

INSTITUTO FEDERAL DE GOIÁS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
TECNOLOGIA DE PROCESSOS
SUSTENTÁVEIS

COMPENSAÇÃO SÍNCRONA EM SISTEMAS
INDUSTRIAIS SUBMETIDOS A DISTORÇÕES
HARMÔNICAS

Pedro Henrique Franco Moraes

[IFG] & [NExT]
[Goiânia - Goiás - Brasil]
28 de janeiro de 2017

INSTITUTO FEDERAL DE GOIÁS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
TECNOLOGIA DE PROCESSOS
SUSTENTÁVEIS

COMPENSAÇÃO SÍNCRONA EM SISTEMAS
INDUSTRIAIS SUBMETIDOS A DISTORÇÕES
HARMÔNICAS

Pedro Henrique Franco Moraes

Dissertação apresentada à Banca Examinadora como exigência parcial para a obtenção do título de Mestre em Tecnologia de Processos Sustentáveis pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás (IFG), Mestrado em Tecnologia de Processos Sustentáveis, sob a orientação do Prof. Dr. Aylton José Alves e co-orientação do Prof. Dr. Wesley Pacheco Calixto

[IFG] & [NExT]
[Goiânia - Goiás - Brasil]
28 de janeiro de 2017

M8275c Moraes, Pedro Henrique Franco.

Compensação síncrona em sistemas industriais submetidos a distorções harmônicas / Pedro Henrique Franco Moraes. – Goiânia: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, 2017.

111 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Aylton José Alves.

Coorientador: Prof. Dr. Wesley Pacheco Calixto.

Dissertação (Mestrado) – Mestrado em Tecnologia de Processos Sustentáveis, Coordenação do Programa de Mestrado em Tecnologia de Processos Sustentáveis, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

1. Máquina síncrona. 2. Compensação de reativos. 3. Fator de potência. I. Alves, Aylton José (orientador). II. Calixto, Wesley Pacheco (coorientador). III. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás. IV. Título.

CDD 631.3133

“Todo esforço, qualquer que seja o fim para que tenda, sofre, ao manifestar-se, os desvios que a vida lhe impõe; torna-se outro esforço, serve outros fins, consoma por vezes o mesmo contrário do que pretendia realizar...”

FERNANDO PESSOA
em “O Livro do Desassossego”, 1984.

A minha namorada Mariana Felipe de Oliveira. Seu companheirismo e apoio foram essenciais para preencher meus dias com amor durante esta jornada. A minha amada mãe Gisela Franco Vilela e avós Lúcia Franco Vilela e Sebastiana Fernandes de Moraes. O amor materno de vocês sempre esteve presente. Ao meu avô Cristiano Fláusino Vilela pelo carinho, torcida e humor.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço ao nosso Criador Magnânimo, essência de todo amor, sabedoria e justiça. Também, ao nosso mestre Jesus Cristo, eterno educador, terapeuta e psicólogo de almas.

Ao padrasto e amigo Éximo Alfaix Neto pela amizade e companheirismo no lar e a todos os familiares sem exceção.

Aos amigos e amigas de Jataí, Goiânia e todas as partes. A amizade é fator crucial em nossas vidas. Citar nomes aqui seria tarefa difícil, preferindo abraçar a todos pela parceria constante.

Aos professores e servidores do Mestrado Profissional em Tecnologia de Processos Sustentáveis do Instituto Federal de Goiás, Campus Goiânia. Em especial à servidora Leila Ninon de Souza pela prontidão, amizade e carinho em todos os momentos, ao Prof. Dr. Aylton José Alves pela paciência e sabedoria no período de orientação e ao Prof. Dr. Wesley Pacheco Calixto pelos valiosos conselhos e salutares sugestões. Ao Prof. Dr. Pedro José Abrão por ter aceitado o convite da banca de qualificação e defesa final, tendo participado de perto no andamento da pesquisa. Ao Prof. Dr. Roberlam Gonçalves de Mendonça por gentilmente ter aceitado o convite para participar da banca de defesa final, abrilhantando as discussões com suas ponderações.

À amiga e colega de pesquisa Alana da Silva Magalhães pelas tardes de parceria e auxílios mútuos, bem como os artigos e publicações que juntos desenvolvemos. Ao colega Calebe Abrenhosa Matias por ceder seus aparatos e seu tempo, facilitando o andamento das práticas. Aos colegas de mestrado Adriano Ferreira de Faria, Alessandro Nunes Costa, Bruno de Assis Fernandes, Cleiderjam Meireles de Oliveira, Daiane dos Santos Mamede Mendonça, Gleice Alves de Sousa, Josiene Barcelo da Silva, Karla de Carvalho Cunha, Leonardo Ribeiro Pinto, Marcus Vinicius Ramos, Patrícia Christiana Silva de Souza, Pedro de Aquino Moraes Junior, Ricardo de Alcântara Ferreira, Suzel de Almeida. Juntos, formamos bem mais que uma turma, pois nos tornamos verdadeiros amigos.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás (FAPEG) pelo apoio financeiro. À equipe de pesquisadores do Núcleo de Estudos e Pesquisas Experimentais e Tecnológicas (NExT).

RESUMO

Este trabalho propõe testar as condições de funcionamento de uma máquina síncrona, operando como compensador síncrono e mitigador de componentes harmônicos em um sistema elétrico típico. Testes realizados em um barramento isolado, isto é, de carga controlada; e também em um barramento não isolado com cargas aleatórias, ambos com a presença de cargas harmônicas, demonstram que o gerador síncrono operando como compensador de reativos é capaz de fornecer a potência reativa consumida pelas cargas e atenuar as harmônicas, em especial, as harmônicas de ordens mais altas em um amplo espectro, reduzindo a potência harmônica do sistema. Testes de compensação de reativos com a forma convencional, isto é, com bancos de capacitores, para as mesmas ordens de grandezas de reativos, mostram que estes equipamentos ao compensar os reativos distorcem as formas de onda de corrente, piorando as distorções harmônicas produzidas pelas cargas não lineares. Conclui-se, que há vantagens e desvantagens para cada uma das técnicas de compensação de reativos e que em casos especiais a compensação síncrona pode ser considerada razoável opção.

Palavras-chave: Compensação Capacitiva, Compensação Síncrona, Distorção Harmônica, Fator de Potência.

SYNCHRONOUS COMPENSATION IN INDUSTRIAL SYSTEMS SUBJECTED TO HARMONIC DISTORTION

ABSTRACT

This work proposes to test the operating conditions of a synchronous machine as a synchronous compensator and harmonic attenuator in a typical electrical system. Tests performed on an isolated bus with controlled load; and also in a non-isolated bus with random loads, both with the presence of harmonic loads, demonstrate that synchronous generator operating as a reactive compensator is able to supply the reactive power consumed by the loads and to attenuate harmonics, especially harmonics of higher orders in a broad spectrum, reducing the harmonic power of the system. Reactive compensation tests with the conventional form with capacitor banks, applied for the same orders of reactive quantities, show that such equipment distort current waveforms, worsening the harmonic distortions produced by nonlinear loads. It is concluded that there are advantages and disadvantages for each of the techniques of reactive compensation and in special cases synchronous compensation can be considered reasonable option.

Keywords: Capacitive Compensation, Harmonic Distortion, Power Factor, Synchronous Compensation.

SUMÁRIO

Pág.

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE SÍMBOLOS

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	25
1.1 Objetivo Geral	30
1.2 Objetivos Específicos	30
1.3 Estrutura do Trabalho	31
CAPÍTULO 2 TECNOLOGIAS E CONCEITOS APLICADOS À CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA	33
2.1 Disposição das Potências em um Sistema Elétrico	33
2.1.1 Potências em sistemas senoidais	33
2.1.2 Potências em sistemas não-senoidais	35
2.2 Fator de Potência	37
2.2.1 Fator de potência em sistemas senoidais	37
2.2.2 Fatores de deslocamento, de distorção e de potência em sistemas não senoidais	39
2.3 Distorções Harmônicas nos Sistemas Elétricos	40
2.4 Bancos de Capacitores	44
2.4.1 Bancos de capacitores em sistemas senoidais	44
2.4.2 Bancos de capacitores em sistemas não senoidais	46
2.5 Considerações	48
CAPÍTULO 3 MÁQUINA SÍNCRONA EM SISTEMAS SENOI- DAIS E SUBMETIDA A DISTORÇÕES HARMÔ- NICAS	49
3.1 Máquina Síncrona	49
3.1.1 Máquina síncrona em sistemas senoidais	49

3.1.2	Máquina síncrona em sistemas não senoidais	54
3.2	Considerações	55
CAPÍTULO 4 METODOLOGIA		57
4.1	Estudo de Caso – Sistema 1	57
4.2	Estudo de Caso – Sistema 2	59
4.3	Estudo de Caso – Sistema 3	63
4.4	Considerações	66
CAPÍTULO 5 RESULTADOS E ANÁLISES		67
5.1	Resultados do Estudo de Caso – Sistema 1	67
5.2	Resultados do Estudo de Caso – Sistema 2	73
5.3	Resultados do Estudo de Caso – Sistema 3	80
5.4	Comparação dos Resultados dos Sistemas 2 e 3	87
CAPÍTULO 6 CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS		89
6.1	Publicações Realizadas	89
6.2	Sugestões para Trabalhos Futuros	90
CAPÍTULO A Comportamento da máquina síncrona submetida a distorções harmônicas		91
A.1	Forças Magneto Motrizes Girantes	91
A.2	Gerador Síncrono Trifásico em Regime Permanente Senoidal	93
A.3	Gerador Trifásico em Regime Permanente Não Senoidal	98
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		109

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
2.1 Triângulo de potências.	34
2.2 Tetraedro de potências.	36
2.3 Corrente atrasada e fator de potência indutivo.	37
2.4 Corrente adianta e fator de potência capacitivo.	38
2.5 Representação ilustrativa do limite aceitável do fator de potência.	39
2.6 Onda de corrente distorcida e componentes harmônicas.	41
2.7 Diagrama de correção do fator de potência.	45
2.8 Sistema de potência com compensação capacitiva.	46
2.9 Circuito equivalente do sistema da Figura 2.8	47
2.10 Circuito equivalente modelado para harmônicas.	47
3.1 Esquema de uma máquina síncrona.	50
3.2 Região de trabalho da máquina síncrona.	50
3.3 Circuito equivalente de um gerador síncrono.	51
3.4 Circuito equivalente simplificado de um gerador síncrono.	52
3.5 Circuito equivalente de um gerador e de um motor síncrono.	52
3.6 Fasores do gerador (a) sobre-excitado e (b) subexcitado.	53
3.7 Fasores do motor (a) sobre-excitado e (b) subexcitado.	53
3.8 Esquema da máquina síncrona para correntes harmônicas.	54
4.1 Estrutura montada para o estudo de caso do Sistema 1.	58
4.2 <i>CNL</i> baseada em lâmpadas halógenas controladas por <i>TRIACS</i>	59
4.3 Estrutura montada para o Estudo de Caso do Sistema 2.	60
4.4 Máquina síncrona e painel de sincronização para barramento não isolado.	62
4.5 Diagrama de conexão e sincronização da máquina síncrona.	63
4.6 Máquina síncrona para barramento isolado.	64
4.7 Estrutura montada para o Estudo de Caso do Sistema 3.	65
4.8 Retificador trifásico de meia onda controlado.	66
5.1 Medições de corrente em <i>M1</i> com a <i>CNL</i> ligada e a <i>MS</i> ligada.	68
5.2 Medições de corrente em <i>M1</i> com a <i>CNL + MS</i> , chaves <i>S1</i> e <i>S2</i> ligadas.	69
5.3 Medições de corrente em <i>M4</i> , nos terminais da <i>MS</i> , com a (<i>CNL + MS</i>), chaves <i>S1</i> e <i>S2</i> ligadas.	70
5.4 Medições de corrente em <i>M1</i> com a <i>CNL + MIT + BC</i> , chaves <i>S1</i> , <i>S2</i> e <i>S3</i> ligadas.	76

5.5	Medições de corrente em $M1$ com a $CNL + MIT + MS$, chaves $S1, S2$ e $S4$ ligadas.	78
5.6	Medições de corrente em $M1$ com a $CNL + MIT + BC$, chaves $S1, S2$ e $S3$ ligadas.	83
5.7	Medições de corrente em $M1$ com a $CNL + MIT + MS$, chaves $S1, S2$ e $S4$ ligadas.	85
A.1	fmm girantes.	93
A.2	Corte linearizado da máquina síncrona – fmm_R	94
A.3	Polaridade da tensão induzida – fase A estator.	94
A.4	Diagrama fasorial – $t = 0$ carga RL	95
A.5	Diagrama fasorial – $t = \frac{\phi_a}{2\pi f}$, carga RL	95
A.6	Corte linearizado da máquina síncrona – fmm_a, fmm_E	95
A.7	Corte linearizado da máquina síncrona – fmm_R, fmm_E , carga RL	96
A.8	Diagrama fasorial – $t = 0$ carga RC	96
A.9	Diagrama fasorial – $t = -\frac{\phi_a}{2\pi f}$	97
A.10	Corte linearizado da máquina síncrona – fmm_R, fmm_E , carga RC	97
A.11	Corte linearizado do gerador síncrono – $fmm_{E0h} - (h = 5, 11, \dots)$	99
A.12	Tensão induzida em $R1 - (h = 5, 11, \dots)$	99
A.13	Diagrama fasorial do enrolamento do rotor – $t = 0, (h = 5, 11, \dots)$	100
A.14	Diagrama fasorial do enrolamento do rotor – $t = \frac{\phi_{R(h+1)}}{2\pi f_{R(h+1)}}$, $(h = 5, 11, \dots)$	100
A.15	Corte linearizado do rotor – fmm pulsante $fmm_{R(h+1)} - (h = 5, 11, \dots)$	101
A.16	Corte linearizado do rotor fmm girantes produzidas no rotor e suas velocidades em relação ao rotor – $(h = 5, 11, \dots)$	101
A.17	Corte linearizado do gerador síncrono – fmm girantes com velocidade em relação ao estator.	102
A.18	Corte linearizado do gerador síncrono – $fmm_{E0h}, fmm_{Rh}, fmm_{R(h+2)} - (h = 5, 11, \dots)$	102
A.19	Corte linearizado do gerador síncrono – $fmm_{E0h}, fmm_{Rh}, f'mm_{R(h+2)}, f'mm_{Eh} - (h = 5, 11, \dots)$	103
A.20	Corte linearizado do gerador síncrono – $fmm_{E0h} - (h = 7, 13, \dots)$	104
A.21	Tensão induzida em $R_1 - (h = 7, 13, \dots)$	104
A.22	Diagrama fasorial do enrolamento do rotor – $t = 0 - (h = 7, 13, \dots)$	104
A.23	Diagrama fasorial do enrolamento do rotor – $t = \frac{\phi_{R(h-1)}}{2\pi f_{R(h-1)}}$	105
A.24	Corte linearizado do rotor fmm pulsante $fmm_{R(h-1)} - (h = 7, 13, \dots)$	105
A.25	Corte linearizado do rotor – fmm girantes produzidas no rotor e suas velocidades em relação ao rotor.	105

A.26 Corte linearizado do gerador síncrono – fmm girantes com velocidades em relação ao estator.	106
A.27 Corte linearizado do gerador síncrono – fmm_{E0h} , fmm_{Rh} , $fmm_{R(h-2)}$ – $(h = 7, 13, \dots)$	106
A.28 Corte linearizado do gerador síncrono – fmm_{E0h} , fmm_{Rh} , $fmm_{R(h-2)}$, $f'mm_{Eh}$ – $(h = 7, 13, \dots)$	106
A.29 Figura A.18 com $h = 5$	107
A.30 Figura A.24 com $h = 7$	107

