em coordenadas de fase. Contudo, para que os resultados sejam representados em termos de valores para comparação com a rede elétrica é necessário que seja feita a conversão de retorno do sistema $d - q$ para coordenadas de fase.

3.6 Conclusão

Neste capítulo foi desenvolvida uma modelagem matemática que aborda a MSPSS e MSPSL. Inicialmente a abordagem foi direcionada ao domínio de coordenadas de fase, onde grande parte dos elementos apresentaram relação com o tempo. Em seguida, a transformada de *Park* foi apresentada como uma ferramenta matemática para simplificar as equações e torná-las mais compreensíveis. Foi aplicada a transformada de *Park* em todas as equações antes representadas em coordenadas de fase, nas quais os elementos não dependem do tempo.

O capítulo é essencial para o entendimento da operação do motor síncrono, onde a modelagem computacional se mostra indispensável para a correta compreensão do modelo computacional que será apresentado no próximo capítulo.

4 CAPÍTULO 4 – SISTEMA DE GERAÇÃO DE CARGAS MECÂNICAS

4.1 Introdução

Até a década de 1960 era comum encontrar máquinas de corrente contínua em diversas aplicações na sociedade, apesar do desenvolvimento da eletrônica de potência, especificamente dos dispositivos de estado sólido, e, conseqüentemente, a crescente presença de sistemas CA [25]. Desse modo, o que explicava a grande quantidade de máquinas de corrente contínua (MCC), sabendo que sistemas CA mostravam-se mais robustos?

A resposta mais adequada para essa pergunta encontra-se em duas evidências históricas. Naquele momento, o MCC era o mais ideal em aplicações automobilísticas. Além disso, o MCC era insuperável em situações que exigiam controle de velocidade, mostrando-se a mais ideal, fazendo com que retificadores de elevada potência fossem construídos para essa aplicação. Atualmente, o motor de indução, com auxílio de unidades de estado sólido, é o mais utilizado quando é necessário o controle de velocidade [25].

A MCC é altamente versátil. Pode fornecer torque de aceleração, assim como desaceleração com facilidade, comparada a outras máquinas, e exige um controle simples de velocidade. No entanto a necessidade de um retificador mecânico para converter a potência CA torna essa máquina frágil e onerosa.

A MCC é composta na maioria dos casos por dois enrolamentos. O enrolamento de campo e o enrolamento de armadura. O enrolamento de campo, fixo à estrutura estatórica da máquina, é responsável por produzir o fluxo magnético indutor, que permeia o enrolamento de armadura. O enrolamento de armadura, situado no rotor, também produz um fluxo que interage com o fluxo indutor gerando um torque eletromagnético T_{em} . Operando como gerador, o fluxo indutor permeia as bobinas de armadura, onde uma corrente é induzida no sentido de se opor a variação do fluxo

indutor. Os dois enrolamentos podem ser associados internamente de três formas: Série, paralelo e composto. Na associação em série o enrolamento de campo é percorrido pela mesma corrente que circula na armadura. No caso da associação em paralelo a tensão aplicada aos dois enrolamentos é igual. A associação composta reúne as características das duas ligações.

A figura 4.1 mostra a vista em perfil de uma MCC típica. Existem dois polos salientes no estator envolvidos por uma ou mais bobinas que produzem uma onda de fluxo magnético simétrica ao eixo direto. Assim, como citado anteriormente, pelo seu princípio de funcionamento a máquina exige um retificador mecânico para a conversão CA/CC. Dessa forma, existem escovas fixas, e um comutador rotativo, ligado às extremidades das bobinas de armadura, que entram em contato no momento conversão. As escovas estão posicionadas a meio caminho entre os polos de campo de tal forma que a comutação ocorra quando a bobina de armadura esteja na zona neutra. No instante da comutação, o eixo da FMM produzida pela armadura deve estar em quadratura com o eixo dos polos. Na figura 4.1, as escovas estão mostradas a 90° do eixo direto, porque essa é a posição das bobinas às quais elas estão conectadas [22]. Devido a simplicidade associada ao controle de conjugado, neste projeto será utilizada uma MCC operando como gerador (GCC), com a finalidade de produzir as cargas mecânicas necessárias. Será realizada uma abordagem matemática da máquina ao longo do capítulo, bem como dos princípios de controle mais empregados.

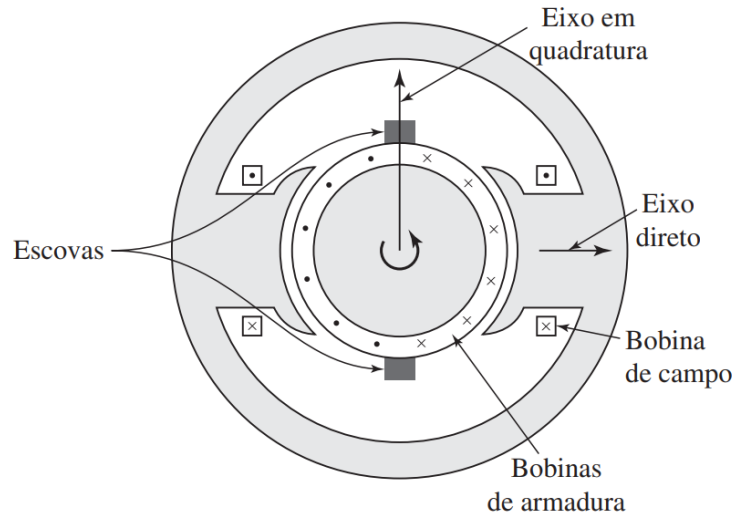


Figura 4-1 – Esquema de uma MCC típica.

Fonte [22].

4.2 Modelagem Matemática da MCC

Considerando que o circuito da figura 4.2 seja a representação do circuito de um gerador de corrente contínua, R_a simboliza a resistência do enrolamento de armadura, L_a a indutância do enrolamento de armadura, e R_L a resistência de uma carga conectada aos terminais.

Com o enrolamento de campo conectado a uma fonte CC, e o rotor submetido a uma velocidade ω_m fornecida por uma fonte mecânica primária será gerada uma *força eletromotriz* (f_{em}) internamente ao gerador de corrente contínua. Tal f_{em} , pelo que estabelece a da lei de *lenz*, deve gerar uma corrente i_a na armadura para se opor à variação do fluxo que a originou [1]. Aplicando a lei das tensões de *kirchhoff* ao circuito da figura 4.2:

$$e = (R_a + R_f)i_a + L_a \frac{di_a}{dt} \quad (4.1)$$

No instante que a corrente i_a circular na armadura será produzido um torque eletromagnético T_e , que se opõe ao movimento da fonte mecânica, devido a interação entre o campo do enrolamento indutor com o do induzido, assim K_t é uma constante de torque [26,27]:

$$T_e = K_t i_a \quad (4.2)$$

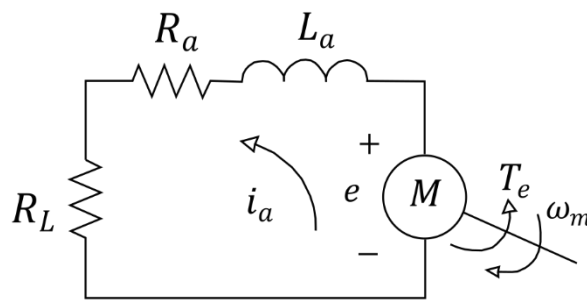


Figura 4-2 – Circuito elétrico de uma MCC.

Fonte [26].

Uma relação eletromecânica pode ser estabelecida entre a tensão gerada interna e a velocidade angular, onde K_e representa uma constante de força eletromotriz [26,27]:

$$e = K_e \omega_m \quad (4.3)$$

Conforme estabelecido em [27], as constantes K_e e K_t podem ser unificadas em um único valor que representa a indutância mútua entre o enrolamento de campo e de armadura. Assim, a seguinte expressão passa a ser válida e substitui K_e e K_t :

$$K_b = M_{af} i_f \quad (4.4)$$

Aplicando lei das tensões ao circuito do enrolamento de campo da máquina CC, surge:

$$V_f = R_f i_f + L_f \frac{di_f}{dt} \quad (4.5)$$

Na qual R_f é a resistência do enrolamento de campo e L_f a indutância.

Reunindo as equações (4.1), (4.2), (4.3) e (4.5) e aplicando transformada de Laplace:

$$\frac{I_a(s)}{E(s)} = \frac{1}{R_a + R_L + sL_a} \quad (4.6)$$

$$\frac{T_e(s)}{I_f(s)I_a(s)} = M_{af} \quad (4.7)$$

$$\frac{E(s)}{\Omega_m(s)I_f(s)} = M_{af} \quad (4.8)$$

$$\frac{I_f(s)}{V_f(s)} = \frac{1}{R_f + sL_f} \quad (4.9)$$

Relacionado as equações (4.6) a (4.9) é possível construir o diagrama de blocos da figura 4.3. No diagrama é possível observar que o torque eletromagnético produzido pelo Gerador de Corrente Contínua (GCC) pode ser controlado pela tensão de campo, assim como pela velocidade no eixo.

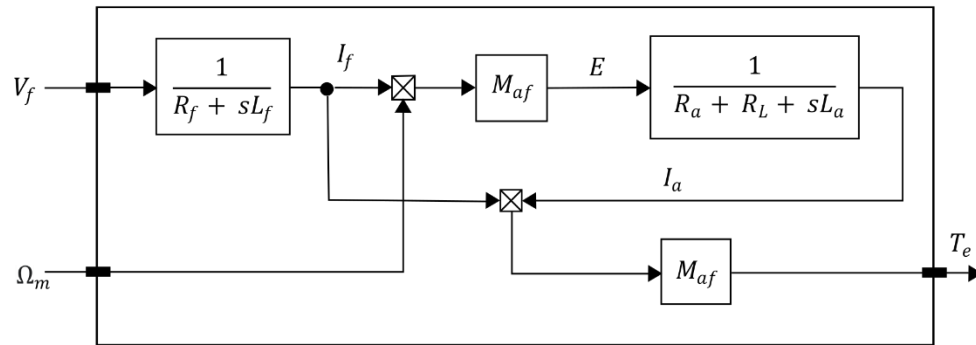


Figura 4-3 – Diagrama de um GCC.

Adaptado de [26].

Na prática o GCC vai estar acoplado a uma outra máquina. Um MS no caso do presente trabalho. Em vista disso, a velocidade não pode ser uma variável de controle, pois será fornecida por uma máquina de acionamento, restando apenas a tensão de campo V_f como o principal meio de atuação para controlar o torque eletromagnético.

Como mostrado no esquema da figura 4.4, o torque T_e pode ser medido na prática com o auxílio de um transdutor de torque acoplado entre o eixo do motor síncrono e o eixo do gerador de corrente contínua. A velocidade é necessária para gerar o torque de referência T_{ref} , que é produzido por um mecanismo de perfil de cargas a partir do comportamento da velocidade instantânea ω_r , que pode ser mensurada por um encoder. Em seguida os dois sinais são subtraídos e um erro é gerado para alimentar um controlador. No caso do presente projeto foi adotado um controle *Proporcional Integrativo* (PI) inserido em um controlador que atua na tensão de campo V_f do GCC.

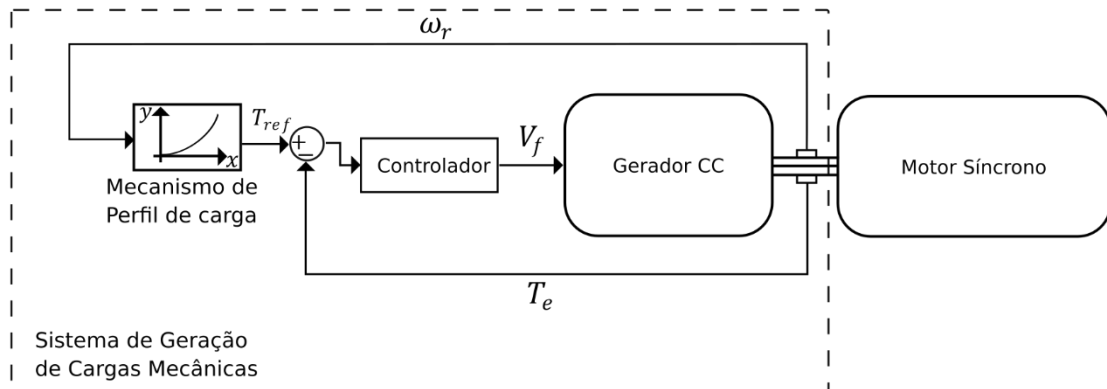


Figura 4-4 – Esquema da ligação entre o sistema de geração de cargas e o Motor Síncrono.

Fonte Autor.

4.3 Conjugado Resistente de Carga

É o tipo de conjugado demandado pela carga, que depende do tipo de carga a ser acionada. Todas seguem o seguinte termo geral [28]:

$$C_c = C_o + K_c \cdot n^x \quad (4.10)$$

Onde,

C_c : Conjugado de Carga (N.m)

C_o : Conjugado demandado pela carga em repouso (N.m)

K_c : Constate que depende do tipo de carga.

x : Valor que depende do tipo de carga. -1, 0, 1 e 2.

O tipo de carga tem relação com a velocidade, conforme o termo (4.10). Assim, em seguida será feita uma descrição dos quatro tipos de cargas e onde podem ser encontradas.

4.4 Conjugado Constante

No caso desse tipo de carga $x = 0$, e o conjugado permanece constante com o aumento da velocidade. Exemplos de cargas que apresentam esse perfil de conjugado são guinchos, guindastes e correias transportadoras [26].

$$C_c = C_o + K_c \quad (4.11)$$

A potência P aumenta de forma proporcional a velocidade n , figura 4.5:

$$P = (C_o + K_c).n \quad (4.12)$$

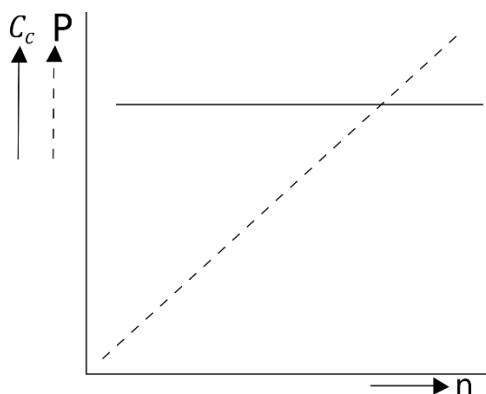


Figura 4-5 - Perfil de carga constante.

Fonte Autor.

4.5 Conjugado Linear

Neste tipo de carga o conjugado cresce linearmente com o aumento da velocidade, $x = 1$. Cargas com esse perfil são encontradas em moinho de rolos, bombas de pistão, plainas e serras para madeira [26].

$$C_c = C_o + K_c \cdot n \quad (4.13)$$

A potência aumenta em uma relação quadrática com a velocidade, figura 4.6:

$$P = (C_o \cdot n) + (K_c \cdot n^2) \quad (4.14)$$

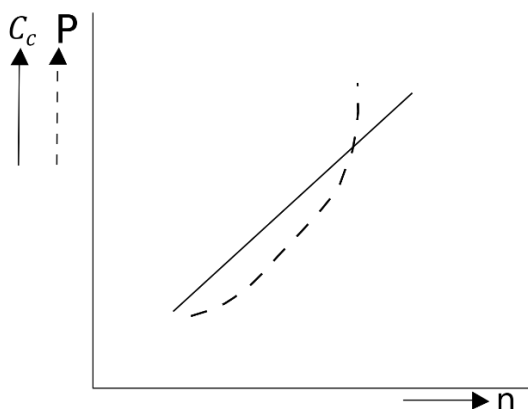


Figura 4-6 – Perfil de carga constante.

Fonte Autor.

4.6 Conjugado Quadrático

Neste caso, $x = 2$ e o conjugado varia com o quadrado da velocidade. Cargas com perfil de conjugado quadrático são encontradas em ventiladores, misturadores, centrífugas, bombas centrífugas, exaustores e compressores [26].

$$C_c = C_o + K_c \cdot n^2 \quad (4.15)$$

A potência aumenta com o cubo da velocidade, figura 4.7:

$$P = (C_o \cdot n^2) + (K_c \cdot n^3) \quad (4.16)$$

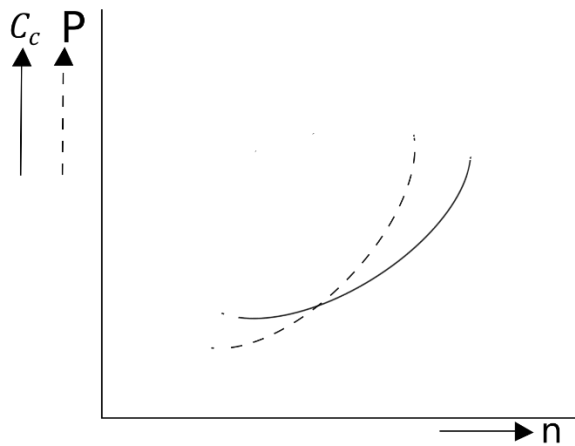


Figura 4-7 – Perfil de carga quadrática.

Fonte Autor.

4.7 Conjugado Hiperbólico

Neste caso $x = -1$ e $C_o = 0$. Assim,

$$C_c = \frac{K_c}{n} \quad (4.17)$$

Uma consequência quando $n = 0$ é que C_c é infinito, que não faz sentido na prática, pois neste tipo carga o conjugado varia entre dois valores definidos [28]. Encontram aplicações em fresadoras e mandriladoras [26].

