

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
DEPARTAMENTO DAS ÁREAS ACADÊMICAS IV
COORDENAÇÃO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

BRUNO CÂNDIDO PEREIRA
HIAGO VINICIUS DE OLIVEIRA MATOS

**ANÁLISE HARMÔNICA DO GERADOR DE INDUÇÃO E GERADOR
SÍNCRONO EM REGIME NÃO SENOIDAL**

GOIÂNIA
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: Bruno Cândido Pereira

Matrícula: 20161011060520

Título do Trabalho: Análise Harmônica do Gerador de Indução e Gerador Síncrono em Regime Permanente Não Senoidal

Autorização - Marque uma das opções

- ☒ Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso aberto);
- ☐ Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG somente após a data ____/____/____ (Embargo);
- ☐ 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:

- 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;
- obteve autorização de quaisquer materiais incluídos 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;
- 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.

Goiânia, 30/08/2021.

Bruno Cândido Pereira
Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais



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: Hiago Vinícius de Oliveira Matos

Matrícula: 20151011060328

Título do Trabalho: Análise Harmônica do Gerador de Indução e Gerador Síncrono em Regime Permanente Não Senoidal

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).

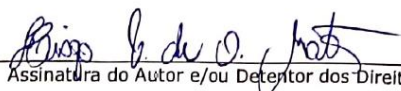
Ao indicar a opção **2 ou 3**, marque a justificativa:

- () 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 incluídos 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.


Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

Goiânia, 02/09/2021.

BRUNO CÂNDIDO PEREIRA
HIAGO VINICIUS DE OLIVEIRA MATOS

**ANÁLISE HAMÔNICA DO GERADOR DE INDUÇÃO E GERADOR SÍNCRONO
EM REGIME NÃO SENOIDAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
como requisito parcial à obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Elétrica, da
Coordenação de Engenharia Elétrica, do
Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia de Goiás – Campus Goiânia.

Orientadora: Prof. Dr. Alana da Silva Magalhães

GOIÂNIA

2021

P4141a Pereira, Bruno Candido.

Análise harmônica do gerador de indução e gerador síncrono em regime não senoidal /
Bruno Candido Pereira. – Goiânia: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de
Goiás, 2021.

60 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Alana da Silva Magalhães.

TCC (Trabalho de Conclusão de Curso) – Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica,
Departamento de Áreas Acadêmicas IV, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia
de Goiás.

1. Gerador Síncrono. 2. Gerador de Indução. 3. Distorções harmônicas. I. Magalhães, Alana
da Silva (orientador). II. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás. III.
Título.

CDD 621.31042

Ficha catalográfica elaborada pela Bibliotecária Karol Almeida da Silva Abreu CRB1/ 2.740

Biblioteca Professor Jorge Félix de Souza,
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia.



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

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

BRUNO CÂNDIDO PEREIRA
HIAGO VINÍCIUS DE OLIVEIRA MATOS

**ANÁLISE HARMÔNICA DO GERADOR DE INDUÇÃO E GERADOR SÍNCRONO
EM REGIME NÃO SENOIDAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, como parte das exigências para obtenção do Título de Engenheiro Eletricista.

Goiânia, 10 de agosto de 2021.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dra. Alana da Silva Magalhães
Orientadora - IFG/Goiânia

Prof. Dr. João Batista José Pereira
Membro da Banca Examinadora - IFG/Goiânia

Prof. Dr. Renato Jayme Dias
Membro da Banca Examinadora - IFG/Goiânia

Documento assinado eletronicamente por:

- **João Batista José Pereira**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLÓGICO, em 20/09/2021 08:12:07.
- **Renato Jayme Dias**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLÓGICO, em 17/09/2021 22:55:18.
- **Alana da Silva Magalhães**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLÓGICO, em 17/09/2021 17:25:15.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 17/09/2021. 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: 200525

Código de Autenticação: 05015b8a4b



DEDICATÓRIA

Dedicamos este trabalho a todos os nossos familiares e amigos por todo o incentivo e força para a elaboração desta Monografia.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos primeiramente a Deus, pelas suas bênçãos na realização deste trabalho e durante toda a Graduação. Aos nossos pais e familiares pelo apoio e compreensão nos momentos difíceis.

À nossa orientadora Prof. Dr. Alana da Silva Magalhães por todo o auxílio e atenção durante a execução deste trabalho.

A todos os colegas que colaboraram nesta caminhada.

A todos os professores, pela dedicação em ensinar.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás pela oportunidade de realização deste curso.

RESUMO

Será apresentado neste trabalho a comparação entre simulação e testes experimentais com o intuito de validar as interações elétricas e conteúdo das harmônicas utilizando gerador síncrono e gerador de indução. Os geradores serão conectados ao barramento comum em regime permanente, sujeitos a cargas não lineares. Os resultados obtidos apresentaram que, o gerador de indução além de incrementar a potência ativa, apresenta melhor caminho para as correntes harmônicas que fluem no barramento comum. Por outro lado, o gerador síncrono se comporta como fonte harmônica no regime permanente não senoidal.

Palavras-chave: Gerador Síncrono, Gerador de Indução, Carga não linear e Distorções Harmônicas.

ABSTRACT

This work will present a comparison between simulation and experimental tests in order to validate the electrical interactions and harmonic content scans using synchronous generator and induction generator. The generators will be connected to the common bus on a permanent basis, subject to nonlinear loads. The results obtained showed that, the induction generator, in addition to increasing the active power, presents a better path for the harmonic currents that flow on the common bus. On the other hand, the synchronous generator behaves as a harmonic source in the non-sine permanent regime.

Keywords: Synchronous Generator, Induction Generator, Nonlinear Load, and Harmonic Distortions.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 2.1– Rotor de polos salientes (WEG, 2008).....	21
Figura 2.2 – Estator de um gerador síncrono (NIEDERLE, 2018).	22
Figura 2.3 – Circuito equivalente completo do gerador síncrono trifásico.....	24
Figura 2.4 – Diagrama de fluxo de potência de um GS (Chapman, 2014).....	25
Figura 2.5 – Operação em paralelo de geradores síncronos (Chapman, 2014).....	27
Figura 2.6 – Vista detalhada de uma máquina assíncrona.....	28
Figura 2.7 – Enrolamento de campo de uma máquina assíncrona.Da esquerda para direita: execução dos enrolamentos; núcleo com enrolamento completo.....	29
Figura 2.8 – Rotor tipo gaiola de esquilo	29
Figura 2.9 - Curva característica de conjugado versus velocidade de uma máquina de indução em regime de motor e de gerador (CHAPMAN, 2013).	30
Figura 2.10 - Circuito equivalente do motor de indução (KHAN, 2008).....	31
Figura 2.11 – Diagrama de fluxo de potência de um gerador de indução (VALADÃO, 2012).....	32
Figura 2.12 – Gerador de indução operando isolado com um banco de capacitores (CHAPMAN, 2013).....	35
Figura 3.1 – Aumento da Carga Eletrônica frente a Carga Instalada nos EUA (GARCIA, 2013).....	38
Figura 3.2 – Tensão resultante da soma da componente fundamental, terceiro, quinto e sétimo harmônico (MAGALHÃES, 2019).....	39
Figura 4.1 – Carga não linear e um gerador. Adaptado de (IZADFAR, 2017)	46
Figura 4.2 – Componentes da FMM (ALVES, 2011).	47
Figura 4.3 – Representação fasorial da superposição dos torques (FUCHS; MASOUM, 2011)	50
Figura 5.1 – Representação da bancada de teste (MAGALHÃES et al., 2016)	52
Figura 5.2 – Tela ambiente do DataView: Power Analyzer Control Panel (Próprio autor).....	54
Figura 6.1 – Formas de onda de tensão e de corrente no gerador de indução com $W = 1840$ rpm.....	59

Figura 6.2 – Formas de onda de tensão e de corrente no secundário do transformador com $W = 1840$ rpm.....	59
Figura 6.3 – Formas de onda de tensão e de corrente na carga com $W = 1840$ rpm.....	59
Figura 6.4 – Formas de onda de tensão e de corrente no gerador de indução com $W = 1830$ rpm.....	60
Figura 6.5 – Formas de onda de tensão e de corrente no secundário do transformador com $W = 1830$ rpm.....	60
Figura 6.6 – Formas de onda de tensão e de corrente na carga com $W = 1830$ rpm.....	61
Figura 6.7 – Formas de onda de tensão e de corrente no gerador síncrono com $V_f = 71,2V$..	63
Figura 6.8 – Formas de onda de tensão e de corrente no secundário do transformador com $V_f = 71,2V$	64
Figura 6.9 – Formas de onda de tensão e de corrente na carga com $V_f = 71,2V$	64
Figura 6.10 – Formas de onda de tensão e de corrente no gerador síncrono com $V_f = 77,8V$	65
Figura 6.11 – Formas de onda de tensão e de corrente no secundário do transformador com $V_f = 77,8V$	65
Figura 6.12 – Formas de onda de tensão e de corrente na carga com $V_f = 77,8V$	65
Figura 6.13 – Formas de onda de tensão e de corrente no gerador síncrono com $V_f = 46,3V$	66
Figura 6.14 – Formas de onda de tensão e de corrente no secundário do transformador com $V_f = 46,3V$	66
Figura 6.15 – Formas de onda de tensão e de corrente na carga com $V_f = 46,3V$	66

LISTA DE TABELAS**Pág.**

Tabela 3.1 – Limites de distorções harmônicas (PRODIST, 2020).....	41
Tabela 3.2 – Limites de Distorções Harmônicas Individuais de Corrente, IEEE (519., 2014).....	42
Tabela 3.3 – Limites de Distorções Harmônicas de Tensão IEEE (519., 2014).....	43
Tabela 4.1 – Força magneto motriz (FMM) por índice harmônico.....	47
Tabela 6.1 – Características gerais dos equipamentos.....	56
Tabela 6.2 – Dados coletados em bancada e simulados.....	61
Tabela 6.3 – Dados coletados em bancada e simulados do gerador síncrono.....	67

LISTA DE SÍMBOLOS

n_m	—	Velocidade síncrona.
P	—	Número de polos.
f_{se}	—	Frequência elétrica.
E_A	—	Tensão interna gerada.
K	—	Constante de aspectos construtivos.
ϕ	—	Fluxo da máquina.
ω	—	Velocidade angular do rotor.
V_ϕ	—	Tensão de saída.
X_S	—	Reatância síncrona.
R_A	—	Resistência do estator.
I_A	—	Corrente de armadura.
Ω	—	Ohm.
E_{Ai}	—	Tensão interna gerada [V], $i = 1, 2, \dots, n$. onde n é o nº de fases.
V_f	—	Tensão de campo.
I_f	—	Corrente de campo.
R_f	—	Resistência de campo.
R_{Aj}	—	Resistência limitadora de corrente de campo.
L_f	—	Indutância de campo.
P_{conv}	—	Potência convertida.
δ	—	Ângulo de conjugado (torque).
cos	—	Cosseno.
sin	—	Seno.
τ_{ind}	—	Conjugado induzido.
ω_m	—	Velocidade angular rotor.
n_s	—	Velocidade síncrona.
n_r	—	Velocidade do rotor.
S	—	Escorregamento.
f_{re}	—	Frequência do rotor.
V_1	—	Tensão de fase/fundamental.
I_1	—	Corrente de linha no estator.
I_m	—	Corrente de magnetização.

I_2	–	Corrente rotórica refletida ao estator.
R_1	–	Resistência do estator.
R_2	–	Resistência do rotor refletida ao estator.
X_1	–	Reatância de dispersão do estator.
X_2	–	Reatância de dispersão do rotor refletida ao estator.
X_m	–	Reatância de Magnetização.
R_m	–	Resistência de Perdas no Núcleo.
Z	–	Impedância equivalente média por fase.
P_{hf}	–	Perdas por histerese e por correntes Foucault.
V_l	–	Tensão de linha.
I_l	–	Corrente de linha.
φ	–	Ângulo de deslocamento.
P_{mec}	–	Potência mecânica.
d_{q0}	–	Modelo ortogonal.
$f(t)$	–	Função no domínio do tempo.
n	–	Índice harmônico.
L	–	Período da função em segundos.
t	–	Tempo.
h	–	Ordem da componente harmônica.
V_h	–	Tensão de ordem h.
F_{MMH}	–	Força magneto motriz.
I_H	–	Corrente eficaz.
θ	–	Ângulo espacial com origem em uma das fases do estator [graus].
ω	–	Velocidade síncrona.
P_{PT}	–	Perdas totais por correntes parasitas.
P_{PF}	–	Perdas de correntes parasitas em plena carga na frequência fundamental.
I_{EH}	–	Corrente eficaz da harmônica de índice H .
S_H	–	Escorregamento devido às ordens das harmônicas.
T_e	–	Torque eletromagnético resultante.
T_{e1}	–	Torque eletromagnético devido à componente fundamental.
T_{e5}	–	Torque eletromagnético devido à componente harmônica de quinta ordem.
T_{e7}	–	Torque eletromagnético devido à componente harmônica de sétima ordem.
T_L	–	Torque de carga.

LISTA DE SIGLAS

KVA	–	Kilovoltamperes.
CC	–	Corrente Contínua.
CA	–	Corrente Alternada.
IEEE	–	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
ANEEL	–	Agência Nacional de Energia Elétrica.
PRODIST	–	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional.
GI	–	Gerador de Indução.
GS	–	Gerador Síncrono.
DFIG	–	Gerador de indução com alimentação dupla.
SFIG	–	Gerador de indução auto excitado.
EUA	–	Estados Unidos.
FFT	–	Transformada rápida de Fourier.
ONS	–	Operador Nacional de Sistema Elétrico.
DHT_V	–	Distorção Harmônica Total de Tensão.
DHI_V	–	Distorção Harmônica Individual de Tensão.
AIEE	–	Instituto Americano de Engenheiros Eletricistas.
IRE	–	Instituto de Engenheiros de Rádio.
Hz	–	Hertz.
V	–	Volt.
A	–	Ampere.
H	–	Henry.
W	–	Watt.

SUMÁRIO

Pág.

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE SÍMBOLOS

LISTA DE SIGLAS

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	17
 CAPÍTULO 2 - FUNDAMENTOS E ANÁLISE DE GERADORES.....	20
2.1.INTRODUÇÃO.....	20
2.1.1.ASPECTOS CONSTRUTIVOS DO GERADOR SÍNCRONO	20
2.1.2.PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO GERADOR SÍNCRONO.....	22
2.1.3.MODELAGEM MATEMÁTICA E CIRCUITO EQUIVALENTE DO GERADOR SÍNCRONO.....	23
2.1.4.POTÊNCIA E CONJUGADO DO GERADOR SÍNCRONO	25
2.1.5.OPERÇÃO EM PARALELO DE GERADORES SÍNCRONOS	26
2.2.GERADORES ASSÍNCRONOS	27
2.2.1.ASPECTOS CONSTRUTIVOS DO GERADOR ASSÍNCRONO.....	28
2.2.1.1.ESTATOR	28
2.2.1.2.ROTOR.....	29
2.2.2.PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO: MOTOR E GERADOR	29
2.2.3.MODELAGEM MATEMÁTICA DO GERADOR ASSÍNCRONO	30
2.2.3.1.POTÊNCIA EM GERADORES ASSÍNCRONOS.....	32
2.2.4.OPERÇÃO DE UM GERADOR ASSÍNCRONO	33
2.2.4.1.OPERÇÃO INTERLIGADO À REDE	34
2.2.4.2.OPERÇÃO ISOLADO	34
2.2.4.3.OPERÇÃO EM PARALELO COM GERADOR SÍNCRONO	35
2.2.5.CONSIDERAÇÕES FINAIS	35

CAPÍTULO 3 - HARMÔNICAS.....	37
3.1.INTRODUÇÃO.....	37
3.2.DISTORÇÃO HARMÔNICA.....	37
3.3.ÍNDICES, REGULAMENTAÇÃO E LIMITES DE HARMÔNICOS NO SISTEMA ELÉTRICO NACIONAL E INTERNACIONAL	40
3.3.1.PROCEDIMENTOS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO SISTEMA ELÉTRICO NACIONAL - PRODIST	40
3.3.2.INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS – IEEE.....	42
3.4.EFEITOS DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS EM MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS.....	43
 CAPÍTULO 4 – GERADORES EM REGIME PERMANENTE NÃO SENOIDAL .	45
4.1 INTRODUÇÃO.....	45
4.2 GERADOR SÍNCRONO EM REGIME PERMANENTE NÃO SENOIDAL.....	45
4.2.1 OSCILAÇÕES DE CONJUGADO.....	46
4.2.2 PERDAS.....	48
4.3 GERADOR ASSÍNCRONO EM REGIME PERMANENTE NÃO SENOIDAL	49
4.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS	51
 CAPÍTULO 5 - METODOLOGIA	52
5.1 METODOLOGIA.....	52
5.2 DESCRIÇÃO DOS ESTUDOS PROPOSTOS	53
5.3 FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS	54
5.3.1 DATAVIEW.....	54
5.3.2 MATLAB®	55
5.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS	55
 CAPÍTULO 6 – RESULTADOS E DISCUSSÕES	56
6.1 DESCRIÇÃO DOS EQUIPAMENTOS	56
6.2 PARÂMETROS INTERNOS DO SISTEMA.....	57
6.3 ESTUDOS DE CASO	57
6.3.1 ESTUDO 1 - GERADOR DE INDUÇÃO CONECTADO À CARGA NÃO LINEAR.....	58
CENÁRIO 1 – GERADOR DE INDUÇÃO COM $\omega = 1840$ RPM. CASO BASE.....	58

CENÁRIO 2 - GERADOR DE INDUÇÃO COM $\omega = 1830$ RPM.	60
ANÁLISE DOS DADOS COLETADOS E SIMULADOS.....	61
6.3.2 ESTUDO DE CASO 2 - GERADOR SÍNCRONO CONECTADO À CARGA NÃO LINEAR.....	62
CENÁRIO 1 – GERADOR SÍNCRONO – CASO BASE.....	63
CENÁRIO 2 - GERADOR SÍNCRONO SOBREEXCITADO.	64
CENÁRIO 3 - GERADOR SÍNCRONO SUBEXCITADO.	65
ANÁLISE DOS DADOS COLETADOS E SIMULADOS.....	66
6.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	68
6.5 SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS.....	69
CAPÍTULO 7	71
CONCLUSÃO.....	55
7.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	72
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	73

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Os primeiros relatos registrados de uma máquina eletrostática são datados de 1663, construída pelo alemão Otto Guericke que em 1774 foi aperfeiçoada pelo suíço Martin Planta (WEG, 2020). Após diversos estudos realizados por cientistas, foi-se aprimorado a máquina eletrostática com as mais diversas variações construtivas e somente em 1856, Werner Siemens desenvolveu o primeiro gerador de corrente contínua auto induzido (WEG, 2020).