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
2.1 Níveis de distorção harmônica individual de tensão.	43
2.2 Níveis de distorção harmônica total de tensão.	43
4.1 Descrição dos componentes do sistema sob estudo.	58
4.2 Descrição dos equipamentos utilizados no barramento não isolado.	61
4.3 Descrição dos equipamentos utilizados no barramento isolado.	65
5.1 Resultado dos valores absolutos das correntes da Fase <i>A</i> , referentes às Figura 5.1 à Figura 5.3.	72
5.2 Barramento não isolado com carga não linear (<i>CNL</i>).	73
5.3 Barramento não isolado com cargas não linear e indutiva (<i>CNL + MIT</i>).	74
5.4 Compensação capacitiva no barramento não isolado (<i>CNL + MIT + BC</i>).	74
5.5 Compensação síncrona no barramento não isolado (<i>CNL + MIT + MS</i>).	77
5.6 Resultado dos valores absolutos das correntes da Fase <i>A</i> para o Sistema 2.	79
5.7 Barramento isolado com carga não linear (<i>CNL</i>).	81
5.8 Barramento isolado com cargas não linear e indutiva (<i>CNL + MIT</i>).	81
5.9 Compensação capacitiva no barramento isolado (<i>CNL + MIT + BC</i>).	82
5.10 Compensação síncrona no barramento isolado (<i>CNL + MIT + MS</i>).	84
5.11 Resultado dos valores absolutos das correntes da Fase <i>A</i> para o Sistema 3.	86
5.12 Confrontação das compensações no sistema não isolado.	88
5.13 Confrontação das compensações no sistema isolado.	88

LISTA DE SÍMBOLOS

<i>A</i>	–	Ampère
<i>cv</i>	–	Cavalo-vapor
<i>E</i>	–	Volt (tensão interna)
<i>Hz</i>	–	Hertz
<i>HP</i>	–	Horsepower
<i>R</i>	–	Resistência
<i>s</i>	–	segundo
<i>V</i>	–	Volt (tensão terminal)
<i>VA</i>	–	Volt-ampère
<i>VA_r</i>	–	Volt-ampère reativo
<i>W</i>	–	Watts
<i>X</i>	–	Reatância
φ	–	Ângulo do fator de potência (phi)
θ	–	Ângulo entre tensão e corrente (teta)

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	–	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	–	Agência Nacional de Energia Elétrica
BC	–	Bancos de Capacitores
C	–	Capacitor
CC	–	Corrente Contínua
CELG	–	Centrais Elétricas de Goiás
CNL	–	Carga não-linear
CNPq	–	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
DH	–	Distorção Harmônica
DHI	–	Distorção Harmônica Individual
DHT	–	Distorção Harmônica Total
FACTS	–	Flexible AC Transmission Systems
FD	–	Fator de distorção
Fdes	–	Fator de deslocamento
FP	–	Fator de Potência
GD	–	Geração Distribuída
I	–	Corrente elétrica
IEEE	–	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IFG	–	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
MCC	–	Motor de Corrente Contínua
MEC	–	Ministério da Educação
MIT	–	Motor de Indução Trifásico
MS	–	Máquina Síncrona
NExT	–	Núcleo de Estudos Experimentais e Tecnológicos do IFG
P	–	Potência ativa
PRODIST	–	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica
S	–	Potência aparente
TRIAC	–	Triode for Alternating Current

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Nos tempos atuais há a constante preocupação, de todos os agentes do sistema elétrico, pela qualidade de energia elétrica e pela qualidade do serviço prestado de entrega da energia. Essa busca é motivada pelo aumento populacional e a industrialização. Sistemas de geração de energia estão cada vez mais sobrecarregados, linhas de transmissão submetidas a interferências das forças da natureza, linhas de distribuição cada vez mais susceptíveis a falhas na entrega da energia, poluições harmônicas, baixos fatores de potência. Com isso, a necessidade de se empregar meios para assegurar uma maior qualidade é crescente; mais importante que isso, formas sustentáveis e eficientes são necessárias. Um exemplo é a Geração Distribuída, que ganha força no cenário de energia, mas que traz consigo problemas de qualidade para o sistema (PIZZALI, 2006), (SALIM, 2011).

O Módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST), apresentado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) em 2008 e revisado pela última vez em 2015/2016, determina alguns dos principais problemas de Qualidade de Energia, estabelecendo seus níveis aceitáveis. Dentre eles estão o fator de potência e as distorções harmônicas (ANEEL, 2016).

Dentre os diversos problemas mais conhecidos que podem acarretar em uma baixa qualidade na distribuição de energia elétrica, o baixo fator de potência está entre as preocupações mais comuns. Um fator de potência relativamente baixo traz diversos incômodos, tais como: menor capacidade de fluxo de potência ativa, maior sobrecarga dos componentes envolvidos no sistema, maior gasto nas tarifas e multa por parte das concessionárias no caso de se trabalhar fora do intervalo regulado por lei (SILVA, 2009).

O fator de potência de um sistema é a relação da potência ativa e a potência aparente. Seu valor está compreendido entre 0 e 1, sendo que quanto mais próximo de 1, menor o fluxo de potência reativa. A alteração do fator de potência é causada por cargas indutivas e capacitivas conectadas à rede. Motores de indução, por exemplo, aumentam o fluxo de potência reativa indutiva, reduzindo o fator de potência local de uma instalação industrial, podendo provocar sobrecarga das subestações, das linhas, instabilidade do sistema, perdas, quedas de tensão e subutilização da ca-

pacidade instalada. Assim, para esse caso, faz-se necessário a compensação reativa, introduzindo uma fonte de potência reativa capacitiva, para que o fator de potência aumente (ALDABÓ, 2001), (SILVA, 2009).

Existem algumas fontes de potência reativa para compensação, as principais são: os bancos de capacitores e os reatores (amplamente conhecidos), as máquinas síncronas sobre-excitadas, dispositivos FACTS (*Flexible AC Transmission Systems*), entre outros. Nos bancos de capacitores, um conjunto de capacitores é ligado em blocos ou bancos dificultando o ajuste preciso de fornecimento de potência reativa, impossibilitando sua ação em problemas transitórios, porém seu custo de manutenção é baixo e sua atuação pode ser bem distribuída de acordo com a necessidade de cada fase. Já as máquinas síncronas podem ser fontes concomitantes de potência ativa e reativa e responder rapidamente às necessidades e à dinâmica do sistema, porém o custo de manutenção é de mediano para alto e a atuação é igual nas três fases. Importante, para melhor escolha do compensador, sempre levar em consideração a situação e realidade do sistema em questão (tamanho do sistema, tipo de problema), o custo e a real necessidade do ponto consumidor (precisão, velocidade e eficiência na atuação). (ECHEVERRI, 2011), (RAGNEV, 2005).

Dixon et al. (2005) apresenta um estudo sobre o estado da arte em tecnologias para compensação de reativos. Os princípios de operação, características de projeto e exemplos de aplicações de compensadores estáticos de reativos SVC (*Static Var Compensator*) implementados com tiristores também são apresentados. Os SVC são usados para melhorar a regulação de tensão, estabilidade e fator de potência em sistemas de corrente alternada.

Kepka (2007) faz um estudo sobre os diversos tipos de compensadores de reativos e fala sobre as máquinas síncronas sobre-excitadas. Segundo o autor, as máquinas síncronas são vantajosas pelos seguintes motivos: podem produzir potência reativa indutiva ou capacitiva continuamente, geram potências equilibradas, além de não produzirem harmônicas. Porém, há alguns fatores que ajudam a decidir se a compensação síncrona é efetiva ou não, tais como: capacidade de compensação estática e dinâmica da máquina, a precisão do circuito de excitação e a estrutura e o algoritmo de regulação da potência reativa.

Colak et al. (2004) implementou um sistema com compensação síncrona controlada pelo microcontrolador *PIC16F877* se utilizando de lógica fuzzy. Sua conclusão foi

que esse sistema é mais sensível, confiável e econômico do que outros sistemas com capacitores, uma vez que a máquina síncrona é utilizada no sistema para algum outro propósito, seja trabalhando como motor ou gerador.

[Zhang et al. \(2012\)](#) é sólida referência para os dispositivos FACTS (*Flexible AC Transmission Systems*). São sistemas de corrente alternada controlados por dispositivos da Eletrônica de Potência. São usados para várias aplicações e o controle desses equipamentos reduz custos, permitindo melhor adaptação dentre as várias condições de operação do sistema, além de uma melhora na utilização da instalação já existente. São listadas as seguintes aplicações: controle do fluxo de potência, aumento da capacidade de transmissão, controle de tensão, compensação reativa, melhora da estabilidade, melhora da qualidade de energia, entre outros aspectos. Em seu livro, o autor cita todos os tipos de dispositivos FACTS utilizados e faz modelos para diferentes configurações de sistemas elétricos. Dentre os principais FACTS, são listados: dispositivos paralelos ou shunt, dispositivos série, dispositivos paralelo-série, entre outros.

Outra forma de se corrigir o fator de potência é através da filtragem de harmônicas em um sistema com cargas não lineares. [Pottker \(1997\)](#) demonstra essa correção do fator de potência construindo um filtro ativo monofásico com controle por valores médios instantâneos. O filtro cancela grande parte das harmônicas da carga não linear. Por fim, a autora conclui que o filtro ativo controlado com monitoração da corrente da rede e sua comparação com uma corrente de referência é uma solução viável, simples e atrativa, uma vez que o filtro é conectado em paralelo com a rede.

Uma discussão é feita por [Steeper e Stratford \(2007\)](#) envolvendo problemas e soluções na aplicação de compensação de reativos, seja de forma estática ou dinâmica. A ressonância em bancos de capacitores, causada por correntes harmônicas, produz distorção harmônica de tensão nos barramentos de alimentação. Além disso, o autor discute diferentes métodos de controle de potência reativa em seu trabalho. [Kundur et al. \(1994\)](#), em seu livro, cita e aprofunda em todos os tipos de controle de tensão e de potência reativa, além de classificar os diversos dispositivos em: fontes de potência reativa (capacitores shunt, reatores shunt, condensadores síncronos, compensadores estáticos de reativos) e compensadores de reatância de linha (capacitores em série). Os capacitores shunt, reatores shunt e capacitores em série, são fontes passivas que podem ser chaveadas ou não. Já os condensadores síncronos e compensadores estáticos são fontes ativas de compensação.

Outro problema recentemente muito discutido, apresentado em [Rosa \(2006\)](#), são as distorções harmônicas. São causadas, principalmente, por aparelhos eletrônicos que deformam as formas de ondas devido ao chaveamento por componentes semicondutores, podendo surgir harmônicas de corrente e tensão. A regulamentação vigente determina níveis percentuais aceitáveis dessas distorções, dependendo do nível de tensão nominal do barramento. As distorções harmônicas podem danificar aparelhos, causar erros em medidores, gerar interferências, sobrecarregar os condutores, entre outros problemas.

Segundo [Kjær \(2005\)](#), componentes de fontes alternativas de energias, como: inversores fotovoltaicos, inversores eólicos, controladores das diversas fontes de geração distribuída, são exemplos de geradores de harmônicas de alta ordem. Depois de analisar o espectro das correntes fornecidas, o autor verifica que esses inversores tendem a fornecer níveis relevantes de correntes harmônicas de alta frequência. Encontrar meios mais simples e baratos que auxiliam na mitigação de harmônicas de alta ordem é desafio necessário para uma aplicação mais eficiente dos dispositivos de fontes renováveis (por exemplo, sistemas de conversão fotovoltaica, eólica, entre outras).

[Wagner et al. \(2002\)](#) apresenta os principais efeitos das harmônicas nos equipamentos. São mencionados os seguintes problemas: aquecimento, rompimentos, estresse dielétrico. São testados os efeitos nos seguintes equipamentos: bancos de capacitores, disjuntores, fusíveis, condutores, equipamentos eletrônicos, medidores, relés de proteção, máquinas elétricas, telefones, transformadores e outros.

As distorções harmônicas são causadas principalmente pelo aumento da utilização das chamadas cargas não lineares, tais como: lâmpadas eletrônicas, televisores transistorizados, *nobreaks*, micro-ondas, inversores e demais equipamentos chaveados. As harmônicas podem reduzir a vida útil ou danificar aparelhos conectados à rede, causar interferências nos sistemas de comunicação, reduzir a capacidade do fluxo de potência do sistema, entre outros. Outro relevante aspecto de sistemas submetidos a distorções harmônicas é que a modelagem dos equipamentos empregados deve ser feita considerando as componentes harmônicas. Medições e cálculos também são alterados, por exemplo, o modo de se encontrar o fator de potência é alterado, pois as grandezas envolvidas não mais são puramente senoidais ([NAKAMURA, 2011](#)), ([SANTOS, 2011](#)).

[Emanuel e Minghao \(1993\)](#) afirmam que a melhor estratégia que minimiza as dis-

torções harmônicas de tensão, as perdas do sistema elétrico e as interferências nos sistemas de comunicação, não necessariamente é obtida quando o fator de potência é levado à unidade. O autor constata que para um compensador de estado sólido ajustado para minimizar as perdas por potência distorciva, a distorção harmônica total do sistema é minimizada, porém o fator de potência não é unitário. Para o caso do fator de potência unitário, as perdas são maiores. Segundo o autor, a teoria sempre especifica a necessidade de um fator de potência unitário, porém, nem sempre essa necessidade reflete a menor perda por potência e a menor interferência nos sistemas de comunicação, uma vez que a distorção harmônica total é um pouco maior para esse caso, do que no melhor caso atingido pelo autor em seus experimentos. O autor também constata que bancos de capacitores ampliam as distorções harmônicas do barramento, causando perdas por potência harmônica.

Geralmente, filtros passivos ou ativos são usados para atenuar as distorções, como é amplamente estudado por [Das \(2015\)](#), porém, os passivos podem, às vezes, não apresentar grande eficiência, pois não acompanham a dinâmica do barramento. Já os filtros ativos são eficientes, porém, mais caros e oferecem complexidade na instalação e manutenção. [Detjen et al. \(2001\)](#) apresenta um filtro híbrido que reduz ressonâncias, mitiga harmônicas e consequentemente compensa reativos do barramento, uma desvantagem é a alta complexidade nas conexões do arranjo.

Segundo [Delbone \(2012\)](#), máquinas síncronas podem ser usadas, como motores ou geradores, para filtrar conteúdos harmônicos de um barramento, pois possuem um comportamento similar a um filtro passa-baixas, além de possuírem a capacidade de compensar reativos quando sobre-excitadas. São os chamados compensadores síncronos.

[Rocco \(1998\)](#) afirma que uma máquina síncrona pode absorver harmônicas do sistema. Em seus testes e modelagens, o autor verifica a influência das distorções harmônicas provindas de uma ponte conversora de seis pulsos totalmente controlada em um gerador síncrono.

[Chiang et al. \(1997\)](#) estuda os problemas harmônicos em uma usina em Taiwan, onde geradores síncronos são empregados. Filtros são instalados para mitigação dos problemas, porém, nota-se que nem sempre a utilização desses filtros é a melhor alternativa. Uma combinação de um transformador, acrescentado no sistema, juntamente com o funcionamento das máquinas síncronas sobre-excitadas foi escolhida

como a melhor solução para atenuar harmônicas.

Em alguns casos, especialmente, em sistemas sujeitos a distorções harmônicas, principalmente a componentes de alta ordem, e que necessitem de compensação de potência reativa, pode ser vantajoso a aplicação da compensação síncrona, uma vez que bancos de capacitores podem sofrer ressonância e filtros nem sempre são economicamente viáveis ou apresentam os melhores resultados. Além do mais, as máquinas síncronas tendem a se comportar como filtros passa-baixas atenuando as correntes distorcidas.

Este trabalho busca comparar dois sistemas de compensação de reativos: *i*) através de bancos de capacitores e *ii*) com máquina síncrona; em um barramento submetido a distorções harmônicas, analisando o aumento do fator de potência e as magnitudes das correntes harmônicas após as compensações.

1.1 Objetivo Geral

Analisar o comportamento da compensação síncrona de reativos, através da máquina síncrona (MS), em um barramento submetido a distorções harmônicas. São verificados os níveis de Distorção Harmônica Total de corrente (DHT_I) e Distorção Harmônica Total de tensão (DHT_V); além dos níveis de Distorção Harmônica Individual de corrente (DHI_I) e Distorção Harmônica Individual de tensão (DHI_V). É realizada uma análise do comportamento elétrico interno da MS , nas condições de carga distorciva, e uma análise comparativa entre os métodos de compensação síncrona de reativos com o método de compensação utilizando banco de capacitores.