A potência por sua vez permanece constante independente da velocidade, figura 4.8:

$$P = K_c \quad (4.18)$$

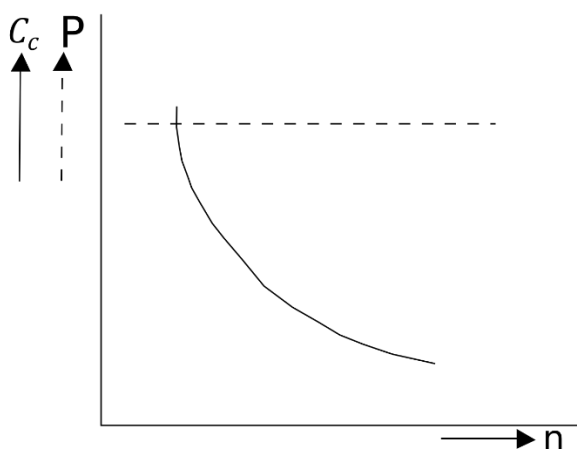


Figura 4-8– Perfil de carga hiperbólica.

Fonte Autor.

4.8 Conclusão

No presente capítulo as cargas mecânicas que serão inseridas no eixo do MS foram abordadas. Foi apresentada a modelagem matemática de uma MCC operando como gerador. As equações matemáticas foram relacionadas de tal forma que foi possível construir um diagrama de blocos no qual o Torque Eletromagnético produzido pelo GCC pode ser controlado pela tensão aplicada ao enrolamento de campo. Foi mostrado que a velocidade no eixo do GCC também é uma variável que tem influência

sobre o Torque Eletromagnético, no entanto o controlador PI conseguiu atuar de forma satisfatória sobre a tensão de campo, mesmo com a velocidade variando.

Em seguida a cargas mecânicas que serão produzidas pelo GCC foram detalhadas, onde também foram mostradas suas principais aplicações. O capítulo mostra-se importante para a análise da dinâmica dos resultados apresentados nos próximos capítulos.

5 CAPÍTULO 5 – PLATAFORMA DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

5.1 Introdução

As simulações computacionais são de fundamental importância, pois possibilitam a realização de ensaios que seriam impossíveis de serem executados na prática. Assim, através de simulação uma máquina elétrica pode ser projetada da melhor forma, implicando em vantagens no momento de construção na prática. De forma resumida, a simulação computacional é utilizada para resolver o equacionamento de uma máquina elétrica, gerando resultados que irão facilitar a compreensão do funcionamento na prática.

Em [29], por exemplo, foi desenvolvida uma bancada de simulação de cargas mecânicas de diferentes perfis. Para produzir o conjugado mecânico foi utilizada uma máquina de corrente contínua operando como gerador. O GCC foi conectado a um motor de indução, que, por sua vez, foi submetido a cargas em degrau, parabólica e linear. Antes de implementar na prática, foram desenvolvidas simulações no *software MATLAB*, na ferramenta *simulink*, que foram utilizadas como apoio na construção da bancada.

Em [26] foi desenvolvida uma modelagem no domínio da frequência de uma máquina de corrente contínua operando como gerador. A máquina operando como gerador é controlada pela tensão de campo e produz cargas mecânicas que variam dependendo da velocidade no eixo. Com o objetivo de validar a modelagem, o GCC é conectado a um motor de indução e as equações eletromecânicas são inseridas no ambiente de simulação *simulink*.

Neste capítulo será apresentada uma plataforma computacional que simula o comportamento dinâmico de um motor síncrono assim como de um gerador de corrente contínua produzindo cargas mecânicas. No decorrer do capítulo será feita

uma descrição da simulação desenvolvida estabelecendo uma relação com a modelagem matemática das duas máquinas apresentadas em capítulos anteriores.

5.2 Descrição do Modelo Computacional do Gerador CC

Com o objetivo de validar a modelagem matemática desenvolvida no item 4.2 e apresentar os resultados de forma clara e correta, o *software MATLAB* foi adotado como ferramenta computacional no desenvolvimento deste trabalho. Além de ser intuitivo, ter um ambiente de simulação amigável, é um *software* prático, que vem sendo adotado na resolução de diversos problemas por parte da comunidade acadêmica. Internamente o *MATLAB* disponibiliza ao usuário uma ferramenta denominada *simulink*, que apresenta uma linguagem de programação por blocos de fácil entendimento e pode ser aplicada na resolução de problemas de telecomunicações, aeroespaciais, engenharia mecânica, controle, processamento de sinais, instrumentação médica, eletrônica.

Na ferramenta *simulink* existe um pacote de modelos denominado *SymPowerSystem* que representa sistemas dinâmicos. Na biblioteca *machines* existem diversos modelos de máquinas elétricas. Foi escolhido o bloco *DC MACHINE* que representa uma Máquina CC, e os parâmetros do modelo escolhido estão na tabela 5.1. Em seguida os parâmetros foram inseridos no diagrama de blocos da figura 4.3, que representa um GCC com o torque eletromagnético controlado pela tensão de campo e velocidade de acionamento.

O diagrama de blocos com os parâmetros da tabela 5.1 foi introduzido no *simulink*.

Tabela 5-1 – Parâmetros da Máquina CC.

PARÂMETROS	VALOR
POTÊNCIA NOMINAL	20HP
TENSÃO DE ARMADURA	500V
TENSÃO DE CAMPO	300V
VELOCIDADE NOMINAL	1750RPM
RESISTÊNCIA DE ARMADURA	1,785Ω
INDUTÂNCIA DE ARMADURA	0,02124H
RESISTÊNCIA DE CAMPO	105,9Ω
INDUTÂNCIA DE CAMPO	27,65H

Inicialmente o GCC foi simulado conectado ao motor síncrono, sem variar o conjugado em função da velocidade. Com objetivo de verificar o comportamento do gerador frente às cargas mecânicas de perfis variados exigidas pela lógica de controle. Simulação variando o conjugado em função da velocidade é apresentada no próximo capítulo, que é o objetivo central do presente trabalho.

O controlador consiste em um mecanismo que atua em uma variável do processo, com o objetivo de modificar a dinâmica deste mesmo processo, levando as variáveis de saída a valores desejáveis [30]. Especificamente, o controlador *Proporcional Integrativo* (PI) desempenha esta função em diversas aplicações na engenharia de forma satisfatória. É possível atuar nos ganhos do controlador PI de forma a obter valores em regime permanente com o mínimo de erro possível e um tempo de acomodação do processo desejável. Assim, no caso do presente projeto foi adotado um controlador PI para atuar na tensão de campo do GCC modelado. Considerado que $U(s)$ seja o sinal de atuação na tensão de campo e $E(s)$ o sinal de erro entre o conjugado de referência e o conjugado produzido pelo GCC, o seguinte termo geral pode ser escrito no domínio da frequência.

$$U(s) = K_p \cdot E(s) + \frac{K_i}{s} \cdot E(s)$$

Os ganhos do controlador, $K_p = 1000$ e $K_i = 0,1$, foram adotados com base em uma sintonização manual e quando implementados no controlador mostraram-se aceitáveis.

$$U(s) = 1000E(s) + \frac{0,1}{s} \cdot E(s) \quad (5.1)$$

A implementação do sistema de controle PI no *simulink* está ilustrada na figura 5.1. Com o objetivo de limitar a ação de controle à faixa de valores aceitáveis pelo enrolamento de campo, foi inserido em série com o controlador um bloco de saturação com valores de 0 a 300. A escolha da faixa de variação da tensão de campo observa o valor da tensão nominal no enrolamento de campo, 300V, conforme tabela 5.1. O bloco é necessário, pois, como será mostrado adiante, o controlador pode exigir uma reposta de controle com valores irrealizáveis na prática. A saída do bloco *saturation* é conectada à tensão de campo do GCC. O torque produzido pelo GCC é inserido no Motor Síncrono e uma derivação é feita para a realimentação do sistema de controle.

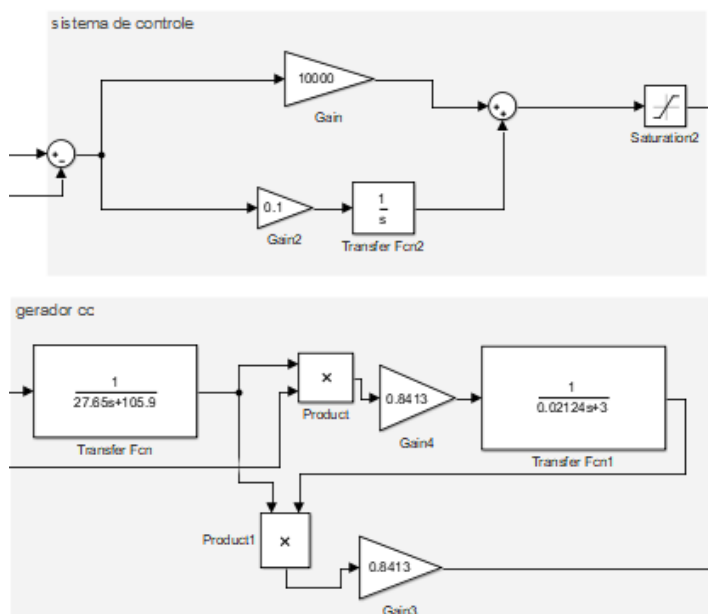


Figura 5-1 – Implementação do GCC e do Controlador PI no simulink.

Fonte Autor.

Foi escolhido o método de resolução *ode23tb (stiff/TR-BDF2)* em todas as simulações, para a correta solução das equações diferenciais. A simulação segue a ordem do fluxograma da figura 5.2. Inicialmente o MS é acionado até o regime permanente, acoplado ao GCC. O MS atinge a velocidade síncrona, regime permanente, no instante 2 segundos. Em seguida, no instante 4 segundos, a carga escolhida é implementada no eixo do MS. A lógica de controle compara o torque instantâneo com o torque de referência. Tal comparação é feita de forma iterativa, sempre buscando igualar o torque gerado ao valor de referência. Com base nisso, um sinal de erro é gerado e alimenta o controle PI.

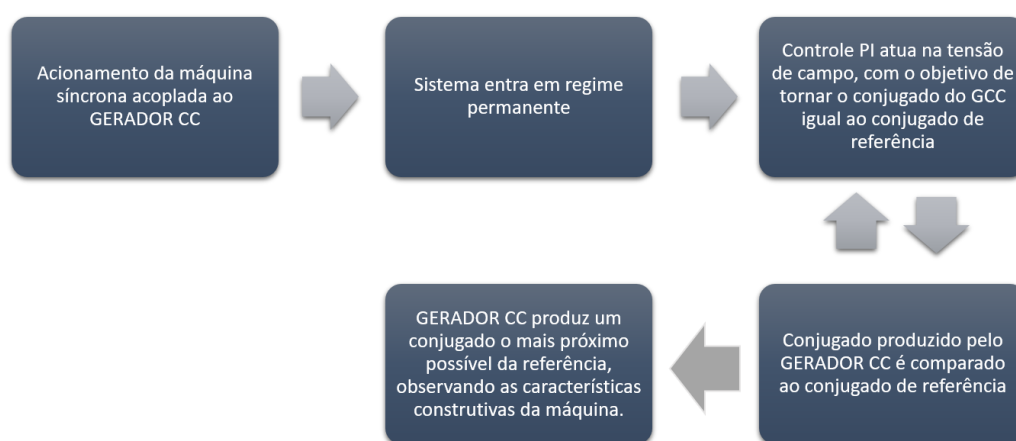


Figura 5-2 – Acionamento do Sistema de Geração de Cargas Mecânicas.

Fonte Autor.

5.3 Acionamento com uma Carga em Degrau

No primeiro ensaio realizado foi selecionada uma carga em degrau. O MS foi acionado conectado ao GCC. No instante 4 segundos, quando o MS já se encontra

em regime permanente, um bloco aplica ao comparador da figura 5.1 um degrau de 44N.m. Instantaneamente o controle atua na tensão de campo do GCC, levando o conjugado de carga a 43,992N.m depois de 0,12 segundos da aplicação do degrau. Em regime transitório o conjugado ainda atinge aproximadamente 44,5N.m, e em poucos instantes chega a 43,992N.m. A figura 5.3 mostra o torque de referência, assim como o produzido pelo GCC.

A figura 5.4 apresenta a velocidade do MS frente a implementação da carga mecânica em degrau. O MS parte suprindo apenas as próprias perdas rotacionais, bem como as do GCC. Na aplicação do conjugado de 44N.m, que é o nominal do MS, o rotor sofre uma frenagem, devido a rápida variação de conjugado solicitada. Fortes transitórios de correntes são gerados pelo MS, que serão mostrados detalhadamente adiante. O comportamento das correntes de armadura e de campo do GCC podem ser observadas nas figuras 5.5 e 5.6, respectivamente. A corrente de armadura sofre um transitório e se estabelece em torno de 60,82A depois de 0,3 segundos, aproximadamente. A corrente de campo apresenta um pico de corrente mais acentuado, devido a atuação direta do enrolamento de campo e se estabelece em torno de 0,401A, depois de 0,29 segundos. O pequeno erro em regime permanente observado na figura 5.3 entre o conjugado de referência e o produzido pelo GCC, assim como os transitórios que se passam em menos de meio segundo, são fortes indicadores da escolha correta para os ganhos do controlador, mostrando o seu correto funcionamento.

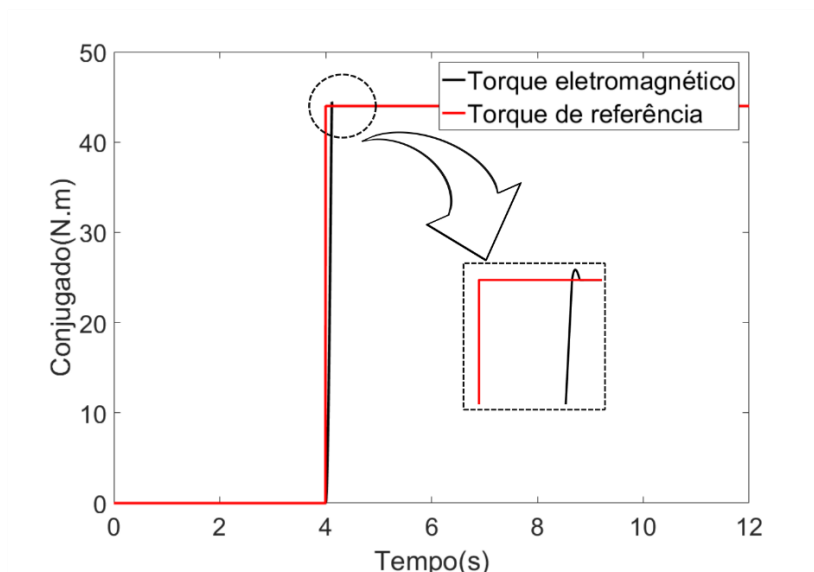


Figura 5-3 – Conjugado Produzido pelo GCC.

Fonte Autor.

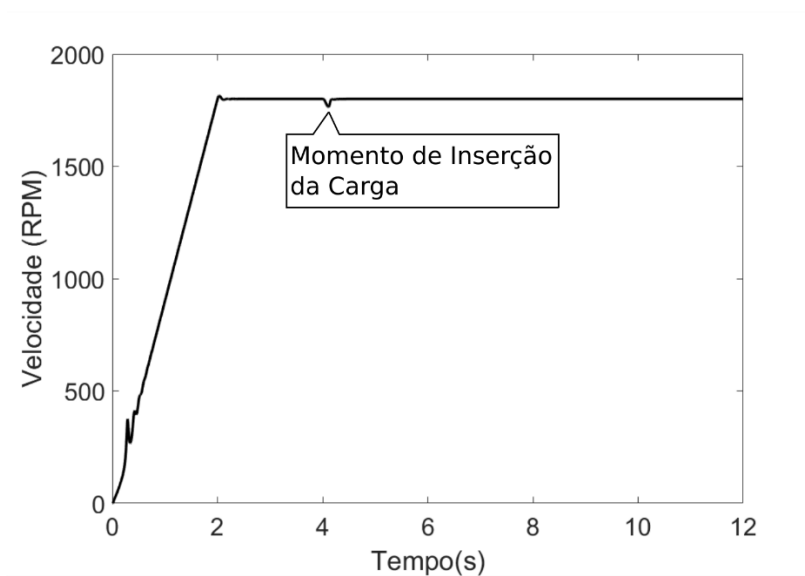


Figura 5-4 - Conjugado Produzido pelo GCC.

Fonte Autor.

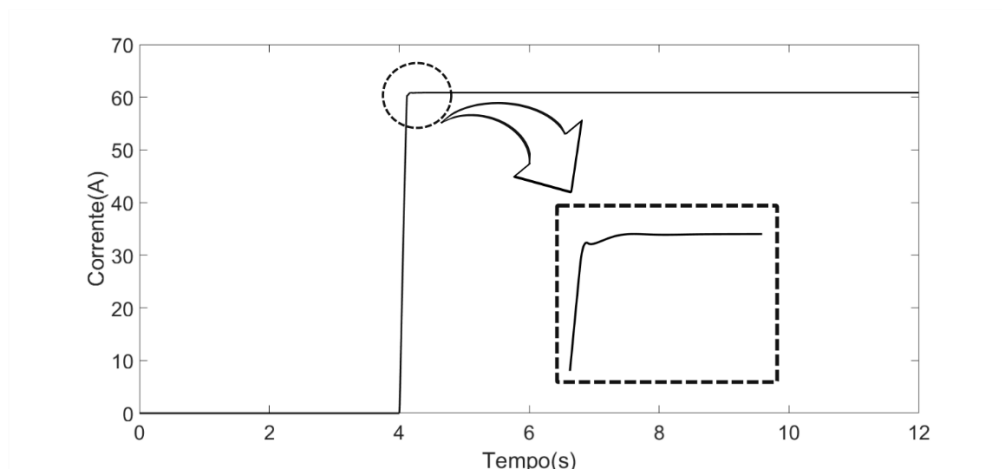


Figura 5-5 – Corrente na Armadura do GCC.

Fonte Autor.