Diversos estudos foram surgindo, evoluindo em seus aspectos construtivos, mudando materiais e formas de construção, mas com seu funcionamento tão simplista como a máquina desenvolvida por Davenport, onde a variação eletromagnética gera movimento mecânico do rotor (Motor), assim como a variação mecânica gera corrente elétrica (Gerador).

Na geração de energia de algumas hidroelétricas, termoeletricas e eólicas com conjunto turbina e gerador, normalmente gerador síncrono, consta uma potência de geração que não é utilizada em sua totalidade, ocasionando em desuso de recurso, uma vez que estas usinas já estão instaladas, esta capacidade de geração pode ser aproveitada com a inclusão de um gerador de indução em paralelo com o gerador síncrono (FERNANDES *et al.*, 2013).

Atualmente são dois os geradores mais utilizados, gerador de indução e o gerador síncrono. O gerador de indução é uma solução viável técnico e economicamente para potências de até 100KVA, pois apresenta maior robustez, simplicidade construtiva, menor preço e menor manutenções, porém consome muito reativo da rede para sua excitação e pode apresentar um baixo fator de potência (CHAPALLAZ *et al.*, 1992).

O gerado síncrono tem como principal vantagem sua estabilidade de frequência em corrente alternada, independe da carga a qual ela está submetida (CHAPALLAZ *et al.*, 1992).

A defasagem entre as correntes demandadas pelas cargas e as tensões de alimentação é considerado um fenômeno indesejado, uma vez que gera um fluxo de potência oscilatório entre a fonte e a carga, sem que tenha sido convertida em potência útil. Porém essa potência oscilatória ou reativa, é frequentemente necessária para excitar os campos magnéticos (efeito indutivo) ou elétricos (efeito capacitivo) da rede e de determinadas cargas (PAREDES *et al.*, 2017).

Com a proliferação dos conversores eletrônicos de potência, amplamente difundidos no mercado industrial e doméstico a rede elétrica passou a apresentar correntes harmônicas que podem resultar em distorções significativas nas tensões. Tais fontes harmônicas (cargas não lineares) estão distribuídas por toda a rede (PAREDES et al, 2017).

Com o crescente avanço tecnológico, cada vez mais a sociedade se torna dependente da energia elétrica. A matriz energética mundial é oriunda de diversas fontes renováveis e não renováveis (IEA, 2018), que consistem primordialmente na conversão cinética em energia elétrica. Para essa conversão são necessários geradores, que tem maior predominância os geradores síncronos.

Segundo Chapman (2013), no gerador síncrono, um campo magnético é produzido no rotor. Para se obter esse campo magnético, é necessário a utilização de ímã permanente ou de um eletroímã a partir da aplicação de uma corrente CC a um enrolamento desse rotor. Por meio de uma máquina motriz primária, é acionado o rotor do gerador, produzindo um campo magnético girante, na qual irá induzir um conjunto de tensões trifásicas nos enrolamentos de estator do gerador.

Ainda de acordo com Chapman (2013), o gerador de indução trata de uma máquina assíncrona de indução. A máquina assíncrona (ou de indução) é composta por duas partes, o estator (parte fixa onde é criado um campo girante nos seus enrolamentos) e o rotor (parte móvel que terá correntes induzidas pelo campo do estator). Seu nome advém do fato de o enrolamento do estator criar um campo magnético girante que induz corrente alternada no enrolamento do rotor. Além disso, o não sincronismo entre o fluxo da armadura em relação ao rotor gera um conjugado (torque) eletromecânico, isto é, existe um escorregamento entre o rotor e a velocidade de fluxo magnético que irá definir se esta funcionará como motor ou gerador.

Harmônicas são formas de ondas que apresenta distorções similares em cada ciclo do período fundamental (PHIPPS; NELSON; SEN, 1994). Tal deformação se deve à relação não linear de tensão/corrente provenientes de dispositivos eletrônicos capazes de controlar as cargas elétricas.

Os efeitos harmônicos em máquinas síncronas aumentam o aquecimento devido as perdas no ferro e no cobre, além de gerar componentes oscilantes de torque, uma vez que a combinação de pares de harmônicos de corrente, geralmente de ordem ímpares de 5^a e 7^a, 11^a e 13^a, 17^a e 19^a geram oscilações de 6^a harmônica de conjugado, bem como outros pares de componentes de ordens mais elevadas. Essas perdas, assim como as harmônicas geradas,

são efeitos cumulativos que refletem na diminuição do rendimento e da vida útil da máquina (IEEE Std-519, 2014).

De acordo com Dias (2002), a presença de harmônicos em máquinas assíncronas ocasiona o sobreaquecimento dos enrolamentos da máquina e diminuição da vida útil. Já nas máquinas síncronas, ocorre o sobreaquecimento das sapatas polares que comprometem a qualidade das tensões geradas.

As normativas impostas pela IEEE (STD 519-2014) e pela ANEEL (PRODIST 2018 – Módulo 08), possuem o objetivo de impor limites para o conteúdo das harmônicas de tensão e/ou corrente, a fim de obter um nível aceitável de qualidade de energia.

Delbone (2012) define que a carga não linear alimentada pelo gerador síncrono produz correntes no estator que variam de forma não senoidal, sendo composta pela fundamental e harmônicas; e demonstra matematicamente que o gerador síncrono se comporta como uma fonte de harmônicos quando sujeita ao regime permanente não senoidal.

O gerador de indução pode alimentar a carga elétrica não linear, dessa forma, as correntes do estator serão não senoidais, ou seja, será formada por componentes fundamental e diversas componentes harmônica (MAGALHÃES, 2019). De acordo com Delbone (2012), ao contrário do gerador síncrono, o gerador de indução quando sujeito ao regime permanente não senoidal, se comporta como um supressor de harmônicos.

Dessa forma, o objetivo deste trabalho consiste em fazer análise experimental do gerador de indução e gerador síncrono no barramento do sistema de energia sujeito à carga não linear, com a finalidade de analisar seu comportamento quando sujeito ao conteúdo/nível harmônico de cargas não lineares.

No capítulo 2 será abordado a teoria de máquinas síncronas e de máquinas de indução, onde serão apresentados os aspectos construtivos, princípio de funcionamento e modo de operação. O capítulo 3 trará conceitos de qualidade de energia e harmônicos, bem como as normativas impostas devido às distorções. Além disso, será exposto as consequências destas distorções nos equipamentos elétricos. O capítulo 4 apresentará a teoria das máquinas síncronas e nas máquinas de indução quando sujeitas a uma carga não senoidal. No capítulo 5 será descrito a metodologia aplicada no desenvolvimento da bancada de ensaios. Por fim, o capítulo 6 apresentará os resultados e conclusões obtidas.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTOS E ANÁLISE DE GERADORES SÍNCRONOS E ASSÍNCRONOS

2.1. INTRODUÇÃO

Máquinas síncronas são predominantemente utilizadas como geradores, produzindo uma grande parcela da energia elétrica consumida no mundo. As necessidades de consumo de energia elétrica, na indústria, estabelecimentos comerciais e consumidores individuais são praticamente produzidas pela geração síncrona, sabe-se que podem ser operados facilmente em paralelo, fato é que em países industrializados existem centenas deles conectados por linhas de transmissão e fornecem energia elétrica a cargas espalhadas por áreas por milhares de quilômetros, mas também podem operar isoladamente, alimentando cargas para áreas de difícil acesso, e também como unidades emergenciais em uma indústria, hospital, prédios comerciais, etc.

Máquinas assíncronas são mais comumente utilizadas por ter seu custo efetivo menor, possuir aspectos construtivos mais simples e maior simplicidade para interligação ao SEPI quando o comparado com a máquina síncrona. São amplamente utilizados como motores em dispositivos conectados ao consumidor e como geradores nos sistemas de geração de energia de pequeno porte.

2.1.1. ASPECTOS CONSTRUTIVOS DO GERADOR SÍNCRONO

Chapman (2013) define que os geradores síncronos são máquinas síncronas utilizadas para conversão de potência mecânica em potência elétrica CA. Dessa forma, os geradores síncronos são construídos por duas partes fundamentais: rotor e estator.

Ainda segundo Chapman (2013), os enrolamentos de campo ou enrolamentos do rotor são responsáveis pela produção do campo magnético principal da máquina. Já os enrolamentos de armadura ou enrolamentos de estator são responsáveis pela indução da tensão principal.

O rotor de polo saliente (protuberante) é um polo magnético que se sobressai radialmente do rotor, ou seja, os enrolamentos de campo são alojados nas sapatas polares. Um rotor com polos salientes está mostrado na Figura 2.1.

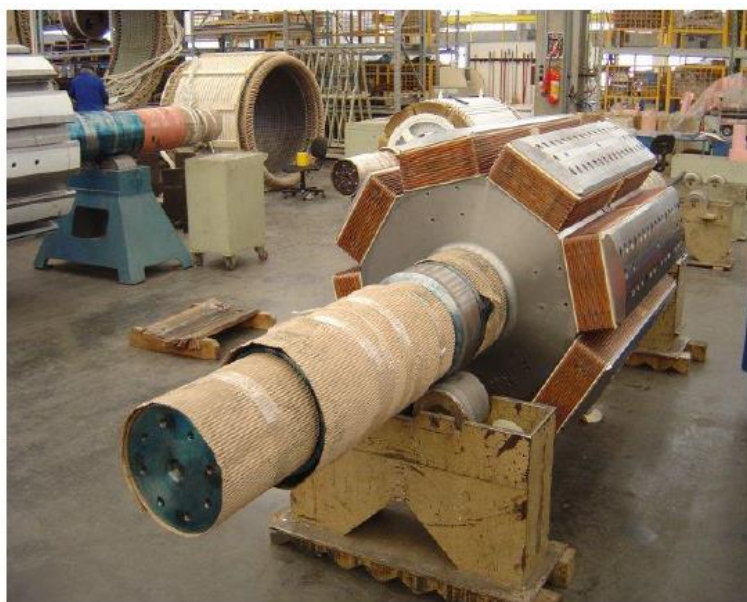


Figura 2.1– Rotor de polos salientes (WEG, 2008).

O rotor de geradores de polos salientes são feitos por chapas laminadas de material magnético, que são justapostas, formando os polos magnéticos, e um enrolamento que é excitado com corrente contínua (JORDÃO, 2013). Dessa forma, como o rotor está sujeito a campos magnéticos variáveis, as construções por meio das chapas laminadas ajudam a reduzir as perdas por corrente parasita (CHAPMAN, 2013).

Os rotores das máquinas de polos salientes são fabricados de 4 ou mais polos, com maior número de polos são utilizados para operar em baixa rotação, um exemplo são as usinas hidrelétricas (CHAPALLAZ *et al.*, 1992).

Dessa forma, uma corrente CC deverá ser fornecida ao circuito de campo do rotor por meio de um arranjo especial. Esse arranjo é necessário para deslocar a potência CC até os enrolamentos de campo.

De acordo com Chapman (2013), geralmente esse deslocamento é feito a partir de uma excitatriz. Uma excitatriz sem escovas é um pequeno gerador CA com seu circuito de campo montado no estator e seu circuito de armadura montado no eixo do rotor. A saída trifásica do gerador da excitatriz é convertida em corrente contínua por meio de um circuito retificador trifásico, conhecido como roda de diodos, que também está montado no eixo do gerador. A seguir, essa corrente contínua alimenta o circuito CC principal de campo.

Os estatores dos geradores síncronos são formados por bobinas de estator pré-moldadas em um enrolamento de camada dupla. De acordo com Fitzgerald, Kingsley e Umans (2006), as características magnéticas do estator que são de alta permeabilidade,

possibilita um caminho magnético de baixa relutância para o fluxo, dessa forma reduzindo o fluxo disperso. Além disso, conforme Chapman (2013), a fim de reduzir o conteúdo das harmônicas presentes nas tensões e corrente de saída do gerador, o enrolamento é distribuído e encurtado.

A carcaça, protege e apoia a máquina, é nela que os pacotes de chapas e enrolamentos são inseridos. São construídas carcaças horizontais e verticais, e com a necessidade de proteção conforme o ambiente, composta em chapas de aço soldada, formando um cilindro rígido e robusto para a ser a base da máquina síncrona. Um estator de um gerador síncrono está mostrado na Figura 2.2.



Figura 2.2 – Estator de um gerador síncrono (NIEDERLE, 2018).

A característica construtiva mais importante e afins prático é possuir um enrolamento de campo único de potência menor no rotor, e o enrolamento de maior potência usualmente polifásico no estator (UMANS, 2014).

2.1.2. PRICÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO GERADOR SÍNCRONO

A fim de manter os valores de tensão e frequência fixos, é necessário conectar um gerador síncrono à um barramento infinito, e com isso, as correntes de armadura irão produzir uma componente do campo magnético de entreferro, que gira na velocidade síncrona em função da frequência do sistema.

Dessa forma, após o recebimento de uma corrente contínua no rotor do gerador síncrono, que é fornecido através de uma excitatriz ou ímã permanente, o campo magnético do rotor aponta em qualquer direção, na qual o rotor foi posicionado ao ser girado. A taxa de rotação dos campos magnéticos está relacionada com a frequência elétrica do estator por meio da Equação 2.1 (CHAPMAN, 2013).

$$n_m = \left(\frac{120}{P} \right) f_{se} \quad 2.1$$

Onde,

n_m – Velocidade síncrona [rpm];

P – Número de polos;

f_{se} – Frequência elétrica [Hz].

A tensão interna gerada E_A (rms) é diretamente proporcional ao fluxo e à velocidade, mas o fluxo propriamente depende da corrente que flui no circuito de campo do rotor. A tensão interna gerada é determinada por meio da Equação 2.2 (CHAPMAN, 2013).

$$E_A = K \phi \omega \quad 2.2$$

Onde,

E_A – Tensão interna gerada [V];

K – Constante de aspectos construtivos;

ϕ – Fluxo da máquina;

ω – Velocidade angular do rotor.

2.1.3. MODELAGEM MATEMÁTICA E CIRCUITO EQUIVALENTE DO GERADOR SÍNCRONO

De acordo com Chapman (2013), a tensão de saída V_ϕ não é igual a tensão interna gerada, E_A , devido à corrente de armadura que circula no gerador síncrono. Existe uma série de fatores responsáveis por essa diferença:

- i) Reação de Armadura;
- ii) Autoindutância das bobinas da armadura;
- iii) A resistência das bobinas da armadura;

iv) O efeito do formato dos polos salientes do rotor.

Considerando os fatores acima mencionados, a tensão de saída, V_ϕ , por fase pode ser determinada pela Equação 2.3.

$$V_\phi = E_A - jX_S I_A - R_A I_A \quad 2.3$$

Onde,

- V_ϕ – Tensão de saída [V];
- E_A – Tensão interna gerada [V];
- X_S – Reatância síncrona [Ω];
- R_A – Resistência do estator [Ω];
- I_A – Corrente de armadura [A].

De forma geral, o circuito equivalente completo do gerador síncrono trifásico está representado na Figura 2.3, onde a fonte de tensão CC alimenta o circuito de campo do rotor, na qual é modelado pela indutância e a resistência em série da bobina.

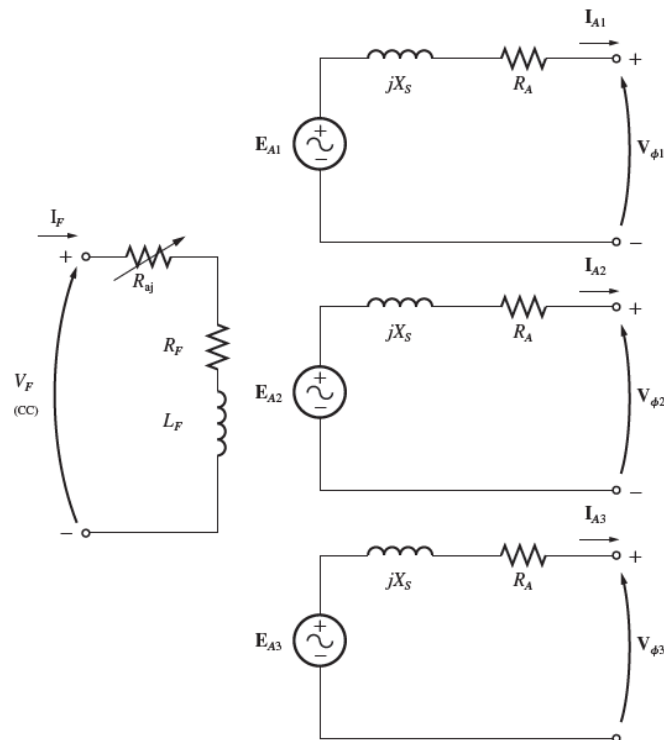


Figura 2.3 – Circuito equivalente completo do gerador síncrono trifásico (CHAPMAN, 2013).

Onde,

- V_ϕ – Tensão de saída [V];
- E_{Ai} – Tensão interna gerada [V], $i = 1, 2, \dots, n$. onde n é o nº de fases;
- X_S – Reatância síncrona [Ω];
- R_A – Resistência do estator [Ω];
- I_A – Corrente de armadura [A];
- V_f – Tensão de campo [V];
- I_f – Corrente de campo [A];
- R_f – Resistência de campo [Ω];
- R_{Aj} – Resistência limitadora de corrente de campo [Ω];
- L_f – Indutância de campo [H].

2.1.4. POTÊNCIA E CONJUGADO DO GERADOR SÍNCRONO

A diferença entre a potência de entrada e potência convertida do gerador síncrono representam as perdas mecânicas, do núcleo e as suplementares (CHAPMAN, 2013). A Figura 2.4 mostra o diagrama de fluxo de potência de um gerador síncrono.

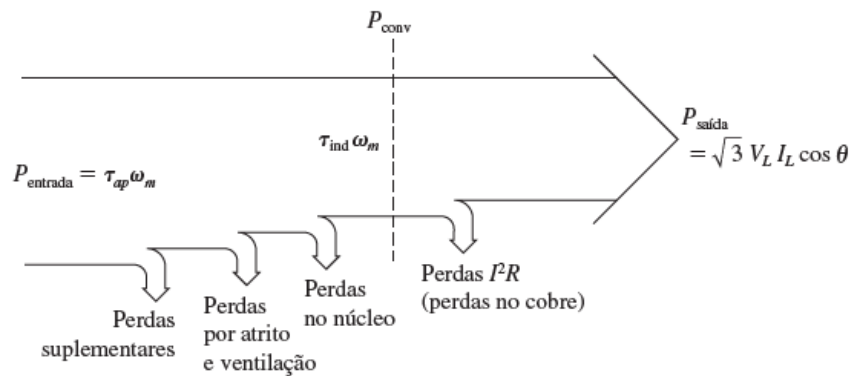


Figura 2.4 – Diagrama de fluxo de potência de um GS (Chapman, 2014).