1.2 Objetivos Específicos

- Desenvolver estudos sobre compensação de reativos;
- Preparar um barramento não isolado, isto é, um barramento qualquer da instalação, e um barramento isolado para testes;
- Montar painel de sincronização da máquina síncrona;
- Avaliar as principais características que envolvem a compensação de reativos através de bancos de capacitores;
- Conduzir a compensação de reativos em ambos os barramentos;

- Coletar e tratar os dados coletados;
- Comparar o método de compensação de reativos, através de bancos de capacitores, com o método de compensação síncrona, avaliando o impacto de cada uma, nas taxas de distorções harmônicas nos barramentos;

1.3 Estrutura do Trabalho

O Capítulo 2 apresenta conceitos e tecnologias voltados à correção do fator de potência, bem como um estudo das disposições de potência em um sistema senoidal e não senoidal. Nesse capítulo são realizados estudos da máquina síncrona, dos bancos de capacitores, do conceito de fator de potência e das distorções harmônicas.

O Capítulo 3 apresenta o comportamento da máquina síncrona submetida a distorções harmônicas.

O Capítulo 4 apresenta a metodologia utilizada para desenvolvimento dos procedimentos práticos. Além da lista de materiais utilizados.

O Capítulo 5 apresenta os resultados dos testes experimentais seguindo a metodologia apresentada no Capítulo 4.

O Capítulo 6 apresenta a conclusão do trabalho com base nos resultados obtidos no Capítulo 5 e a fundamentação teórica apresentada no Capítulo 1, Capítulo 2 e Capítulo 3.

CAPÍTULO 2

TECNOLOGIAS E CONCEITOS APLICADOS À CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA

Neste capítulo são apresentados conceitos e tecnologias para correção do fator de potência, em especial as tecnologias que utilizam bancos de capacitores e aquelas que utilizam máquinas síncronas.

Apresenta-se também um estudo que mostra a influência das distorções harmônicas tanto nas tecnologias apresentadas quanto no cálculo do fator de potência real.

2.1 Disposição das Potências em um Sistema Elétrico

2.1.1 Potências em sistemas senoidais

No sistema senoidal as formas de onda de tensão e corrente são representadas como senóides puras, como em (2.1) e (2.2).

$$v(t) = V_{max} \cdot \text{sen}(\omega t) \quad (2.1)$$

$$i(t) = I_{max} \cdot \text{sen}(\omega t + \theta) \quad (2.2)$$

Onde $v(t)$ e $i(t)$ são funções temporais senoidais que variam entre zero e os valores máximos ou de pico V_{max} e I_{max} , com frequência $\omega = 2\pi f$.

A corrente é representada com a adição de um defasamento θ , pois nem sempre as duas ondas estão em fase, dependendo do tipo de carga da instalação. Valores eficazes ou *rms* das ondas de tensão e corrente podem ser encontrados em (2.3) e (2.4).

$$V_{rms} = \frac{V_{max}}{\sqrt{2}} \quad (2.3)$$

$$I_{rms} = \frac{I_{max}}{\sqrt{2}} \quad (2.4)$$

A definição de potência, também como onda temporal, em um sistema senoidal é apresentada em (2.5).

$$p(t) = v(t) \cdot i(t) \quad (2.5)$$

Sendo P a potência ativa, Q a potência reativa e S a potência aparente de um circuito, em um sistema trifásico equilibrado senoidal, tem-se (2.6), (2.7) e (2.8).

$$P = \sqrt{3} \cdot V_{rms} \cdot I_{rms} \cdot \cos(\theta) \quad (2.6)$$

$$Q = \sqrt{3} \cdot V_{rms} \cdot I_{rms} \cdot \sin(\theta) \quad (2.7)$$

$$S = \sqrt{3} \cdot V_{rms} \cdot I_{rms} \quad (2.8)$$

Por definição matemática, uma função senoidal, como (2.1), (2.2) ou (2.5), pode ser representada por uma notação fasorial, ou seja, parte real mais parte imaginária. Portanto, as funções tensão, corrente e potência podem ser representadas por fasores no tempo.

A notação fasorial das potências é representada pelo triângulo de potências a partir das componentes P , Q e S . A Figura 2.1 apresenta a soma vetorial triangular.

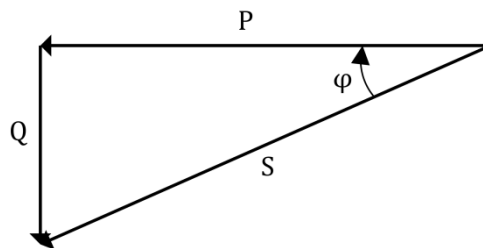


Figura 2.1 - Triângulo de potências.

O P representa a parte ativa ou útil (em *watt* ou W), parcela real que produz

trabalho. O Q é a parte reativa (em *volt-ampere reativo* ou VAr), podendo ser potência reativa indutiva ou capacitiva, sendo a parcela imaginária que não produz trabalho. O S é a potência resultante ou aparente (em *volt-ampere* ou VA), resultado da soma vetorial de P e Q , como em (2.9).

$$S = P + jQ \quad (2.9)$$

O ângulo φ entre o fasor P e o S é conhecido como ângulo de potência, sendo que em um sistema senoidal ele é igual ao defasamento entre tensão e corrente θ .

2.1.2 Potências em sistemas não-senoidais

Em sistemas não senoidais são encontradas deformidades nas ondas de tensão e/ou corrente. Essas deformidades são causadas por cargas não lineares que provocam distorções harmônicas, modificando a forma de se calcular as potências.

As funções instantâneas de tensão e corrente são dadas pelo somatório das componentes harmônicas h até o infinito, como em (2.10) e (2.11).

$$v'(t) = \sum_{h=1}^{\infty} v_h(t) = \sum_{h=1}^{\infty} V_{max_h} \cdot \text{sen}(h\omega_h t) \quad (2.10)$$

$$i'(t) = \sum_{h=1}^{\infty} i_h(t) = \sum_{h=1}^{\infty} I_{max_h} \cdot \text{sen}(h\omega_h t + \theta_h) \quad (2.11)$$

Cada componente harmônica possui um valor de amplitude e uma frequência ω . A definição de potência mantém como em (2.5). Porém, os cálculos dos valores eficazes ou *rms* são como em (2.12) e (2.13).

$$V'_{rms} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} V_h^2} \quad (2.12)$$

$$I'_{rms} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2} \quad (2.13)$$

Para o cálculo das potências P' e Q' , segue-se a mesma ideia de somatório, como em (2.14) e (2.15).

$$P' = \sum_{h=1}^{\infty} P_h(t) = \sum_{h=1}^{\infty} V_h \cdot I_h \cdot \cos(\theta_h) \quad (2.14)$$

$$Q' = \sum_{h=1}^{\infty} Q_h(t) = \sum_{h=1}^{\infty} V_h \cdot I_h \cdot \sen(\theta_h) \quad (2.15)$$

E como proposto por Budeanu, explicitado em Rosa (2006), há uma terceira componente de potência ou potência de distorção D , calculado como em (2.16).

$$D = \sqrt{\left(\sum_{h \neq k}^{h,k} (V_h^2 I_k^2 + V_k^2 I_h^2 - 2V_h I_h V_k I_k \cos(\theta_h - \theta_k)) \right)} \quad (2.16)$$

Enfim, a potência aparente de um sistema submetido a distorções harmônicas é calculada como em (2.17).

$$S' = \sqrt{P'^2 + Q'^2 + D^2} \quad (2.17)$$

O triângulo de potências não mais é correto para representar as potências do sistema. A representação passa a ser feita por um tetraedro, como na Figura 2.2.

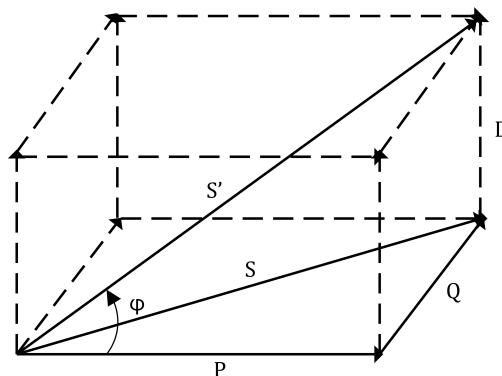


Figura 2.2 - Tetraedro de potências.

O ângulo de potência φ não é igual ao ângulo de defasamento θ , uma vez que a potência aparente resultante é deslocada do plano senoidal.

2.2 Fator de Potência

2.2.1 Fator de potência em sistemas senoidais

O fator de potência, em um sistema puramente senoidal, é um número adimensional que demonstra a proporção de potência ativa (P) em relação à potência aparente (S) de uma instalação. A potência aparente é composta por uma parte real e uma parte imaginária, e o fator de potência pode ser calculado como em (2.18).

$$FP = \frac{P}{S} = \cos(\varphi) \quad (2.18)$$

O cosseno do ângulo formado entre o fasor P e o fasor S , conhecido como ângulo de potência, é também o fator de potência de um sistema senoidal.

O fator de potência pode ser unitário, indutivo ou capacitivo: se é unitário a tensão está em fase com a corrente, se é indutivo a corrente é atrasada em relação à tensão, se é capacitivo a corrente é adiantada em relação à tensão. Meier (2006) apresenta um esquema que demonstra essa diferenciação. A Figura 2.3, adaptada de Meier (2006) apresenta um fator de potência indutivo.

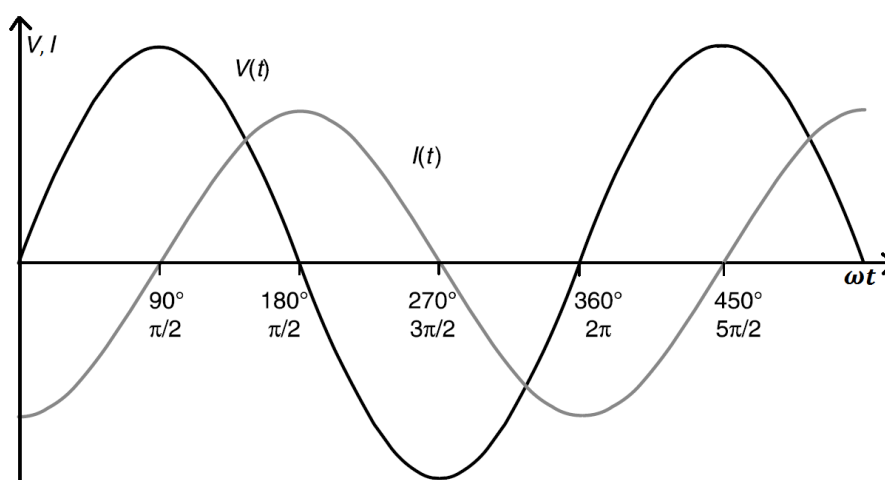


Figura 2.3 - Corrente atrasada e fator de potência indutivo.

Já para o caso de um fator de potência capacitivo a corrente é adiantada da tensão. A Figura 2.4, adaptada de Meier (2006) apresenta esse caso.

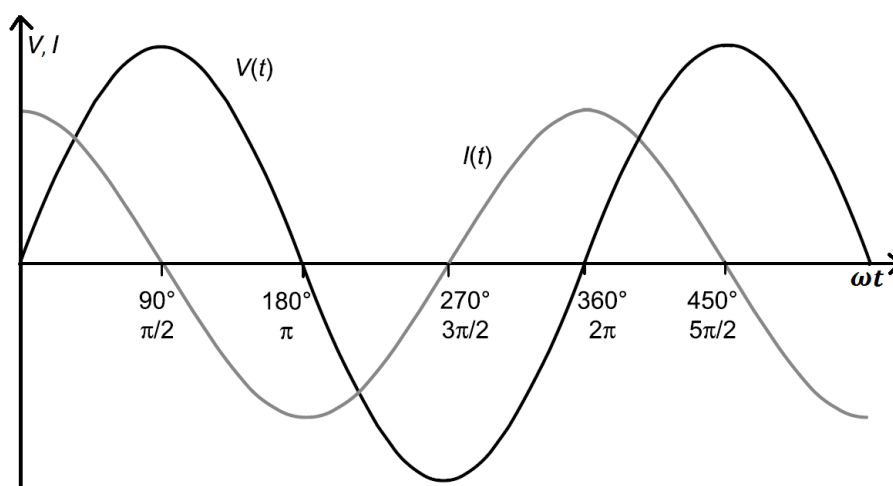


Figura 2.4 - Corrente adianta e fator de potência capacitivo.

Na Figura 2.3 e na Figura 2.4 a corrente está atrasada e adiantada, respectivamente, com defasamento θ de 90° . Os valores de amplitude das ondas são arbitrários.

Em (2.9), por motivos de cálculo, para um fator de potência indutivo considera-se valor Q positivo, já para um fator de potência capacitivo o valor de Q é negativo.

Conclui-se que para um sistema senoidal, o cosseno do ângulo de defasagem entre corrente e tensão ou cosseno do ângulo de potência equivalem ao fator de potência da instalação.

O PRODIST, publicado pela ANEEL (2016), determina que o fator de potência de uma instalação deve estar dentro do intervalo de 0,92 indutivo e 0,92 capacitivo. A Figura 2.5 faz uma representação ilustrativa desse limite aceitável.

Diversos problemas podem surgir devido a um baixo fator de potência, dentre eles: sobrecargas nos condutores e componentes, perdas, redução do nível de tensão, multa ou ônus na conta de energia elétrica. As causas para um baixo fator de potência podem ser inúmeras, tais como: motores de indução, reatores, transformadores a vazio, excesso de cargas capacitivas, outras. Para correção adequada do fator de potência, deve-se primeiro constatar o tipo predominante de carga (indutiva ou

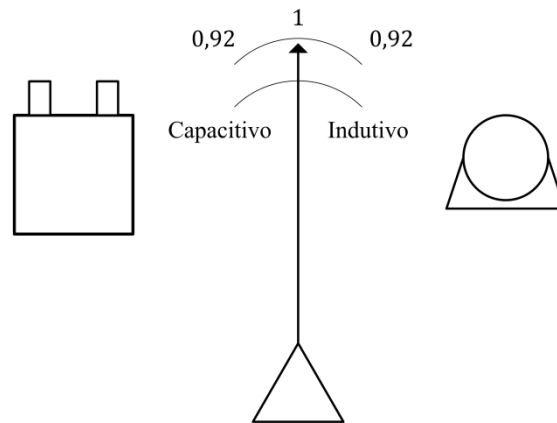


Figura 2.5 - Representação ilustrativa do limite aceitável do fator de potência.

capacitiva), depois corrigir com uma fonte de potência reativa inversa ao que foi constatado.

2.2.2 Fatores de deslocamento, de distorção e de potência em sistemas não senoidais

Em sistemas não senoidais, como mostrado no Tópico 2.1.2, as potências não são mais calculadas como em sistemas senoidais, portanto, assim também se procede com o fator de potência. Circuitos submetidos a distorções harmônicas possuem dois novos fatores adimensionais importantes e o produto deles é o fator de potência real ou total. São eles: fator de deslocamento ($Fdes$) e o fator de distorção (FD).

O fator de deslocamento já foi intrinsecamente definido no Tópico 2.1.1, pois nada mais é do que o cosseno do ângulo de defasamento entre componente fundamental de corrente e componente fundamental de tensão. Em um sistema senoidal o fator de deslocamento é igual ao fator de potência. O cálculo do fator de deslocamento é definido em (2.19).

$$Fdes = \cos(\theta) \quad (2.19)$$

Já o fator de distorção averigua qual é o teor de distorção harmônica existente na instalação. Em sistemas não senoidais o fator de potência real sempre é menor que o fator de deslocamento, pois o fator de distorção é um número menor que 1, o que diminui o resultado do produto em 2.21. Quanto mais próximo de 1 for o fator de

distorção, menor a quantidade de distorção existente. Ele é definido como em (2.20).

$$FD = \frac{I_1}{\sqrt{I_1^2 + \sum_{h=2}^n I_h^2}} \quad (2.20)$$

Enfim, a definição do fator de potência real para sistemas não senoidais é descrita em (2.21).

$$FP' = Fdes \cdot FD \quad (2.21)$$

Em (2.21) observa-se que em sistemas senoidais, quando o FD é unitário, isto é, instalação sem harmônicas, o fator de potência é igual ao fator de deslocamento.