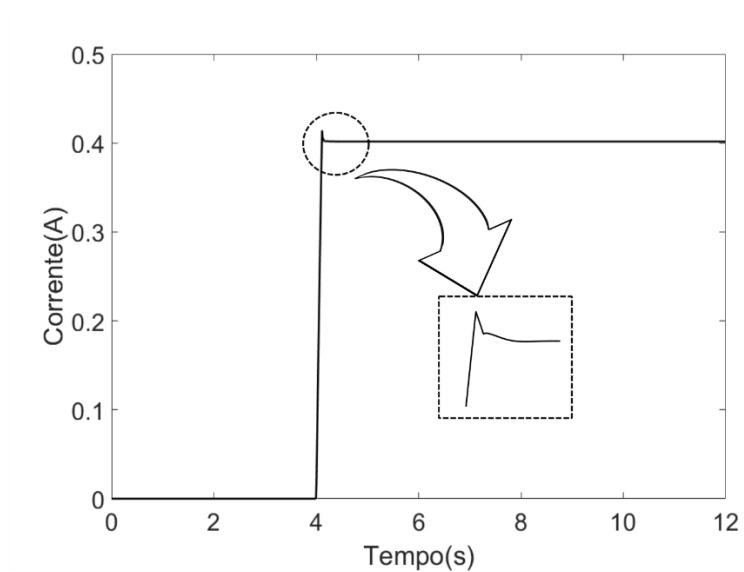


Figura 5-6 – Corrente no Enrolamento de Campo do GCC.

Fonte Autor.

5.4 Acionamento com um Triângulo de Carga

Neste segundo ensaio foi posto um sinal de referência no formato triangular para o controlador. Assim como no ensaio anterior o MS é acionado até entrar em regime permanente, conectado ao GCC. No instante 4 segundos, é solicitado do GCC um conjugado conforme mostrado na figura 5.7. O torque de referência cresce em uma taxa de $14,666\text{N.m/s}$, e alcança 44N.m no instante 7 segundos. Em seguida, o mesmo torque de referência decresce com a mesma taxa de subida, agora negativa, atingindo zero no instante 10 segundos. Após os 4 segundos, a figura 5.7 mostra um comportamento oscilatório do conjugado do GCC em torno da referência. Isso acontece, pois, o enrolamento de campo apresenta uma constante de tempo que influencia no período da corrente circular no enrolamento e criar um campo magnético que irá atuar no torque do GCC. Mediante isso, o torque produzido apresenta esse transitório rápido, se estabelecendo depois de poucos milissegundos.

Em torno de 10 segundos também pode ser observada, em amplitude maior que o caso anterior, uma divergência entre os dois conjugados. Diante do enrolamento de campo mostrar-se altamente indutivo, conforme dados da tabela 1, a energia presente nas bobinas que constituem o enrolamento demanda um certo tempo até que seja totalmente descarregada. Isso influencia na corrente de campo que, conforme o perfil de corrente da figura 5.9, em torno de 10 segundos, exige um tempo até alcançar o valor nulo. Perante o exposto, fica simples entender o comportamento do conjugado na figura 5.7, em torno de 10 segundos, devido a relação entre o torque eletromagnético e a corrente de campo.

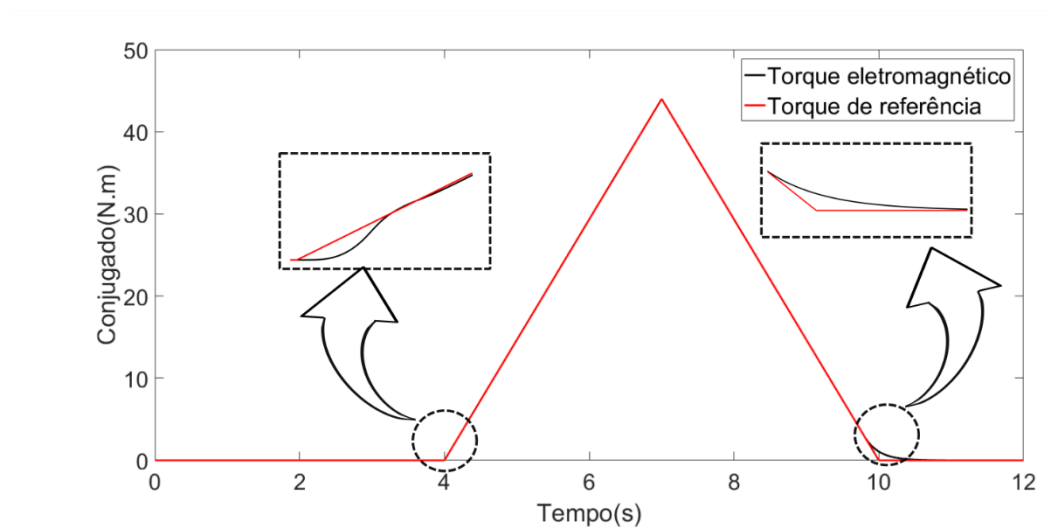


Figura 5-7 - Conjugado Produzido pelo GCC.

Fonte Autor.

O Perfil de corrente que circula na armadura do GCC é ilustrado na figura 5.8.

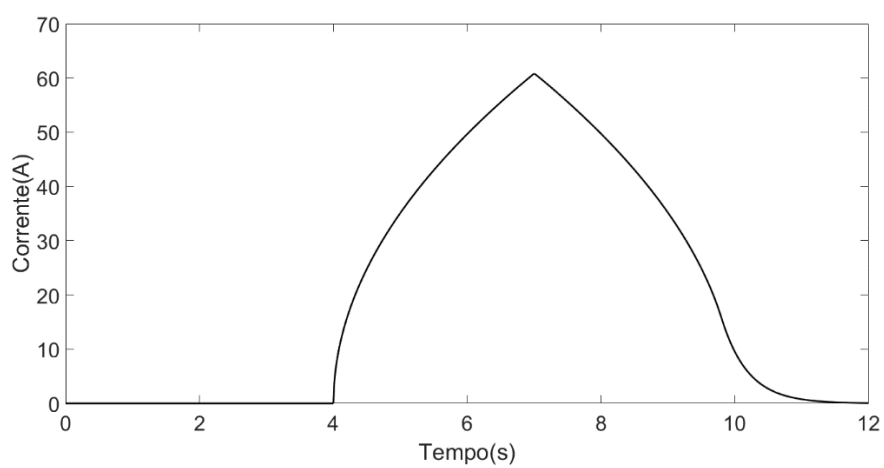


Figura 5-8 – Corrente na armadura do GCC.

Fonte Autor.

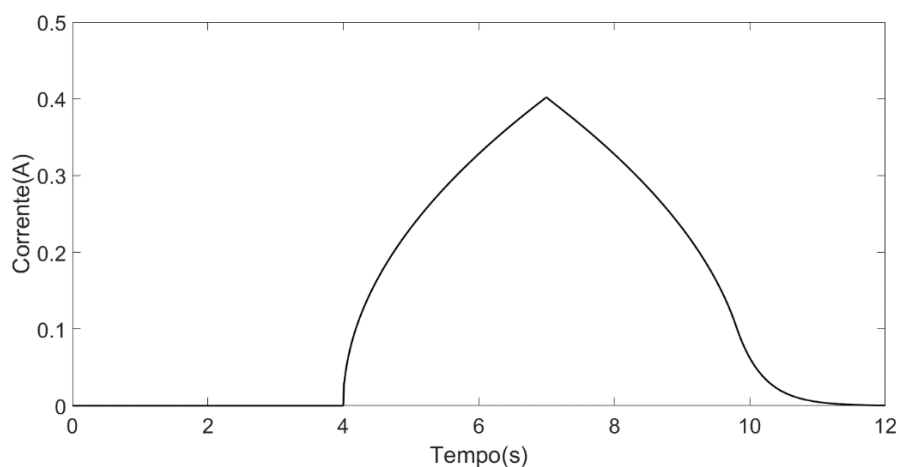


Figura 5-9 – Corrente no Enrolamento de Campo do GCC.

Fonte Autor.

5.5 Acionamento com uma Carga Parabólica

Uma carga com perfil parabólico também foi imposta ao controlador. Adiante será detalhada a modelagem matemática de todas as cargas mecânicas mencionadas. O sinal de referência inicia em 3 segundos e atinge 44 N.m em 7 segundos, assumindo o formato de uma parábola, conforme figura 5.10. Pode ser observado que o GCC atende o conjugado de referência sem dificuldade, além de não apresentar transitório de corrente, figura 5.11 e 5.12.

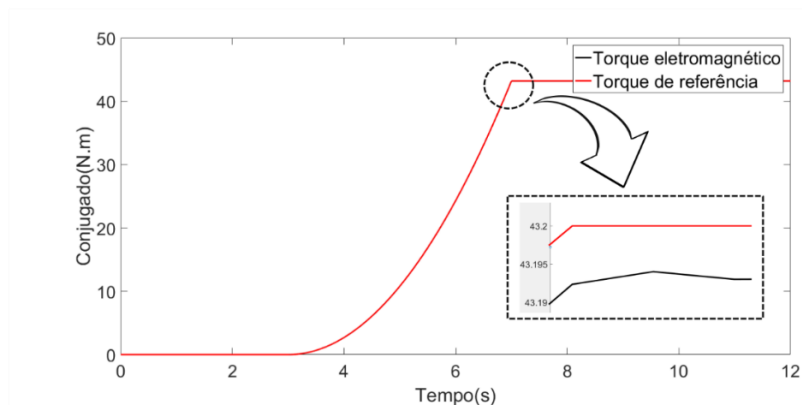


Figura 5-10 – Conjugado Parabólico Produzido pelo GCC.

Fonte Autor.

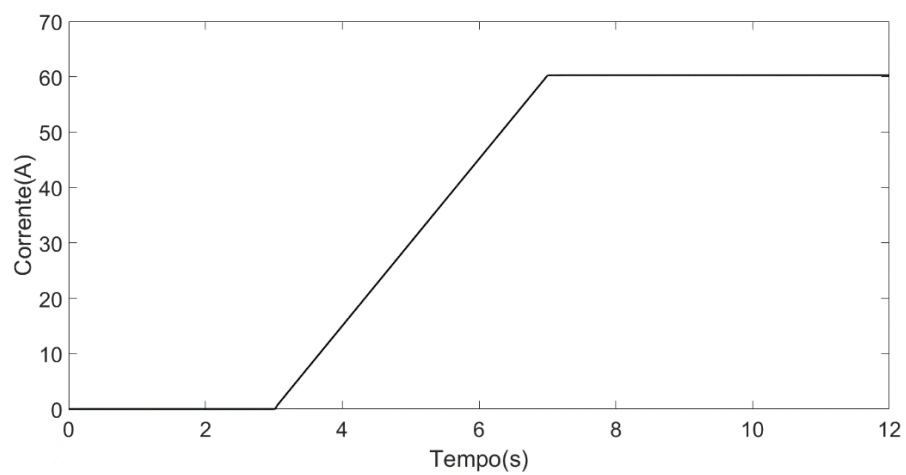


Figura 5-11 – Corrente na armadura do GCC.

Fonte Autor.

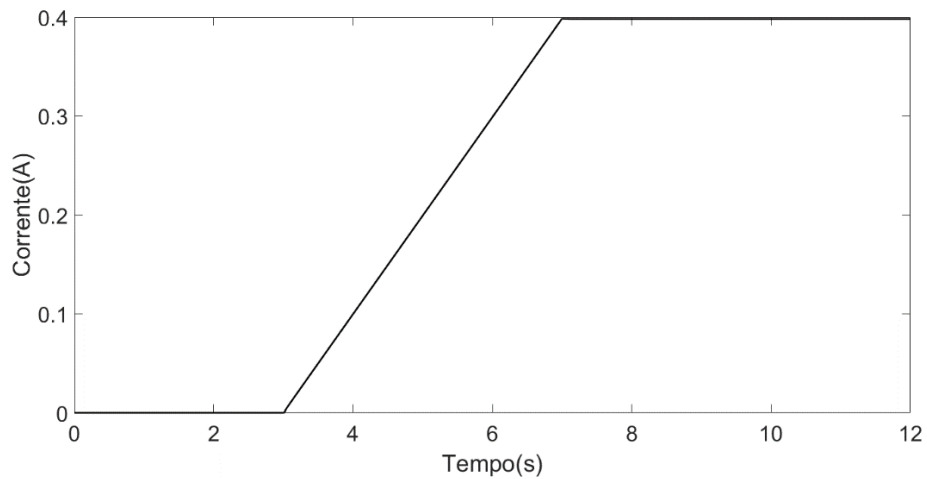


Figura 5-12 – Corrente no Enrolamento de Campo do GCC.

Fonte Autor.

5.6 Acionamento com uma Carga Hiperbólica

Neste ensaio foi adotado um conjugado hiperbólico. No instante 4 segundos foi solicitado um conjugado de 44 N.m do GCC. Em seguida o conjugado decresce com o passar do tempo, segundo uma função inversa. É notável que em torno de 4 segundos o conjugado produzido mostra um atraso em relação a referência, figura 5.13. A explicação para esse não seguimento da referência inicialmente deve-se a constante de tempo do enrolamento de campo, de acordo com o exposto no item 5.4. Na figura 5.16 está a tensão no enrolamento de campo, onde é possível observar que em 3 segundos é aplicada a tensão máxima de 300V, com o objetivo de zerar o erro entre a referência e o conjugado no eixo do GCC.

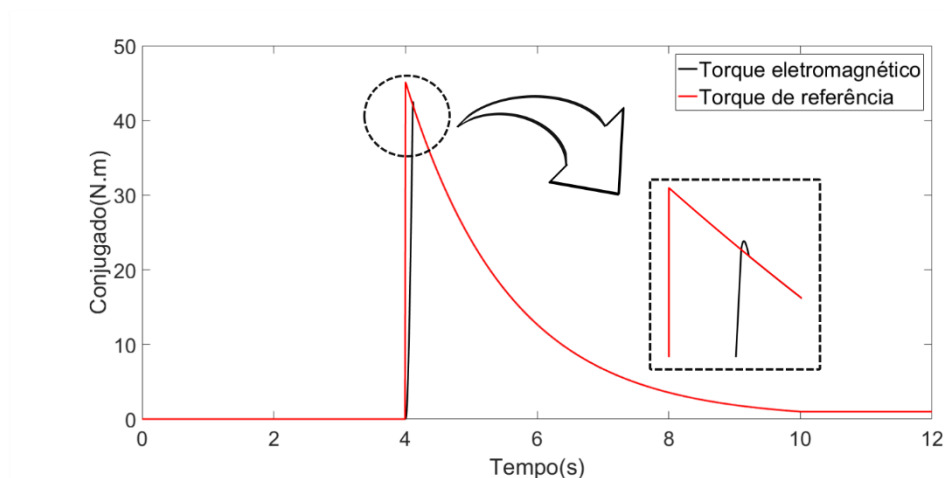


Figura 5-13 – Conjugado Hiperbólico Produzido pelo GCC.

Fonte Autor.

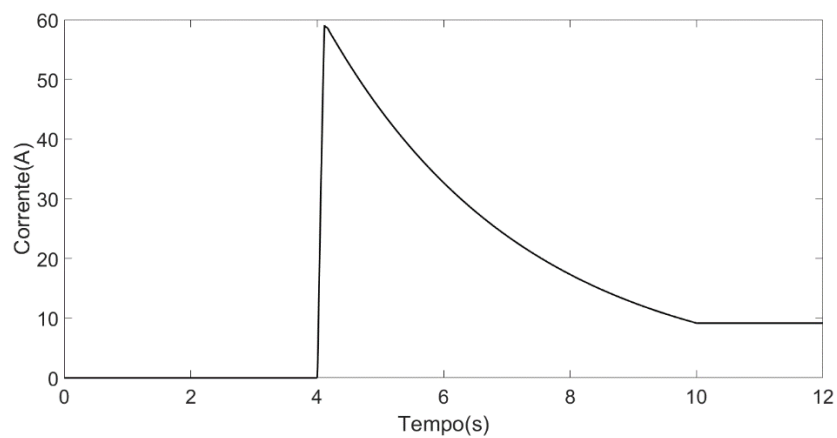


Figura 5-14 – Corrente na armadura do GCC.

Fonte Autor.

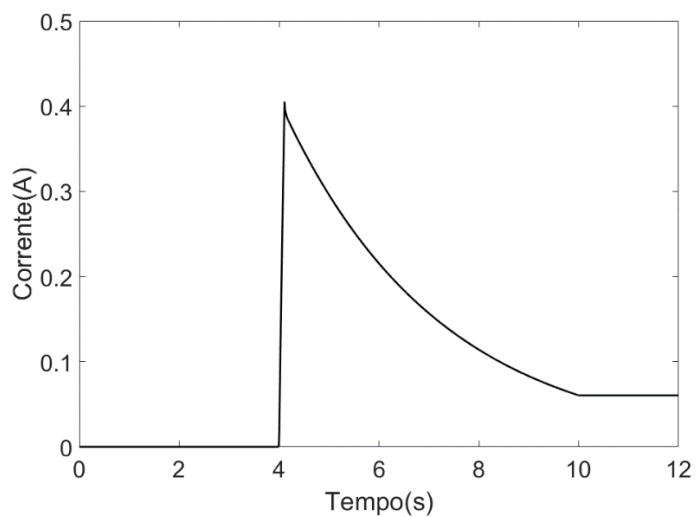


Figura 5-15 – Corrente no Enrolamento de Campo do GCC.

Fonte Autor.

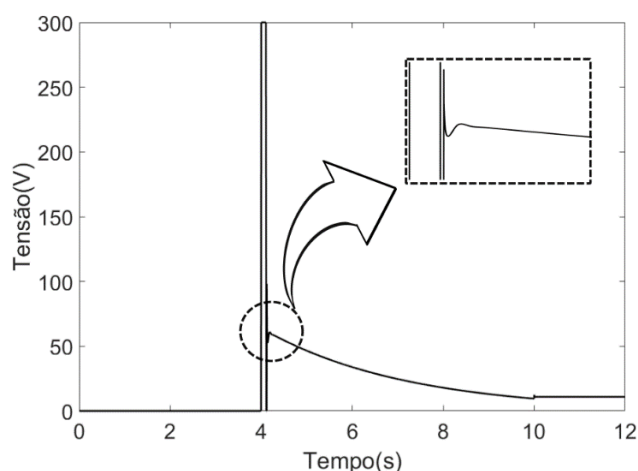


Figura 5-16 – Tensão no Enrolamento de Campo do GCC.