A potência convertida internamente da forma mecânica para a forma elétrica é dada pela Equação 2.4.

$$P_{conv} = \frac{3V_\phi E_A}{X_S} \sin \delta \quad 2.4$$

Em que,

- P_{conv} – Potência convertida [W];
- V_ϕ – Tensão de saída [V];
- E_A – Tensão interna gerada [V];
- X_S – Reatância síncrona [Ω];
- δ – Ângulo de conjugado (torque).

O conjugado induzido é dado pela Equação 2.5.

$$\tau_{ind} = \frac{3V_\phi E_A}{\omega_m X_S} \sin \delta \quad 2.5$$

Onde,

- τ_{ind} – Conjugado induzido [Nm];
- V_ϕ – Tensão de saída [V];
- E_A – Tensão interna gerada [V];
- ω_m – Velocidade angular rotor [rad/s];
- X_S – Reatância síncrona [Ω];
- δ – Ângulo de conjugado (torque).

De acordo com Chapman (2013), os geradores síncronos operando em plena carga apresentam ângulos típicos de conjugado entre 20 a 30 graus, de modo que a potência e o conjugado máximos absolutos instantâneos que os geradores podem oferecer são no mínimo o dobro de seus valores a plena carga. Devido à essa reserva de potência e conjugado, os geradores síncronos conseguem a estabilidade dos sistemas de potência.

2.1.5. OPERAÇÃO EM PARALELO DE GERADORES SÍNCRONOS

No sistema elétrico, o barramento de potência infinito também conhecido como barra slack ou swing é onde se mantém constantes a tensão e frequência sendo estabelecidos como referência (SINGH, 2006). Essa definição se aplica aos sistemas de potência interligados de países industrializados que são constituídos por um grande número de geradores operando em paralelo.

De acordo com Chapman (2013), a operação de geradores síncronos oferece uma série de vantagens, sendo que a mais importante é o aumento da confiabilidade do sistema, uma vez que se um gerador falhar, não ocorrerá uma perda total de potência para a carga.

O processo de paralelismo deve atender a alguns critérios de sincronismo, caso contrário essa conexão pode danificar o próprio gerador e outros equipamentos ligados a rede ou pode não ocorrer. Depois de sincronizada, a máquina pode trocar potência ativa e/ou reativa com a rede.

A Figura 2.5 representa um gerador síncrono G_1 fornecendo potência para uma carga qualquer, e um outro gerador G_2 que será ligado em paralelo com G_1 por meio da chave S_1 . Se a chave for fechada arbitrariamente em um instante qualquer, os geradores estarão sujeitos a danos graves e a carga poderá perder potência.

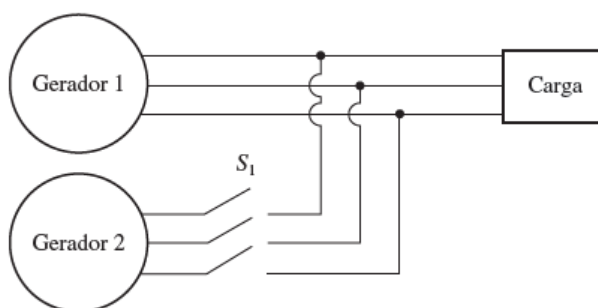


Figura 2.5 – Operação em paralelo de geradores síncronos (Chapman, 2014).

Alguns requisitos de sincronização devem ser seguidos para que seja feito o paralelismo de forma segura. São eles:

- i) Tensões eficazes de linha devem ser iguais;
- ii) Devem possuir a mesma sequência de fases;
- iii) Os ângulos de fases devem ser iguais;
- iv) A frequência do novo gerador síncrono (GS) deve ser ligeiramente superior à frequência do sistema que já está em operação.

2.2. GERADORES ASSÍNCRONOS

Máquinas assíncronas, como seu próprio nome define, são aquelas em que a velocidade de rotação do seu eixo se difere da velocidade do fluxo magnético interno da máquina. Este tipo de arranjo é o mais comumente utilizado devido ao custo efetivo da

máquina, robustez e menor volume quando comparada a uma máquina de corrente contínua e síncrona de mesma potência (BIM, 2013).

2.2.1. ASPECTOS CONSTRUTIVOS DO GERADOR ASSÍNCRONO

Segundo Chapman (2013) uma máquina assíncrona se divide basicamente em duas partes, o estator que é fisicamente idêntico ao estator da máquina síncrona, sendo essa a parte fixa da máquina que possui enrolamentos simetricamente bobinados, onde é induzida tensão pelo movimento rotórico e; o rotor, que está locado no interior do estator. Há dois tipos de rotores, um deles denominado rotor bobinado e outro denominado gaiola de esquilo, sendo este último, o que terá enfoque neste trabalho.

A Figura 2.6 mostra a estrutura de uma máquina assíncrona com suas respectivas partes.

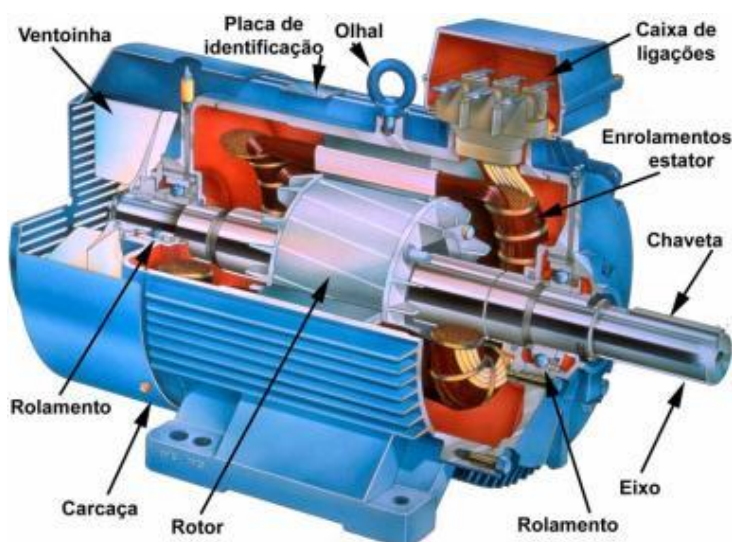


Figura 2.6 – Vista detalhada de uma máquina assíncrona (FRANCISCO, 2010)

2.2.1.1. ESTATOR

É constituído de chapas de ferro-silício laminado, com ranhuras uniformemente espaçadas onde estão alojados os condutores de um enrolamento polifásico (em geral trifásico), semelhante ao de uma máquina síncrona (CHAPMAN, 2013). Exemplificado na Figura 2.7.

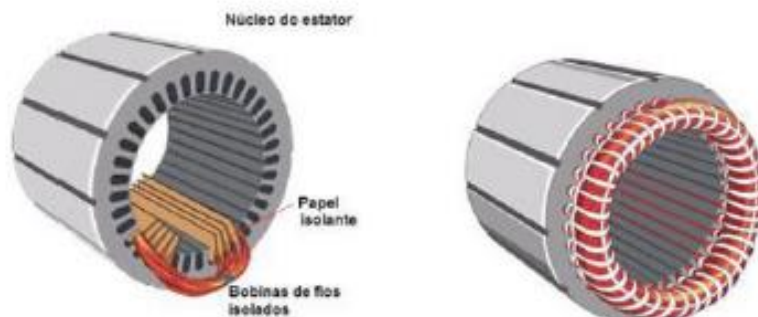


Figura 2.7 – Enrolamento de campo de uma máquina assíncrona. Da esquerda para direita: execução dos enrolamentos; núcleo com enrolamento completo (FRANCISCO, 2010)

2.2.1.2. ROTOR

O rotor do tipo gaiola de esquilo, conforme ilustrado na Figura 2.8, é constituído por um núcleo de chapas de ferro-silício, isoladas entre si, sobre o qual são colocados condutores, dispostos paralelamente entre si e unidas nas suas extremidades, por anéis que curto-circuitam os condutores.



Figura 2.8 – Rotor tipo gaiola de esquilo (FRANCISCO, 2010).

2.2.2. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO: MOTOR E GERADOR

Na máquina assíncrona a corrente alternada é fornecida diretamente ao estator, assim, o rotor recebe a corrente por indução. Sendo a excitação feita por uma fonte equilibrada de correntes alternadas, um campo magnético é produzido no entreferro, girando na velocidade síncrona (UMANS, 2014).

O campo magnético produzido se desloca em relação ao rotor, cortando as barras do rotor, induzindo tensões que farão circular correntes também alternadas no rotor. Devido as

correntes do rotor terem polaridades contrárias à do estator, surge um campo magnético girante no rotor, que será atraído e arrastado pelo campo magnético girante do estator (UMANS, 2014).

Assim, surge o conjugado mecânico no rotor e o leva a girar. A velocidade do campo magnético girante (n_s) será sempre maior que a velocidade do rotor (n_r) quando a máquina estiver operando como motor; e o contrário quando a máquina estiver operando como gerador (UMANS, 2014).

Na operação como gerador, a máquina assíncrona é acionada por uma força motriz externa com uma velocidade superior à velocidade do campo girante n_s , isso irá permitir a inversão no sentido do conjugado conforme figura 2.9, observa-se também, na região de operação como gerador, o conjugado máximo que é o limite de conjugado que deve ser aplicado ao eixo, valores superiores a estes levam ao disparo da máquina, sendo necessário o uso de dispositivo de sobrevelocidade para sua proteção (KHAN, 2008).

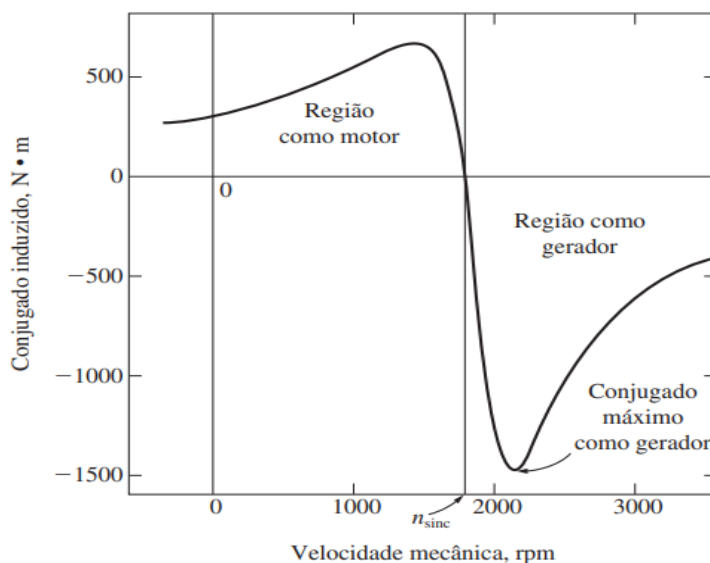


Figura 2.9 - Curva característica de conjugado versus velocidade de uma máquina de indução em regime de motor e de gerador (CHAPMAN, 2013).

2.2.3. MODELAGEM MATEMÁTICA DO GERADOR ASSÍNCRONO

Como visto, o escorregamento (S) é dado pela diferença de velocidade entre o rotor (n_r) e a velocidade síncrona do campo girante (n_s), dividido pela velocidade síncrona (n_s). Definido pela Equação 2.6.

$$S = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad 2.6$$

A velocidade do campo magnético girante (n_s) é chamada de velocidade síncrona, pois é sincronizada com a frequência da rede, e pode ser calculada como função do número de polos e pela frequência do sinal (CHAPMAN, 2013).

A frequência do rotor (f_{re}) é diretamente proporcional ao número de polos da máquina (p) vezes diferença entre a velocidade do campo magnético com a velocidade do rotor, dividido por 120. Dada pela Equação 2.7.

$$f_{re} = \frac{P}{120} (n_s - n_r) \quad 2.7$$

O circuito equivalente da máquina assíncrona por fase com o secundário refletido ao primário é dado pela Figura 2.10.

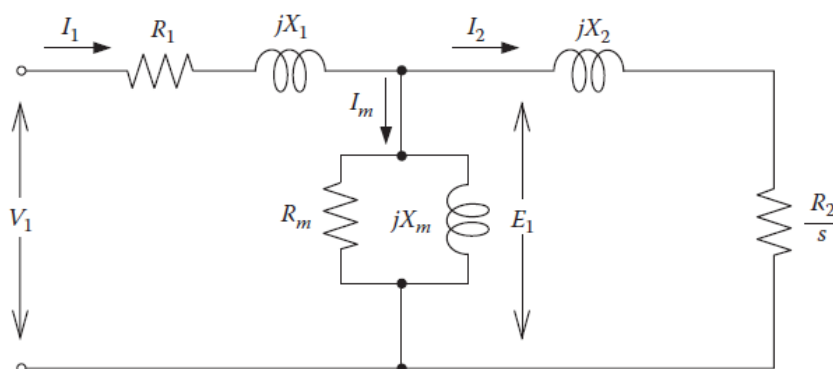


Figura 2.10 - Circuito equivalente do motor de indução (KHAN, 2008).

Onde:

- V_1 – Tensão de fase;
- I_1 – Corrente de linha no estator;
- I_m – Corrente de magnetização;
- I_2 – Corrente rotórica refletida ao estator;
- R_1 – Resistência do estator;
- R_2 – Resistência do rotor refletida ao estator;
- x_1 – Reatância de dispersão do estator;

- x_2 – Reatância de dispersão do rotor refletida ao estator;
- x_M – Reatância de Magnetização;
- R_m – Resistência de Perdas no Núcleo;
- S – Escorregamento.

2.2.3.1. POTÊNCIA EM GERADORES ASSÍNCRONOS.

A potência convertida da forma elétrica para mecânica é obtida a partir da subtração da potência de entrada pelas perdas no interior da máquina. As perdas por dissipação nos enrolamentos do estator são as primeiras da máquina, seguidas pelas perdas por dissipação no cobre do rotor e finalmente, as perdas por atrito e ventilação e as perdas suplementares (CHAPMAN, 2013). Como gerador, potência de entrada é a potência mecânica e a potência elétrica é, agora, a potência de saída conforme observado na Figura 2.11

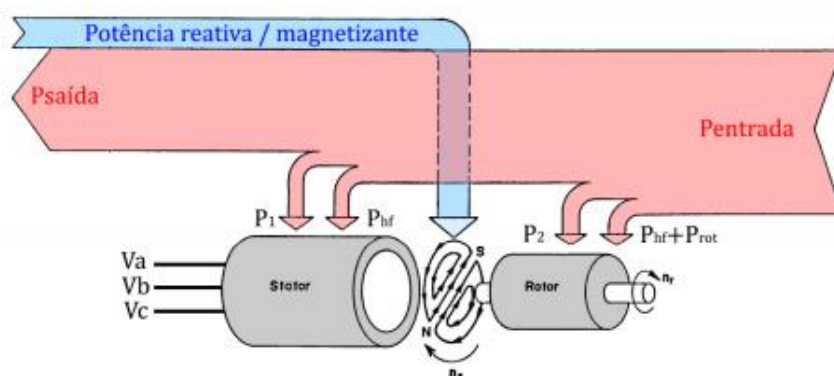


Figura 2.11 – Diagrama de fluxo de potência de um gerador de indução com excitação trifásica (VALADÃO, 2012).

Quando a tensão aparece nos terminais do gerador de indução para uma dada rotação constante, representada pelo circuito equivalente da Figura 2.3, há uma impedância equivalente média por fase dada por:

$$Z = R_1 + jX_1 + \frac{1}{\frac{1}{jX_m} + \frac{1}{R_m} + \frac{1}{\frac{R_2}{s} + jX_2}} \quad 2.8$$

Quantitativamente, uma corrente I_1 circulará através desta impedância por fase que produz perdas no enrolamento do estator das três fases cujo total é expresso por:

$$P_1 = 3I_1^2 R_1 \quad 2.9$$

As perdas por histerese e por correntes Foucault, P_{hf} , vêm dos circuitos do estator e do rotor e são agrupadas juntos em um resistor de derivação R_m e segundo (SIMOES; FARRET, 2015) pode ser dada como:

$$P_{hf} = \frac{3E_1^2}{R_m} \quad 2.10$$

A energia trifásica transferida do rotor para o estator através do entreferro pode ser obtido com uso das Equações 2.9 e 2.10:

$$P_g = P_{saída} + P_{perdas} = \sqrt{3}V_l I_l \cos(\varphi) + \underbrace{3I_1^2 R_1 + \frac{3E_1^2}{R_m}}_{P_{hf} + P_1} \quad 2.11$$

Onde V_l e I_l são, respectivamente, as tensões e correntes de linhas enquanto φ o ângulo de deslocamento entre elas. Por fim, a potência mecânica, P_{mec} , convertida em eletricidade é medida pela diferença da potência do entreferro e da potência dissipada no rotor, indicada pela Equação 2.12 dada conforme a seguir

$$P_{mec} = 3I_2^2 R_2 \frac{1-s}{s} \quad 2.12$$

2.2.4. OPERAÇÃO DE UM GERADOR ASSÍNCRONO

A máquina de indução oferece vantagens para usinas hidrelétricas e eólicas porque de sua fácil operação como motor ou gerador, construção robusta, proteção natural contra curto-circuito e baixo custo em comparação com outros geradores (SIMÕES; FARRET, 2014).

Ainda segundo Simões e Farret (2014), muitas usinas comerciais em países desenvolvidos foram projetadas para operar em paralelo com grandes sistemas de energia, geralmente fornecendo a quantidade máxima de energia primária disponível para conversão

em seu entorno (eólica, solar ou hídrica). Esta solução é muito conveniente porque a rede pública controla a tensão e a frequência enquanto capacitores de compensação estáticos e reativos podem ser usados para correção do fator de potência e redução harmônica.

A seguir são apresentados os modos mais comuns de operação de um gerador assíncrono, sua versatilidade permite a desde cargas do tipo constante e cargas variáveis, partidas com carga ou sem carga, a capacidade de ou operação intermitente e etc.

2.2.4.1. OPERAÇÃO INTERLIGADO À REDE

Diferentemente do gerador síncrono, o gerador de indução não precisa estar sincronizado em tensão, frequência e fase com a rede para ser conectado. O procedimento a seguir deve ser feito ao conectar o gerador na rede:

- 1 - Com o gerador de indução desconectado, aumenta-se a velocidade da máquina primária até atingir a velocidade síncrona. Dessa forma, ao imprimir tensões nos terminais do estator, não haverá movimento relativo entre o campo e o rotor, assim a máquina pode ser conectada sem riscos de grandes picos de corrente.

- 2 - Realizar a conexão com a rede.

- 3 - Após a conexão, deve-se aumentar a velocidade da máquina primária para que forneça uma velocidade superior a síncrona, isso colocará máquina em modo gerador.