A análise deste tópico é de grande importância para este trabalho, pois é demonstrado que quanto maior o teor de distorção em uma instalação, menor o fator de potência real. Meios que compensem a potência reativa excedente e também parte das distorções harmônicas são necessários para uma melhora na eficiência do sistema.

2.3 Distorções Harmônicas nos Sistemas Elétricos

Segundo Fourier, apresentado por Rosa (2006), uma onda periódica não senoidal pode ser remontada pela associação (somatório) de ondas senoidais de frequências e amplitudes diversas. Essas ondas senoidais que remontam a onda primária são conhecidas como componentes harmônicas e possuem frequência múltipla inteira da frequência fundamental.

A Figura 2.6 ilustra uma onda de corrente qualquer distorcida (em amarelo), sua componente fundamental (em preto), e suas componentes harmônicas de 3^a, 5^a e 7^a ordem (em vermelho, verde e azul, respectivamente).

Observa-se que a componente fundamental tem frequência idêntica da onda real distorcida. A componente de 3^a ordem tem amplitude menor e frequência três vezes maior que a fundamental, a 5^a ordem tem frequência cinco vezes maior e a 7^a ordem tem frequência sete vezes maior.

Como se sabe, as grandezas elétricas (tensão, corrente, potência) são representadas a partir de ondas senoidais. Essas ondas possuem uma frequência, uma amplitude

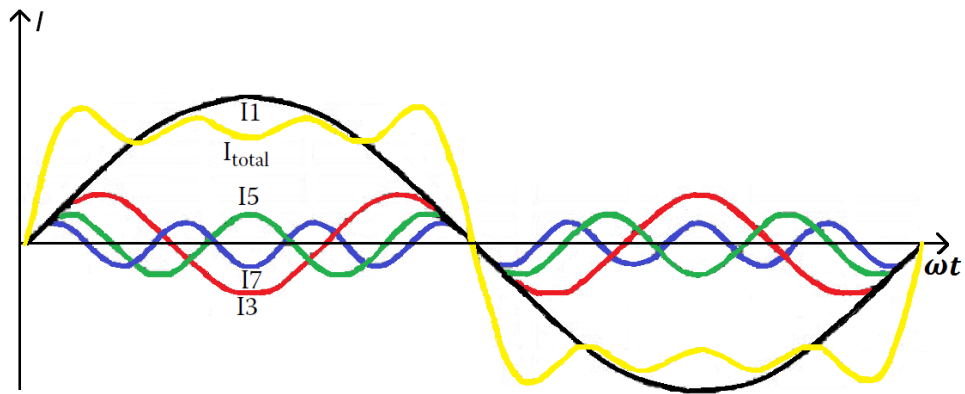


Figura 2.6 - Onda de corrente distorcida e componentes harmônicas.

e alguns outros valores agregados. Portanto, os estudos de Fourier são amplamente empregados no universo da eletricidade, tendo como principal foco as ondas não senoidais.

As distorções harmônicas são deformações nas ondas senoidais, tanto de corrente quanto de tensão. Qualquer situação que interfira repetidamente no formato da onda é fonte geradora de distorção. As principais fontes de harmônicas são os chaveamentos por dispositivos semicondutores, pois modificam a forma de onda de corrente recortando o formato da senoide. Outras fontes, segundo Santos (2011), são os compensadores estáticos de reativos, controladores eletrônicos, drives de modulação por largura de pulso, entre outros mais específicos.

Existem dois índices principais para se medir distorção harmônica em uma instalação: o primeiro é determinar o nível de distorção harmônica individual (*DHI*) e o segundo é determinar o nível de distorção harmônica total (*DHT*). É possível calcular os dois índices tanto para corrente quanto para tensão. As distorções harmônicas individuais de tensão e de corrente podem ser calculadas em (2.22) e (2.23).

$$DHI_V(\%) = \frac{V_h}{V_1} \cdot 100\% \quad (2.22)$$

$$DHI_I(\%) = \frac{I_h}{I_1} \cdot 100\% \quad (2.23)$$

Onde:

DHI_V (%): distorção harmônica individual de tensão;
 DHI_I (%): distorção harmônica individual de corrente;
 V_1 : Valor eficaz da componente fundamental de tensão;
 I_1 : Valor eficaz da componente fundamental de corrente;
 V_h : Valor eficaz da tensão de ordem harmônica h ;
 I_h : Valor eficaz da corrente de ordem harmônica h .

Esses índices mostram o quanto uma determinada ordem harmônica tem influência na corrente ou na tensão total.

As distorções harmônicas totais de tensão e de corrente podem ser calculadas como em (2.24) e (2.25), respectivamente.

$$DHI_V(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^n V_h^2}}{V_1} \quad (2.24)$$

$$DHI_I(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^n I_h^2}}{I_1} \quad (2.25)$$

Onde:

DHT_V (%): distorção harmônica total de tensão;
 DHT_I (%): distorção harmônica total de corrente;
 n : ordem harmônica máxima observada.

Esse índice mostra o quanto a onda real é distorcida, pois leva em conta todas as ordens harmônicas até a componente harmônica máxima de ordem n .

O PRODIST, regulamentado pela ANEEL, apresenta a Tabela 2.1 sobre os níveis aceitáveis de distorção harmônica individual de tensão para diferentes valores de tensão de barramento. O documento divide em harmônicas ímpares múltiplas de 3, ímpares não múltiplas de 3 e pares. Além disso, são apresentadas as porcentagens aceitas, dentro de quatro intervalos de níveis de tensão nominal do barramento (V_n).

Para um barramento com tensão de linha de 380V, caso em que este estudo se desenvolve, deve-se observar a primeira coluna $V_n \leq 1kV$.

A Tabela 2.2 apresenta os níveis aceitáveis de distorção harmônica total de tensão

Tabela 2.1 - Níveis de distorção harmônica individual de tensão.

Ordem Harmônica	Distorção Harmônica Individual de Tensão - DHI_V [%]				
	$V_n \leq 1kV$	$1kV < V_n \leq 13,8kV$	$13,8kV < V_n \leq 69kV$	$69kV < V_n \leq 230kV$	
Ímpares não múltiplas de 3	5	7,5	6	4,5	2,5
	7	6,5	5	4	2
	11	4,5	3,5	3	1,5
	13	4	3	2,5	1,5
	17	2,5	2	1,5	1
	19	2	1,5	1,5	1
	23	2	1,5	1,5	1
	25	2	1,5	1,5	1
	≥ 25	<u>1,5</u>	<u>1</u>	<u>1</u>	<u>0,5</u>
Ímpares múltiplas de 3	3	6,5	5	4	2
	9	2	1,5	1,5	1
	15	1	0,5	0,5	0,5
	21	1	0,5	0,5	0,5
	≥ 21	<u>1</u>	<u>0,5</u>	<u>0,5</u>	<u>0,5</u>
Pares	2	2,5	2	1,5	1
	4	1,5	1	1	0,5
	6	1	0,5	0,5	0,5
	8	1	0,5	0,5	0,5
	10	1	0,5	0,5	0,5
	12	1	0,5	0,5	0,5
	≥ 12	<u>1</u>	<u>0,5</u>	<u>0,5</u>	<u>0,5</u>

para diferentes intervalos de tensão nominal do barramento. Os intervalos de tensão nominal são os mesmos da Tabela 2.1.

Tabela 2.2 - Níveis de distorção harmônica total de tensão.

Tensão nominal do Barramento	Distorção Harmônica Total de Tensão DHT_V [%]
$V_n \leq 1kV$	10
$1kV < V_n \leq 13,8kV$	8
$13,8kV < V_n \leq 69kV$	6
$69kV < V_n \leq 230kV$	3

Para um barramento com tensão de linha de 380V, caso deste estudo, o nível máximo da DHT_V é de 10%.

A regulamentação brasileira não trata diretamente dos índices de distorções harmônicas de corrente. Entretanto, as distorções de corrente são as mais usuais em um sistema elétrico, pois as ondas de corrente são mais sensíveis do que as ondas de tensão providas da concessionária. Essas distorções de corrente e seus índices são foco de análise deste trabalho.

2.4 Bancos de Capacitores

2.4.1 Bancos de capacitores em sistemas senoidais

As cargas mais comuns de consumidores industriais e residenciais são as indutivas, pois motores e reatores ocupam uma gama maior no sistema elétrico global. O aumento das cargas indutivas provoca queda no fator de potência local, com isso, surge a necessidade da compensação reativa.

O meio mais comum de se compensar reativos é através de bancos de capacitores. Os bancos são encapsulamentos de capacitores, geralmente trifásicos, que entregam a potência reativa necessária para suprir a necessidade das cargas indutivas.

A correção do fator de potência por bancos de capacitores é um meio eficaz para corrigir potências reativas indutivas, porém, de acordo com [Nakamura \(2011\)](#), sua utilização sem controle adequado pode acarretar problemas quando as cargas indutivas forem desconectadas da rede. O excesso de potência reativa capacitiva na rede também reduz o fator de potência, por isso, as concessionárias aplicam tarifa noturna para essa situação, pois é no período da noite que geralmente as cargas indutivas são desligadas ([CELG, 2015](#)).

A Figura 2.7 contém dois triângulos de potências, o primeiro triângulo ou situação 1 tem S_1 como hipotenusa e o segundo triângulo ou situação 2 possui S_2 como hipotenusa. A compensação reativa através dos bancos permite sair da situação 1 e ir para a situação 2. A potência reativa necessária, fornecida pelos capacitores, é representada por Q_c .

Observa-se que a compensação permite sair da situação 1 com o ângulo de potência φ_1 e ir para a situação 2 com um ângulo de potência φ_2 (maior fator de potência).

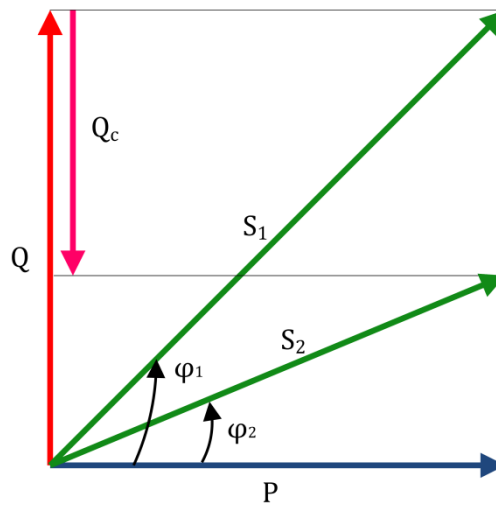


Figura 2.7 - Diagrama de correção do fator de potência.

A potência reativa Q_c fornecida pelos bancos de capacitores é calculada como em (2.26).

$$Q_C = Q - [P \cdot \tan\varphi_2] \quad (2.26)$$

Sendo:

Q_C : Potência reativa necessária e fornecida pelos capacitores;

Q : Potência reativa da rede sem correção;

P : Potência ativa da rede;

φ_1 : Ângulo de potência antes da correção;

φ_2 : Ângulo de potência depois da correção;

S_1 : Potência aparente antes da correção;

S_2 : Potência aparente depois da correção.

Os bancos de capacitores podem ser controlados por mecanismos de chaveamento, entrando apenas em momentos necessários para corrigir o fator de potência, elevando a tensão do barramento. Além disso, o consumo de potência ativa desses dispositivos é baixo, praticamente desprezível.

2.4.2 Bancos de capacitores em sistemas não senoidais

Os capacitores são afetados pelas distorções harmônicas, pois suas impedâncias dependem da frequência da(s) corrente(s) que circula(m) por eles (NAKAMURA, 2011).

A impedância do capacitor, ou reatância capacitiva, é encontrada como em (2.27).

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} \quad (2.27)$$

Quanto maior a frequência da corrente que circula pelo capacitor, menor é a impedância para essa corrente.

Para melhor analisar os efeitos das distorções harmônicas em capacitores faz-se necessário apresentar um sistema de potência com carga não linear que possui compensação capacitiva. A Figura 2.8 apresenta situação similar.

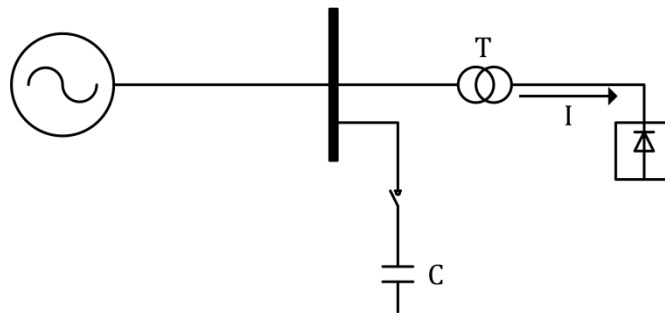


Figura 2.8 - Sistema de potência com compensação capacitiva.

A Figura 2.9 apresenta o circuito equivalente do sistema da Figura 2.8.

A análise para correntes harmônicas requer a retirada da fonte do sistema, além do mais, a carga é agora vista como uma fonte de corrente. Apenas as reatâncias da fonte, da linha e dos capacitores são consideradas. A Figura 2.10 apresenta a situação para harmônicos.

Há dois possíveis equacionamentos para a situação da Figura 2.10: sem capacitor e com capacitor. Os cálculos estão em (2.28) e (2.29), respectivamente.

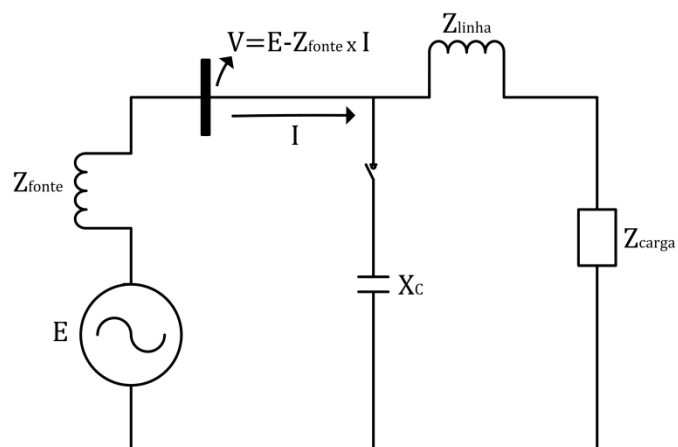


Figura 2.9 - Circuito equivalente do sistema da Figura 2.8

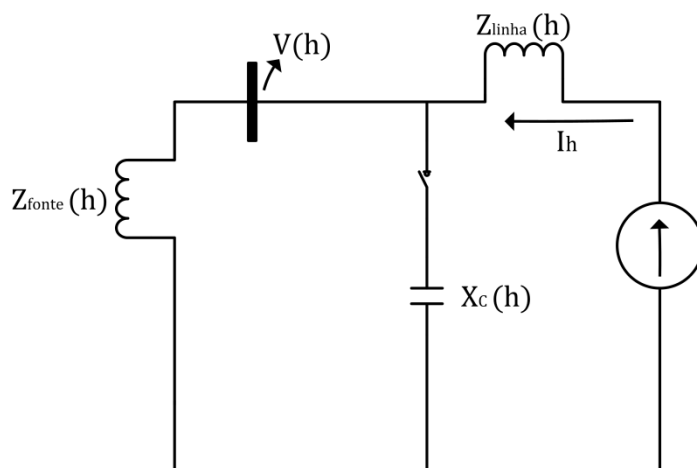


Figura 2.10 - Circuito equivalente modelado para harmônicas.

$$V(h) = Z_{fonte}(h) \cdot I_h \quad (2.28)$$

$$V(h) = \frac{(Z_{fonte}(h) \cdot X_C(h))}{(Z_{fonte}(h) - X_C(h))} \cdot I_h = Z_{eq} \cdot I_h \quad (2.29)$$

Em (2.29), o denominador da impedância equivalente (Z_{eq}) é a subtração da impedância da fonte com a reatância dos capacitores. Se a reatância capacitiva atingir valores próximos aos da impedância da fonte, a subtração terá valores muito pequenos, o que resultará em valores muito altos de tensão $V(h)$. Esse fenômeno é

conhecido como ressonância paralela. O comportamento é mais observado em instalações com valores baixos de resistência elétrica (NAKAMURA, 2011).