Fonte Autor.

5.7 Modelo Computacional da Máquina Síncrona

Como mencionado, *SymPowerSystem* é uma área do Simulink e contém uma biblioteca com modelos de máquinas síncronas, assíncronas e CC. É possível encontrar 6 modelos diferentes de máquinas síncronas trifásicas, com parâmetros em unidades SI e em pu. A máquina síncrona pode operar como motor ou gerador, dependendo do sinal de potência mecânica P_m , figura 5.17. Em regime de gerador, P_m é maior que zero e opera como motor para P_m menor que zero [31]. De acordo com a figura 5.17, é possível acessar as fases ABC, a entrada para alimentação do enrolamento de campo V_f , a entrada de potência mecânica PM, assim como um sinal que dá acesso a todas informações elétricas e mecânicas pertinentes a dinâmica de operação, m.

No presente projeto foi adotado o modelo da máquina síncrona com os parâmetros representados em unidades pu. O modelo leva em consideração a dinâmica dos enrolamentos do estator, campo e amortecedor. O circuito equivalente do modelo é

representado no referencial do rotor (quadro qd), com base nas equações (3.51) (3.56) (3.58). As equações da máquina síncrona são comumente resolvidas usando a técnica de transformação direta em quadratura zero. Uma técnica de tradução de dados calcula parâmetros fundamentais a partir de parâmetros padrão [32].

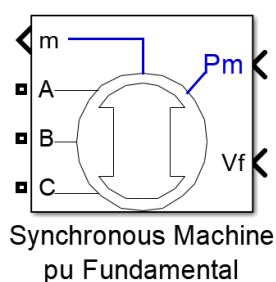


Figura 5-17 – Bloco que Representa uma Máquina Síncrona no Simulink.

Fonte [31].

Ao acessar o modelo da máquina o usuário tem a opção de simular uma máquina existente ou inserir os valores e simular uma outra. A outra configuração é definir a entrada mecânica, podendo ser tanto a potência mecânica quanto a velocidade do eixo, ambas em pu. O usuário também tem a opção de escolher uma máquina de rotor cilíndrico ou polos salientes, figura 5.18 - (a).

Os parâmetros podem ser inseridos conforme a figura 5.18 - (b). Podem ser descritos como:

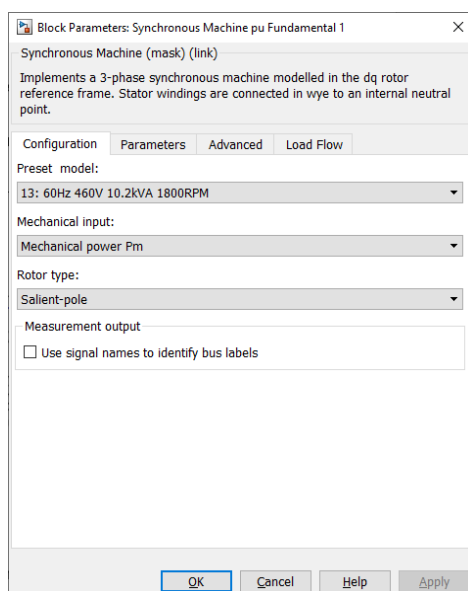
- [**Pn(VA) Vn(Vrms) fn(Hz)**]: Potência nominal, tensão linha a linha e frequência, respectivamente.
- [**Rs LI Lmd Lmq**] (**pu**): Resistência nos enrolamentos do estator, indutância de fuga, indutância de magnetização no eixo d e indutância de magnetização no eixo q, respectivamente.
- [**Rf Lofd**] (**pu**): Resistência de campo e indutância de fuga, respectivamente. Ambas referidas ao estator.

-
- **[Rkd Llkd Rkq1 Llkq1] (pu)**: Resistência do eixo d, indutância de fuga, resistência do eixo q, e indutância de fuga, respectivamente. Esses valores referem-se a um rotor de polos salientes. Todos referem-se ao estator.
 - **[H(s) F(pu) p()]**: Coeficiente de inércia, Fator de atrito e número de pares de polos, respectivamente.
 - **[dw(%) th(deg) ia,ib,ic(pu) pha,phb,phc(deg) Vf(pu)]**: Desvio de velocidade inicial, ângulo elétrico do rotor, magnitude de corrente de linha ia, ib, ic, ângulos de fase pha, phb, phc, e a tensão de campo inicial, respectivamente.

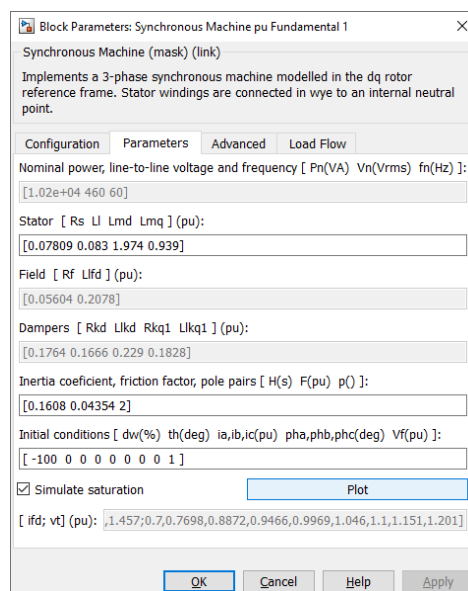
A figura 5.19 estabelece aspectos internos da modelagem da máquina. Existem dois subsistemas: Um elétrico e outro mecânico. O subsistema mecânico foi expandido na figura 5.20. Segundo a modelagem do subsistema mecânico a potência mecânica e o torque eletromagnético são variáveis de entrada. Inicialmente é feito o cálculo do torque mecânico, a partir da potência mecânica e da velocidade angular do eixo, $T_m = P_m / \omega_e$. Em seguida, com auxílio de um bloco somador, do torque mecânico é subtraído o torque eletromagnético e um torque devido ao atrito interno, implicando em um conjugado resultante. Dando continuidade na programação em blocos, com o auxílio de um bloco de ganho com o coeficiente de inércia H, e após uma integração, a velocidade resultante é calculada no eixo da máquina. Posteriormente, seis sinais que caracterizam a máquina mecanicamente são enviados a um multiplexador.

No subsistema elétrico, figura 5.21, as tensões são convertidas para o referencial d-q, e depois de passar pelo modelo da máquina são transformadas para o sistema trifásico novamente. Os fluxos em eixo direto, quadratura, devido às fases do estator referidas, devido ao enrolamento amortecedor e ao enrolamento de campo podem ser mensurados e mostrados para o usuário. As potências ativa e reativa também são computadas e enviadas a um multiplexador. Outro parâmetro fundamental no estudo

da máquina síncrona é o ângulo de carga que é calculado e pode ser analisado detalhadamente.



(a)



(b)

Figura 5-18 – (a) Configurações Iniciais do Modelo. (b) Inserção dos Parâmetros Elétricos e Mecânicos no Modelo.

Fonte [31].

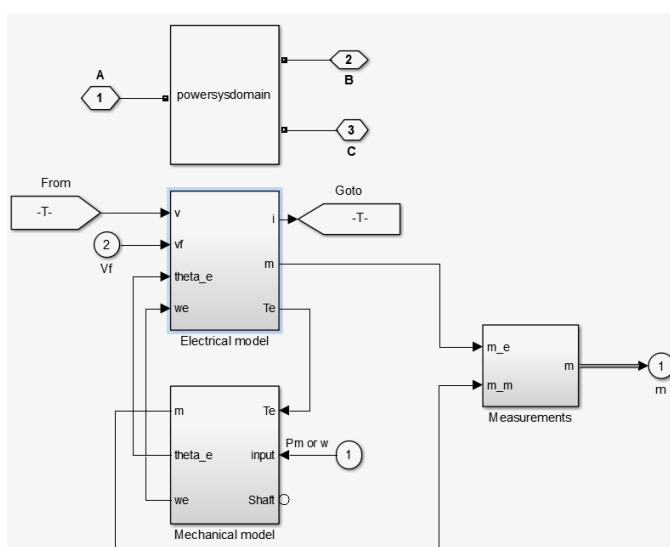


Figura 5-19 – Bloco que Representa uma Máquina Síncrona no Simulink.

Fonte [31].

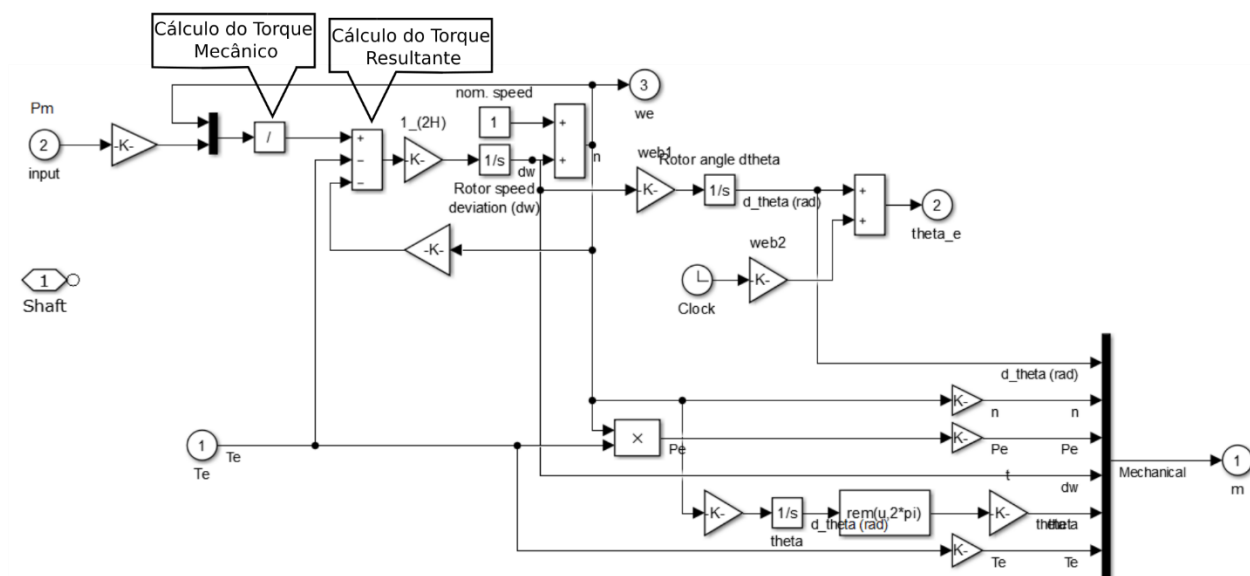


Figura 5-20 – Subsistema com Modelo Mecânico.

Fonte [31].

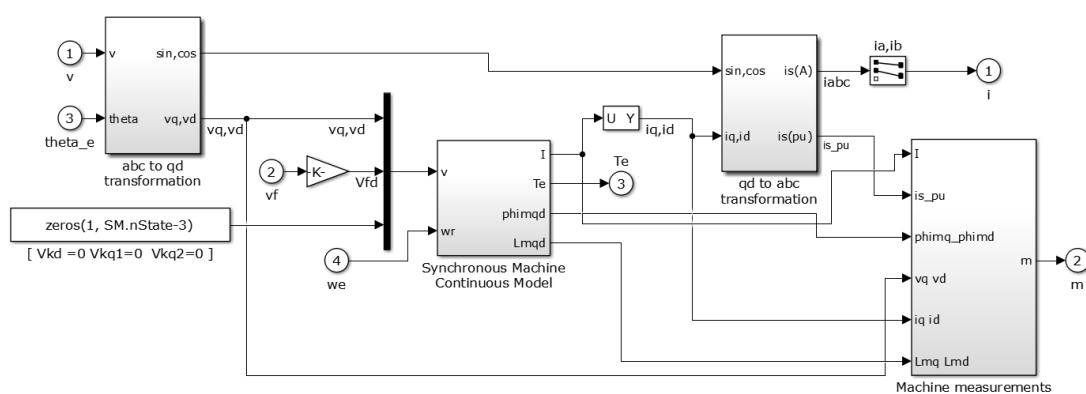


Figura 5-21 – Subsistema com Modelo Elétrico.

Fonte [31].

Foi feita a simulação do modelo da máquina síncrona apresentada. Foi adotado um modelo predefinido do simulink e os parâmetros são apresentados na figura 5.18. O diagrama de blocos implementado no simulink está na figura 5.22. Com o auxílio de uma fonte de frequência variável trifásica, a máquina síncrona foi acionada operando como motor. A fonte de frequência variável leva a máquina do repouso até uma velocidade próxima a síncrona em 2 segundos, em uma taxa de variação da frequência de 30Hz/s. A máquina sai do repouso com o devido apoio dos enrolamentos amortecedores e do enrolamento de campo. Quando o motor síncrono é acionado, a tensão CC de excitação não é aplicada ao enrolamento de campo. O motor é ligado no modo de máquina de indução com correntes induzidas no enrolamento amortecedor e enrolamento de campo. Um resistor é conectado ao enrolamento de campo para produzir uma corrente de campo aceitável e limitar a tensão induzida no mesmo enrolamento. Então, quando a velocidade atinge um valor próximo à velocidade síncrona, o enrolamento de campo é conectado à fonte de tensão CC e o motor sincroniza na frequência do sistema. No modelo de máquina síncrona adotado, os terminais de enrolamento de campo não estão disponíveis. Em vez disso, um sinal Simulink representando a tensão de campo deve ser aplicado na entrada Vf da máquina. Portanto, se a entrada Vf for deixada desconectada, uma tensão de campo zero é aplicada ao rotor. Em outras palavras, o enrolamento de campo está em curto-circuito. Na Simulação, a corrente de campo (idf) e um bloco de ganho (R_start) são usados para implementar a resistência conectada ao enrolamento de campo. No instante 3 segundos a excitação do enrolamento de campo é ativada, estabelecendo o sincronismo entre a máquina e a rede.

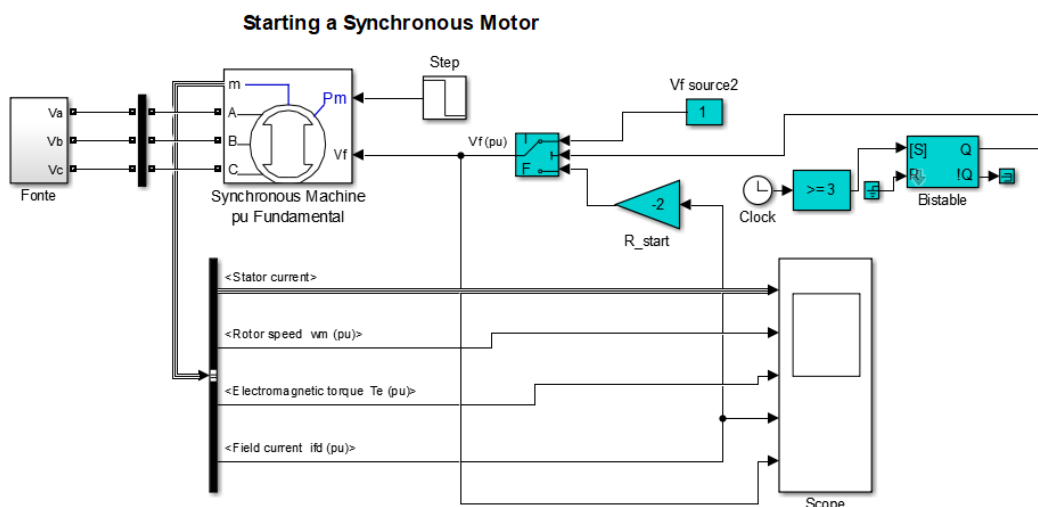


Figura 5-22 – Simulação Desenvolvida no Simulink.

Fonte autor.

As correntes nas fases da máquina síncrona apresentam um perfil típico de correntes transitórias nos enrolamentos de uma máquina de indução. As correntes nas fases do motor síncrono são constatadas na figura 5.23 - (a), onde a fase B chega a 18,2pu que é um valor aceitável, uma vez que é exigida uma energia reativa considerável, necessária na magnetização e formação de campos magnéticos das bobinas. Este fato pode ser verificado na figura 5.26 - (a), na qual o fator de potência é extremamente baixo, menor que 0,2, comprovando a necessidade da máquina síncrona em ser atendida por potência reativa operando a vazio.

É importante ressaltar o perfil de corrente do enrolamento de campo e do enrolamento amortecedor que estão em eixo direto, figura 5.23 - (b) e figura 5.25 - (a). A forma das correntes nestas bobinas é similar, exceto pela magnitude que se mostra menor no enrolamento amortecedor, em eixo direto. Isso acontece, pois, a forma de onda da indutância entre as fases e os dois enrolamentos é semelhante, que explica a similaridade das correntes, no entanto a magnitude das indutâncias é diferente que explica o porquê de uma corrente ser maior que a outra. Verificar a matriz de

indutâncias da máquina (3.11). Por outro lado, o perfil de corrente no enrolamento em quadratura apresenta-se de outra forma comparando aos anteriores, figura 5.25 - (b). Isso acontece, pois, um fluxo menor permeia o enrolamento, devido ao mesmo estar em quadratura com o eixo direto, implicando na não existência de indutância mútua em relação aos demais enrolamentos rotóricos. A não existência de indutância mútua provoca a anulação de fluxo mútuo, e, portanto, a não indução de correntes.