Capacitores são normalmente conectados em paralelo com as fases de um GI para melhorar o fator de potência. Os enrolamentos do estator e os capacitores formam um circuito ressonante onde a potência reativa oscila somente entre os capacitores e a máquina de indução. Dessa forma menos corrente reativa precisa ser absorvida e diminuem as perdas da rede de distribuição.

2.2.4.2. OPERAÇÃO ISOLADO

Neste modo, o gerador de indução opera independentemente de qualquer sistema da potência, sendo necessário um banco de capacitores conectado em paralelo com estator da máquina conforme mostrado na figura 2.12. Dessa forma, os capacitores fornecem a potência reativa requerida para que o gerador se magnetize e para as cargas acopladas a ele.

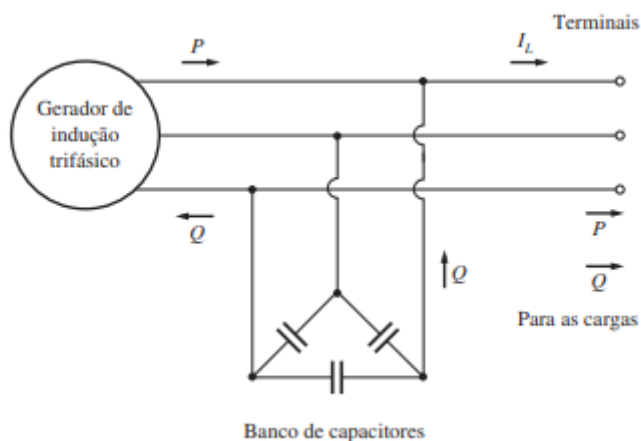


Figura 2.12 – Gerador de indução operando isolado com um banco de capacitores (CHAPMAN, 2013).

2.2.4.3. OPERAÇÃO EM PARALELO COM GERADOR SÍNCRONO

Condições estáveis de operação podem ser atingidas se a potência aparente do gerador síncrono for pelo menos o dobro da potência aparente da máquina de indução. O uso de capacitores não é obrigatório visto que a potência reativa necessária pode ser suprida pelo gerador síncrono se o mesmo trabalhar sobre-excitado. Os esquemas de monitoramento e proteção são similares ao de operação em paralelo com uma grande rede que será abordado na sequência.

2.2.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Tratando-se de modelos matemáticos, existem diferentes abordagens se destacando-se duas delas: o modelo de coordenadas de fase e o modelo ortogonal (dq0) (BOLDEA, 2020).

Na primeira abordagem as equações incluem, entre outros parâmetros, as indutâncias mútuas estator-rotor com valores que variam de acordo com a posição do rotor. Como consequência, o modelo torna-se não linear dificultando a análise para estudos dinâmicos. Já no modelo ortogonal (dq0), com início pela teoria de Park, se utilizam de parâmetros que geralmente são independentes da posição do rotor. O resultado é uma simplificação significativa do cálculo, que se tornou mais conveniente com a definição do conceito de fasor espacial (BOLDEA, 2020).

Dessa forma, verifica-se que este capítulo abordou a teoria de máquinas síncronas e máquinas de indução, bem como o circuito equivalente para cada máquina e suas respectivas

modelagens matemáticas para que no próximo capítulo seja apresentado o princípio das distorções harmônicas, limites estabelecidos pelo sistema elétrico nacional e internacional e o efeito causado.

CAPÍTULO 3

HARMÔNICAS

3.1. INTRODUÇÃO

Phipps et al. (1994) define que há presença de harmônica quando a deformação da forma de onda se apresenta de forma similar em cada ciclo da frequência fundamental. Assim, seu espectro contém apenas frequências múltiplas inteiras da fundamental. Esse tipo de deformação periódica geralmente é imposta pela relação não linear da tensão/corrente, ocasionado por determinados componentes da rede como, por exemplo, transformadores e motores. Outro agravante da não linearidade são as descontinuidades devido ao chaveamento dos conversores eletrônicos, como pontes retificadoras.

3.2. DISTORÇÃO HARMÔNICA

A maioria das cargas instaladas atualmente no sistema de potência é geradora de correntes harmônicas. Quando estas correntes circulam pelas impedâncias do sistema elétrico, elas induzem tensões harmônicas. As cargas não lineares podem ambas serem vistas como geradores de correntes e tensões harmônicas (SANKARAN, 2017).

De acordo com Casimiro (2018), os problemas relacionados à qualidade de energia elétrica do sistema de distribuição são oriundas das cargas não lineares, pois injetam componentes harmônicas de correntes que elevam o valor eficaz da corrente no sistema, aumentando assim as perdas, reduzindo o fator de potência, aquecendo os componentes do sistema de distribuição e causando distorções na forma de onda da tensão no ponto de acoplamento comum devido à queda de tensão na impedância da fonte.

A figura 3.1 apresenta o levantamento realizado no EUA entre os anos de 1960 a 2000, onde verifica-se um significativo aumento de cargas eletrônicas.

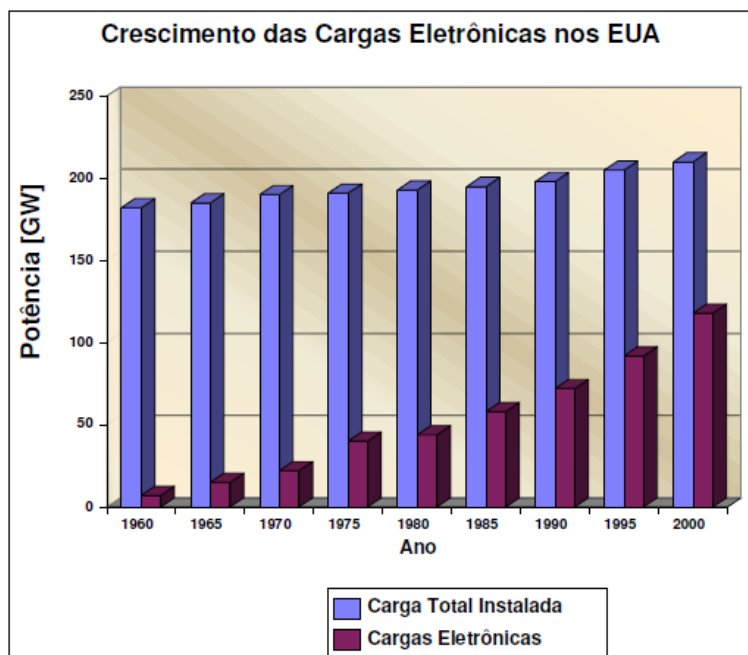


Figura 3.1 – Aumento da Carga Eletrônica frente a Carga Instalada nos EUA (GARCIA, 2013).

A distorção harmônica pode ser quantificada matematicamente com base no estudo das ondas não senoidais periódicas, viabilizada por meio da série de Fourier, equação 3.1. O teorema de Fourier mostra que toda função não senoidal pode ser representada sob a forma de uma soma de expressões que é composta de uma expressão senoidal em frequência fundamental de expressões senoidais cujas frequências são múltiplos inteiros da fundamental (harmônicas) e de uma eventual componente contínua (LATHI, 2006).

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_n \cos \frac{n\pi t}{L} + b_n \sin \frac{n\pi t}{L} \right) \quad 3.1$$

$$a_0 = \frac{1}{L} \int_{-L}^L f(t) dt$$

$$a_n = \frac{1}{L} \int_{-L}^L f(t) \cos \left(n\pi \frac{t}{L} \right) dt$$

$$b_n = \frac{1}{L} \int_{-L}^L f(t) \sin \left(n\pi \frac{t}{L} \right) dt$$

Onde:

$f(t)$ – Função no domínio do tempo;

n – Índice harmônico;

L – Período da função em segundos;

Para a análise das harmônicas é realizada a decomposição de onda utilizando a Transformada Rápida de Fourier (*Fast Fourier Transformer – FFT*) (ZHANG; GENG; YUAN, 2001) que consiste em amostrar e armazenar as formas de onda no domínio do tempo como pontos de dados discretos e computar os componentes harmônicos digitalmente usando um microprocessador

A Figura 3.2, demonstra a decomposição da forma de onda periódica não senoidal, em sua correspondente fundamental juntamente com suas componentes harmônicas de 3ª, 5ª e 7ª ordens. Nota-se que a partir da soma das distorções produzidas pelos harmônicos, a resultante tende para a onda quadrada.

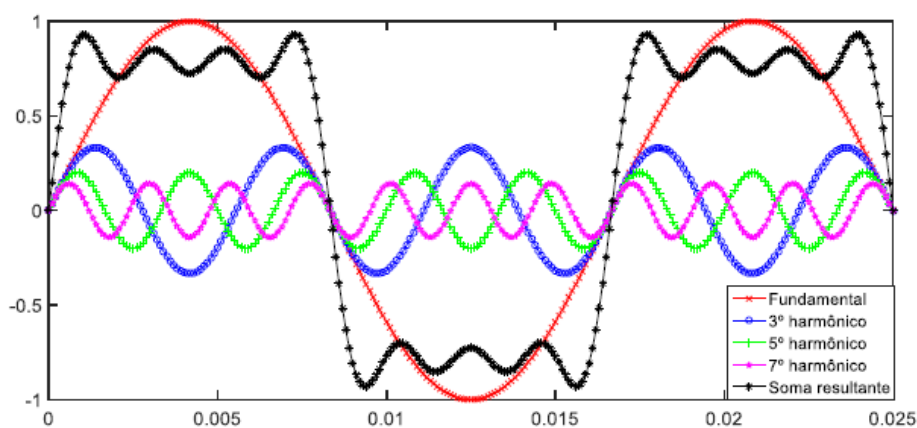


Figura 3.2 – Tensão resultante da soma da componente fundamental, terceiro, quinto e sétimo harmônico (MAGALHÃES, 2019)

A intensidade dos harmônicos gerados por cargas não lineares depende de cada carga especificamente. É um fenômeno contínuo, isto é, com longa duração. Os harmônicos de ordem ímpar são mais frequentes e com mais intensidade devido ao comportamento similar no semiciclo positivo e no semiciclo negativo da quase totalidade das cargas. Além disso, quanto maior a ordem do harmônico, menor será sua intensidade. (PHIPPS; NELSON; SEN, 1994).

Em casos específicos de instalação de novos componentes no sistema tais como bancos de capacitores “shunt” para correção do fator de potência e regulação de tensão, os estudos harmônicos tornam-se imprescindíveis para a definição do equipamento correto seja na forma de bancos de capacitores seja na forma de filtros de harmônicos (DIAS, 2002).

Devido a gestão de harmônicos em um sistema de potência ser considerado um trabalho de responsabilidade conjunta, envolvendo tanto usuários finais como operadores do sistema, os limites de harmônicos são recomendados tanto para tensões como para corrente (CASIMIRO, 2018).

A fim de medir o quão significativo estão os harmônicos na rede, são utilizados alguns índices, chamados de distorções harmônicas totais ou individuais de tensão ou corrente.

3.3. ÍNDICES, REGULAMENTAÇÃO E LIMITES DE HARMÔNICOS NO SISTEMA ELÉTRICO NACIONAL E INTERNACIONAL

De acordo com Magalhães (2019), foram regulamentadas normas nacionais e internacionais para estabelecer limites nos valores de distorções harmônicas no sistema elétrico. Tais normas realizam recomendações práticas, requisitos de controle de harmônicas, compatibilidade eletromagnética, limites para correntes harmônicas, procedimentos de distribuição de energia elétrica e procedimentos de qualidade de energia.

Os indicadores utilizados para avaliar o estudo harmônico da rede elétrica no Brasil são documentados pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) e regulamentado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Onde as principais referências nacionais e internacionais são o Guia IEEE Std 519-2014 (519., 2014) e Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional, PRODIST (PRODIST, 2020), da própria ANEEL através do módulo 8.

3.3.1. PROCEDIMENTOS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO SISTEMA ELÉTRICO NACIONAL - PRODIST

O PRODIST (Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional) é um conjunto de documentos redigidos pela ANEEL com o objetivo de normalizar e padronizar as atividades relacionadas a operação e desempenho do sistema de distribuição de energia elétrica. O módulo 8 do PRODIST tem por objetivo definir os parâmetros mínimos para garantir a qualidade mínima de energia entregue aos consumidores pelas concessionárias de energia.

Dentre os indicadores para o cálculo de distorção harmônica, destaca-se a distorção harmônica total e individual, ambas definidas para as tensões e correntes. A distorção

harmônica total é definida pelo quociente da raiz quadrada do somatório dos quadrados das amplitudes das harmônicas pela amplitude da componente fundamental, equação 3.2.

Por outro a distorção harmônica individual de tensão de ordem h e tido como a razão, em porcentagem, da amplitude do h-ésimo componente harmônico pela amplitude da componente fundamental, equação 3.3.

$$DHT_V = \frac{\sqrt{\sum_{h>1}^{h_{max}} V_h^2}}{V_1^2} \times 100 \quad 3.2$$

$$DHI_V = \frac{V_h}{V_1} \times 100 \quad 3.3$$

Onde,

h – Ordem da componente harmônica;

V_h – Tensão de ordem h [V];

V_1 – Tensão fundamental [V];

A Tabela 3.1 apresenta os valores limites de distorções harmônicas de tensão estipulados pelo PRODIST:

Módulo 8 Prodinst DHTv - ANEEL (2018)			
Indicador	$V \leq 1\text{kV}$	$1\text{ kV} < V < 69\text{ kV}$	$69\text{kV} \leq V < 230\text{kV}$
$DHT_{95\%}$	10,0%	8,0%	5,0%
$DHT_{p95\%}$	2,5%	2,0%	1,0%
$DHT_{l95\%}$	7,5%	6,0%	4,0%
$DHT_{395\%}$	6,5%	5,0%	3,0%

Tabela 3.1 – Limites de distorções harmônicas (PRODIST, 2020).

3.3.2 INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS – IEEE

O IEEE foi formado em 1963 com a junção de AIEE – Instituto Americano de Engenheiros Eletricistas e IRE – Instituto de Engenheiros de Rádio.

Para a verificação dos limites de distorção harmônica de corrente, a IEEE Std 519 (1993) toma como referência os níveis individuais de distorção em função da tensão de operação do sistema. Um outro elemento utilizado para a obtenção dos limites individuais de harmônicos é a relação entre a corrente de curto circuito na barra e a corrente máxima solicitada pela carga, conforme está representado na tabela 3.2.

Limites de distorções harmônicas individuais de corrente IEEE STD 519 (1993)							
Nível de Tensão	Icc/ I _{carga}	$3 \leq h$ e $h < 11$	$11 \leq h$ e $h < 17$	$17 \leq h$ e $h < 23$	$23 \leq h$ e $h < 35$	$35 \leq h$ e $h \leq 50$	DTT
$V \leq 69\text{kV}$	<20	4	2	1,5	0,6	0,3	5
	20<50	7	3,5	2,5	1	0,5	8
	50<100	10	4,5	4	1,5	0,7	12
	100<1000	12	5,5	5	2	1	15
	>1000	15	7	6	2,5	1,4	20
$69\text{kV} < V$ e $V \leq 161\text{kV}$	<20	2	1	0,75	0,3	0,15	2,5
	20<50	3,5	1,75	1,25	0,5	0,25	4
	50<100	5	2,25	2	0,75	0,35	6
	100<1000	6	2,75	2,5	1	0,5	7,5
	>1000	7,5	3,5	3	0,125	0,7	10
$V > 161\text{kV}$	<25	1	0,5	0,38	0,15	0,1	1,5
	25<50	2	1	0,75	0,3	0,15	2,5
	≥ 50	3	1,5	1,15	0,45	0,22	3,75

Tabela 3.2 – Limites de Distorções Harmônicas Individuais de Corrente, IEEE (519., 2014).

A Tabela 3.3, apresenta os valores limites de distorções harmônicas individuais de tensão, sendo estes adotados com predominância em países da Europa.

Limites de Distorções Harmônicas de Tensão - IEEE STD 519 (2014)		
Faixa de tensão	DHI _v [%]	DHT _v [%]
$V \leq 1\text{kV}$	5,0	8,0
$V \leq 69\text{kV}$	3,0	5,0
$69\text{kV} < V \leq 161\text{kV}$	1,5	2,5
$V \geq 161\text{kV}$	1,0	1,5

Tabela 3.3 – Limites de Distorções Harmônicas de Tensão IEEE (519., 2014).

3.4. EFEITOS DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS EM MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS

O grau com que harmônicas podem ser toleradas em um sistema de alimentação depende da susceptibilidade da carga (ou da fonte de potência). Os equipamentos menos sensíveis, geralmente, são os de aquecimento (carga resistiva), para os quais a forma de onda não é relevante. Os mais sensíveis são aqueles que, em seu projeto, assumem a existência de uma alimentação senoidal como, por exemplo, equipamentos de comunicação e processamento de dados. No entanto, mesmo para as cargas de baixa susceptibilidade, a presença de harmônicas (de tensão ou de corrente) podem ser prejudiciais, produzindo maiores esforços nos componentes e isolantes.

Em máquinas elétricas o maior efeito dos harmônicos é o aumento do aquecimento dado ao aumento das perdas no ferro e no cobre, afetando sua eficiência e o torque. Além disso, tem-se um possível aumento do ruído audível (DONOLO, 2016). O efeito cumulativo do aumento das perdas reflete-se numa diminuição da eficiência e da vida útil da máquina.

Algumas componentes harmônicas, ou pares de componentes (por exemplo, 5^a e 7^a, produzindo uma resultante de 6^a harmônica) podem estimular oscilações mecânicas em sistemas turbina-gerador ou motor-carga, devido a um potencial excitação de ressonâncias mecânicas.

Em transformadores, também se nota um aumento nas perdas. Harmônicos na tensão aumentam as perdas ferro, enquanto harmônicos na corrente elevam as perdas cobre. A elevação das perdas cobre deve-se principalmente ao efeito pelicular, que implica na redução

da área efetivamente condutora à medida que se eleva a frequência da corrente (SALIH, 2014).

Associada à dispersão existe ainda outro fator de perdas que se refere às correntes induzidas pelo fluxo de dispersão. Esta corrente manifesta-se nos enrolamentos, no núcleo, e nas peças metálicas adjacentes aos enrolamentos. Estas perdas crescem proporcionalmente ao quadrado da frequência e da corrente.

3.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A teoria de distorção harmônica apresentada neste capítulo ilustra a forma de quantificar matematicamente os seus níveis por meio da série de Fourier. Dessa forma, os sistemas elétricos nacionais e internacionais impõem índices, regulamentações e limites de harmônicos no sistema.

Portanto, este capítulo foi produzido com o intuito de analisar os efeitos das harmônicas para que no próximo seja apresentado as consequências ao submeter as máquinas em regime permanente não senoidal.