É importante analisar essas influências das ondas distorcidas em capacitores, pois segundo a IEEE (1992) os capacitores devem obedecer aos seguintes padrões de suportabilidade: devem suportar até 110% da tensão nominal, admitir operação contínua com corrente de até 180% da corrente nominal e suportar potência de 135% da potência nominal.

Ao submeter capacitores em barramentos com harmônicas, deve ser realizado detalhado estudo, que foge ao escopo deste trabalho, para determinar: as possíveis elevações de tensões no barramento produzidas pela circulação de correntes harmônicas nas impedâncias indutivas do sistema; as correntes adicionais nos capacitores produzidas pelas correntes harmônicas; e a potência exigida dos capacitores considerando as correntes harmônicas. Os catálogos de capacitores expressam esses referidos limites.

2.5 Considerações

Neste capítulo foram introduzidos conceitos e tecnologias empregados em sistemas elétricos de potência, principalmente envolvidos com a correção do fator de potência. Modelagens e equacionamentos foram apresentados para sistemas senoidais e não senoidais. O Capítulo 3 apresenta análise mais profunda do comportamento da máquina síncrona em sistemas senoidais e submetida a distorções harmônicas.

CAPÍTULO 3

MÁQUINA SÍNCRONA EM SISTEMAS SENOIDAIS E SUBMETIDA A DISTORÇÕES HARMÔNICAS

Neste capítulo pretende-se expor embasamento teórico referente à modelagem e ao comportamento interno da máquina síncrona em sistemas senoidais e submetida a distorções harmônicas no ponto de acoplamento comum com o barramento (PAC). Este estudo tem por objetivo fazer compreender de que forma essa máquina é capaz de compensar reativos e atenuar componentes harmônicos de carga. Para dar maior sustentação a essa análise, é apresentado o Anexo A, onde é desenvolvida uma modelagem matemática, além de estudos feitos no domínio da frequência para obter uma visão clara do que acontece com os geradores síncronos em cada frequência: fundamental e harmônicas.

3.1 Máquina Síncrona

3.1.1 Máquina síncrona em sistemas senoidais

Uma máquina síncrona basicamente é conhecida por ter dois campos magnéticos que interagem entre si: da armadura em corrente alternada (estator) e o do campo em corrente contínua (rotor). Quando a máquina converte potência mecânica, no seu eixo, em potência elétrica, é chamada de gerador, quando converte potência elétrica em mecânica atua como um motor; quando não converte potência ativa entregando apenas potência reativa, é chamada de compensador síncrono. A Figura 3.1 demonstra um esquema simplificado de uma máquina síncrona.

Segundo Ragnev (2005), as máquinas síncronas são as mais usadas para geração de energia elétrica e são classificadas em dois tipos: rotor de polos lisos e polos salientes. Polos lisos são usados, geralmente, para maiores rotações.

A Figura 3.2 ilustra a região de trabalho da máquina síncrona onde o semicírculo limitante é a corrente máxima de armadura (I_{max}). Em outras palavras, existe um ponto limitante sobre o semicírculo para cada valor de potência ativa e reativa, podendo a máquina atuar dentro da área do semicírculo sem nenhum dano.

Como há outros parâmetros, além da corrente máxima de armadura, que também limitam o funcionamento da máquina síncrona, uma curva mais precisa pode ser

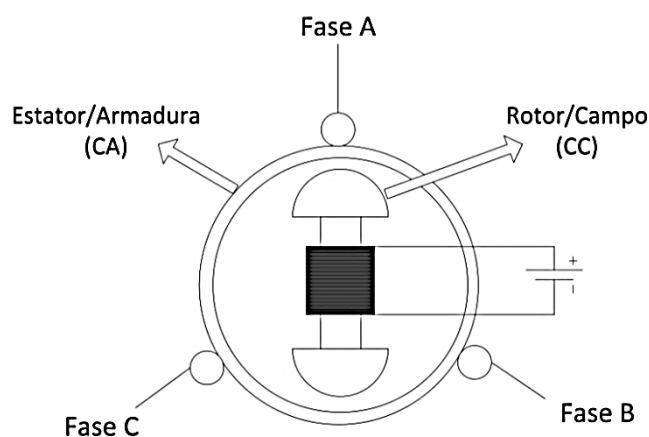


Figura 3.1 - Esquema de uma máquina síncrona.

construída seguindo outros limites da máquina, como: limite de aquecimento do enrolamento de campo, limite de potência primária, limite de estabilidade e limite de excitação mínima (RAGNEV, 2005).

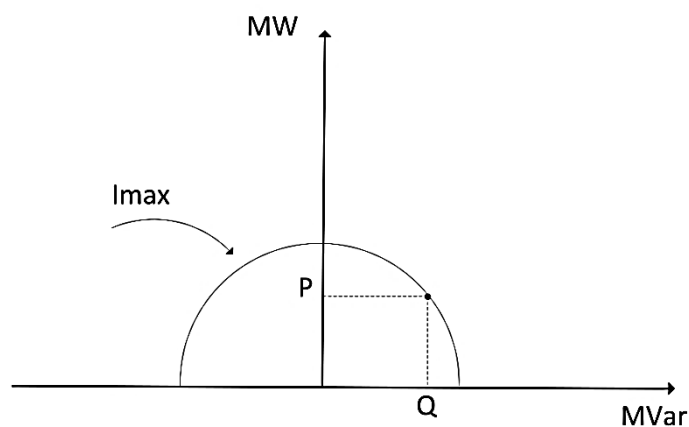


Figura 3.2 - Região de trabalho da máquina síncrona.

Uma grande vantagem das máquinas síncronas sobre as assíncronas ou de indução é a capacidade de trabalhar subexcitada ou sobre-excitada. No primeiro caso a máquina trabalha com uma tensão de excitação abaixo da nominal, podendo fornecer ou consumir potência ativa e consumir potência reativa indutiva da rede, tendo um efeito semelhante a um indutor. No segundo caso a máquina é submetida a uma tensão de excitação acima da nominal, podendo também fornecer ou consumir potência ativa e fornecer potência reativa capacitiva à rede, tendo efeito semelhante a

um capacitor.

O compensador síncrono é uma condição intermediária entre gerador e motor, sendo nulo ou pequeno o fluxo de potência ativa se comparado com o fluxo de potência reativa indutiva/capacitiva. As características de subexcitação e sobre-excitação são similares para os três comportamentos.

A Figura 3.3 contém a representação do circuito equivalente de um gerador síncrono.

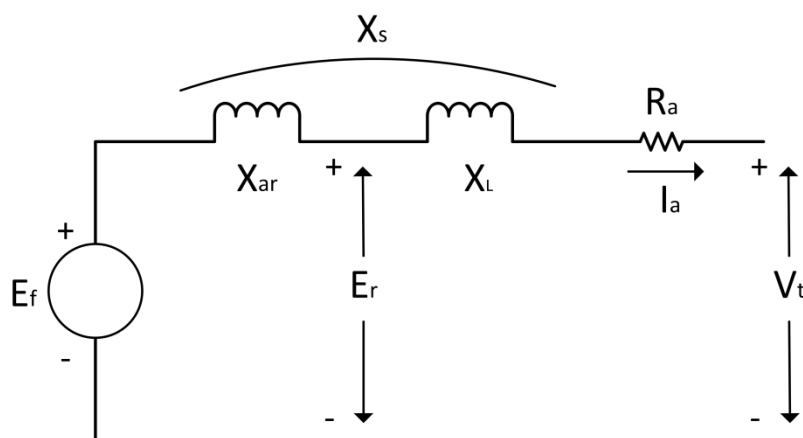


Figura 3.3 - Circuito equivalente de um gerador síncrono.

Onde:

V_t : Tensão por fase nos terminais;

E_r : Tensão equivalente no rotor;

E_f : Tensão gerada por fase;

R_a : Resistência por fase do enrolamento da armadura;

X_L : Reatância da armadura por fase (fluxo disperso);

X_{ar} : Reatância que representa a reação da armadura por fase.

A soma das duas reatâncias é chamada de reatância síncrona ou X_s . A Figura 3.4 demonstra um gerador síncrono com o circuito simplificado.

A resistência de armadura é menor que a reatância síncrona, portanto, um modelo do gerador e do motor síncrono, simplificado, pode ser estipulado e apresentado na Figura 3.5.

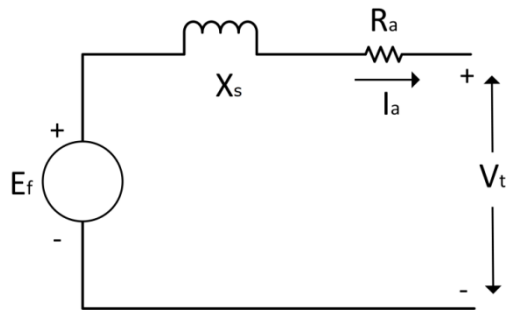


Figura 3.4 - Circuito equivalente simplificado de um gerador síncrono.

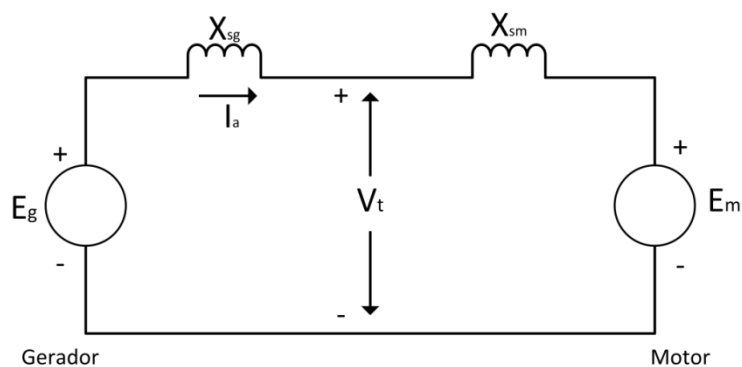


Figura 3.5 - Circuito equivalente de um gerador e de um motor síncrono.

Onde:

E_g : Tensão gerada internamente, produzida em uma fase do gerador síncrono;

X_{sg} : Reatância síncrona do gerador;

I_a : Corrente fornecida pelo gerador;

V_t : Tensão nos terminais do gerador e do motor;

X_{sm} : Reatância síncrona do motor;

E_m : Tensão gerada internamente, produzida em uma fase do motor síncrono.

Quando o gerador está sobre-excitado fornece corrente atrasada em relação à tensão do sistema. Atuando como um capacitor, ele entrega potência reativa ao sistema, portanto, $|E_g| > |V_t|$.

Atuando subexcitado, o gerador entrega corrente adiantada em relação à tensão do sistema. Ele agora consome potência reativa da instalação, portanto, $|E_g| < |V_t|$. A Figura 3.6 apresenta o diagrama vetorial do gerador síncrono subexcitado e sobre-excitado.

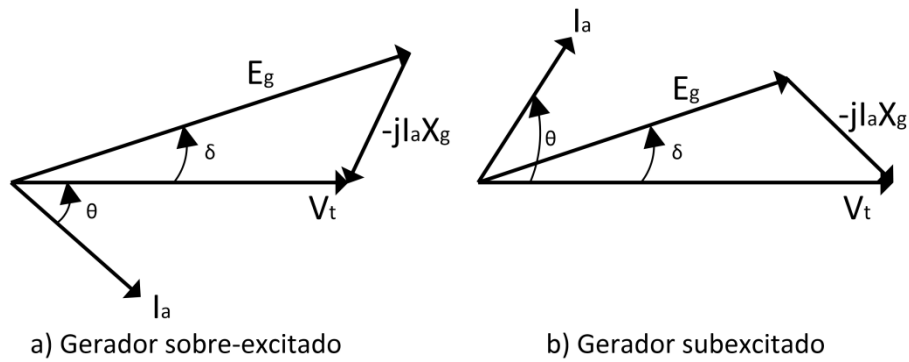


Figura 3.6 - Fasores do gerador (a) sobre-excitado e (b) subexcitado.

Para o caso do motor síncrono, quando sobre-excitado, solicita corrente adiantada do sistema, fornecendo potência reativa e agindo como um circuito capacitivo, portanto, $|E_m| > |V_t|$. Para o caso de subexcitação, o motor requer corrente em atraso do sistema, absorvendo potência reativa como um circuito indutivo, portanto, $|E_m| < |V_t|$. A Figura 3.7 apresenta o diagrama vetorial do motor síncrono subexcitado e sobre-excitado.

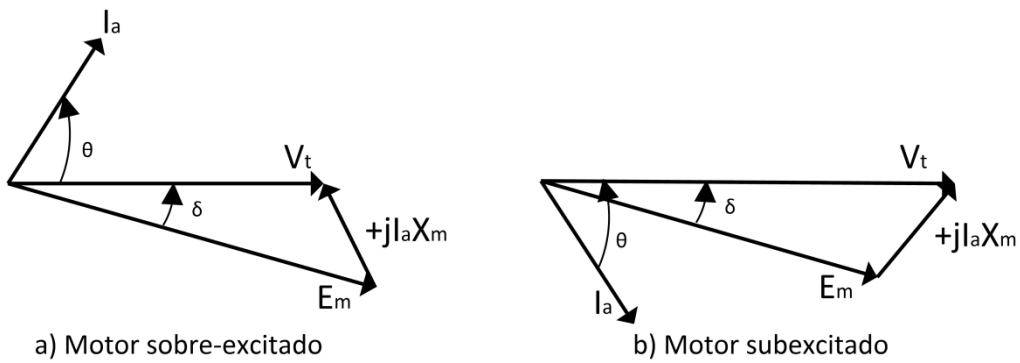


Figura 3.7 - Fasores do motor (a) sobre-excitado e (b) subexcitado.

Através de uma análise detalhada dos circuitos equivalentes e dos diagramas fasoriais pode-se determinar a expressão matemática das tensões da máquina síncrona funcionando como gerador, como em (3.1).

$$E_g = (V_t \cdot \cos\theta + I_a R_a) + j(V_t \cdot \sin\theta \pm I_a X_s) \quad (3.1)$$

A expressão matemática para a máquina síncrona funcionando como motor é vista em (3.2).

$$E_m = (V_t \cdot \cos\theta - I_a R_a) + j(V_t \cdot \text{sen}\theta \pm I_a X_s) \quad (3.2)$$

A parte imaginária das duas expressões é representada pelo símbolo \pm , sendo que para um fator de potência em avanço adota-se sinal positivo e para fator de potência em atraso adota-se sinal negativo. O ângulo θ , que determina o defasamento entre I_a e V_t , é igual ao ângulo φ do fator de potência se o sistema for puramente senoidal. O ângulo δ é o ângulo de carga ou de torque e também representa o defasamento entre tensão interna (E_g ou E_m) e tensão de terminal (V_t).

3.1.2 Máquina síncrona em sistemas não senoidais

Após demonstrações matemáticas, Delbone (2012) conclui que a máquina síncrona submetida a correntes harmônicas pode ser “enxergada” como uma impedância que depende da frequência da corrente. A Figura 3.8 contém o circuito simplificado da máquina síncrona em um barramento com harmônicas.

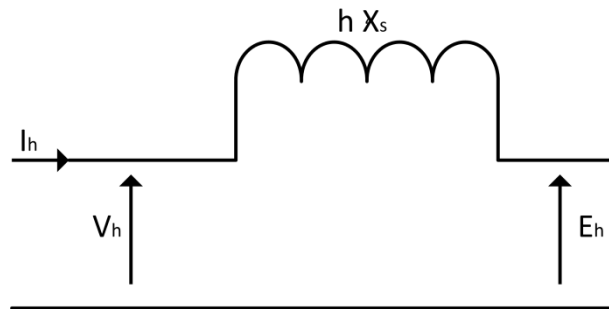


Figura 3.8 - Esquema da máquina síncrona para correntes harmônicas.