No instante em que a tensão é aplicada ao enrolamento de campo, 3 segundos, as correntes nas fases sofrem uma redução, pois a quantidade energia reativa oriunda da fonte diminui, uma vez que a máquina síncrona com o campo excitado funciona como compensador síncrono, figura 5.23 – (a) e (b). A carga mecânica nominal de 1pu é aplicada no eixo do motor em 4 segundos. A partir deste momento, as correntes no estator voltam a crescer e ficam próximas a 1pu, já que a fonte precisa entregar potência elétrica para o acionamento da carga. A figura 5.24 – (b) ilustra muito bem o processo de inserção de carga. Na figura o torque eletromagnético desenvolvido internamente oscila durante a partida se estabelecendo em valores próximos de zero em seguida, devido às perdas internas de atrito inerentes à máquina. Ao aplicar a carga, o conjugado interno oscila e se estabelece próximo a -1 pu. Outro ponto a ser analisado, sobretudo no que se trata de estabilidade da máquina, é o ângulo de carga detalhado no item 2.6. Em regime permanente o ângulo de carga fica próximo a -33° , que é uma posição aceitável do dipolo magnético do rotor em relação ao dipolo magnético do estator, considerando que a carga é a nominal e a máquina encontra-se longe da zona de instabilidade, 5.26 – (b).

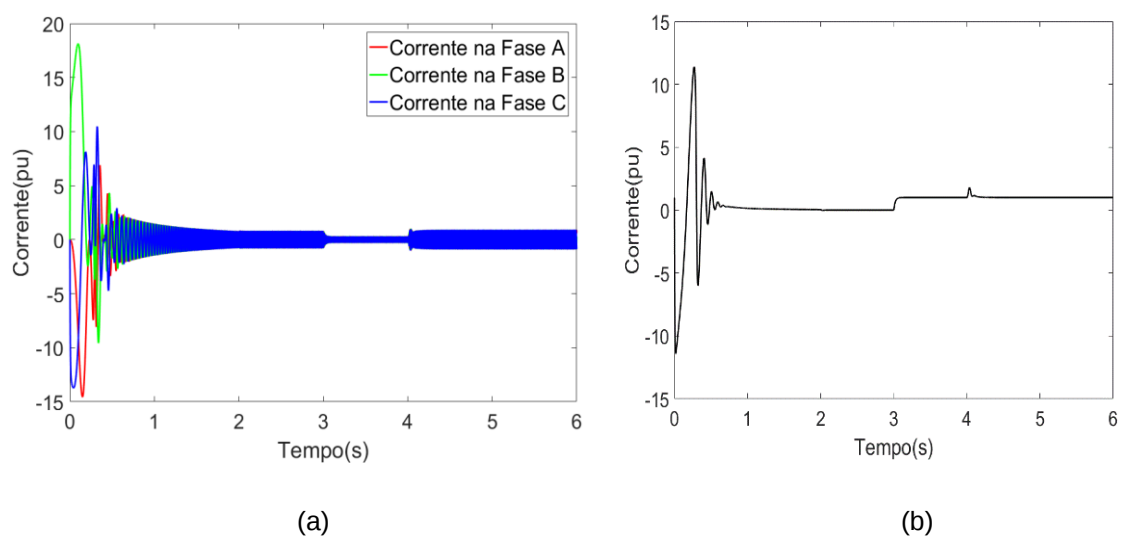


Figura 5-23 - (a) Correntes nas fases. (b) Corrente no Enrolamento de Campo

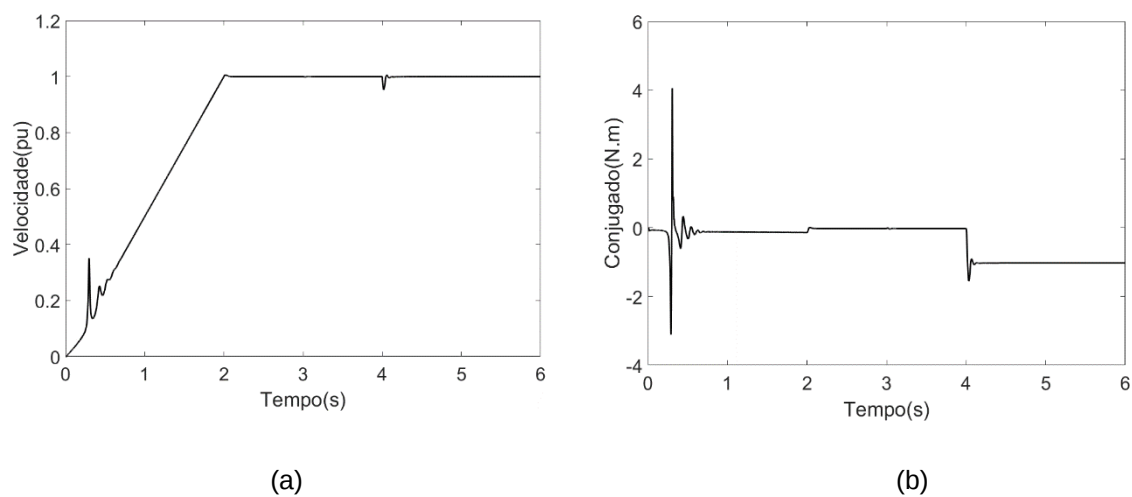


Figura 5-24 - (a) Velocidade. (b) Conjugado Eletromagnético

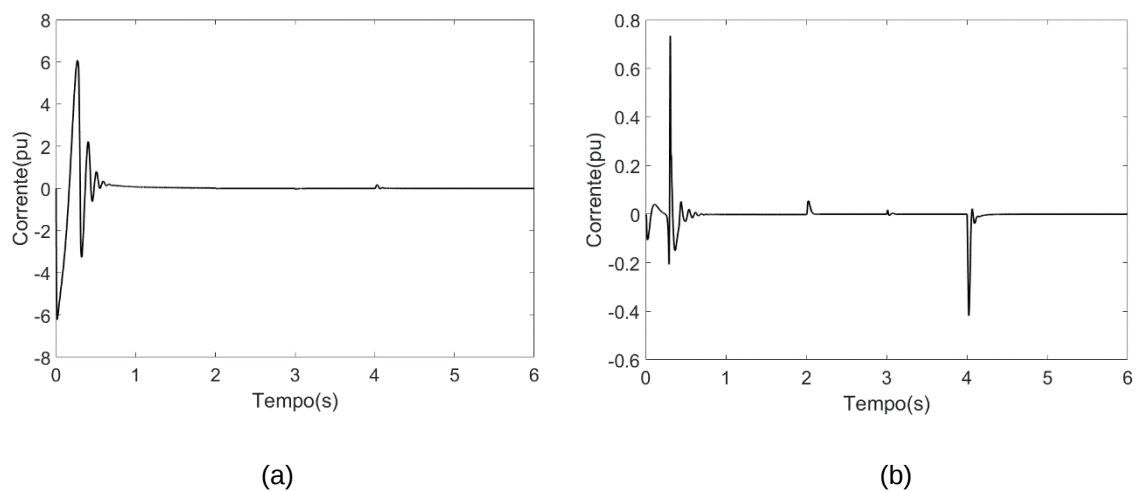


Figura 5-25 - (a) Corrente no Enrolamento Amortecedor em Eixo Direto. (b) Corrente no Enrolamento Amortecedor do Eixo em Quadratura.

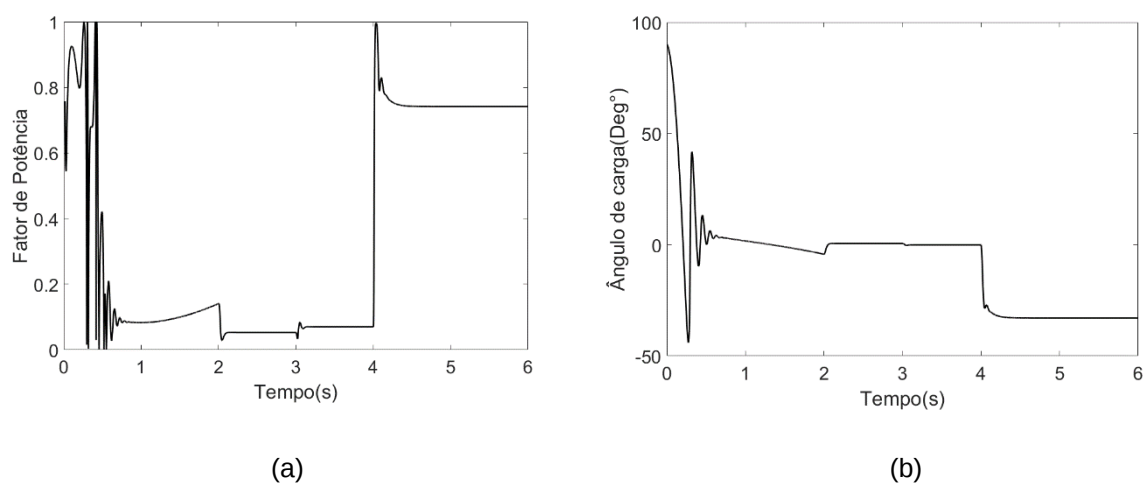


Figura 5-26 - (a) Fator de Potência. (b) Ângulo de Carga.

5.8 Conclusão

Neste capítulo foi apresentado o funcionamento do diagrama de blocos da figura 4.3, que representa um GCC. Foram inseridos os parâmetros de uma MCC existente no *simulink* no diagrama da figura 4.3. Adiante foi mostrado o controlador PI adotado e os ganhos para o seu correto funcionamento sobre o GCC.

Em seguida, foram realizadas simulações no ambiente de simulação do *simulink*, onde as cargas mecânicas produzidas pelo GCC foram validadas e analisadas detalhadamente.

A máquina síncrona existente no *simulink* também foi apresentada neste capítulo, no qual foram feitas simulações com objetivo de entender o comportamento das variáveis elétricas e mecânicas frente a inserção de cargas.

6 CAPÍTULO 6 – SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DO MOTOR SÍNCRONO CONECTADO AO GERADOR CC

6.1 Introdução

No capítulo anterior foi detalhado o modelo computacional do GCC e do MS implementados no simulink. Foram feitas diversas simulações com o objetivo de validar o modelo computacional. O desempenho do GCC foi analisado produzindo cargas mecânicas variadas impostas pelo controle PI atuando na tensão de campo. O comportamento dinâmico do MS também foi estudado, onde a modelagem da máquina síncrona já existente no simulink foi adotada nas simulações. Foi feita uma análise detalhada das curvas que descrevem os parâmetros elétricos e mecânicos da máquina ao longo da simulação, sempre fazendo uma relação com o que estabelece a literatura de máquinas elétricas em relação a prática. As simulações desenvolvidas comprovaram a robustez do modelo computacional e possibilitaram o avanço nos estudos que serão apresentados ao longo deste capítulo.

O objetivo central deste capítulo é entender o comportamento do MS conectado ao GCC partindo o MS do repouso à velocidade síncrona, onde um conjugado de carga imposto ao MS, que depende da velocidade, também cresce de acordo com o perfil de carga mecânica escolhida. Será feita uma descrição da estratégia de partida do MS adotada, que não pode acontecer com o enrolamento de campo excitado, conforme detalhado no item 2.6. A modelagem matemática das cargas mecânicas em função da velocidade será mostrada.

6.2 Considerações Iniciais

Diferentemente do capítulo anterior, no qual o desempenho do controle sobre o GCC foi analisado sem a variação da velocidade, que é uma variável que atua diretamente na operação do CGG, neste capítulo o conjugado será produzido com a

variação da velocidade. Desse modo, será verificada a efetividade real do controle sobre a máquina, frente a variação da velocidade. Em relação aos parâmetros elétricos e mecânicos do MS assim como do GCC foram adotados os mesmos do capítulo anterior. Os ganhos do controle PI também foram mantidos.

A figura 6.1 mostra a modelagem computacional das cargas mecânicas implementadas no simulink que são a referência de atuação do controle PI. As expressões matemáticas para as cargas são as seguintes:

- Carga hiperbólica: $C_c = 55e^{-0,003*n}$ (6.1)

- Carga parabólica: $C_c = 1,355 * 10^{-5} * n^2$ (6.2)

- Carga linear: $C_c = 0,02444 * n$ (6.3)

- Carga em degrau: $C_c = 44$ (6.4)

Em que C_c é o conjugado em (N.m) e n é a velocidade no eixo do MS em (RPM). De acordo com a figura 6.1, o sinal de entrada das funções matemáticas é a velocidade do MS. Um flip-flop foi inserido entre a entrada das funções e o sinal de velocidade, pois o sistema deve produzir as cargas após 4,06 segundos, que é o instante em que o MS é acionado de uma velocidade próximo de zero. Essa escolha de tempo foi feita com o objetivo de visualizar o conjugado variando com a velocidade, que é o que ocorre na prática, conforme estabelecido anteriormente. O sinal de saída alimenta o bloco sistema de controle, figura 6.2.

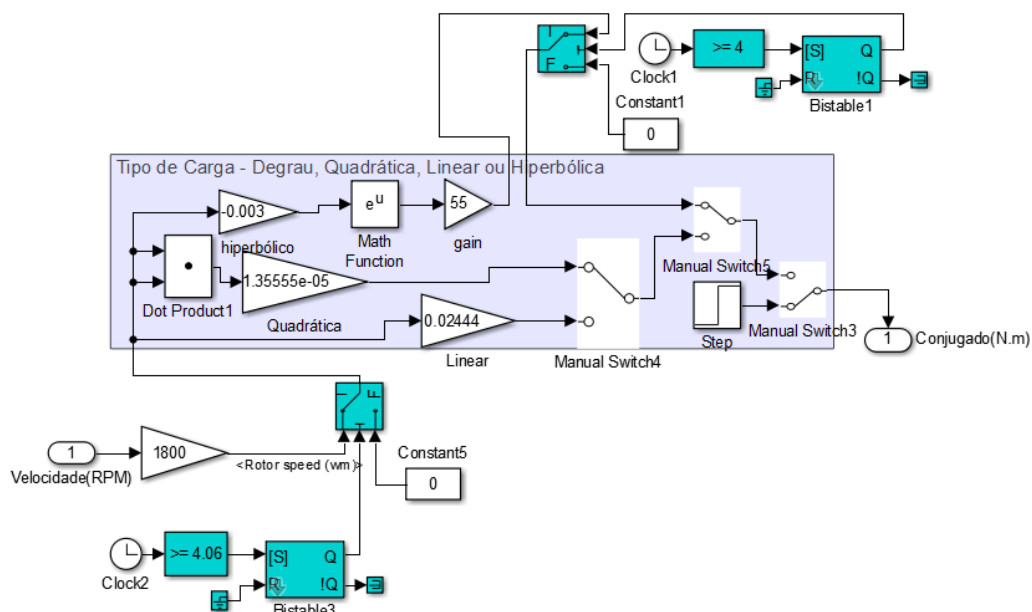


Figura 6-1 – Modelagem computacional das cargas mecânicas de referência.

Fonte Autor.

A figura 6.2 apresenta a plataforma de simulação desenvolvida. A excitação do campo da máquina síncrona segue a mesma metodologia estabelecida no item 5.7. Os subsistemas das figuras 5.1 e 6.1 estão inseridos nos blocos Cargas mecânicas, Sistema de Controle e Gerador CC da plataforma.

Devido a diferença entre o MS e o GCC na forma de entrada e saída dos dados foi necessário utilizar um bloco de conversão do conjugado gerado de N.m para pu, antes de inserir no MS. Foi utilizado um bloco com um ganho de $-1/43,3$. O torque nominal do MS em N.m é 43,3 Nm, que resulta em 1 pu no instante em que o GCC produzir o conjugado nominal. Antes de conectar as duas máquinas também foi necessário inserir um ganho de 1800 da velocidade do MS.

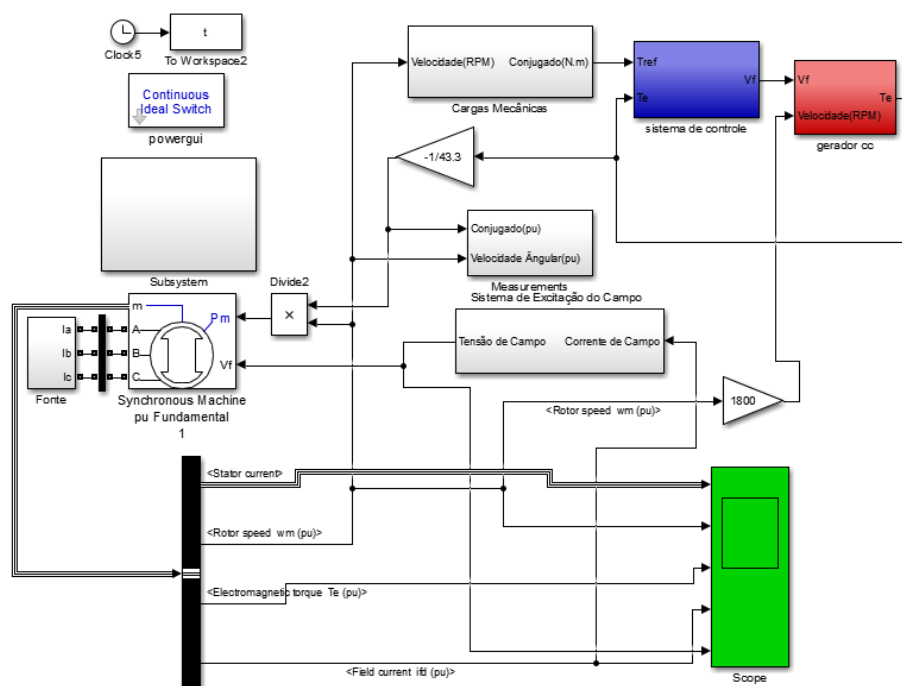


Figura 6-2 – Plataforma de simulação computacional do MS conectado ao GCC.

Fonte Autor.