CAPÍTULO 4

GERADORES EM REGIME PERMANENTE NÃO SENOIDAL

4.1 INTRODUÇÃO

As cargas não lineares são responsáveis pela geração de harmônicos, devido aos chaveamentos dos dispositivos que empregam eletrônica de potência. Este problema em regime permanente não senoidal, irá se refletir na forma e operação do gerador síncrono: rendimento, fator de potência, aquecimento e instabilidades. Tais anomalias se refletirão no aumento das perdas elétricas (estresse térmico e dielétrico), e danos mecânicos, o que, do ponto de vista elétrico e econômico, não é interessante.

Desta forma, observa-se que o tema não foi muito explorado, e devido à sua complexidade, deve-se direcionar a necessidade de investigações sobre o assunto. Somado a este fato, a avaliação das consequências da operação de cargas não lineares sobre o comportamento das máquinas síncronas é de grande interesse, nas fases de planejamento, projeto e operação de sistemas elétricos, de forma a permitir em tempo, a devida avaliação da necessidade de mitigação de tais efeitos sobre esses equipamentos.

Finalmente, cabe destacar que o avanço da cogeração, especialmente em setores de pequeno e médio portes, está se tornando uma realidade cada vez mais comum, o que aumentará o número de geradores, os quais estarão mais próximos das cargas geradoras de harmônicos e portanto, podem sofrer esses efeitos de uma forma mais acentuada.

4.2 GERADOR SÍNCRONO EM REGIME PERMANENTE NÃO SENOIDAL

Quando o gerador síncrono alimenta cargas não lineares, outros componentes harmônicos aparecem através das correntes no estator além das que apresentam a componente fundamental. Esses harmônicos causam distúrbios no campo magnético do gerador. Tais cargas não lineares são criadas devido aos chaveamentos dos dispositivos que empregam eletrônica de potência conforme a Figura 4.1 que ilustra um sistema com um gerador alimentando um resistor por meio de um retificador de diodo. O conjunto resistor-diodo atua como uma carga não linear.

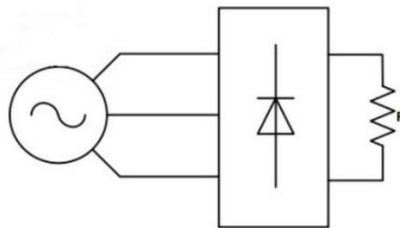


Figura 4.1 – Carga não linear e um gerador. Adaptado de (IZADFAR, 2017)

4.2.1 OSCILAÇÕES DE CONJUGADO

De forma qualitativa a distribuição senoidal da força magneto motriz gerada por cada enrolamento, desprezando efeitos dos harmônicos espaciais dos componentes da força magneto motriz produzida pelos enrolamentos do gerador síncrono por correntes não senoidais é dada por:

$$F_{MMHtotal} = \sum F_{MMH} \quad 4.1$$

Onde

$$F_{MMH} = KI_H [\cos(\theta)\cos(H\omega t) + \cos(\theta - 120^\circ)\cos(H\omega t - 120^\circ) + \cos(\theta + 120^\circ)\cos(H\omega t + 120^\circ)]$$

Em que

- F_{MMH} – Perdas totais por correntes parasitas [W];
- K – Constante de projeto do enrolamento da máquina;
- I_H – Corrente eficaz;
- θ – Ângulo espacial com origem em uma das fases do estator [graus];
- ω – Velocidade síncrona [rad/s].

A tabela 4.1 sumariza os valores da FMM para alguns índices ímpares das harmônicas

Índice	$F_{MMHtotal}$
1	$\frac{3}{2}KI_1[\cos(\theta - \omega t)]$
3	0
5	$\frac{3}{2}KI_5[\cos(\theta + 5\omega t)]$
7	$\frac{3}{2}KI_7[\cos(\theta - 7\omega t)]$

Tabela 4.1 – Força magneto motriz (FMM) por índice harmônico.

Para demais harmônicas a regra consiste em apenas mudar o índice H , ou seja, para o próximo valor do índice temos:

- $H = 9$ que é ao 0 e sendo igual a $H = 3$;
- $H = 11$ e igual a $H = 5$;
- $H = 13$ e igual a $H = 1$;

e assim sucessivamente.

A Figura 4.2 representa as velocidades das harmônicas de 5ª e 7ª além da fundamental vista pelo estator.

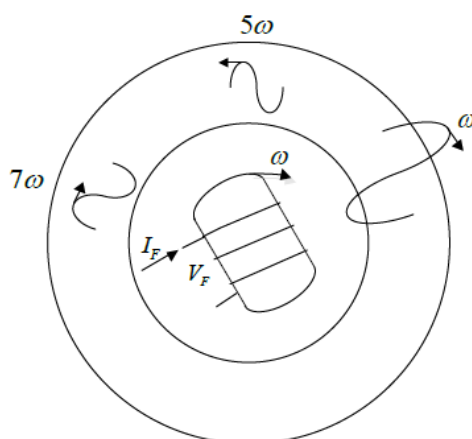


Figura 4.2 – Componentes da FMM (ALVES, 2011).

Percebe-se que as correntes de 5ª ordem harmônica ao circularem nos enrolamentos do estator geram um campo magnético rotativo de cinco (5) vezes o valor da velocidade síncrona e por serem de sentido contrário ao do campo do rotor, induzem neste, uma tensão de (6) vezes do fundamental ($\omega - (-5\omega) = 6\omega$). De forma similar, mas para as correntes 7ª ordem produzirão um campo magnético que gira na mesma direção do rotor, resultando em um campo magnético nos enrolamentos do rotor com uma velocidade de (6) vezes a velocidade síncrona ($7\omega - \omega = 6\omega$).

Tais correntes de quinto e sétimo harmônico resultam um torque pulsante mas contínuo. Dentro do rotor, este efeito é semelhante a uma operação desequilibrada. De forma semelhante, harmônicas de 11ª e 13ª ordem produzirão harmônicas com rotação negativa e positiva no rotor de 12ª ordem, esses valores podem coincidir com a frequência natural do conjunto (turbina + rotor), ocasionando uma fadiga mecânica no eixo por ressonância e em casos críticos podendo fazer a máquinas sair de sincronismo com o sistema (JORDÃO, 2013).

4.2.2 PERDAS

As perdas de ferro compreendem duas perdas separadas, “perdas por histerese” e “perdas por correntes parasitas”. A perda por histerese é a energia consumida devido à não linearidade da densidade de fluxo do gerador / curva de força de magnetização e a reversão subsequente no campo magnético do núcleo do gerador cada vez que a corrente muda de polaridade. Perdas de histerese mais altas ocorrem em frequências harmônicas devido às reversões mais rápidas em comparação com aquelas na frequência fundamental, sendo proporcionais à frequência e ao quadrado do fluxo magnético.

As Correntes parasitas, por sua vez, circulam no núcleo de ferro, enrolamentos e outras partes que componentes do gerador induzidas pelos campos magnéticos dispersos em torno das voltas nos enrolamentos do gerador. As correntes parasitas produzem perdas que aumentam em proporção ao quadrado da frequência. A relação das perdas por correntes parasitas e harmônicas é dada por:

$$P_{PT} = P_{PF} \sum_{H=1}^n I_{EH}^2 H$$

Onde,

- P_{PT} – Perdas totais por correntes parasitas [W];
- P_{PF} – Perdas de correntes parasitas em plena carga na frequência fundamental
- I_{EH} – Corrente eficaz da harmônica de índice H ;
- H – Índice da harmônica.

Em cargas lineares, as perdas de correntes parasitas são bastante menores, mas se tornam mais significativas com o aumento de conteúdo harmônico. As perdas de cobre são dissipadas nos enrolamentos do gerador quando a corrente passa pela resistência do enrolamento. Para uma determinada carga, quando correntes harmônicas estão presentes, o valor eficaz total da corrente que passa pelos enrolamentos será aumentado, aumentando assim as perdas.

As perdas de cobre também são influenciadas por um fenômeno denominado “efeito pelicular” que se refere à tendência de o fluxo da corrente ficar confinado em um condutor a uma camada próxima à sua superfície externa. Na frequência fundamental, o efeito de pelicular é insignificante e a distribuição de corrente pelo cabo é praticamente uniforme. No

entanto, em frequências harmônicas, o efeito é substancialmente pronunciado, reduzindo significativamente a área da seção transversal efetiva do condutor e aumentando sua resistência. Quanto maior a resistência, maiores são as perdas I^2R . A corrente do estator harmônico originária da carga não linear resultará em fluxos de entreferro, semelhante em forma ao fundamental, mas girando em frequências harmônicas, induzindo correntes no ferro do rotor e enrolamentos, adicionando às perdas do rotor e ao aumento de temperatura associado.

4.3 GERADOR ASSÍNCRONO EM REGIME PERMANENTE NÃO SENOIDAL

As correntes no rotor, assim como as tensões estão na frequência de escorregamento quando em regime senoidal. Para a análise das operações em regime não senoidal, existirá um escorregamento para cada ordem harmônica, logo, escorregamento para a frequência fundamental e para as parcelas da 5ª e 7ª podem ser dadas respectivamente pelas equações 4.2 a 4.4 conforme (FUCHS; MASOUM, 2011)

$$S_1 = \frac{\omega - \omega_m}{\omega} \quad 4.2$$

$$S_5 = \frac{5\omega - \omega_m}{\omega} \quad 4.3$$

$$S_7 = \frac{7\omega - \omega_m}{\omega} \quad 4.4$$

De forma geral, o escorregamento pode ser expresso como:

$$S_H = \frac{H\omega - (\pm)\omega_m}{\omega} \quad 4.5$$

Em que:

S_H – Escorregamento devido às ordens das harmônicas;

H – Índice (ordem) da harmônica;

ω_m – Velocidade mecânica do rotor [rad/s];

ω – Velocidade síncrona [rad/s].

Com relação à equação 4.5, o valor positivo é para as componentes harmônicas de sequência negativa, e o valor negativo é para as componentes harmônicas de sequência positiva.

Assim, como na máquina síncrona, as correntes harmônicas de 5ª e 7ª ordem irão produzir torques nas frequências de 5ω e 7ω . A soma fasorial produz um torque eletromagnético permanente, desenvolvido pela componente fundamental somado a um torque pulsante de 6ω , resultado da diferença das velocidades dos campos magnéticos produzidos por estas componentes $(\omega - (-5\omega)) = 6\omega$ e $(7\omega - (\omega)) = 6\omega$.

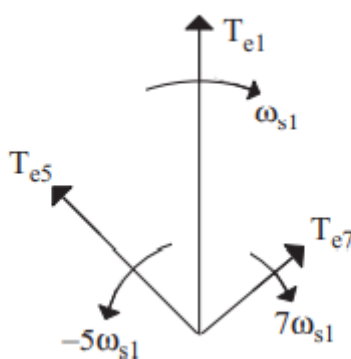


Figura 4.3 – Representação fasorial da superposição dos torques (FUCHS; MASOUM, 2011).

A superposição do torque da componente fundamental ($H=1$), de quinta harmônica ($H = 5$) e de sétima harmônica ($H = 7$) é dado por:

$$T_e = T_{e1} + T_{e5} + T_{e7} = T_L + T_{6\omega} \quad 4.6$$

Sendo que:

T_e – Torque eletromagnético resultante [N.m];

T_{e1} – Torque eletromagnético devido à componente fundamental [N.m];

T_{e5} – Torque eletromagnético devido à componente harmônica de quinta ordem [N.m];

T_{e7} – Torque eletromagnético devido à componente harmônica de sétima ordem [N.m];

T_L – Torque de carga [N.m] e

$T_{6\omega}$ – Parcela de torque pulsante do torque eletromagnético resultante [N.m].

Incluindo as componentes harmônicas H , de ordem ímpares, a equação de torque eletromagnético pode ser representada matematicamente conforme a seguir (OLIVEIRA, 2018);

$$T_e = T_L + \sum \frac{T_{eH\pm 1}}{2}$$

Sendo assim, o torque eletromagnético resultante é a combinação do torque eletromagnético contínuo com os torques eletromagnéticos pulsantes múltiplo da frequência de 6ω .

4.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo apresentou a análise dos efeitos das componentes harmônicas sobre as máquinas elétricas síncronas e de indução. Alguns trabalhos demonstram uma análise mais detalhada para a influência de componentes harmônicas. Um desenvolvimento matemático detalhado foi apresentado em Delbone (2012) e também em Fuchs e Masoum (2011). O comparativo teórico, prático e simulado é mostrado em Magalhães (2019).

CAPÍTULO 5

METODOLOGIA

5.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta os materiais e métodos realizados para análise da operação do gerador síncrono e do gerador de indução em paralelo com uma carga não linear. Será também descrito as ferramentas que serão utilizadas para realizar a avaliação do conteúdo das harmônicas cujo objetivo central é comparar os resultados medidos e simulados.

5.2 METODOLOGIA

Com o intuito de observar o fluxo harmônico do gerador síncrono e de indução, utilizou-se como base de dados as medições realizadas em uma bancada experimental que permite realizar análises físicas entre o gerador síncrono e gerador de indução em regime permanente não senoidal. A bancada é composta por um gerador síncrono *SG*, cujo máquina primária é um motor a diesel, um gerador de indução *IG*, cuja máquina primária é um motor de indução e uma carga não linear *NL*. A carga não linear *NL* é formada por um retificador trifásico e alimenta um conjunto de lâmpadas. O objetivo foi focado em verificar as grandezas elétricas, como tensão, corrente, potência, e também os níveis harmônicos existentes nos pontos de medição.

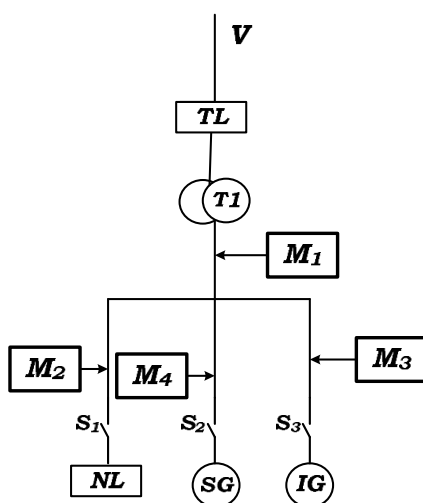


Figura 5.1 – Representação da bancada de teste (MAGALHÃES *et al.*, 2016).

A figura 5.1 representa a bancada descrita acima. Observa-se que TL é o alimentador primário da bancada, T_1 é o transformador, S_1 , S_2 e S_3 são as chaves de conexão e por fim M_1 , M_2 , M_3 e M_4 são os medidores. Os medidores registram os efeitos na geração de potência elétrica e as alterações obtidas no conteúdo harmônico com o chaveamento do sistema.

Os dados obtidos foram coletados em três etapas de medições:

- i) conexão da carga não linear *NL* através da chave S_1 ;
- ii) após a conexão da carga não linear *NL*, foi realizado a conexão do gerador de indução *GI*, através da chave S_3 ;
- iii) desconexão do gerador de indução *GI* através da chave S_3 e conexão do gerador síncrono *GS* através da chave S_2 .

Portanto, para critérios de validação dos resultados que serão obtidos por meio da bancada, será desenvolvido uma simulação por meio de ferramentas computacionais. A simulação seguirá as mesmas etapas da metodologia dos experimentos práticos conforme ilustrado na Figura 5.1.

5.2 DESCRIÇÃO DOS ESTUDOS PROPOSTOS

De posse dos dados foram propostos dois estudos cada qual contemplando diferentes cenários conforme descritos a seguir. Estes cenários serão desenvolvidos tanto em bancadas de testes, quanto em simulações computacionais, no qual serão avaliados os níveis de distorção harmônica bem como o perfil de tensão e corrente além da apresentação de tabelas com dados de potência, fator de potência em três pontos do sistema, a constar: M_1 – Secundário do transformador, M_2 – Carga não linear, M_3 – Gerador de indução e M_4 – Gerador síncrono.

No primeiro estudo de caso, o gerador de indução será conectado à carga não linear por meio do barramento comum e, em seguida será submetido a dois cenários distintos por meio da variação da velocidade da máquina.

Já no segundo estudo de caso, a carga não linear será conectada ao gerador síncrono e este será submetido à três cenários distintos por meio da variação da tensão de excitação, onde tem-se um caso base, um caso com o gerador sobreexcitado e um caso com o gerador subexcitado.

5.3 FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS

Duas ferramentas serão objetos principais para o estudo e interpretação dos dados da bancada de teste, o DataView para uma análise prévia dos arquivos e o MATLAB® para validação dos dados coletados.

5.3.1 DATAVIEW

O DataView¹ é um software de análise e geração de gráficos. Este software permite configurar e capturar dados em tempo real em um computador. Também permite descarregar todas as informações armazenadas no **PowerPad 8335** um analisador de energia trifásico, e imprimir relatórios, escolhidos em uma biblioteca de modelos prontos ou customizados.

O **PowerPad 8335** é um equipamento compacto e robusto. Destinado a técnicos e engenheiros para medir e realizar diagnósticos de trabalho e qualidade de energia em sistemas de tensão monofásicos, bifásicos e trifásicos. A memória interna de 2 GB permite armazenar 4 tipos diferentes de dados, sincronizados ou independentes entre si. É possível armazenar até 50 capturas de tela (screen snapshot), até 210 transientes capturados que contenham quatro ciclos por cada entrada ativa e 10.000 alarmes de eventos de até 40 parâmetros diferentes.

O aparelho utiliza alicates de prova que auto configuram o canal de corrente do instrumento para cada intervalo e escala. Os dados gerados pelo analisador são exportados em um formato com extensão do tipo *.icp*. No âmbito deste trabalho, tais dados de cada estudo proposto foram importados para o software DataView e exportados novamente agora para o formato *.csv* para tratamento e geração de gráficos mais elaborados.

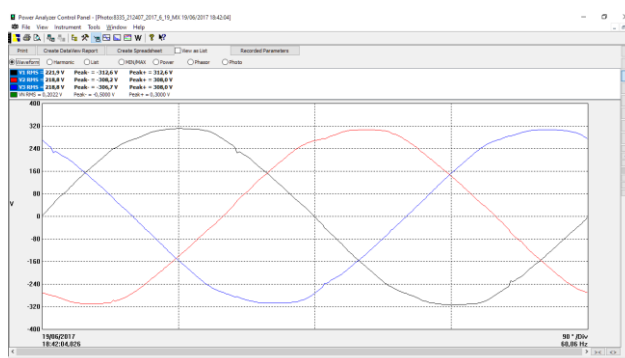


Figura 5.2 – Tela ambiente do DataView: Power Analyzer Control Panel (Próprio autor).

¹ Disponível em: <https://www.aemc.com/applications/dataview>

Dentre as funcionalidades do software destacamos as funções *Waveform*, que permite visualizar o perfil de tensão e corrente conforme ilustrado na Figura 5.2, *Harmonics* para avaliação do espectro de amplitude harmônico e a opção *Phasor* que fornece uma opção gráfica de visualização do deslocamento angular das tensões e correntes.