A formulação matemática da máquina síncrona em um barramento com harmônicas é similar ao caso senoidal, porém é necessário considerar as ordens harmônicas presentes, como em (3.3). A resistência de armadura, como apresentada na Figura 3.4 é desconsiderada.

$$V_h = E_h \pm j(hX_s)I_h \quad (3.3)$$

Onde:

V_h : Tensão de terminal devido a correntes harmônicas;

E_h : Tensão interna por fase devido a correntes harmônicas;

h : Ordem harmônica;

X_S : Reatância síncrona;

I_h : Corrente harmônica de ordem h .

Ao fim deste trabalho é apresentado o Anexo A, baseado nos estudos de [Delbone \(2012\)](#), que compreende a modelagem das componentes das forças magneto motrizes (fmm) que são produzidas pelas componentes senoidais das correntes de excitação de campo CC , também produzidas pelas componentes distorcivas da carga através da reação do estator. Por questão de simplificação, as modelagens foram realizadas para o gerador síncrono de polos lisos.

3.2 Considerações

Este capítulo apresentou a modelagem da MS em regime permanente senoidal e também breve modelagem em regime não senoidal conectando com os estudos do Anexo A. O autor do anexo conclui que a MS em regime permanente não senoidal se comporta como fonte de harmônicos. No Capítulo 4 são apresentados os procedimentos metodológicos para os estudos que objetivam comprovar as conclusões do Anexo A, bem como comparar as técnicas de compensação de reativos através de bancos de capacitores e através da máquina síncrona.

CAPÍTULO 4

METODOLOGIA

Neste capítulo são detalhados os procedimentos metodológicos para os testes propostos. Três estudos de casos e três sistemas diferentes, com máquinas síncronas, para estudos de atenuação harmônica e compensação reativa são utilizados:

1. Estudo de Caso - Sistema 1 - este sistema é montado a partir de um barramento comum onde uma máquina síncrona é conectada em paralelo com uma carga não linear;
2. Estudo de Caso - Sistema 2 - este sistema é montado a partir de um barramento comum onde uma máquina síncrona é conectada em paralelo com uma carga não linear, motores de indução e um banco de capacitores e outras cargas diversas da instalação;
3. Estudo de Caso - Sistema 3 - este sistema possui um barramento comum onde uma máquina síncrona, de pequena potência, é conectada em paralelo com uma carga não linear, motores de indução e um banco de capacitores.

4.1 Estudo de Caso – Sistema 1

Nesse estudo de caso uma carga não linear é colocada em um barramento comum em paralelo com a máquina síncrona, operando como gerador em carga. A Figura 4.1 ilustra o sistema e a sequência dos procedimentos é executada na seguinte ordem:

1. Fecha-se a chave $S1$ e medem-se os parâmetros de corrente no ponto de acoplamento da barra comum $M1$;
2. Fecham-se as chaves $S1$ e $S2$ e medem se os parâmetros de corrente nos pontos $M2$, $M1$ e $M4$;
3. Compara-se os fluxos de corrente harmônica em cada uma das condições dos itens 1 e 2.

Como mencionado, a Figura 4.1 mostra a estrutura do sistema montado para os testes propostos neste estudo de caso do Sistema 1, que tem como objetivo realizar

estudos do comportamento da *MS* conectada em um barramento submetido a uma forte distorção harmônica das correntes de carga.

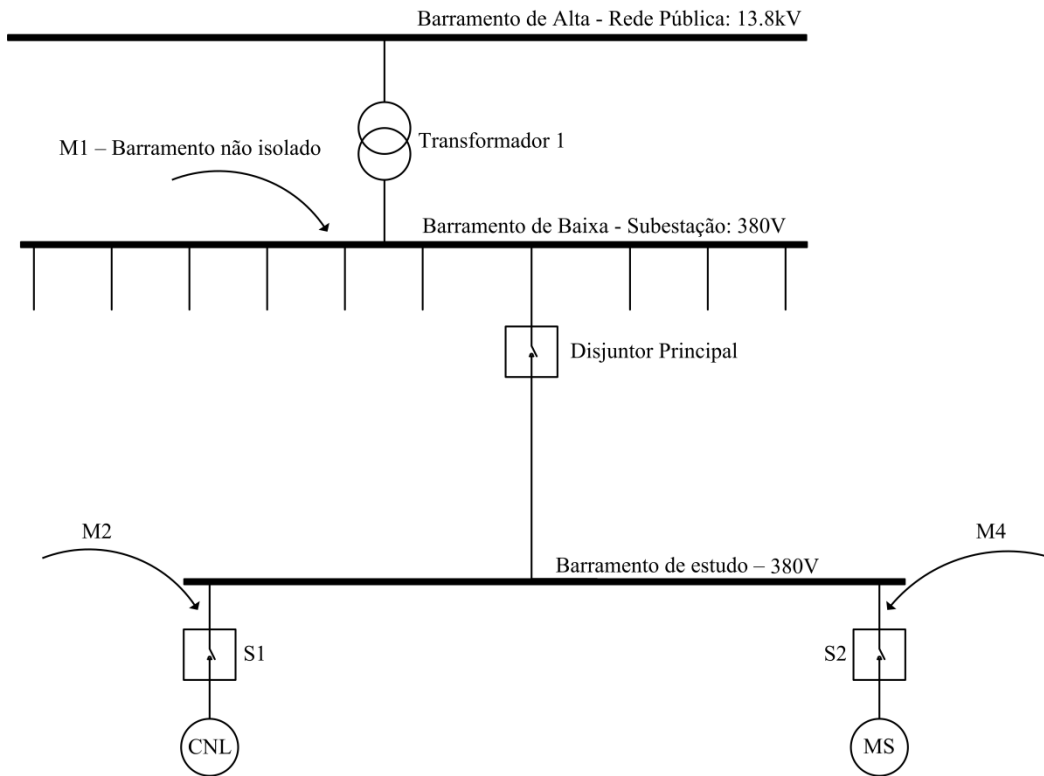


Figura 4.1 - Estrutura montada para o estudo de caso do Sistema 1.

A Tabela 4.1 contém a descrição dos principais elementos desse sistema. Foi construído um barramento comum, isolado de outras cargas.

Tabela 4.1 - Descrição dos componentes do sistema sob estudo.

Siglas	Equipamentos	Dados
<i>MS</i>	Máquina síncrona	37kVA, 380V, trifásico, polos salientes, 4 polos, 60Hz
<i>CNL</i>	Carga não linear – lâmpadas halógenas acionadas a TRIAC	14kW, 380V, trifásico, 60Hz

A Figura 4.2 ilustra a forma como foi obtida a carga não linear. A *CNL* é composta

de um conjunto de lâmpadas halógenas ligadas em paralelo e distribuídas nas três fases, controladas por *TRIACS*.

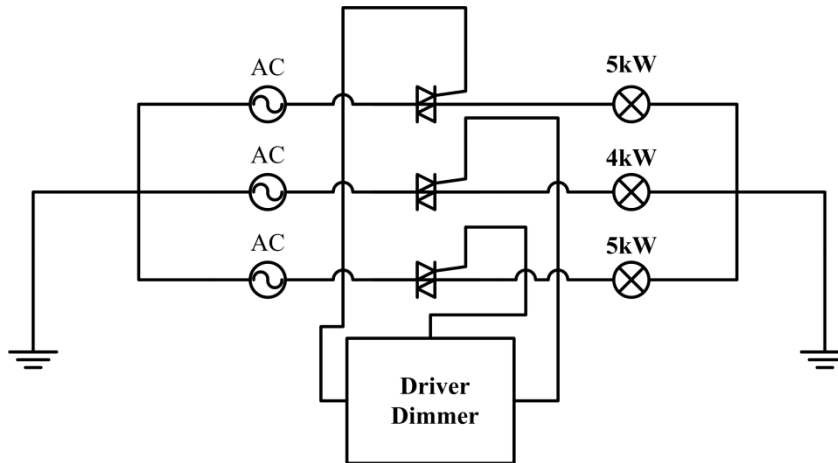


Figura 4.2 - *CNL* baseada em lâmpadas halógenas controladas por *TRIACS*.

Além dos equipamentos principais apresentados nas tabelas, são utilizados durante o experimento multímetros, cabeados, componentes diversos e um computador para coleta das medições dos analisadores de energia. São utilizados dois analisadores de energia que capturam e mostram dados de tensão, de corrente, potência, fator de potência entre outras grandezas, apresentam dados contendo as distorções harmônicas, individuais e totais, de tensão e corrente, registram até a 50ª ordem harmônica de corrente e tensão.

4.2 Estudo de Caso – Sistema 2

Neste estudo de caso utiliza-se de um barramento não isolado, dois motores de indução de $5kW$ e dois bancos trifásicos de capacitores. A carga não linear *CNL* é a mesma utilizado no estudo de caso do Sistema 1.

A Figura 4.3 ilustra a estrutura do sistema montado para os testes propostos neste estudo de caso do Sistema 2, onde *MIT* são motores de indução trifásico, *BC* são bancos de capacitores, *CNL* a carga não linear, a mesma que foi utilizada no estudo de caso do Sistema 1, *MS* uma máquina síncrona de $37kVA$.

A Sequência dos procedimentos é executada na seguinte ordem:

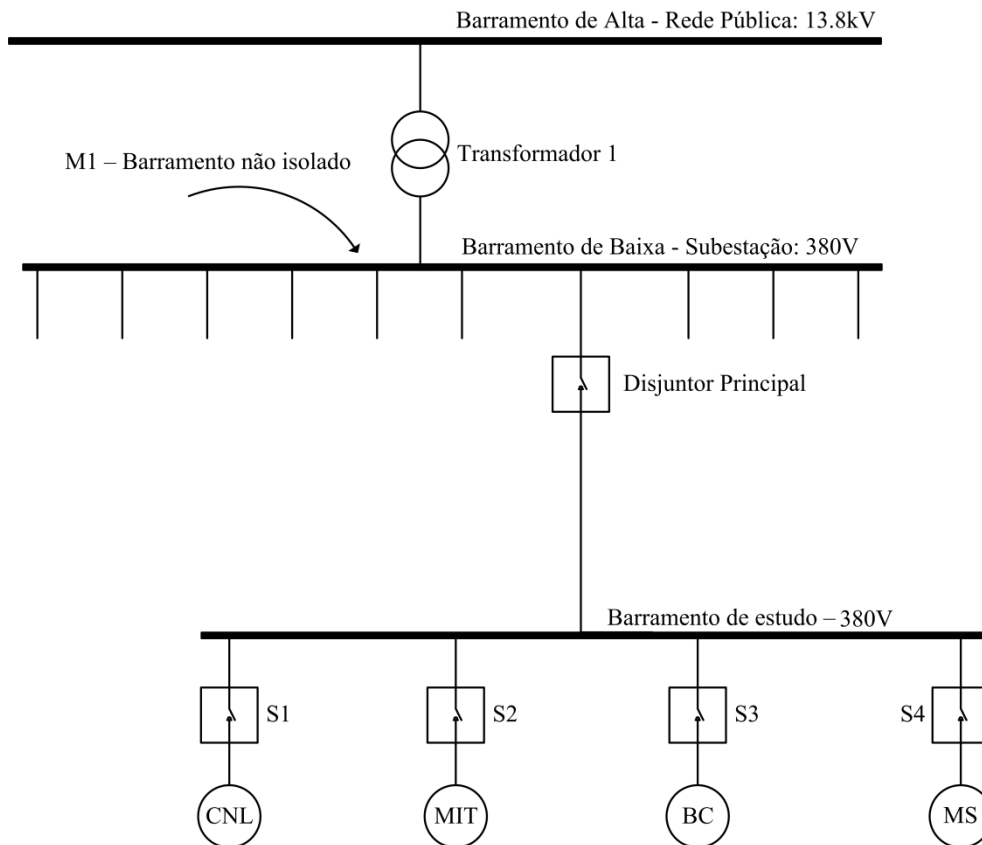


Figura 4.3 - Estrutura montada para o Estudo de Caso do Sistema 2.

1. Fechamento da chave $S1$ realizando a entrada da CNL no barramento;
2. Fechamento da chave $S2$ realizando a entrada dos dois motores de indução a vazio;
3. Fechamento da chave $S3$ realizando a entrada dos bancos de capacitores;
4. Com as chaves $S1$, $S2$ fechadas, abre-se a chave $S3$, retirando o banco de capacitores e realiza-se o fechamento da chave $S4$, entrada da MS , em carga e sobre-excitada oferecendo reativo para o sistema.

Em cada uma das sequências de procedimentos listadas acima, realiza-se as seguintes medições em $M1$ no barramento não isolado: Corrente nas três fases, tensão fase neutro e entre fases, potência ativa, reativa e aparente, fator de potência. Nas medições realizadas são consideradas as ordens harmônicas até a 50ª ordem. Os resultados das medições são transferidos para um computador para processamento.

A Tabela 4.2 contém a descrição dos principais elementos instalados nesse sistema, para o desenvolvimento da metodologia, em associação com outras cargas aleatórias alimentadas pelo mesmo barramento.

Tabela 4.2 - Descrição dos equipamentos utilizados no barramento não isolado.

Siglas	Equipamentos	Dados
<i>BC</i>	Bancos de capacitores	(1)10kVAr + (1)5kVAr, 380V, trifásico, 60Hz
<i>MS</i>	Máquina síncrona	37kVA, 380V, trifásico, polos salientes, 4 polos, 60Hz
<i>MIT</i>	Máquinas de indução trifásicas	(2)5kW, 380V, trifásico, rotor gaiola, 4 polos, 60Hz
<i>CNL</i>	Carga não linear – lâmpadas halógenas acionadas a TRIAC	14kW, 380V, trifásico, 60Hz

A Figura 4.4 apresenta a foto do esquema montado para acionamento da máquina síncrona no barramento não isolado. Nesta parte do estudo uma máquina síncrona de 37kVA foi adaptada exclusivamente para atender os experimentos, foi estabelecido que a *MS* não deverá desenvolver potência ativa, isto é, toda a capacidade da máquina deverá estar disponível para gerar reativos. Utiliza-se um pequeno motor *CC*, *MCC*, de 1kW acoplado ao eixo, que normalmente é utilizado como excitatriz do gerador, para levar o rotor ao sincronismo e compensar as perdas rotacionais da máquina, isto é, a *MS* não estará motorizada, não terá demanda de potência ativa, e nem fornecerá potência ativa.