6.3 Carga Hiperbólica

Inicialmente o MS foi simulado acionando uma carga com perfil hiperbólico. Antes de conectar a carga, o MS foi levado até uma velocidade próxima a síncrona através dos enrolamentos amortecedores, assim como no item 5.7. Foi utilizada a mesma fonte trifásica de frequência variável. A fonte produz um sinal de tensão trifásico que varia 30Hz/s possibilitando a máquina atingir a velocidade desejada em 2 segundos. No instante 2,2 segundos foi conectada a fonte CC ao enrolamento de campo, e então a máquina entrou em regime de sincronismo, como pode ser observado na magnitude das correntes que sofrem uma diminuição devido à redução de potência reativa absorvida, figura 6.4 – (a). Em seguida, de 3 a 4 segundos a máquina foi desacelerada até uma velocidade próxima a 0 pu, figura 6.3 – (b). Com isso, um grande esforço eletromagnético foi necessário, que explica o aumento significativo das correntes na figura 6.4 - (a) após 3 segundos. Posteriormente, a máquina foi acelerada novamente,

agora em sincronismo com a fonte de frequência variável e, em 4,06 segundos, submetida a uma carga que decresce de forma hiperbólica com o aumento da velocidade. Esse aumento na velocidade ocorre após 4 segundos, onde a frequência varia até o instante 10 segundos em uma taxa de 10Hz/s. Depois de 10 segundos a fonte mantém a frequência da tensão de alimentação no valor nominal. A figura 6.3 – (a) mostra a variação do conjugado produzido pelo GCC em função da velocidade, ambos em pu, entre 4 e 20 segundos.

Na figura 6.8 - (a), que mostra o conjugado eletromagnético produzido internamente, pode ser verificado o esforço realizado pela máquina para acionar uma carga de 1 pu (aproximadamente 44N.m) inserida instantaneamente no eixo. A expressão (6.1) estabelece a relação matemática entre o conjugado e a velocidade. Devido à carga decrescer com o aumento da velocidade, após 10 segundos o torque exigido pelo GCC vai a zero. No entanto, o torque eletromagnético interno do MS não vai a zero, pois existem perdas internas.

A variação abrupta da frequência em torno de 4 segundos, aliada a inserção de carga, causa uma perturbação eletromagnética significativa na máquina. A figura 6.4 – (b) pode ser usada para explicar o fenômeno, pois mostra a corrente no enrolamento de campo. Após 2,2 segundos a corrente se estabelece em torno de 1 pu, no entanto com a variação da alimentação por parte da fonte em torno de 4 segundos a máquina cria picos de corrente que variam de 8 a -8 pu no enrolamento de campo. Essa ação eletromagnética é tomada pela máquina para tentar se opor a variação de velocidade estabelecida pela fonte.

A mudança abrupta na frequência do fluxo de potência absorvido pela máquina também reflete no ângulo de carga do MS, figura 6.9. A transição em 4 segundos na velocidade faz com ocorra um fenômeno que pode ser entendido fisicamente como um avanço do dipolo do rotor em relação ao dipolo do estator. Assim, o ângulo de carga fica positivo instantaneamente, tal como a operação no modo gerador, e em seguida retorna para um valor que não é zero devido às perdas internas.

Outro parâmetro influenciado é o fator de potência da máquina, figura 6.8 – b. No regime permanente o valor extremamente baixo, abaixo de 0.2, pode ser justificado pela não existência de carga mecânica que resulta na ausência de demanda por potência ativa. Solicitando apenas potência reativa. As figuras 6.5, 6.6 e 6.7 mostram as correntes de alimentação de cada fase do motor, que apresentam um certo desequilíbrio em torno de transitórios, e em regime permanente são equilibradas.

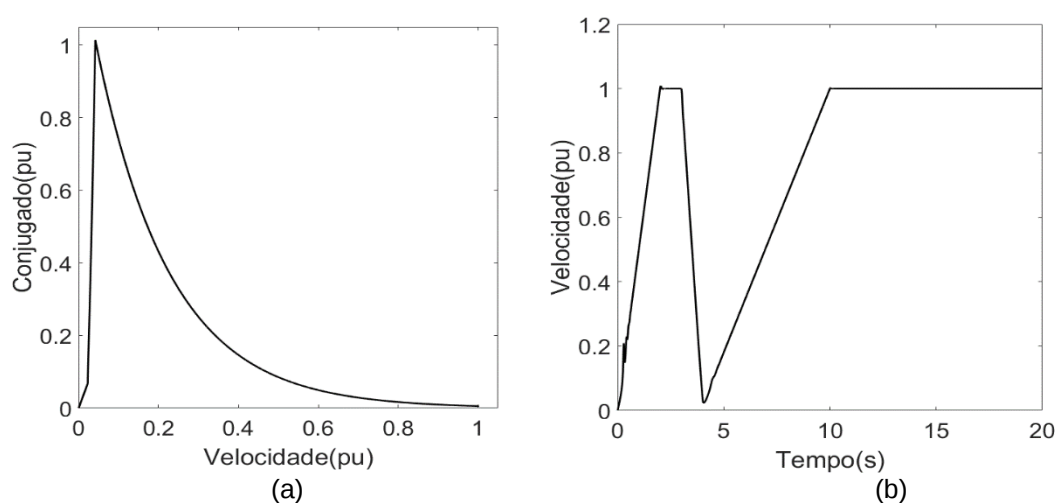
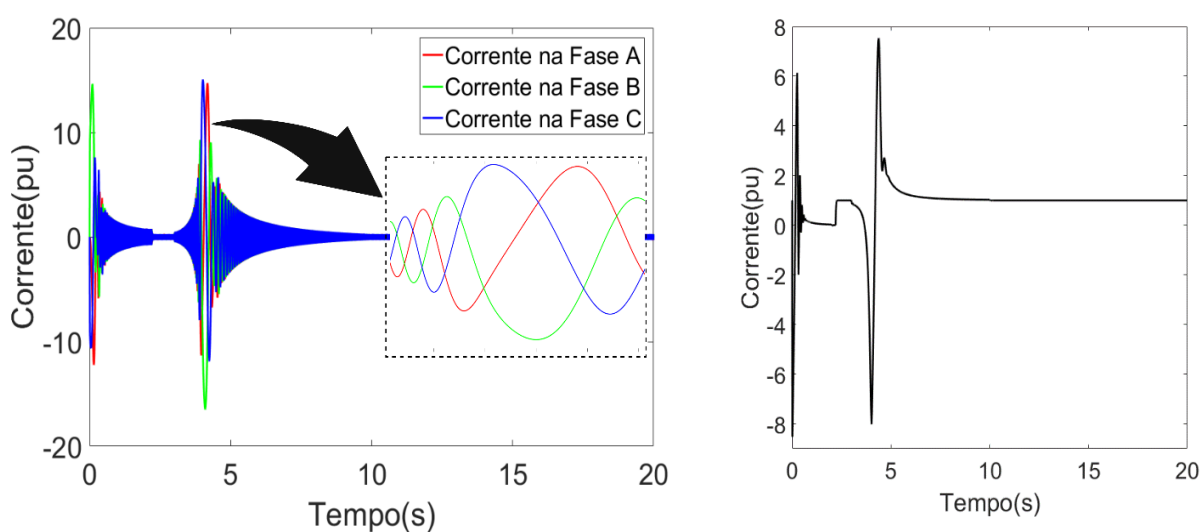


Figura 6-3 - (a) Curva Conjugado por Velocidade. (b) Velocidade.



(a)

(b)

Figura 6-4 - (a) Correntes nas Fases. (b) Corrente no Enrolamento de Campo.

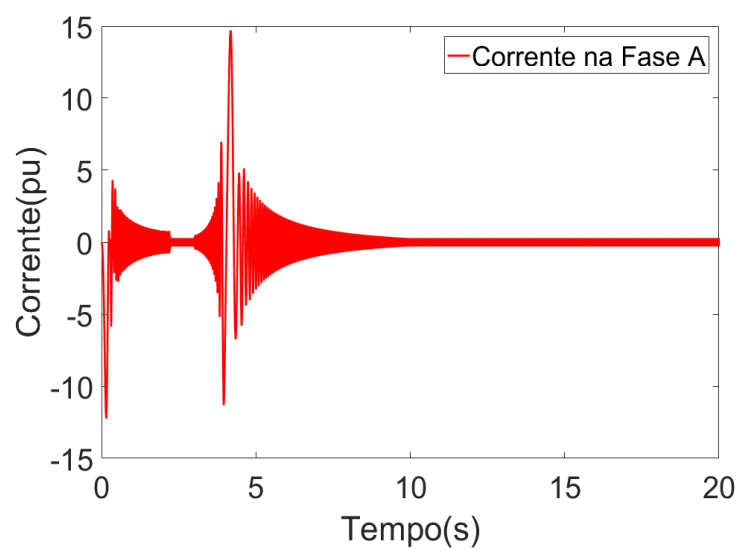


Figura 6-5 - Corrente na Fase A

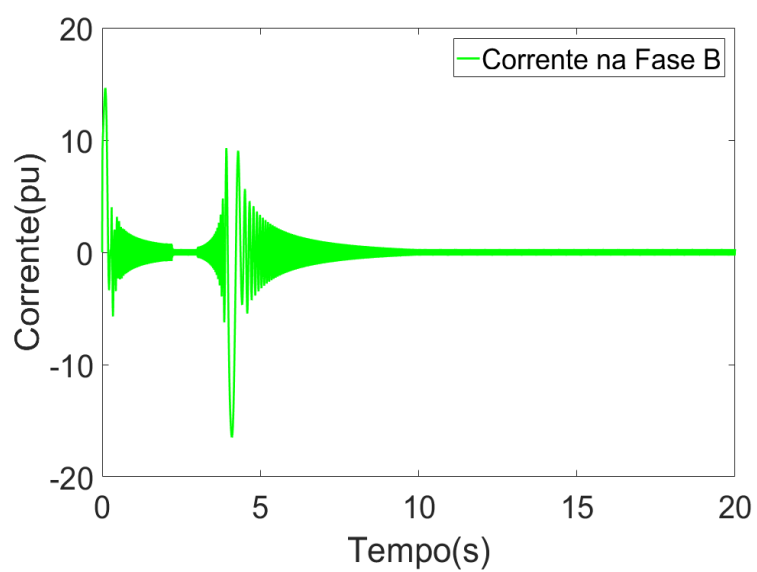


Figura 6-6 - Corrente na Fase B

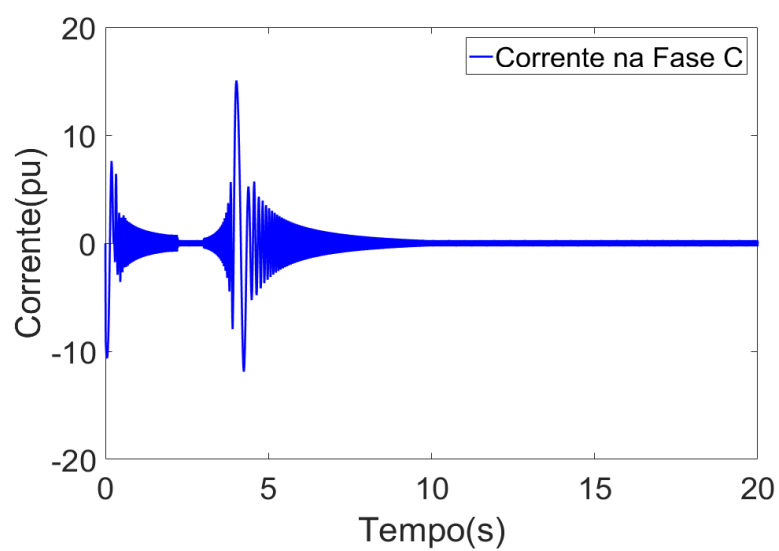
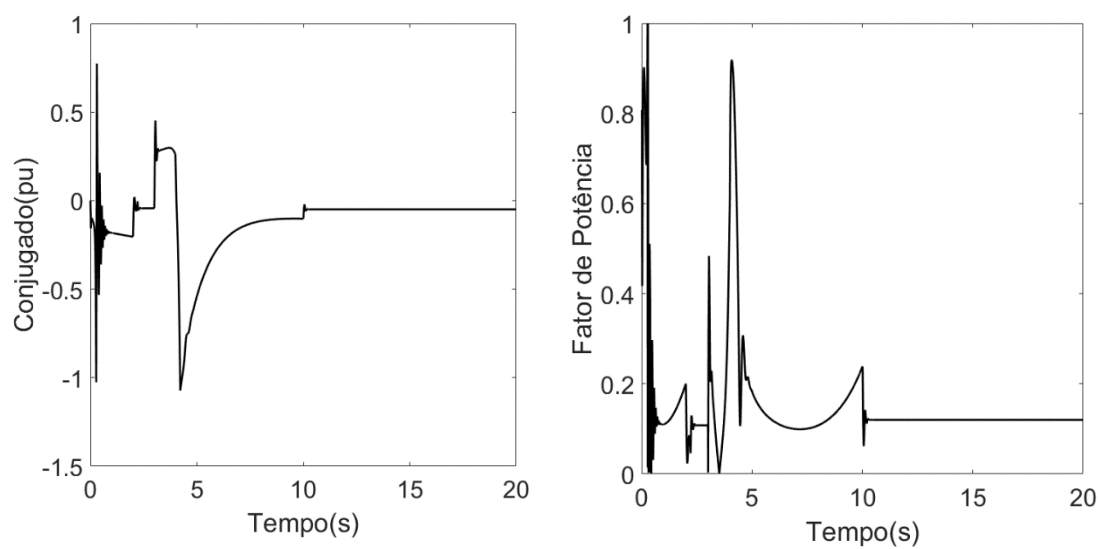


Figura 6-7 - Corrente na Fase C



(a) (b)

Figura 6-8 - (a) Conjugado Eletromagnético Interno. (b) Fator de Potência.

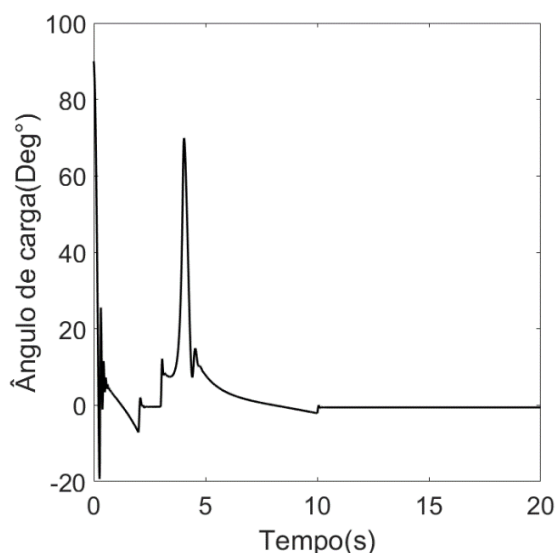


Figura 6-9 - Ângulo de Carga

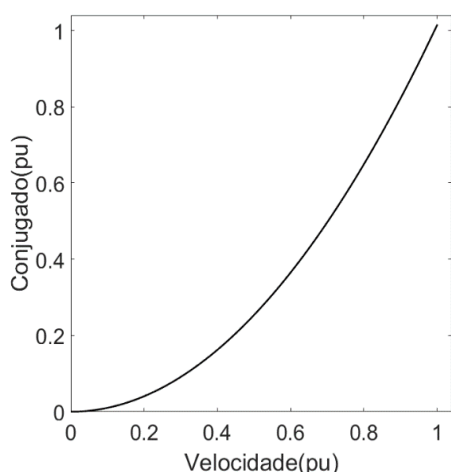
6.4 Carga parabólica

Assim como no caso anterior, a máquina neste ensaio foi levada ao sincronismo em 2,2 segundos. De 3 a 4 segundos foi desacelerada para a conexão da carga. A carga escolhida neste ensaio tem o perfil parabólico. A relação matemática que modela a carga é a expressão (6.2). A figura 6.10 – (a) foi obtida através da variação do conjugado com a velocidade no eixo de ligação entre as duas máquinas, entre 4,06 e 10 segundos. O coeficiente da expressão (6.2) foi adotado com o objetivo de fazer com que a carga mecânica seja igual a nominal quando a velocidade for igual a 1 pu. Estabelecendo isso é mais simples analisar o desempenho da máquina sem ultrapassar suas limitações nominais. A figura 6.14 – (a) ilustra o torque eletromagnético do MS e pode ser observado que a curva segue o mesmo

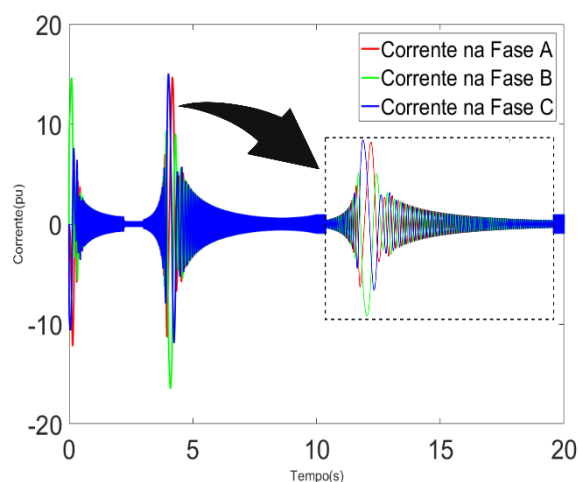
comportamento da figura 6.10 – (a) entre 4,06 e 10 segundos, comprovando que o conjugado solicitado pelo GCC está sendo atendido, além das perdas.

O perfil das correntes segue o mesmo comportamento do ensaio anterior até 4,06 segundos. Em seguida, com o aumento da solicitação por potência ativa, as correntes crescem atingindo 1 pu em 10 segundos. No caso do fator de potência, figura 6.15, que em alguns instantes mostra-se excessivamente baixo, com o aumento do consumo de potência ativa após 4,06 segundos, o mesmo se estabelece em torno de 0,728. O valor pode ser considerado baixo, mas pode ser facilmente corrigido atuando na tensão de excitação imposta ao enrolamento de campo da máquina. Com o aumento da excitação outros indicadores podem ser afetados, como o rendimento da máquina, por exemplo. No presente projeto não será realizada compensação de reativos alterando a excitação do enrolamento de campo.