5.3.2 MATLAB®

Para realizar a validação dos dados coletados na bancada de testes, foi utilizado a ferramenta computacional MATLAB® e, de forma mais específica, o ambiente Simulink. Desenvolvido pela companhia MathWorks, o MATLAB® é um software interativo de alta performance criado para realizar cálculos numéricos e tem como principais funções: construção de gráficos e compilação de funções, manipulação de funções específicas de cálculos e variáveis simbólicas. Além disso, o programa possui uma grande quantidade de bibliotecas auxiliares que otimizam o tempo gasto para realizar tarefas.

Integrada a este software, o Simulink é uma ferramenta de simulação que permite modelar, simular e analisar sistemas dinâmicos. O Simulink utiliza uma interface gráfica ao invés de linhas de comandos por meio de diagramas de blocos que facilitam a interação com o utilizador. O Simulink inclui uma biblioteca de blocos pré-definidos, mas o utilizador pode igualmente criar os seus próprios blocos.

5.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As distorções harmônicas de corrente e tensão, alvo de estudo deste trabalho e apresentadas nos conjuntos de dados nos permitirá fazer um estudo em cima dos parâmetros e utilizá-los para realizar análises e comparação tendo como parâmetros os limites estabelecidos pelas normas nacionais e internacionais. Sendo assim, espera-se que para cada cenário de estudo proposto e baseado na metodologia, seja possível verificar o impacto das distorções de tensão e corrente no sistema, sujeito à carga não linear.

CAPÍTULO 6

RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos com o emprego de análise e visualização dos dados coletados em bancada. Tais experimentos, tem como objetivo observar os níveis de distorção harmônicas em geradores de indução e síncronos e comparar com valores estabelecidos em normas técnicas. Será realizado também a comparação entre os dados coletados em bancada com os dados obtidos por meio de simulações computacionais por meio do software MATLAB®.

Objetivando identificar e quantificar as oscilações nas variáveis elétricas dos geradores, bem como comparar as distorções harmônicas de tensão e corrente, e as oscilações no gerador síncrono, foram propostos dois estudos que avaliam de forma separada o impacto de uma carga não linear alimentada por tais máquinas.

6.2 DESCRIÇÃO DOS EQUIPAMENTOS

Conforme destacado, os dados são oriundos de uma bancada de teste que forma um sistema composto por duas unidades geradoras, uma síncrona e outra de indução. Ambas as unidades estão em paralelo alimentando a carga não linear NL constituída por um retificador a triac modelo, BTA41-600B, que alimenta conjuntos de lâmpadas com potência trifásica de 14kW, 3 lâmpadas que totalizam 5kW para duas fases e um conjunto de 2 lâmpadas com 4kW para a terceira fase.

Como máquina primária do GS foi utilizado motor ciclo diesel com potência de 38,7kW e como máquina primária do GI foi utilizado motor de indução com potência de 7,5kW acionado por inversor de frequência de 9,2kW, conforme Tabela 6.1.

Gerador Síncrono – GS	37kVA, 380V, trifásico, polos salientes, 4 polos, 60Hz
Gerador de Indução – GI	7,5kVA, 380V trifásico, rotor bobinado 4 polos, 60Hz
Carga Não Linear – NL	14kW trifásica, 380V, 60Hz

Tabela 6.1 – Características gerais dos equipamentos.

6.3 PARÂMETROS INTERNOS DO SISTEMA

Para tornar a simulação computacional uma alternativa para comparação com os dados coletados em bancada, é necessário que se tenha os valores dos parâmetros de entrada do sistema e dos equipamentos utilizados. Os parâmetros de entrada são os mesmos adotados no procedimento prático e os parâmetros dos equipamentos geralmente são fornecidos pelo fabricante.

Neste trabalho, os parâmetros construtivos da máquina de indução são encontrados utilizando a regressão paramétrica e o resultado é comparado com os valores disponibilizados no catálogo do fabricante. Os parâmetros construtivos da máquina síncrona são encontrados apenas pela regressão paramétrica, uma vez que se trata de máquina antiga e remodelada (MAGALHÃES, 2019).

Os parâmetros de entrada do sistema para o gerador síncrono são a tensão de excitação do campo V_f e a potência mecânica da máquina primária P_{MEC} . No entanto, tem-se que os parâmetros de entrada do gerador de indução são a tensão de excitação do campo V_f , potência mecânica da máquina primária P_{MEC} , velocidade mecânica W e o ângulo teta de disparo da carga não linear.

As saídas coletadas utilizando os analisadores de energia conforme ilustrado na figura 5.1 fornecerá os dados de: i) potência ativa P , ii) potência reativa Q , iii) potência aparente S , iv) fator de potência fp , v) distorção harmônica total de tensão DHT_V e vi) distorção harmônica total de corrente DHT_I . Dessa forma é possível verificar o impacto das distorções de tensão e corrente no SEPI, sujeito à carga não linear, em cada ponto de medição.

6.4 ESTUDOS DE CASO

Esta seção tem como objetivo apresentar os dados analisados dos estudos propostos avaliados conforme expostos na metodologia. Foram feitas as coletas e análises nos seguintes pontos: M1 - Medição no Secundário do Transformador, M2 - Medição na carga, M3 - Medição no Gerador de Indução e M4 - Medição no Gerador Síncrono. A seguir, será abordado os estudos propostos na metodologia de forma detalhada.

➤ **Estudo de caso 1 - Gerador de Indução Conectado à Carga Não Linear.**

Composto por dois cenários distintos, onde será avaliado os impactos das cargas não linear em paralelo com o gerador de indução quando sujeito à duas velocidades distintas. De forma resumida tem-se:

- *Cenário 1 – gerador de indução com $w = 1840$ rpm.*
- *Cenário 2 – gerador de indução com $w = 1830$ rpm.*

➤ **Estudo de caso 2 - Gerador Síncrono Conectado à Carga Não Linear.**

Neste estudo será apresentado três cenários:

- *Cenário 1 – gerador síncrono – caso base.*

Este cenário será feito o levantamento dos dados com o gerador síncrono conectado em paralelo à carga não linear, sendo este considerado o caso base deste estudo, quando a tensão de campo, ou excitação de for de 71,2V.

- *Cenário 2 – gerador síncrono sobreexcitado.*

Neste cenário o gerador síncrono está em regime de sobreexcitação, enviando reativos para rede, ou seja, se comportando como o capacitor. A tensão de campo neste caso será de 77,8V.

- *Cenário 3 – gerador síncrono subexcitado.*

Este estudo levará em consideração o gerador síncrono com tensão de campo de 46,3 volts conectado a carga não linear, nessa configuração ele estará em estado de subexcitação e consumindo reativos da rede.

6.3.1 ESTUDO DE CASO 1 - GERADOR DE INDUÇÃO CONECTADO À CARGA NÃO LINEAR

Nesse cenário a velocidade do gerador de indução é ajustada para que esteja na velocidade superior a síncrona do campo girante de seu estator e logo em seguida em paralelo uma carga não linear. Para análise do conteúdo harmônico foi proposto dois cenários distintos apresentados a seguir:

- **CENÁRIO 1 – GERADOR DE INDUÇÃO COM $w = 1840$ RPM - CASO BASE**

Nesse cenário o gerador de indução foi submetido à velocidade de rotação de 1840rpm. A Figura 6.1 representa as formas de onda de tensão e corrente no gerador de indução. A Figura 6.2 representa as formas de onda de tensão e corrente no secundário do

transformador e por fim, a Figura 6.3 representa as formas de onda de tensão e corrente na carga. Vale ressaltar que as Figuras 6.1, 6.2 e 6.3 são referentes aos dados experimentais.

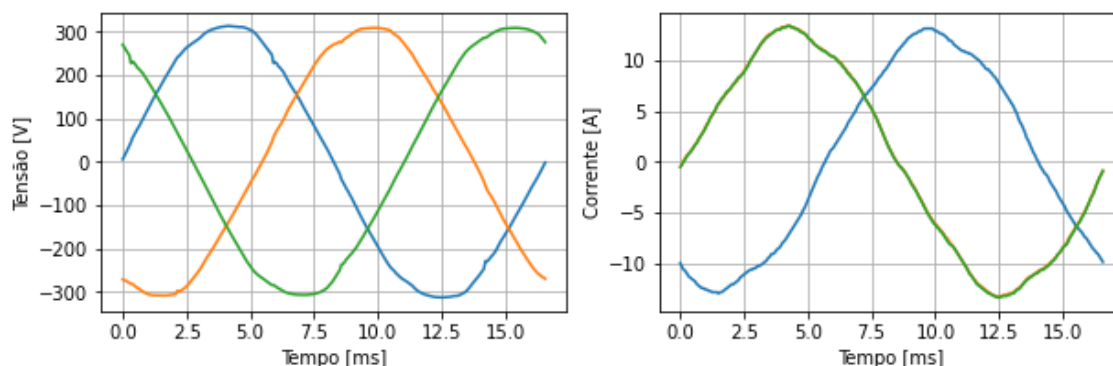


Figura 6.1 – Formas de onda de tensão e de corrente no gerador de indução com $W = 1840$ rpm.

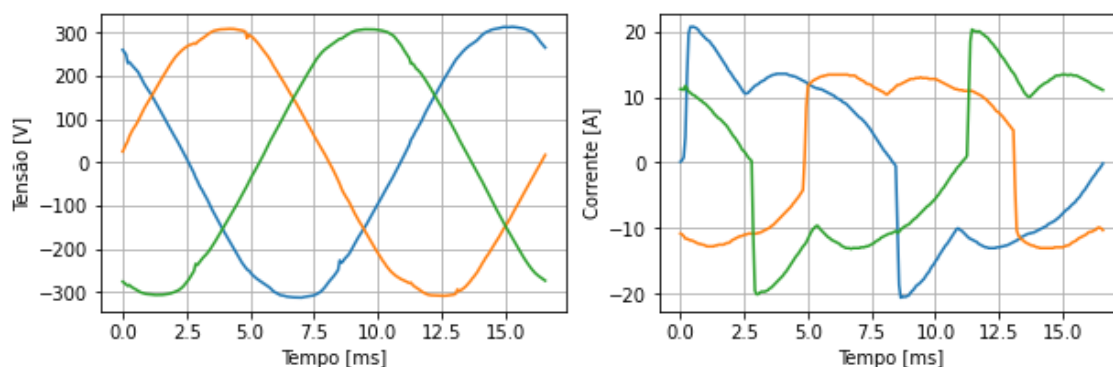


Figura 6.2 – Formas de onda de tensão e de corrente no secundário do transformador com $W = 1840$ rpm.

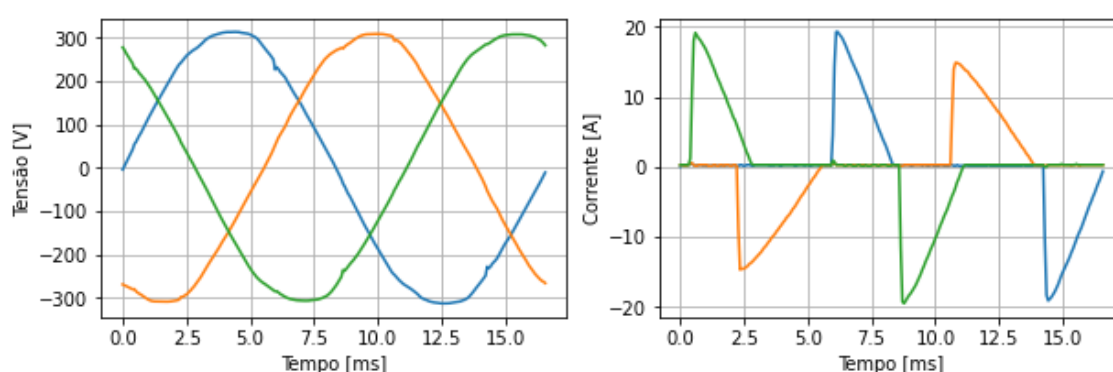


Figura 6.3 – Formas de onda de tensão e de corrente na carga com $W = 1840$ rpm.

Nota-se que as formas de onda de tensão no gerador de indução, no secundário do transformador e na carga apresentam leves distorções, se aproximando do formato senoidal. Contudo, as distorções nas formas de onda de corrente são significantes.

Pode-se observar que as distorções nas formas de onda de corrente no gerador de indução são menores se comparada com o secundário do transformador e a carga. No secundário do transformador as formas de onda de corrente são mais alteradas, porém, a carga possui a maior perturbação, formando picos de 90° conforme ilustrado na Figura 6.3.

- **CENÁRIO 2 - GERADOR DE INDUÇÃO COM $W = 1830$ RPM**

Nesse estudo o gerador de indução em paralelo com a carga não linear e mantido a velocidade constante acima da velocidade síncrona, em 1830 rpm. A Figura 6.4 representa as formas de onda de tensão e corrente no gerador de indução. A Figura 6.5 representa as formas de onda de tensão e corrente no secundário do transformador e por fim, a Figura 6.6 representa as formas de onda de tensão e corrente na carga. As Figuras 6.4, 6.5 e 6.6 são referentes aos dados experimentais.

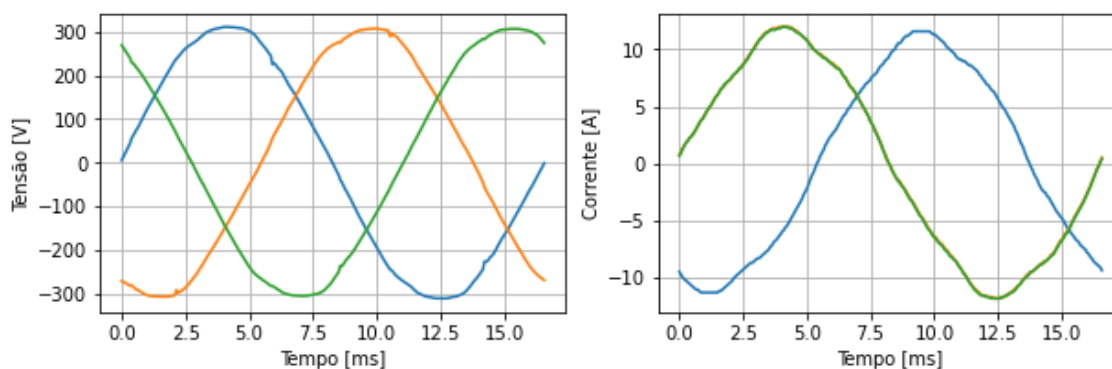


Figura 6.4 – Formas de onda de tensão e de corrente no gerador de indução com $W = 1830$ rpm.

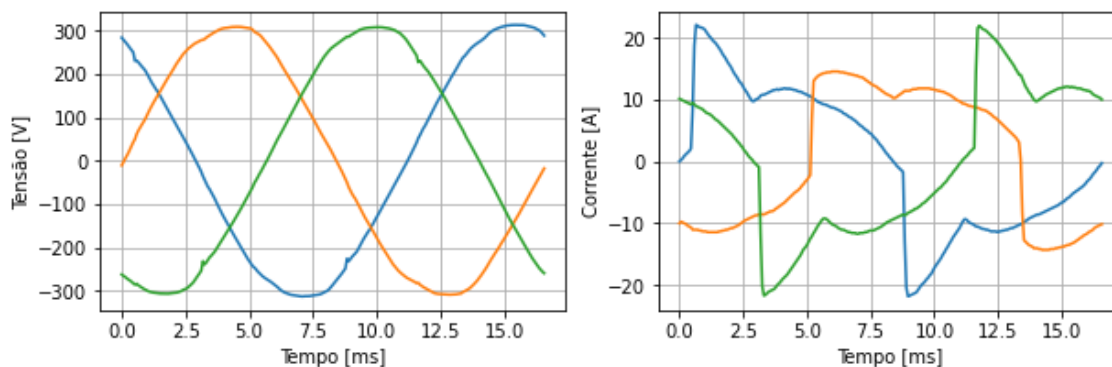


Figura 6.5 – Formas de onda de tensão e de corrente no secundário do transformador com $W = 1830$ rpm.

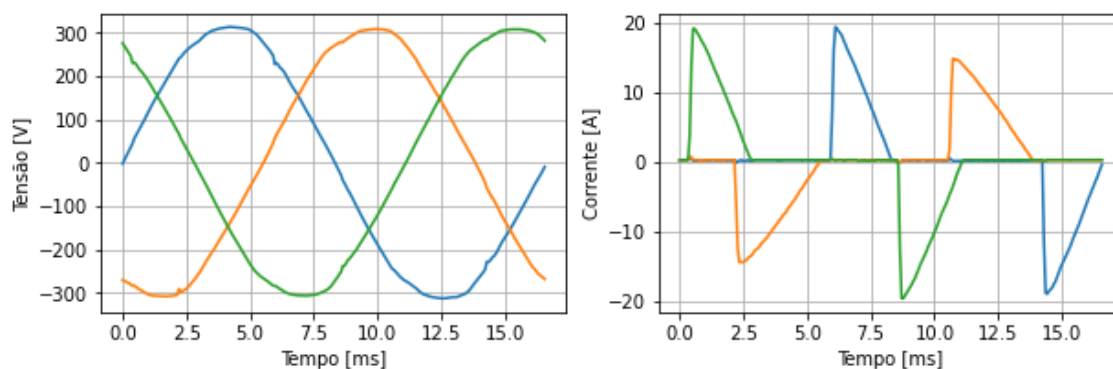


Figura 6.6 – Formas de onda de tensão e de corrente na carga com $W = 1830$ rpm.

Nota-se que as formas de onda de tensão e de corrente para o gerador de indução com velocidade de rotação de 1830 rpm são próximas aos formatos de onda quando o gerador de indução é submetido à velocidade de rotação de 1840 rpm. A seguir, será abordado e discutido os valores coletados e simulados.

• ANÁLISE DOS DADOS COLETADOS E SIMULADOS

Na tabela 6.2 estão representados os dados coletados na bancada de teste e os dados simulados por meio do software MATLAB®. Nela consta os dados de fluxo de potência para os três pontos de medição bem como os valores de distorção harmônica total de tensão e correntes e o fator de potência.