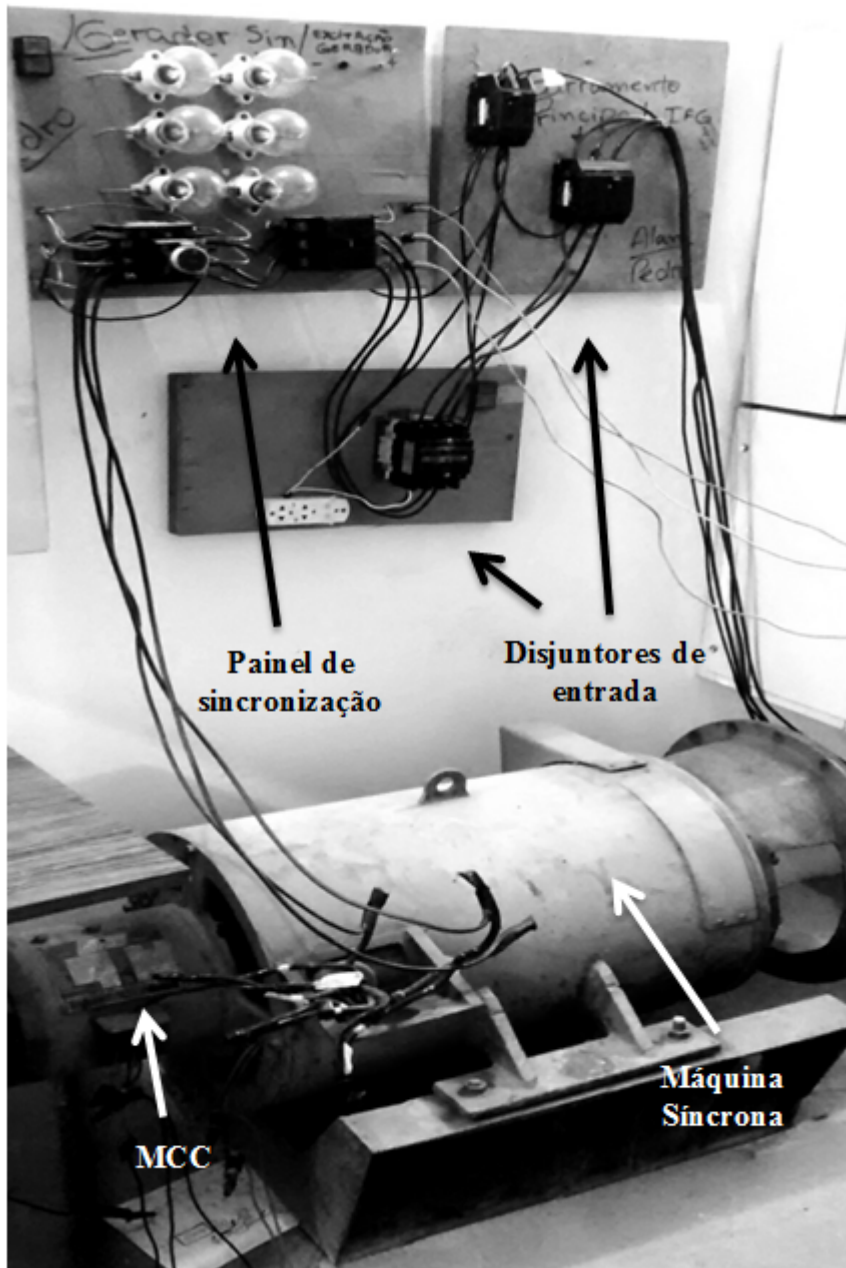


Figura 4.4 - Máquina síncrona e painel de sincronização para barramento não isolado.

O sincronismo é realizado pela teoria dos fogos girantes com a utilização de um conjunto de lâmpadas. A Figura 4.5 ilustra o esquema de acionamento e sincronismo da *MS* no barramento trifásico. A corrente de excitação I_f é obtida de um fonte retificadora *CC* a diodos controlada por varivolt.

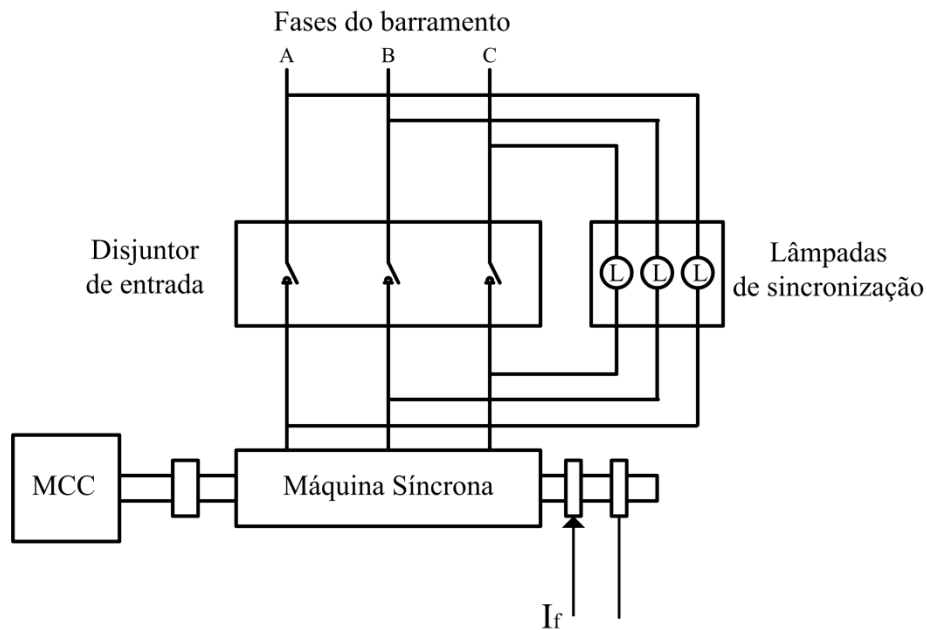


Figura 4.5 - Diagrama de conexão e sincronização da máquina síncrona.

4.3 Estudo de Caso – Sistema 3

Esse sistema possui, como principal diferença em relação ao estudo de caso do Sistema 2, um barramento isolado de outras cargas do sistema geral. Este isolamento é montado para proporcionar avaliação comparativa mais detalhada das potências reativas geradas, através dos dois processos de compensação de reativos, *i*) através de bancos de capacitores; *ii*) através de máquina síncrona.

A Figura 4.6 apresenta a foto do conjunto moto gerador utilizado.

Nesta parte do estudo uma máquina síncrona de $5kVA$ acionada por um motor de corrente contínua de $2kW$ foi utilizada. De forma semelhante ao estudo de caso do sistema 2, foi estabelecido que a *MS* não deverá fornecer ou consumir potência ativa, isto é, toda a capacidade da máquina deverá estar disponível para gerar reativos, cabendo ao motor *CC* produzir a rotação do rotor e levar a *MS* ao sincronismo, também compensar as perdas rotacionais do gerador. A entrada do gerador em sincronismo com a rede utiliza o mesmo método do estudo de caso do Sistema 2, o método dos fogos girantes.

A Figura 4.7 ilustra a estrutura do sistema elétrico montado para o desenvolvimento

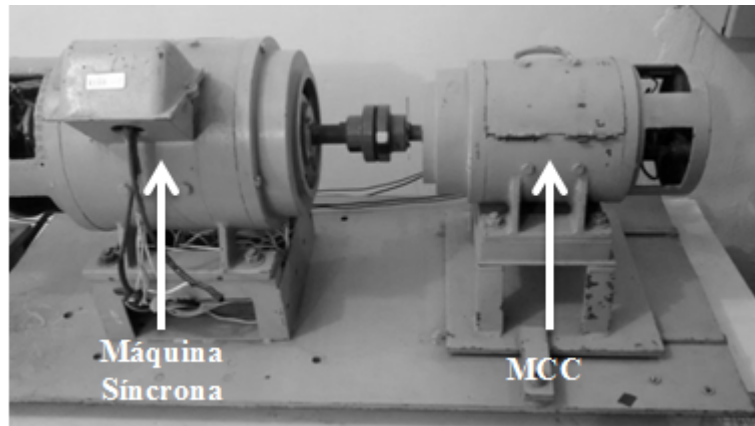


Figura 4.6 - Máquina síncrona para barramento isolado.

do estudo de caso - Sistema 3. O barramento isolado, além de proporcionar melhor controle das entradas e saídas de carga, é mais vulnerável às distorções produzidas pela *CNL*, e o seu fator de potência também pode ser controlado pelas entradas das cargas reativas do motor de indução funcionando a vazio e depois corrigido pelo método capacitivo e do reator síncrono. Houve a necessidade de acrescentar um transformador trifásico $380/220V$, pelo fato de a *MS* possuir um enrolamento com tensões entre fases de $220V$.

A Sequência dos procedimentos do estudo de caso do Sistema 3 segue exatamente a mesma ordem do estudo de caso do Sistema 2:

1. Fechamento da chave *S1* realizando a entrada da *CNL* no barramento;
2. Fechamento da chave *S2* realizando a entrada do motor de indução a vazio;
3. Fechamento da chave *S3* realizando a entrada dos bancos de capacitores;
4. Com as chaves *S1*, *S2*, fechadas, abre-se a chave *S3* e realiza-se o fechamento da chave *S4*.

Em cada uma das sequências de procedimentos listadas acima, realiza-se as seguintes medições em *M2*: corrente nas três fases, tensão fase neutro e entre fases, potência ativa, reativa e aparente, fator de potência. O ponto de medição *M1* não é averiguado.

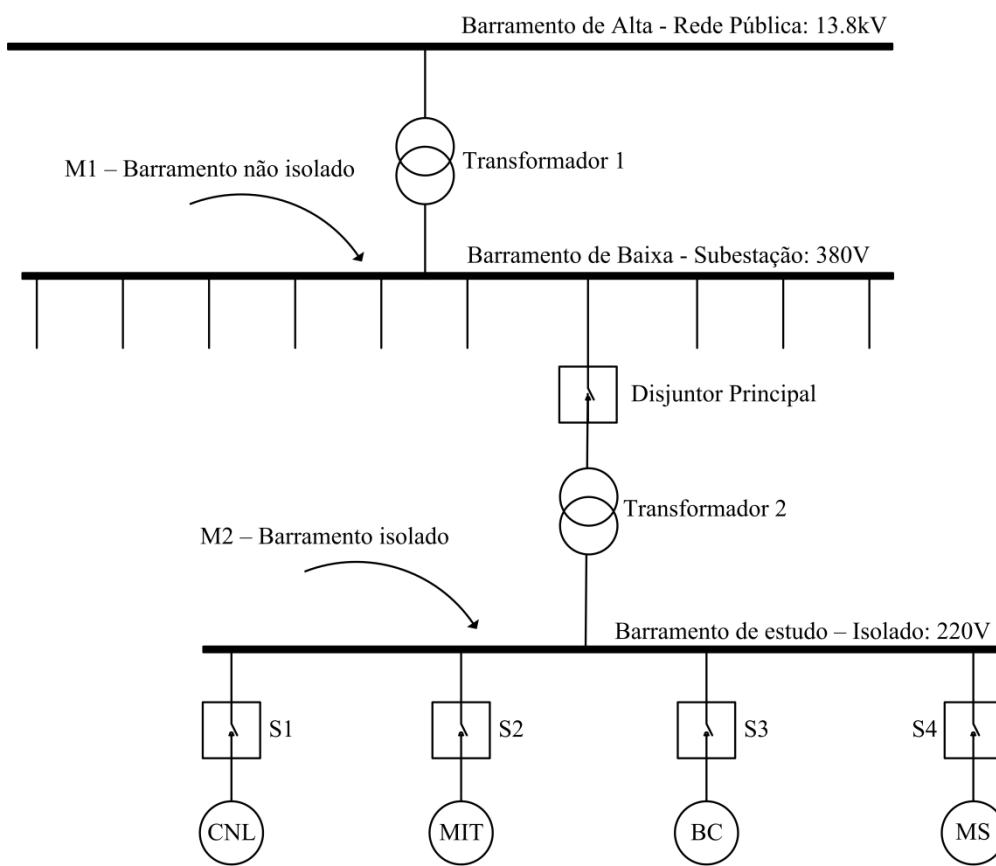


Figura 4.7 - Estrutura montada para o Estudo de Caso do Sistema 3.

A Tabela 4.3, contém a descrição dos principais elementos instalados nesse sistema, para o desenvolvimento da metodologia.

Tabela 4.3 - Descrição dos equipamentos utilizados no barramento isolado.

Siglas	Equipamentos	Dados
<i>BC</i>	Bancos de capacitores	(1)3, 2kVAr, 220V, 3 fases, 60Hz
<i>MS</i>	Máquina síncrona	5kVA, 220V, 3 fases, polos salientes, 4 polos, 60Hz
<i>MIT</i>	Máquinas de indução trifásicas	(1)5kW, 220V, 3 fases, gaiola, 4 polos, 60Hz
<i>CNL</i>	Carga não linear – lâmpadas halógenas acionadas a TRIAC	500W, 220V, 3 fases, 60Hz

O banco de capacitores disponível possui potência nominal de $10kVAr$ em $380V$, porém, a tensão de linha é de $220V$, a entrega do banco cai para $3,2kVAr$. A carga não linear utilizada, para este estudo de caso está ilustrada no esquema da Figura 4.8.

A Figura 4.8 ilustra o esquema do circuito elétrico utilizado para gerar a *CNL* para o estudo de caso do Sistema 3. Nessa estrutura um retificador trifásico de meia onda controlado com tiristores é conectado a uma carga puramente resistiva de $500W$.

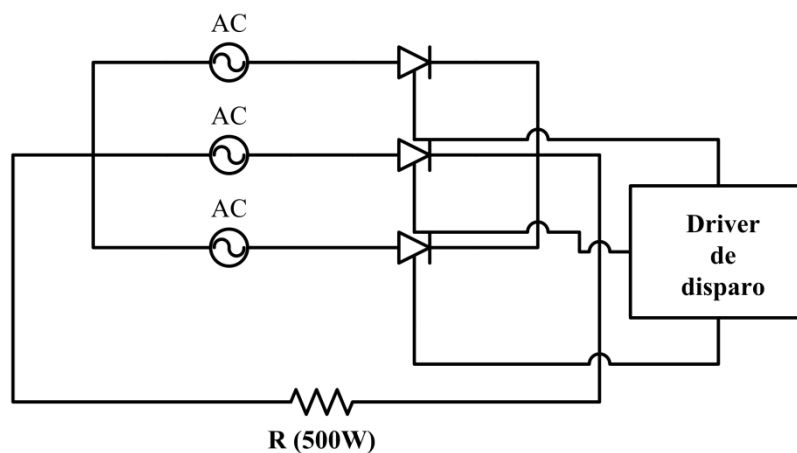


Figura 4.8 - Retificador trifásico de meia onda controlado.

4.4 Considerações

Este capítulo teve como objetivo apresentar os procedimentos experimentais, suas principais características, bem como o que motivou a elaboração e o desenvolvimento dos três estudos de casos. Apresentar, além das principais características do sistema montado, os diagramas elétricos do sistema completo e acessórios. O próximo capítulo se dedica a apresentar os principais resultados obtidos além de algumas conclusões, que serão resumidas no Capítulo 6.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS E ANÁLISES

Neste capítulo apresentam-se os resultados obtidos em cada um dos três Estudos de Casos dos Sistemas 1, 2 e 3.

5.1 Resultados do Estudo de Caso – Sistema 1

Nesse tópico são apresentados os resultados do Estudo de Caso do Sistema 1, apresentados no Tópico 4.1, Figura 4.1, Figura 4.2 e a Tabela 4.1. Para esse estudo de caso utilizou-se de uma estrutura moto gerador acionado por motor diesel, em um laboratório do Instituto Federal de Goiás (IFG). Esse laboratório está em uma sala anexa à subestação de alimentação do Campus. A Figura 4.1 apresenta os principais elementos do sistema elétrico montado para o Estudo de Caso 1: um transformador de $13,8kV/380V$ e $500kVA$ da subestação, *CNL* é a carga não linear utilizada de $14kW$, distribuída nas três fases, conforme Figura 4.2, *MS* é um conjunto motor gerador síncrono, de quatro polos salientes de $37kVA$, conectado diretamente à rede. Da Figura 4.1 identifica-se: *M1*, ponto de medição no ponto de acoplamento comum, da máquina síncrona com a carga não linear; *M2*, ponto de medição nos terminais da *CNL*; *M4*, ponto de medição nos terminais da *MS*.

A Figura 5.1 apresenta os resultados das medições de corrente, das fases *A*, *B* e *C*, realizadas no barramento de acoplamento comum, na posição *M1*, quando se fecha a chave *S1* e deixa *S2* aberta. Apresenta os resultados dos valores de correntes instantâneas para as três fases e os componentes: *rms* total (componente fundamental mais harmônicas) de corrente para a fase *A*, *A1 Waveform* 9, $96A$ *rms*, e as componentes harmônicas, da fase *A*, até a ordem 50. O equipamento utilizado é um analisador de energia da marca *Fluke*, que registra até 50 componentes de ordens harmônicas. As distorções de tensão foram medidas e consideradas desprezíveis, menor do que 2%, e não são apresentadas nesse estudo de caso.