O ângulo de carga mantém-se em torno de $-37,8^\circ$ para uma carga próxima a nominal, figura 6.14 – (b). A mudança no sentido do ângulo de carga em 4 segundos pode ser explicada da mesma forma do ensaio anterior. As figuras 6.11, 6.12 e 6.13 ilustram o comportamento das correntes em cada fase do motor síncrono.



(a)



(b)

Figura 6-10 - (a) Curva Conjugado por Velocidade. (b) Correntes nas Fases

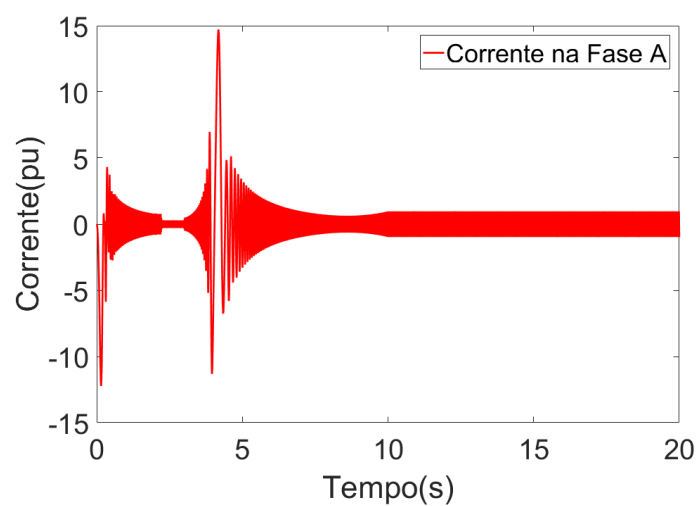


Figura 6-11 - Corrente na fase A

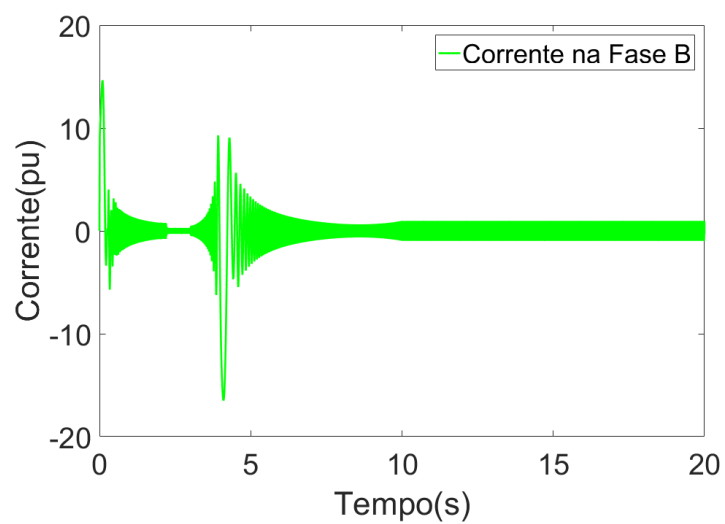


Figura 6-12 - Corrente na fase B

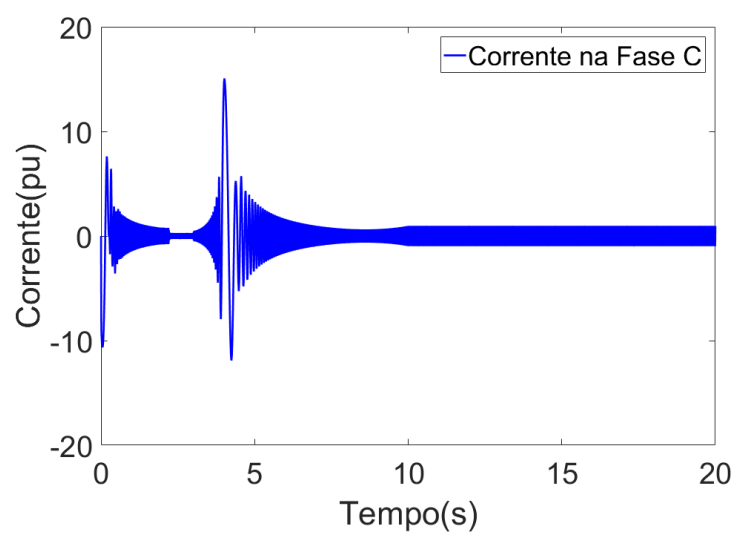


Figura 6-13 - Corrente na fase C

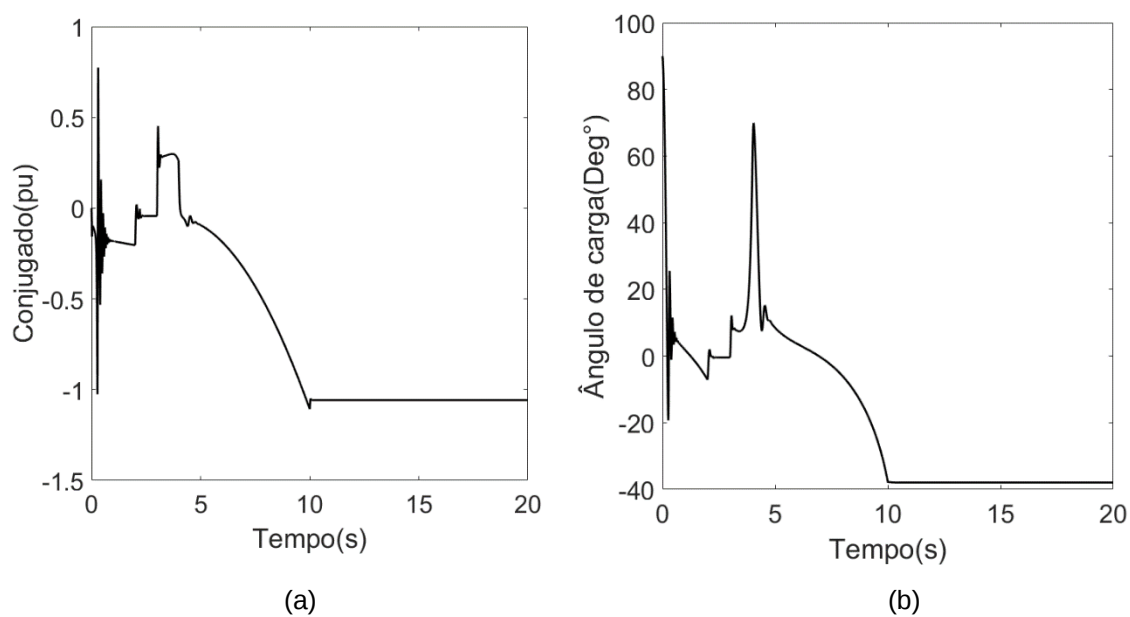


Figura 6-14 - (a) Perfil do Conjugado Eletromagnético Interno. (b) Ângulo de Carga.

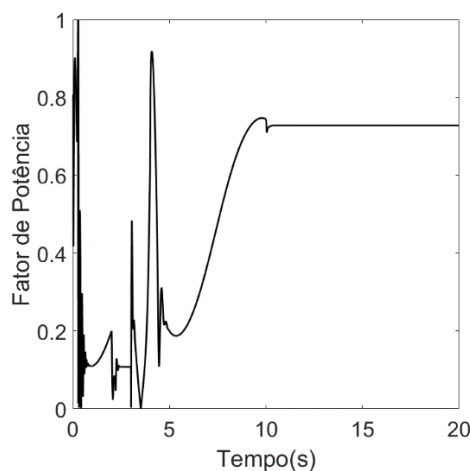


Figura 6-15 - Fator de Potência.

6.5 Carga Linear

Neste ensaio, com carga linear, é possível observar que a velocidade da máquina durante a desaceleração não fica igual a zero. Isso pode ser afirmado com base na curva da figura 6.16 – (a). Como o conjugado de referência é produzido a partir da velocidade instantânea, por volta de 4,06 segundos, instante em que a carga é conectada, entende-se que o rotor da máquina não ficou estático antes de acelerar novamente. Isso explica o pequeno degrau no início da curva 6.16 – (a) e porque o conjugado produzido pelo GCC não chega a zero.

Tal como no ensaio anterior foi feita uma modelagem matemática da carga mecânica a ser usada como referência para o controle PI. A expressão matemática é a (6.3). O coeficiente da equação, que multiplica a velocidade, foi adotado seguindo o mesmo critério do caso anterior.

Analisando a figura 6.20 – (a) novamente observa-se que o conjugado produzido pela máquina síncrona segue o mesmo comportamento da curva 6.16 – (a). O perfil de velocidade pode ser analisado na figura 6.3 – (b). As curvas 6.20 – (b) e 6.21, ângulo de carga e fator de potência, respectivamente, atingem os mesmos valores

finais no regime permanente do ensaio anterior, pois a carga final é a mesma. Nas figuras 6.17, 6.18 e 6.19 pode ser analisado o desempenho das correntes elétricas em cada fase de forma individual.

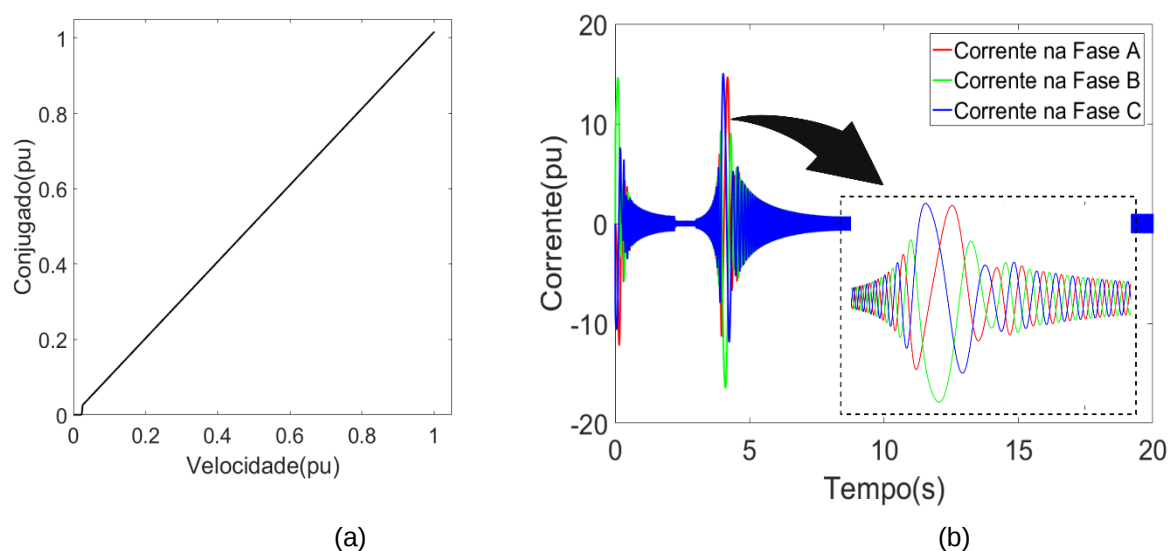


Figura 6-16 - (a) Curva Conjugado por Velocidade. (b) Correntes nas Fases.

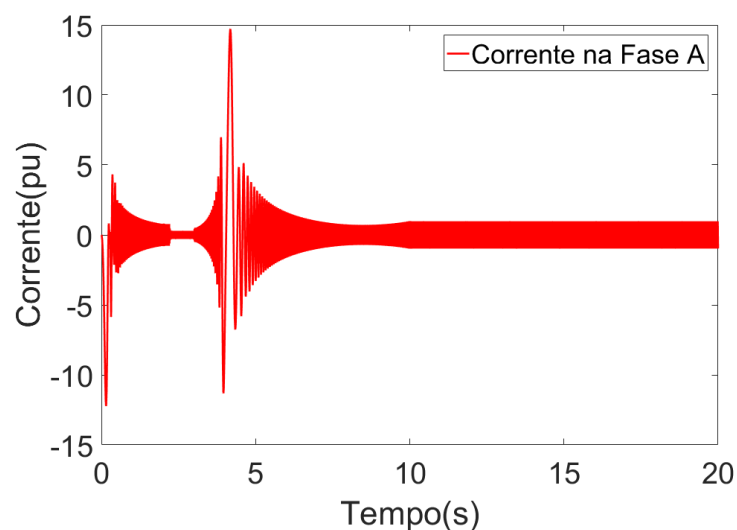


Figura 6-17 – Corrente na fase A

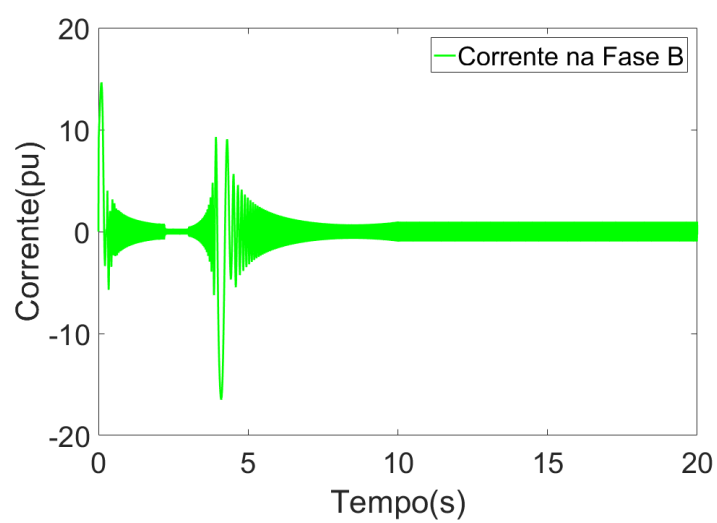


Figura 6-18 – Corrente na fase B

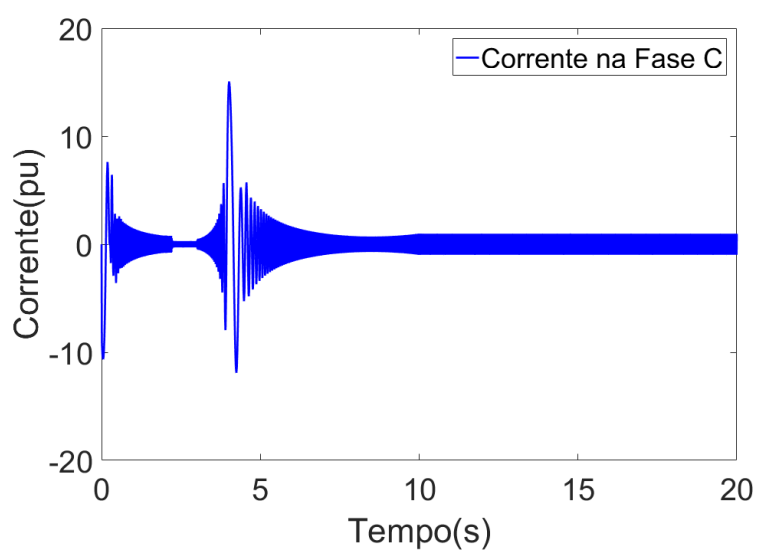


Figura 6-19 – Corrente na fase C

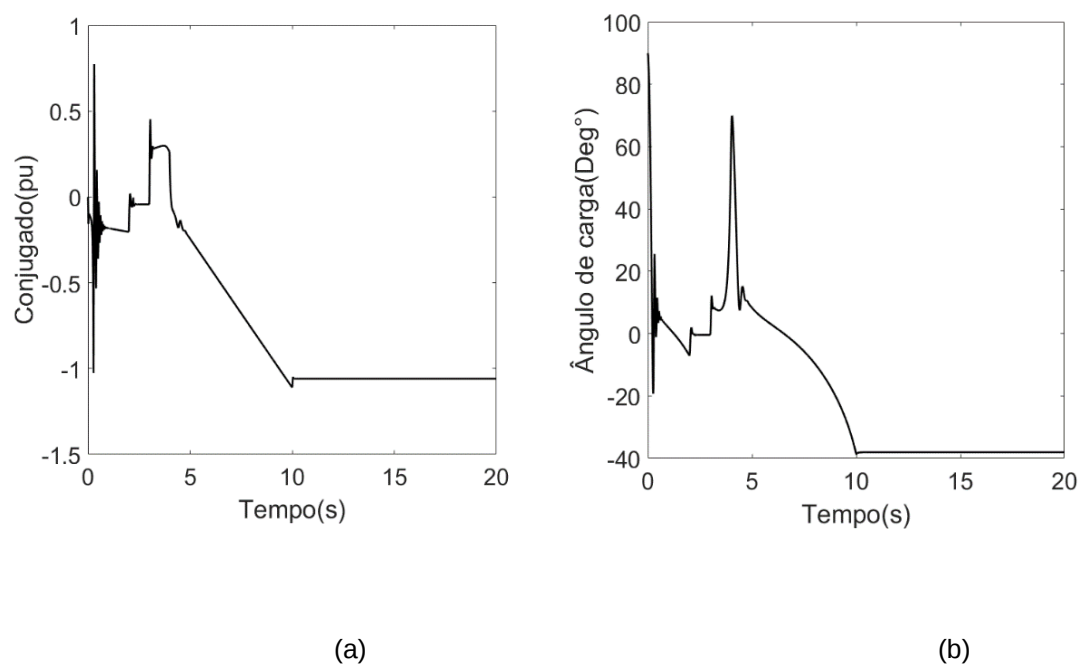


Figura 6-20 - (a) Conjugado Eletromagnético Interno. (b) Ângulo de Carga.