Gerador de Indução + Carga Não Linear							
EXPERIMENTAL	PONTO DE MEDIÇÃO	TDHV%	TDHI%	W	Var	VA	FP
	W = 1830 rpm						
	M1 - Medição no Secundário do Transformador	1,90	44,53	-954	6804	7538	0,126
	M2 - Medição na Carga	1,90	105,50	1719	2246	4165	0,417
	M3 - Medição no Gerador de Indução	1,83	4,17	-2598	1437	5256	0,494
	W = 1840 rpm						
	M1 - Medição no Secundário do Transformador	1,80	41,57	-1921	7012	7881	0,243
	M2 - Medição na Carga	1,90	105,70	1724	2246	4171	0,417
	M3 - Medição no Gerador de Indução	1,90	4,07	-3135	1338	5972	0,525
SIMULADO	W = 1830 rpm						
	M1 - Medição no Secundário do Transformador	2,00	91,77	-1796	6164	7363	0,416
	M2 - Medição na Carga	2,00	125,23	2101	3578	4235	0,833
	M3 - Medição no Gerador de Indução	2,00	1,01	-3897	2586	4678	0,599
	W = 1840 rpm						
	M1 - Medição no Secundário do Transformador	2,00	78,86	-2941	7155	8648	0,457
	M2 - Medição na Carga	2,00	125,23	2124	3600	4266	0,818
	M3 - Medição no Gerador de Indução	2,00	0,76	-5065	3556	6190	0,599

Tabela 6.2 – Dados coletados em bancada e simulados.

De acordo com a Tabela 6.2, pode-se observar que no ponto de medição do secundário do transformador M1, o total de distorção harmônica de tensão e corrente são 1,90% e 44,53% respectivamente para $W = 1830$ rpm. Observa-se também que a potência ativa gerada é de 954 W, porém houve o consumo de 6804 VAR de potência reativo e 7538 VA de potência aparente com fator de potência de 0,126.

No ponto de medição do gerador de indução M3, verifica-se que a potência ativa gerada é de 2598 W e que no ponto de medição na carga M2, o consumo de potência ativa é de 1719 W. Com isso, a geração excedente de 954 W é fornecida para a rede, conforme representado no ponto de medição do secundário do transformador M1. Dessa forma, observa-se que o gerador de indução está suprindo a potência da carga e fornecendo seu excedente para a rede.

Para o caso do gerador de indução com velocidade de $W = 1840$ rpm, nota-se que no ponto de medição do gerador de indução M3 a potência ativa fornecida para a rede é de 3135 W e que a carga consumida é de 1724 W, conforme pode ser visto no ponto de medição M2. Dessa forma, pode-se observar por meio do ponto de medição do secundário do transformador M1, que é fornecido 1921 W para a rede. Com isso, nota-se novamente que o gerador de indução está suprindo a potência da carga e fornecendo seu excedente para a rede.

Com o aumento da velocidade de $W = 1830$ rpm para $W = 1840$ rpm, nota-se que no ponto de medição no gerador de indução M3, a potência ativa fornecida para a rede aumenta de 2598 W para 3135 W. Dessa forma, com o aumento da velocidade de rotação da máquina, nota-se que houve a redução da distorção harmônica total de corrente de 4,17% para 4,07% e além disso, percebe-se também melhora do fator de potência de 0,494 para 0,525.

Pode-se observar também que com o aumento da velocidade de rotação da máquina, a potência ativa fornecida para a rede através do ponto de medição M1 aumentou de 954 W para 1921 W. Com isso, observa-se que quanto maior a velocidade de rotação do gerador de indução, maior será a potência injetada na rede.

Dessa forma, pode-se observar que as variações medidas na bancada de teste estão coerentes com os dados coletados por meio das simulações computacionais devido à terem o mesmo comportamento dos dados expostos na Tabela 6.2.

De acordo com os dados simulados, observa-se que o aumento da velocidade de rotação da máquina de 1830 rpm para 1840 rpm, a potência ativa gerada aumenta de 3897 W para 5065 W no ponto de medição do gerador de indução M3. Além disso, nota-se que a distorção harmônica total de corrente reduz de 91,77% para 78,86% no ponto de medição no secundário do transformador M1 e de 1,01% para 0,76% no ponto de medição do gerador de

indução M3. Dessa forma, confirma-se por meio dos dados simulados que o aumento da velocidade de rotação da máquina provoca o aumento da produção de potência ativa e redução da distorção harmônica total de corrente nos pontos de medição M1 e M3.

Vale ressaltar que a diferença nos valores simulados e práticos se devem à fatores externos que influenciam nas medidas dos analisadores de energia.

Por fim, conclui-se a partir dos dados coletados e simulados que o gerador de indução se comporta como um supressor de harmônicos, conforme descrito anteriormente no capítulo 4.

6.3.2 ESTUDO DE CASO 2 - GERADOR SÍNCRONO CONECTADO À CARGA NÃO LINEAR

Diferentemente do gerado de indução, a análise para o gerador síncrono em paralelo com a carga não linear se deu através da variação da tensão no enrolamento de campo onde propõe-se dois casos além de um caso base para efeito de comparação. As análise e resultados são discutidos conforme a seguir.

- **CENÁRIO 1 – GERADOR SÍNCRONO – CASO BASE**

Como proposta para um caso base para o gerador síncrono, escolheu-se os dados com tensão de excitação igual a 71,2V. A Figura 6.7 representa as formas de onda de tensão e corrente no gerador síncrono. A Figura 6.8 representa as formas de onda de tensão e corrente no secundário do transformador e por fim, a Figura 6.9 representa as formas de onda de tensão e corrente na carga. As Figuras 6.7, 6.8 e 6.9 são referentes aos dados experimentais.

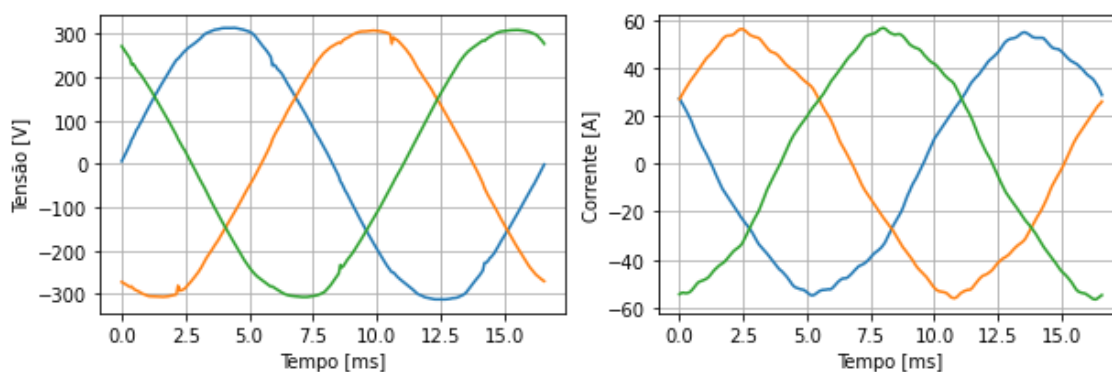


Figura 6.7 – Formas de onda de tensão e de corrente no gerador síncrono com $V_f = 71,2V$.

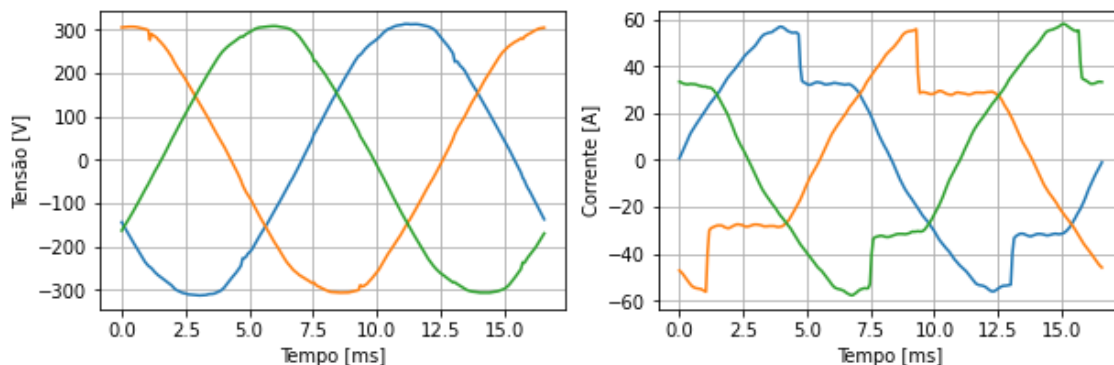


Figura 6.8 – Formas de onda de tensão e de corrente no secundário do transformador com $V_f = 71,2V$.

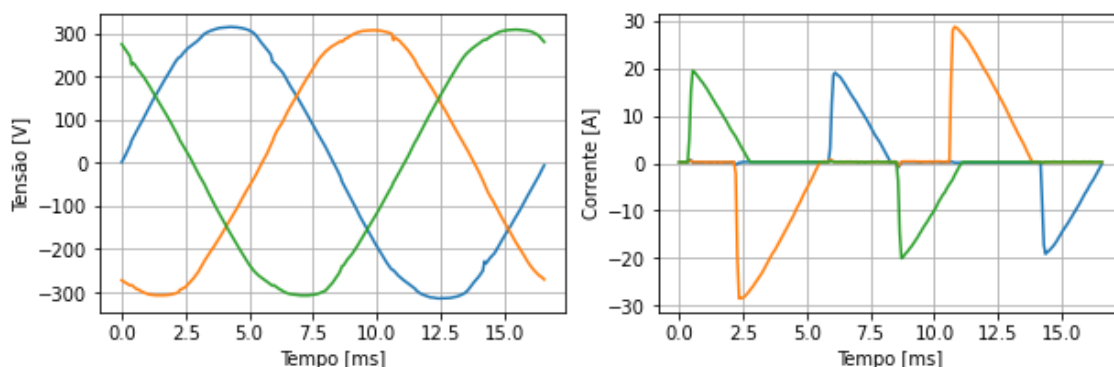


Figura 6.9 – Formas de onda de tensão e de corrente na carga com $V_f = 71,2V$.

Nota-se que as formas de onda de tensão no gerador síncrono, no secundário do transformador e na carga apresentam leves distorções, se aproximando do formato senoidal. Contudo, as distorções nas formas de onda de corrente são significantes, principalmente no secundário do transformador e na carga.

• CENÁRIO 2 - GERADOR SÍNCRONO SOBREEXCITADO

Nessa condição a tensão de excitação imposta ao gerador síncrono sofreu um incremento de 71,2V para 77,8V. De forma análoga aos casos anteriores, a Figura 6.10 representa as formas de onda de tensão e corrente no gerador síncrono. A Figura 6.11 representa as formas de onda de tensão e corrente no secundário do transformador e por fim, a Figura 6.12 representa as formas de onda de tensão e corrente na carga. As Figuras 6.10, 6.11 e 6.12 são referentes aos dados experimentais.

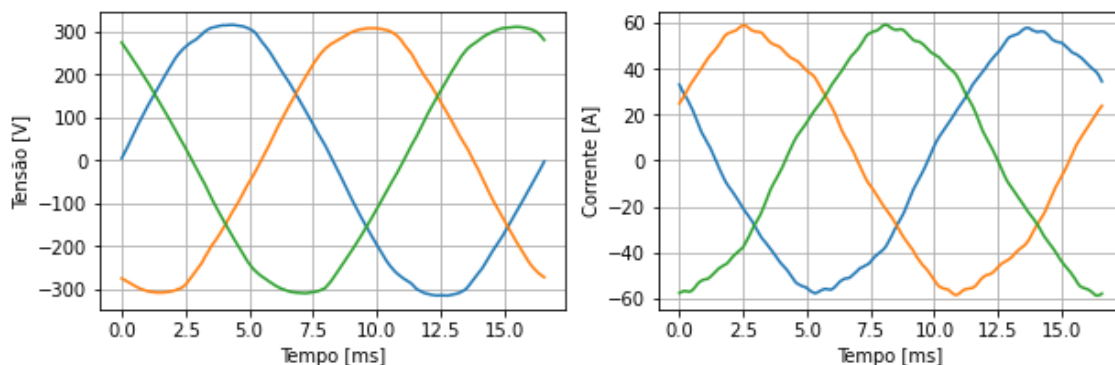


Figura 6.10 – Formas de onda de tensão e de corrente no gerador síncrono com $V_f = 77,8V$.

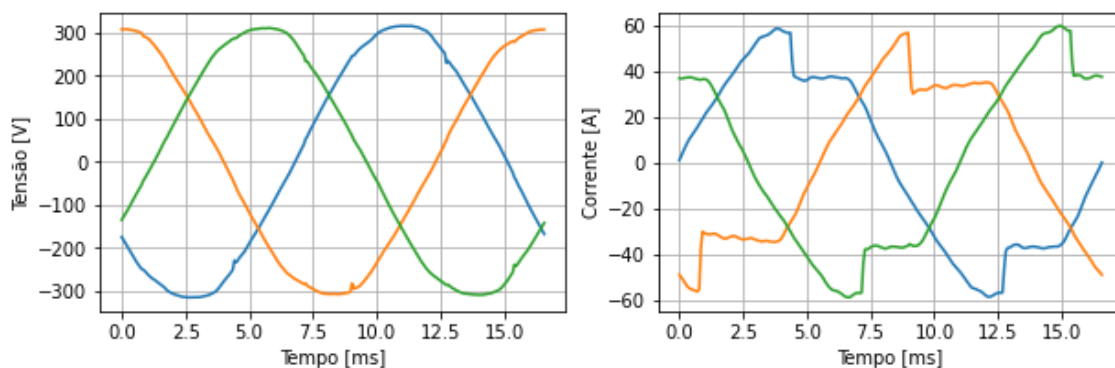


Figura 6.11 – Formas de onda de tensão e de corrente no secundário do transformador com $V_f = 77,8V$.

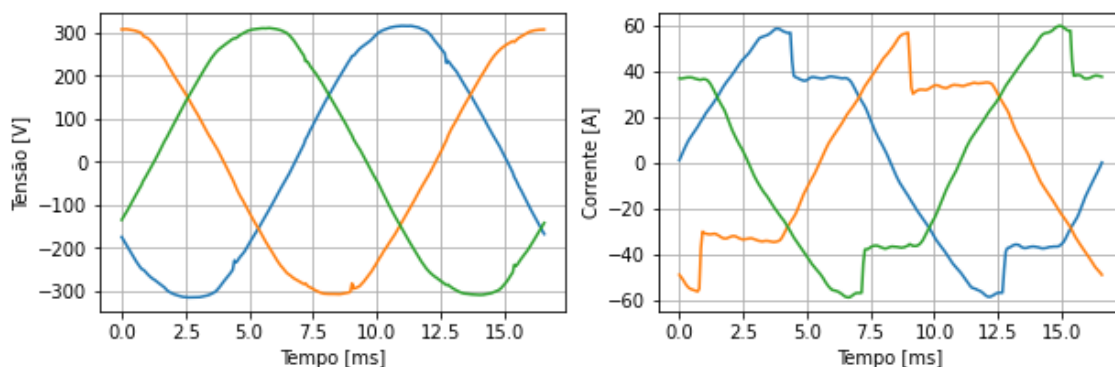


Figura 6.12 – Formas de onda de tensão e de corrente na carga com $V_f = 77,8V$.

Semelhantemente ao cenário base, nota-se que as formas de onda de tensão no gerador síncrono, no secundário do transformador e na carga apresentam leves distorções, se aproximando do formato senoidal. Observa-se que no ponto de medição na carga, as formas de onda de corrente são melhores se comparado com o caso base, devido à suavização dos picos de 90° conforme ilustrado nas Figura 6.9 e 6.12.

• CENÁRIO 3 - GERADOR SÍNCRONO SUBEXCITADO

Nessa condição, ao contrário do cenário apresentado anteriormente, a tensão de excitação imposta ao gerador síncrona sofreu um decréscimo, variando de 71,2V para 46,3V o tornando uma fonte de reativos. Com igualdade aos casos anteriores, a Figura 6.13 representa as formas de onda de tensão e corrente no gerador síncrono. A Figura 6.12 representa as formas de onda de tensão e corrente no secundário do transformador e por fim, a Figura 6.15 representa as formas de onda de tensão e corrente na carga. As Figuras 6.13, 6.14 e 6.15 são referentes aos dados experimentais.

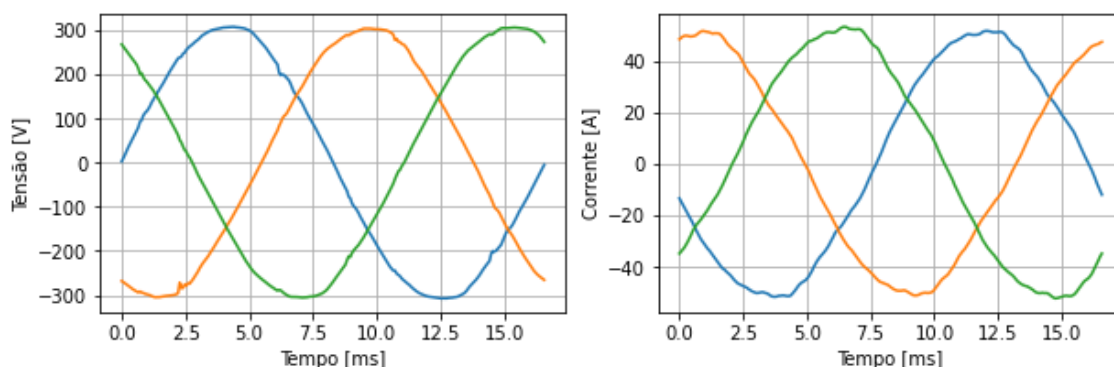


Figura 6.13 – Formas de onda de tensão e de corrente no gerador síncrono com $V_f = 46,3V$.

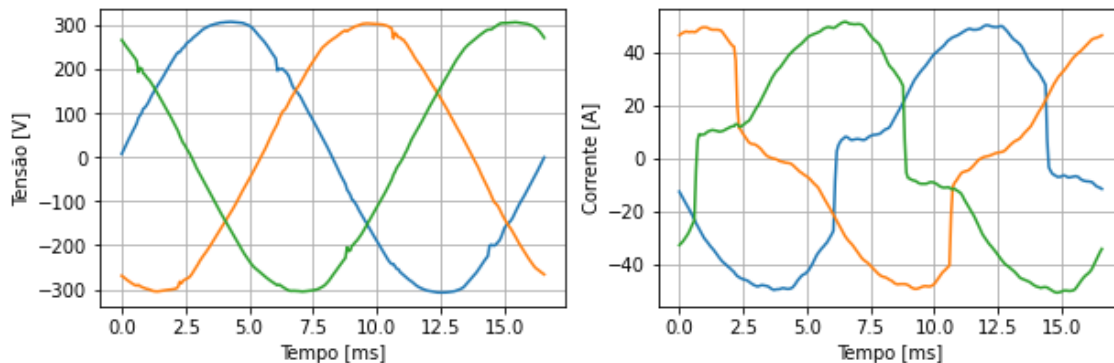


Figura 6.14 – Formas de onda de tensão e de corrente no secundário do transformador com $V_f = 46,3V$.

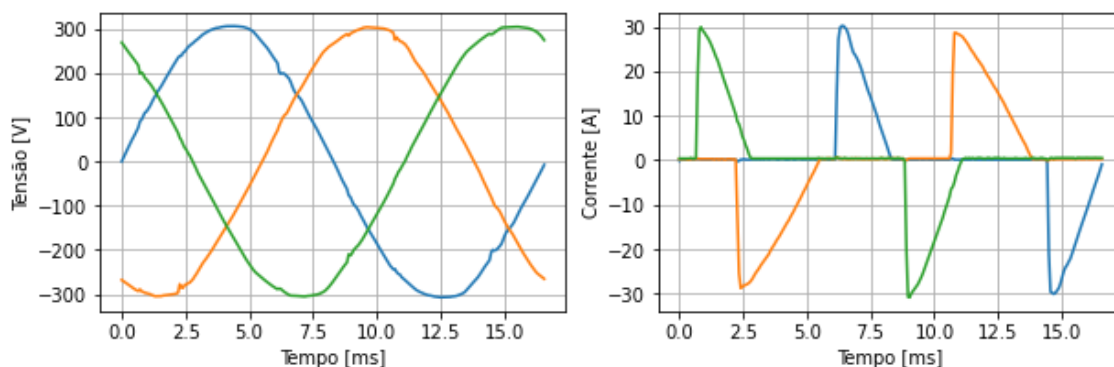


Figura 6.15 – Formas de onda de tensão e de corrente na carga com $V_f = 46,3V$.

Nota-se que as formas de onda de tensão no gerador síncrono, no secundário do transformador e na carga apresentam leves distorções. Entretanto as distorções nas formas de onda de corrente são semelhantes ao caso base, sendo a distorção no secundário do transformador e na carga as mais significantes.

• ANÁLISE DOS DADOS COLETADOS E SIMULADOS

De maneira análoga ao caso anterior, a seguir está sendo representados os dados coletados na bancada de teste e os dados simulados por meio do software MATLAB®. Na tabela constam os dados de fluxo de potência para os três pontos de medição bem como os valores de distorção harmônica total de tensão e correntes e o fator de potência.

Gerador de Síncrono + Carga Não Linear							
EXPERIMENTAL	PONTO DE MEDIÇÃO	TDHV%	TDHI%	W	VA _r	VA	FP
	Vf = 71,2 V						
	M1 - Medição no Secundário do Transformador	1,67	19,23	-20127	-9072	22476	0,895
	M2 - Medição na Carga	1,70	106,00	2353	2909	5397	0,412
	M4 - Medição no Gerador Síncrono	1,76	3,63	-22591	-12728	25945	0,871
	Vf = 77,8 V (Sobreexcitado)						
	M1 - Medição no Secundário do Transformador	1,93	18,33	-20037	-11946	23702	0,845
	M2 - Medição na Carga	1,80	105,96	2372	2921	5431	0,414
	M4 - Medição no Gerador Síncrono	1,93	3,80	-22309	-14854	26821	0,832
	Vf = 46,3 V (Subexcitado)						
	M1 - Medição no Secundário do Transformador	1,60	23,23	-20043	9014	22553	0,888
	M2 - Medição na Carga	1,50	112,13	2634	3681	6827	0,379
	M4 - Medição no Gerador Síncrono	1,50	2,83	-22684	5657	23396	0,969
SIMULADO	Vf = 71,2 V						
	M1 - Medição no Secundário do Transformador	2,00	28,92	-22336	-4653	22946	0,976
	M2 - Medição na Carga	2,00	125,23	2070	3758	4374	0,553
	M4 - Medição no Gerador Síncrono	2,00	3,86	-24405	-8412	25843	0,945
	Vf = 77,8 V (Sobreexcitado)						
	M1 - Medição no Secundário do Transformador	2,00	13,20	-22286	-8462	23925	0,935
	M2 - Medição na Carga	2,00	125,23	2047	3712	4320	0,572
	M4 - Medição no Gerador Síncrono	2,00	3,93	-24333	-12174	27234	0,894
	Vf = 46,3 V (Subexcitado)						
	M1 - Medição no Secundário do Transformador	2,00	23,36	-22220	16144	27729	0,800
	M2 - Medição na Carga	2,00	125,23	2076	3783	4399	0,551
	M4 - Medição no Gerador Síncrono	2,00	3,62	-24295	12361	27291	0,890

Tabela 6.3 – Dados coletados em bancada e simulados do gerador síncrono.

De acordo com a Tabela 6.3, no ponto de medição do gerador síncrono M4 para o caso base com tensão de excitação $V_f = 71,2$ V, verifica-se que a potência reativa gerada é de 12728 VAR e que no ponto de medição na carga M2, o consumo de potência reativa é de 2909 VAR. Com isso, verifica-se que é fornecida para a rede 9072 VAR de potência reativa,

conforme representado no ponto de medição do secundário do transformador M1. Dessa forma, observa-se que o gerador síncrono está suprindo a potência reativa da carga e fornecendo seu excedente para a rede.

Para o caso do gerador síncrono com tensão de excitação $V_f = 77,8 \text{ V}$ (sobree excitado), nota-se que no ponto de medição do gerador síncrono M4 a potência reativa fornecida para a rede é de 14854 VAR e que a carga consome 2921 VAR de potência reativa, conforme representado no ponto de medição da carga M2. Com isso, nota-se que é fornecido 11946 VAR de potência reativa para a rede conforme representado pelo ponto de medição no secundário do transformador M1. Assim, observa-se que o gerador síncrono está suprindo a potência reativa da carga e fornecendo seu excedente para a rede, de igual modo ao caso descrito anteriormente.

No entanto, para o caso do gerador síncrono com tensão de excitação $V_f = 46,3 \text{ V}$ (subexcitado), verifica-se que no ponto de medição do gerador síncrono M4 é consumido 5657 VAR de potência reativa. Além disso, nota-se por meio do ponto de medição da carga M2 que a rede recebeu 3681 VAR de potência reativa. Com isso, verifica-se que a rede consumiu 9014 VAR de potência reativa, conforme representado pelo ponto de medição no secundário do transformador M1. Dessa forma, observa-se que o gerador síncrono e a carga estão consumindo reativo da rede, se opondo ao caso base do gerado síncrono.

Com o aumento da tensão de excitação de $V_f = 71,2 \text{ V}$ para $V_f = 77,8 \text{ V}$, nota-se que no ponto de medição do gerador síncrono M4, a potência reativa fornecida para a rede aumenta de 12728 VAR para 14854 VAR. Além disso, com o aumento da tensão de excitação da máquina, nota-se que houve aumento da distorção harmônica total de corrente de 3,63% para 3,80%. Com isso, conclui-se que quanto maior a tensão de excitação do gerador síncrono, maior será a potência reativa fornecida para a rede. Além disso, quanto maior a tensão de excitação do gerador síncrono, maior será a distorção harmônica total de corrente.

Entretanto, com a redução da tensão de excitação de $V_f = 71,2 \text{ V}$ para $V_f = 46,3 \text{ V}$, observa-se que no ponto de medição do gerador síncrono M4, a máquina muda o comportamento e ao invés de fornecer 12728 VAR de potência reativa para a rede, ela consome 5657 VAR. Nota-se também que a redução da tensão de excitação da máquina provoca a redução da distorção harmônica total de corrente de 3,63% para 2,83%. Dessa forma, conclui-se que quanto menor a tensão de excitação do gerador síncrono, menor será a distorção harmônica total de corrente. Em contrapartida, conclui-se que a redução da tensão de excitação do gerador síncrono provoca mudança no comportamento da máquina conforme descrito acima.

Dessa forma, pode-se observar que as variações medidas na bancada de teste estão coerentes com os dados coletados por meio das simulações computacionais devido à proximidade dos dados expostos na Tabela 6.3.

De acordo com os dados simulados, observa-se que o aumento da tensão de excitação da máquina de 71,2 V para 77,8 V, a potência reativa gerada aumenta de 8412 VAR para 12174 VAR no ponto de medição do gerador síncrono M4. Além disso, observa-se que a distorção harmônica total de corrente aumenta de 3,86% para 3,93% no ponto de medição M4 e apresenta uma redução mínima de 28,92% para 13,2% no ponto de medição no secundário do transformador M1. Dessa forma, confirma-se por meio dos dados simulados que o aumento da tensão de excitação da máquina provoca aumentos na produção de potência reativa e na distorção harmônica total de corrente no ponto de medição do gerador síncrono M4.

Ainda de acordo com os dados simulados, com a redução da tensão de excitação da máquina de 71,2 V para 46,3 V, nota-se que no ponto de medição do gerador síncrono M4, a máquina muda o comportamento e ao invés de fornecer 8412 VAR de potência reativa da rede, ela consome 12361 VAR. Observa-se também que a redução da tensão de excitação da máquina provoca a redução da distorção harmônica total de corrente de 3,86% para 3,62%. Dessa forma, confirma-se por meio dos dados simulados que a redução da tensão de excitação da máquina provoca a redução da distorção harmônica total de corrente. Além disso, confirma-se também que com a redução da tensão de excitação da máquina provoca a mudança de comportamento de consumo e fornecimento de potência reativa para a rede.

Vale ressaltar que a diferença nos valores simulados e práticos se devem à fatores externos que influenciam nas medidas dos analisadores de energia.

Por fim, conclui-se a partir dos dados coletados e simulados que o gerador síncrono se comporta como um supressor de harmônicos no barramento quando está subexcitado, ou seja, quando opera indutivo. Por outro lado, o gerador síncrono aumenta as correntes harmônicas do barramento sujeito à carga não linear quando está sobreexcitado, ou seja, quando opera capacitivo, comportando-se como uma fonte de harmônicos, conforme descrito anteriormente no capítulo 4.

6.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos dados coletados por meio dos analisadores de energia nos pontos de medição descritos na metodologia, e com os dados simulados por meio das ferramentas computacionais pode-se verificar os impactos causados nas formas de onda de tensão e corrente quando sujeito à carga não linear.

Dessa forma, verifica-se a partir dos dados coletados e simulados que o gerador de indução quando sujeito a carga não linear se comporta como um supressor de harmônicos. No gerador síncrono quando sujeito a carga não linear, observa-se um comportamento contrário. Diante deste comportamento, vários estudos estão sendo desenvolvidos a fim de obter um maior rendimento na geração de energia elétrica.

CAPÍTULO 7

CONCLUSÃO

Esse trabalho realizou testes práticos e de simulação de sistema composto por gerador síncrono no mesmo barramento da carga não linear e o gerador de indução no mesmo barramento da carga não linear. Conclui-se que o gerador síncrono quando sujeito a carga não linear conectada no mesmo barramento apresenta comportamentos diferentes quando está subexcitado ou sobreexcitado, reduzindo ou aumentando, respectivamente, as correntes harmônicas; e que o gerador de indução quando sujeito a carga não linear conectada no mesmo barramento funciona como um supressor de distorções harmônicas de corrente.

Os ensaios do estudo de caso 1, representam o gerador de indução conectado a carga não linear é composto por dois cenários: cenário 1 com gerador de indução a uma velocidade mecânica de 1840 rpm e cenário 2 com gerador de indução a uma velocidade de 1830 rpm. Nota-se que quando é elevado a velocidade do gerador de indução de 1830 rpm para 1840 rpm a distorção harmônica total de corrente tem redução nos pontos de medição M1 e M3, M2 permanecendo constante no valor simulado e sofrendo acréscimo de 0,2% na medição experimental. Sendo assim, conclui-se que o gerador de indução funciona como um supressor de harmônico.

Os ensaios do estudo de caso 2, representam o gerador síncrono conectado à carga não linear, composto por três cenários: cenário 1 com gerador com tensão de excitação de valor 71,2V, cenário 2 com tensão de excitação de 77,8V e por fim, cenário 3 com tensão de excitação de 77,8V. Neste caso é observado que o gerador síncrono, enquanto fornecedor de energia reativa para a rede (capacitivo) funciona como um gerador de harmônicos; quando consumidor de energia reativa (indutivo) funciona como um supressor de harmônicos.

O gerador de indução apresenta baixo custo, simplicidade construtiva, maior robustez e menor dimensão, quando comparado ao gerador síncrono de mesma potência e ainda é capaz de suprimir harmônicos do SEPI. Os resultados mostram a influência harmônica que uma carga não linear pode trazer a um sistema utilizando tanto o gerador síncrono, quanto gerador assíncrono.

7.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Propõe-se para trabalhos futuros a utilização de máquinas com potências superiores das utilizadas neste trabalho, a fim de verificar se o comportamento das máquinas se mantém inalterados, tanto para os dados coletados em bancada, quanto para os dados simulados por meio das ferramentas computacionais.

Pode-se realizar também a alteração da carga não linear a fim de verificar se o comportamento das distorções harmônicas de tensão e corrente sofrem mudanças significativas em relação a carga não linear utilizada neste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

519., I. S. Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems. IEEE Std 519-2014 (Revision of IEEE Std 519-1992), New York, 2014.

ALVES, M. B. Análise teórica e experimental do comportamento do gerador síncrono de polos salientes em regime permanente não senoidal. **Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade de Uberlândia, Uberlândia, 2011.**

BIM, E. **Máquinas elétricas e acionamento.** [S.l.]: Elsevier, 2013.

BOLDEA, I. **Induction Machines Handbook:** Transients, Control Principles, Design and Testing. [S.l.]: CRC press, 2020.

CASIMIRO, R. C. **Analysis of harmonic distortion influence in a distributed synchronous generator.** Trabalho de Conclusão de Curso (TCC em Engenharia Elétrica) - USP. São Carlos-SP, p. 131. 2018.

CHAPALLAZ, J. M. et al. Manual on Motors Used as Generators. **MHPG Series: Vieweg+Teubner Verlag**, n. 10, 1992.

CHAPMAN, S. J. **Fundamentos de Máquinas Elétricas.** 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

DELBONE, E. **Atenuação de harmônicos nos geradores síncronos provenientes das cargas Não Lineares utilizando geradores de indução.** Tese (Tese em Engenharia Elétrica) - UFU. Uberlândia, p. 150. 2012.

DIAS, G. A. D. **Harmônicas em Sistemas Industriais.** Porto Alegre: EDIPUCRS, 2002.

DONOLO, P. E. A. Voltage unbalance and harmonic distortion effects on induction motor power, torque and vibrations. **Electric power systems research**, v. 140, p. 866--873, 2016.

EMANUEL., E. et al. Voltage distortion in distribution feeders with nonlinear loads. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 9, n. 1, p. 79–87, Jan. 1994.

FERNANDES, J. P. T. et al. Genetic Algorithm Solution for Optimization of the Power Generation. **IEEE: Congress on Evolutionary Computation**, 2013.

FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY JR, C.; UMANS, S. D. **Máquinas Elétricas: Com Introdução à Eletrônica de Potência**. 6. ed. [S.l.]: Bookman, 2006.

FUCHS, E.; MASOUM, M. A. **Power quality in power systems and electrical machines**. [S.l.]: Academic press, 2011.

IZADFAR, H. R. A. B. M. The Effect of Nonlinear Loads on MMF Wave of a Synchronous Generator. **Indian Journal of Science and Technology**, v. 10, p. 5, 2017.

JORDÃO, R. G. **Máquinas Síncronas**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

KHAN, S. **Industrial power systems**. 1. ed. [S.l.]: CRC Press, 2008.

LATHI, B. P. **Sinais e Sistemas Lineares**. 2. ed. [S.l.]: Bookman, 2006.

MAGALHÃES, A. D. S. **ESTUDO E PRÁTICA NA REPOTENCIALIZAÇÃO DA OPERAÇÃO PARALELA DE GERADOR SÍNCRONO COM GERADOR DE INDUÇÃO**. Tese (Tese em Engenharia Elétrica) - UFG. Goiânia, p. 160. 2019.

MAGALHÃES, A. S. et al. Repotencialização na Operação Paralela de Geradores Síncrono e de Indução. **XIII CONPEEX - Congresso de Pesquisa, Ensino e Extensão**, Goiânia, 2016.

MAGALHAES, A. S. et al. Parametric regression in synchronous and induction generators. **18th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)**, Kouty nad Desnou, 2017.

NIEDERLE, D. Implantação de um Gerador de Imãs Permanentes e levantamento de suas características sob Carga Resistiva. **hidroenergia.com.br**, Maio 2018. Disponível em: <<http://www.hidroenergia.com.br/implantacao-de-um-gerador-de-imas-permanentes-e-levantamento-de-suas-caracteristicas-sob-carga-resistiva/>>. Acesso em: 20 Novembro 2020.

OLIVEIRA, J. M. M. D. **Efeitos da Operação do Gerador de Indução no Comportamento do Gerador Síncrono Operando em um Sistema Isolado Alimentando Cargas não Lineares**. Tese (Tese em Engenharia Elétrica). Goiânia, p. 220. 2018.

PHIPPS, J. K.; NELSON, J. P.; SEN, P. K. Power quality and harmonic distortion on distribution systems. **IEEE transactions on industry applications**, v. 30, p. 476-484, 1994.

PHIPPS, J. K.; NELSON, J. P.; SEN, P. K. Power quality and harmonic distortion on distribution systems. **IEEE transactions on industry applications**, 1994. 476-484.

PRODIST. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional**. [S.l.]: Módulo 8. Qualidade da energia elétrica, 2020.

SALIH, S. M. A. A. K. W. A. N. M. **Elixir Renewable Energy Engg**, v. 70, p. 24362--24367, 2014.

SANKARAN, C. **Power quality**. [S.l.]: CRC press, 2017.

SIMÕES, M. G.; FARRET, F. A. **Modeling and analysis with induction generators**. 3. ed. [S.l.]: CRC Press, 2014.

SINGH, G. Self-excited induction generator research—a survey. **Electric Power Systems Research**, v. 69, p. 107-114, 2004.

SINGH, L. P. **Advanced power system analysis and dynamics**. [S.l.]: New Age International, 2006.

TAZIL, M. et al. Three-phase doubly fed induction generators: an overview. **IET Electric Power Applications**, v. 2, p. 75-89, 2010.

UMANS, S. D. **Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley**. 7. ed. Porto Alegre: [s.n.], 2014.

VALADÃO, R. A. D. **Análise do comportamento de um gerador de indução trifásico autoexcitado por capacitadores**. (Monografia em Engenharia Elétrica) - UFRJ. Rio de Janeiro, p. 72. 2012.

WEG. DT-5 – Características e Especificações de Geradores. **<https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h68/h68/WEG-curso-dt5-caracter-sticas-e-especifica-o-de-geradores-artigo-tecnico-portugues.pdf>**, 2020. Acesso em: 05 Dezembro 2020.

ZHANG, F.; GENG, Z.; YUAN, W. The algorithm of interpolating windowed FFT for harmonic analysis of electric power system. **IEEE transactions on power delivery**, v. 2, 2001.

FRANCISCO, António M. S. **Motores Eléctricos**. 3. ed. rev. e atual. [S. l.]: ETEP - Edições Técnicas e Profissionais, 2010. 192 p. v. 2.