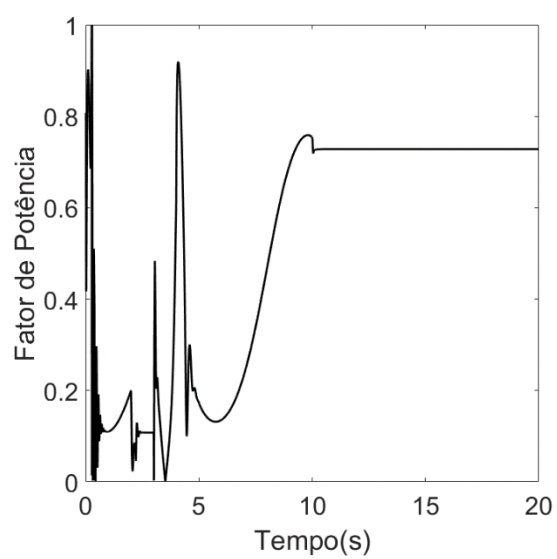


Figura 6-21 - Fator de Potência.

6.6 Carga em Degrau

Neste ensaio o GCC produz uma carga em degrau em 4,06 segundos com o valor de 43,3N.m (1pu), figura 6.22 – (a). A carga permanece no eixo do MS até o final da simulação, conforme o torque eletromagnético interno na figura 6.26, que fica em torno de -1pu. As correntes nas três fases seguem uma tendência de crescimento com o aumento da velocidade da máquina causado pela fonte de frequência variável, independente da carga ser constante. As correntes individuais são mostradas 6.23, 6.24 e 6.25.

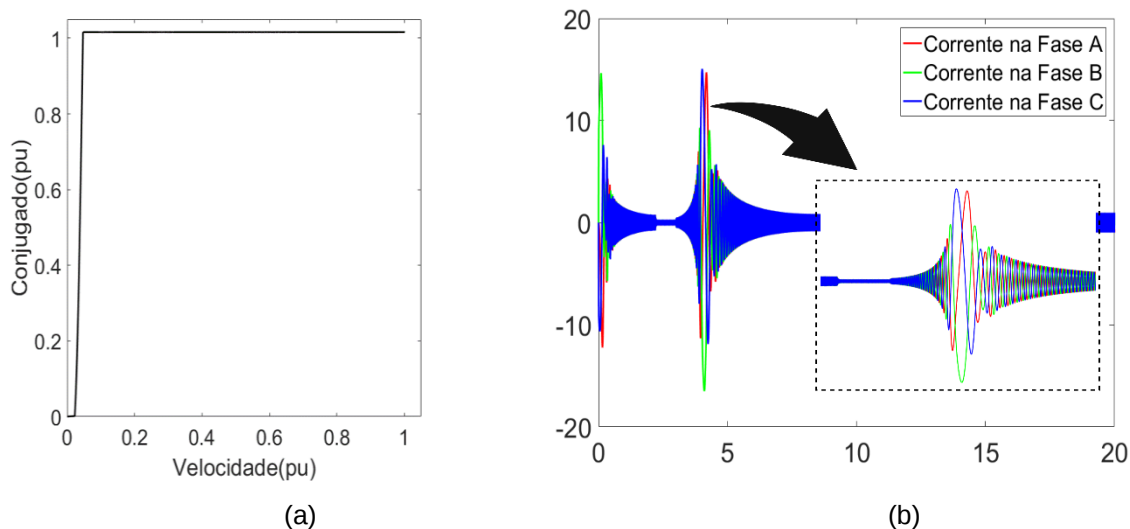


Figura 6-22 - (a) Curva Conjugado por Velocidade. (b) Correntes nas Fases.

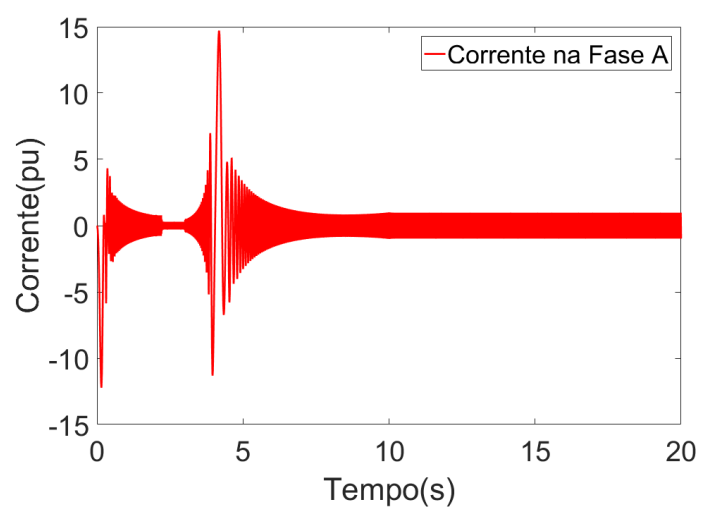


Figura 6-23 – Corrente na fase A

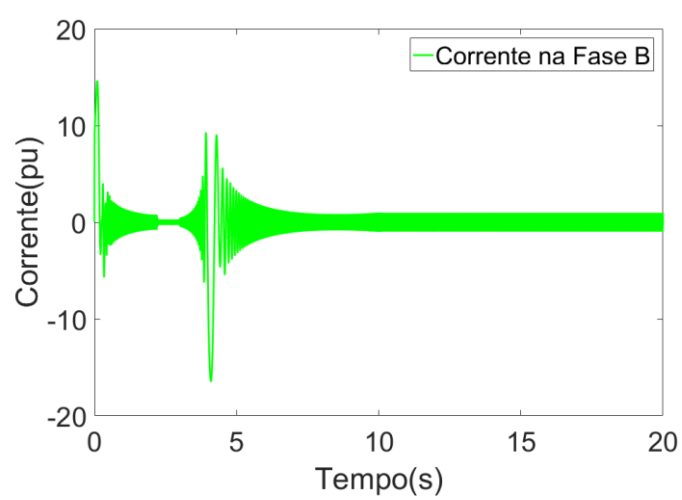


Figura 6-24 – Corrente na fase B

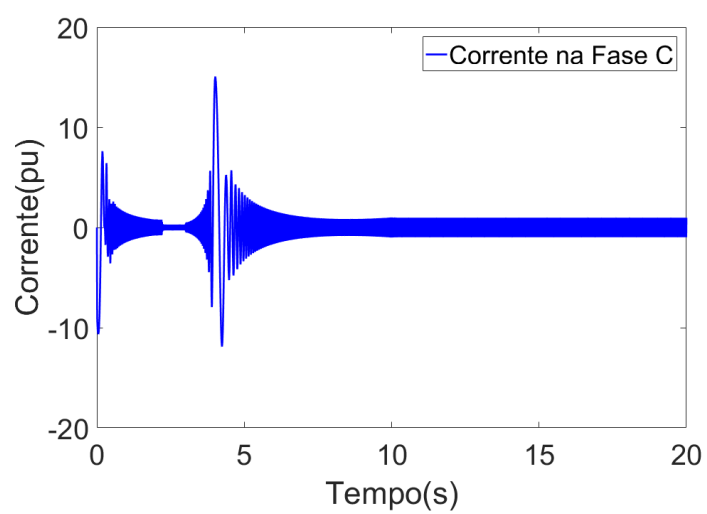


Figura 6-25 – Corrente na fase C

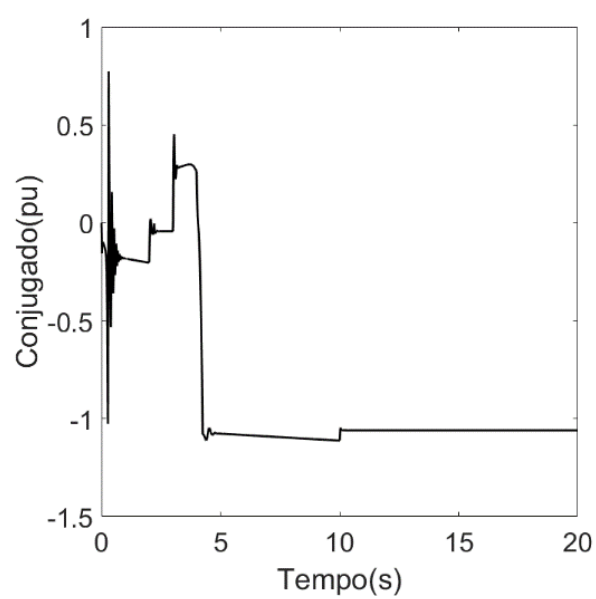


Figura 6-26 - Conjugado Eletromagnético Interno

6.7 Conclusão

Neste capítulo foram apresentados os resultados do presente projeto. Inicialmente foi feita uma abordagem das cargas mecânicas, modelagem matemática e implementação computacional posteriormente.

Foi mostrada a plataforma de simulação computacional geral, que consiste na Máquina Síncrona conectada ao Gerador de Corrente Contínua, controlado pelo controlador PI, baseado em um bloco denominado cargas mecânicas.

Em seguida foram feitas simulações para todas as cargas propostas em capítulos anteriores, que possibilitaram fazer um estudo detalhado do comportamento do motor síncrono.

7 CAPÍTULO 7 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

7.1 Conclusões

Neste projeto foram abordados aspectos pertinentes ao princípio de funcionamento de um Motor Síncrono. Foi realizado inicialmente um levantamento bibliográfico para explicar todos os aspectos construtivos dos diferentes tipos de motores síncronos, assim como suas particularidades. Em seguida foi levantada uma modelagem matemática que abrange os dois tipos de motores síncronos de polos salientes existentes: Laminado e Sólido. De posse dessa modelagem utilizando transformada d_{q0} foi feita uma investigação do modelo computacional da máquina síncrona existente no *simulink*.

Foi mostrado os dois subsistemas que constituem a máquina síncrona. Dentro de cada subsistema foi feita uma análise de como os blocos se relacionam e como é feito o cálculo das grandezas elétricas e mecânicas.

Em seguida o Motor Síncrono foi acoplado a um GCC que funciona sob controle de um controlador PI, atuando na sua tensão de campo e produzindo Cargas mecânicas que variam com a velocidade.

Com base nos resultados explorados, a plataforma de simulação permitiu entender a influência do tipo de carga mecânica nos parâmetros elétricos e mecânicos da máquina síncrona. Um outro ganho proporcionado pela simulação desenvolvida é a possibilidade de entender com mais profundidade a máquina síncrona. De que forma os enrolamentos rotóricos se relacionam eletromagneticamente, entre si e com o estator. Além de entender as características, vantagens e desvantagens da máquina de rotor sólido, em relação ao laminado.

Desse modo, devido a interdisciplinaridade verificada neste projeto entre as diversas áreas da engenharia elétrica, foi possível aprimorar o raciocínio técnico-científico relacionado a lógica de controle, eletrônica de potência e conversões

eletromecânicas, que serviram de apoio para o desenvolvimento de simulações, assim como para a elucidação dos resultados gerados.

Como sugestões para trabalhos futuros podem ser mencionados os seguintes tópicos:

- Estudo do motor como compensador em um barramento com diversas cargas indutivas.
 - Estudo de diferentes métodos de partida de um motor síncrono, quais sejam com capacitor de partida, reator e associações.
 - Desenvolvimento de um controle de velocidade em malha fechada.
 - Estudo de diferentes metodologias de excitação do enrolamento de campo.
 - Confrontar os resultados de uma máquina de rotor liso acionando cargas diversas com os resultados de uma máquina de polos salientes analisando indicadores como rendimento.
 - Analisar a influência dos ganhos do controlador PI sobre o desempenho de cada carga mecânica produzida pelo GCC.
-

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] D. T. VICENTE. “Fundamentos de Máquinas Elétricas”. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S. A., 1999.
 - [2] M. ALFONSO. “Máquinas de Corrente Alternada”. 1º Edição. Porto Alegre: Editora Globo, 1973.
 - [3] M. NED. “Electric Machines and Drives”. 1º Edição. Nova Jersey: John Wiley & Sons.
 - [4] F. KENTLI, Y. BKBK, N. ONAT. “Examination of the Stability Limit on the Synchronous Machine Depending on the Excitation Current Wave Shape”. IEMDC 2001. IEEE International Electric Machines and Drives Conference.
 - [5] M. M. Al-Hamrani, A. Von Jouanne, A. Wallace. “Power Factor Correction in Industrial Facilities Using Adaptive Excitation Control of Synchronous Machines”. Conference Record of the 2002 Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference
 - [6] Gurdial S. Sangha. “Capacitor-Reactor Start of Large Synchronous Motor on a Limited Capacity Network”. IEEE Transactions on Industry Applications (Volume: IA-20, Issue: 5, Sept. 1984)
 - [7] WEG – Artigo Técnico sobre Motores Síncronos, 2003. Disponível em: <<http://catalogo.weg.com.br/files/wegnet/WEG-motores-sincronos-artigo-tecnico-portugues-br.PDF>>. Acesso em: Junho de 2021.
 - [8] M. NED. “Advanced Electric Drives”. Nova Jersey: John Wiley & Sons, 2014.
 - [9] R.C. Schaefer. “Excitation Control of the Synchronous Motor”. IEEE Transactions on Industry Applications (Volume: 35, Issue: 3, May/Jun 1999).
 - [10] C. Concordia, H. Poritsky. “Synchronous Machine With Solid Cylindrical Rotor”. Electrical Engineering (Volume: 56, Issue: 7, July 1937)
-

- [11] M.J. Costello, R.J. Lawrie, M.J. DeBlock, W.J. Jackson. "Large Synchronous Motors for the Delaware City Repowering Project". Record of Conference Papers. Industry Applications Society Forty-Seventh Annual Conference. 2000 Petroleum and Chemical Industry Technical Conference.
- [12] Cheng-Ting Hsu. "Transient Stability Study of the Large Synchronous Motors Starting and Operating for the Isolated Integrated Steel-Making Facility". IEEE Transactions on Industry Applications (Volume: 39, Issue: 5, Sept.-Oct. 2003).
- [13] S.M. Silva, B.J. Cardoso Filho, M. Murta G Cardoso, M. Rocha Braga. "Blower Drive System Based on Synchronous Motor With Solid Salient-Pole Rotor: Performance Under Starting and Voltage Sag Conditions". IEEE Transactions on Industry Applications (Volume: 39, Issue: 5, Sept.-Oct. 2003).
- [14] Jae-Do Park, Claude Kalev, Heath F. Hofmann. "Analysis and Reduction of Time Harmonic Rotor Loss in Solid-Rotor Synchronous Reluctance Drive". IEEE Transactions on Power Electronics (Volume: 23, Issue: 2, March 2008).
- [15] Jae-Do Park, Claude Kalev, Heath Hofmann. "Modeling and Control of Solid-Rotor Synchronous Reluctance Machines Based on Rotor Flux Dynamics". IEEE Transactions on Magnetics (Volume: 44, Issue: 12, Dec. 2008).
- [16] M. V. GUEDES. "MÁQUINAS ELÉCTRICAS SÍNCRONAS arranque dos motores síncronos". Porto. Pag. 1-75, 2003.
- [17] J.C. Das, J. Casey. "CHARACTERISTICS AND ANALYSIS OF STARTING OF LARGE SYNCHRONOUS MOTORS". 1999 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference.
- [18] Yongbin Li, Chris Mi, Haran Karmaker. "Modeling of the Starting Performance of Large Solid-Pole Synchronous Motors Using Equivalent Circuit Approach". 2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting.
-

- [19] A. J. Wood; C. Concordia. "An Analysis of Solid Rotor Machines Part IV. An Approximate Nonlinear Analysis". Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems (Volume: 79, Issue: 3, April 1960).
- [20] T. Labbé, B. Dehez, F. Labrique. "Two phase operation for a three phase PMSM using a control model based on a Concordia like transform associated to a classic Park transform". Mathematics and Computers in Simulation .Volume 81, Issue 2, October 2010, Pag. 315-326.
- [21] M. V. GUEDES. "Motor Síncrono Trifásico modelização, análise do funcionamento, utilização". Porto. Pag. 1-52, 1992.
- [22] Umans, Stephen D. "MÁQUINAS ELÉTRICAS". 7° Edição. Porto Alegre: MCGRAW-HILL EDUCATION, 2014.
- [23] R. H. Park. "Two Reaction Theory of Synchronous Machines Generalized Method of Analysis-Part I". Transactions of the American Institute of Electrical Engineers (Volume: 48, Issue: 3, July 1929)
- [24] B. ADKINS, R. G. HARLEY. "The General Theory of Alternating Current Machines". 1° Edição. New York: Halsted Press, a Division of John Wiley & Sons, 1975.
- [25] S. J. Chapman. "Fundamentos de Máquinas Elétricas". 5° Edição. Porto Alegre: AMGH EDITORA LTDA, 2013.
- [26] F. A. T. NETO. "GERAÇÃO DE PERFIS DE CARGAS INDUSTRIAIS MEDIANTE O CONTROLE PWM DA TENSÃO DE CAMPO DO GERADOR DE CORRENTE CONTÍNUA". Universidade de São Paulo, 2010.
- [27] R. KRISHNAN. "ELECTRIC MOTOR DRIVES Modeling, Analysis, and Control". New Jersey: PRENTICE HALL, 2001.
-

- [28] WEG – TEMPO DE ACELERAÇÃO E TIPOS DE CARGAS WEG. Disponível em: <<http://catalogo.weg.com.br/files/wegnet/WEG-motores-sincronos-artigo-tecnico-portugues-br.PDF>>. Acesso em: Junho de 2021.
- [29] F. dos S. e Silva “Bancada de simulação de cargas mecânicas para motor de indução trifásico acionado por conversor de frequência”. Universidade Federal de Uberlândia, 2015.
- [30] K. OGATA. “Engenharia de Controle Moderno”. 3º Edição. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora, 2000.
- [31] MathWorks – “Synchronous Machine pu Standard”. Disponível em: <<https://kr.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/synchronousmachinepustandard.html>> Acesso em Junho de 2021.
- [32] MOEINI, A., et al. “Modelo de estabilidade da máquina síncrona, uma atualização da técnica de tradução de dados IEEE Std 1110-2002.” Sessões do painel de padrões IEEE . 2018.
-