A Figura 5.2 apresenta os resultados das medições de corrente em *M1*, com os parâmetros de medições semelhantes aos da Figura 5.1, porém, com as duas chaves *S1* e *S2* fechadas, isto é, a Máquina Síncrona operando como gerador e entregando potência para a rede em conexão com a carga não linear, (*MS+CNL*). Através dessa medição é possível quantificar os índices harmônicos injetados na rede, considerado os efeitos da atenuação harmônica proporcionada pela *MS*.

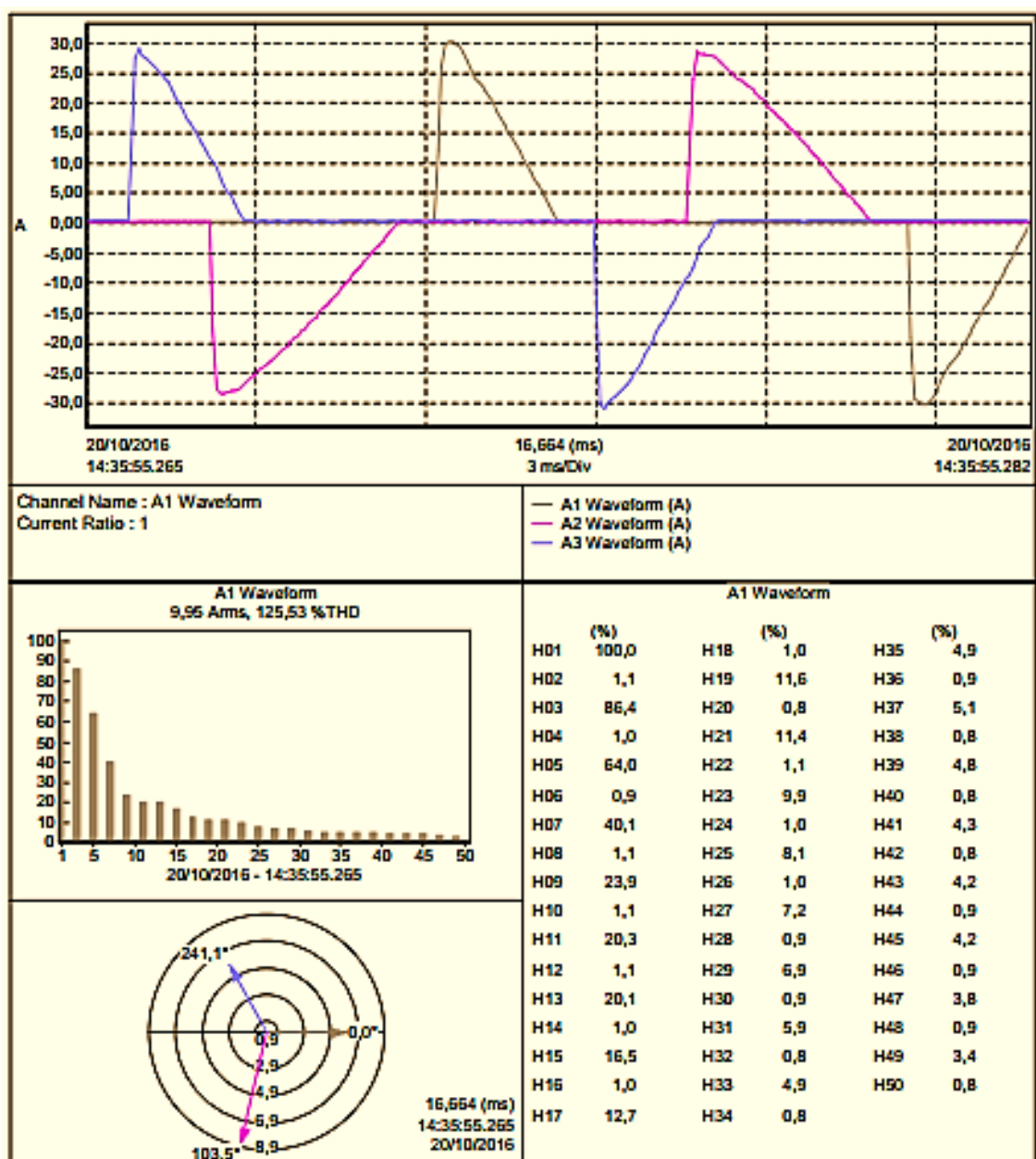


Figura 5.1 - Medições de corrente em $M1$ com a CNL ligada e a MS ligada.

Observa-se na Figura 5.1, que quando somente a CNL estava ativa a taxa de distorção harmônica de corrente total no barramento, o $DHT_I = 125,53\%$. Foi observada a presença de praticamente todas as ordens harmônicas, no range de medição, pares e ímpares, com uma forte predominância das componentes ímpares, sem distinção de sequência, isto é, observaram-se componentes bastantes significativas de sequência

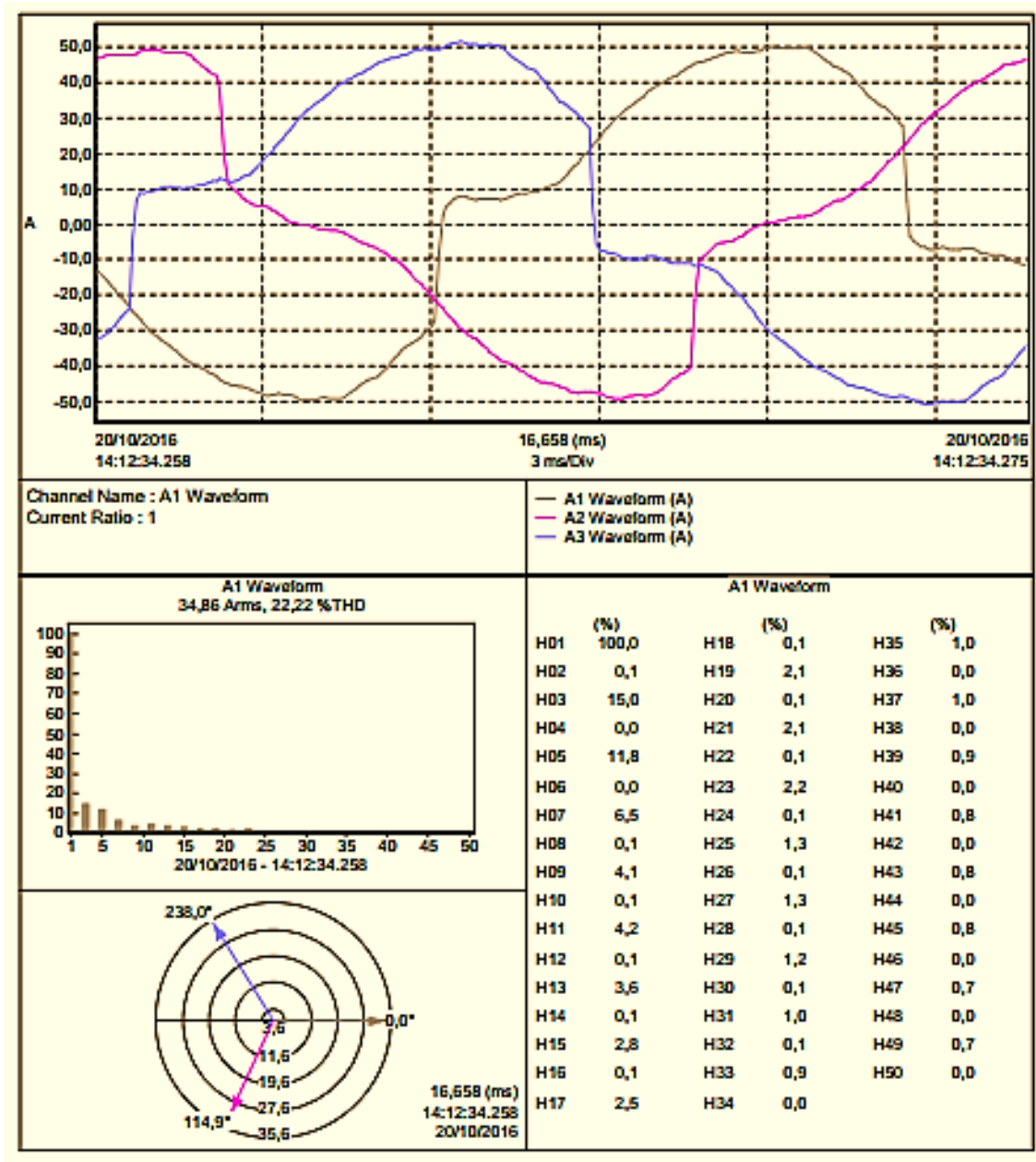


Figura 5.2 - Medições de corrente em $M1$ com a $CNL + MS$, chaves $S1$ e $S2$ ligadas.

positiva ($h = 5, 11, \dots$) e de sequência negativa ($h = 7, 13, \dots$). A entrada de MS , Figura 5.2, implicou em uma diminuição da $DHT_I = 22, 22\%$, restando avaliar a influência da MS na diminuição do fluxo harmônico para o barramento e compreender qual o impacto dessa diminuição de fluxo na barra para a própria MS , determinando qual o fluxo harmônico para dentro da MS .

A Figura 5.3 apresenta os resultados das medições de corrente em $M4$, nos terminais da MS , com as duas chaves, $S1$ e $S2$ fechadas, isto é, a máquina síncrona operando como gerador e entregando potência para a rede em conexão com a carga não linear, ($MS + CNL$). Através dessa medição é possível quantificar os índices harmônicos absorvidos pelo gerador submetido a uma carga não linear.

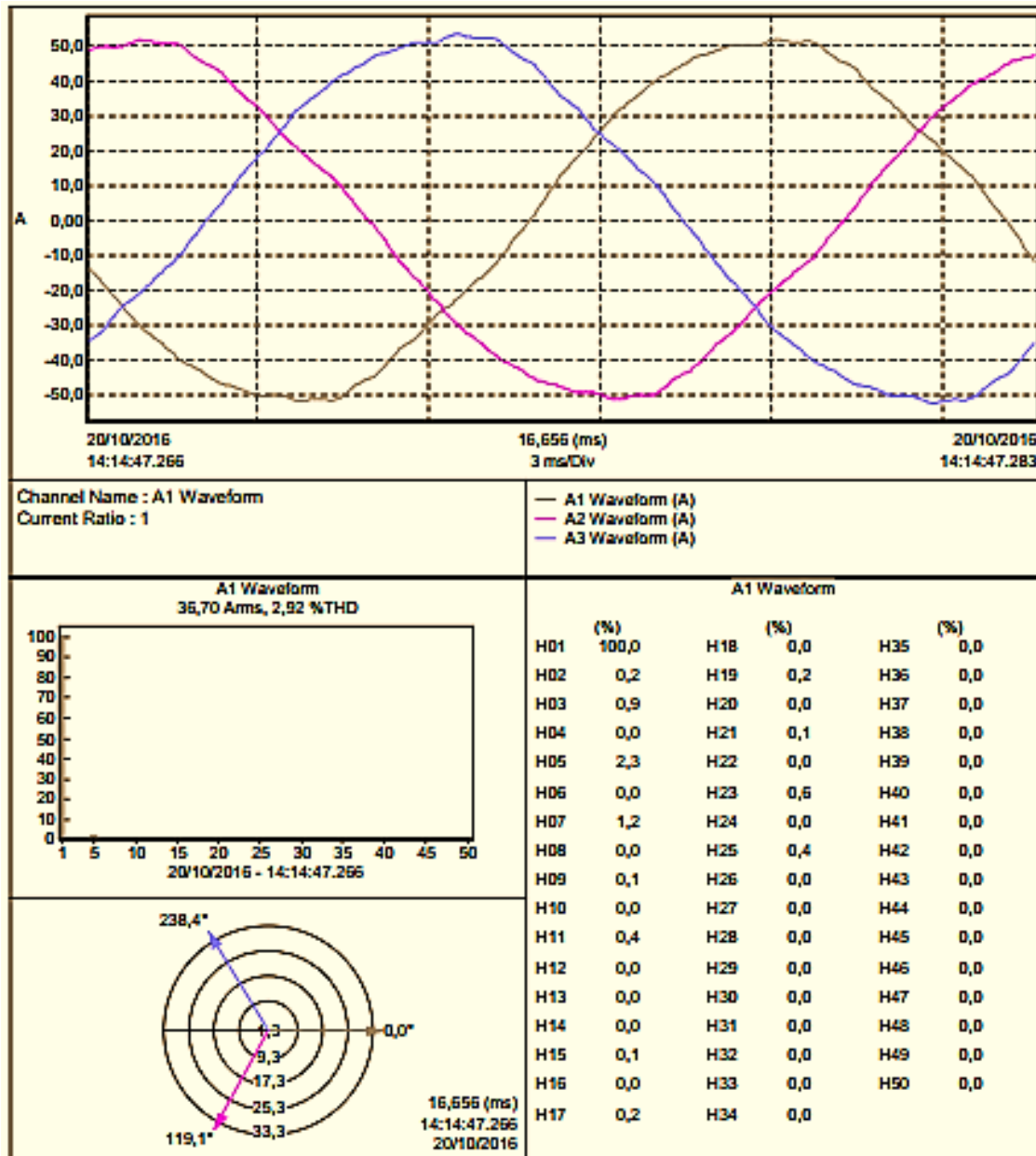


Figura 5.3 - Medições de corrente em $M4$, nos terminais da MS , com a ($CNL + MS$), chaves $S1$ e $S2$ ligadas.

Da Figura 5.3, observa-se que nos terminais da MS , praticamente não há a presença de harmônicas de ordem par e que há correntes distorcidas, em pequena proporção da fundamental, $THD_I = 2,92\%$, de ordem ímpar, nas frequências mais baixas, tanto de sequências positivas ou negativas.

A Tabela 5.1 apresenta os resultados dos valores absolutos das componentes fundamentais e harmônicas de corrente para a fase A , em Amperes, a partir dos resultados obtidos na Figura 5.1, Figura 5.2 e Figura 5.3, e a partir das planilhas de resultados do instrumento.

Da Tabela 5.1, define-se $I_h(A)$ sendo o fluxo harmônico de corrente, em Amperes, que entra no barramento, fluindo do Sistema 1, para fora deste, o cálculo desse valor é feito isolando o valor *rms* dos componentes harmônicos, como em (2.25). Sendo $1,06^*$ o fluxo harmônico de corrente, em Amperes, para dentro da MS .

Tabela 5.1 - Resultado dos valores absolutos das correntes da Fase A, referentes às Figura 5.1 à Figura 5.3.

Ordem harmônica h	Corrente $I_h(A)$			Ordem harmônica h	Corrente $I_h(A)$		
	CNL $M1$	CNL+GS $M1$	CNL+GS $M4$		CNL $M1$	CNL+GS $M1$	CNL+GS $M4$
1	6,2	34,6	36,2	26	0,06	0,03	0
2	0,08	0,07	0	27	0,44	0,41	0
3	5,36	5,02	0,33	28	0,07	0,03	0
4	0,07	0,03	0	29	0,41	0,38	0
5	3,96	3,87	0,83	30	0,06	0,03	0
6	0,07	0,03	0	31	0,37	0,31	0
7	2,47	2,14	0,43	32	0,06	0,03	0
8	0,07	0,03	0	33	0,29	0,28	0
9	1,47	1,35	0	34	0,06	0,03	0
10	0,07	0,03	0	35	0,29	0,31	0
11	1,26	1,38	0,14	36	0,06	0,03	0
12	0,07	0,03	0	37	0,31	0,31	0
13	1,23	1,21	0	38	0,06	0,03	0
14	0,07	0,03	0	39	0,29	0,28	0
15	1,02	0,93	0	40	0,06	0,03	0
16	0,07	0,03	0	41	0,26	0,24	0
17	0,77	0,83	0,07	42	0,06	0,03	0
18	0,07	0,03	0	43	0,25	0,24	0
19	0,71	0,73	0,07	44	0,06	0,03	0
20	0,07	0,03	0	45	0,25	0,24	0
21	0,70	0,69	0	46	0,06	0,03	0
22	0,07	0,03	0	47	0,23	0,21	0
23	0,61	0,66	0,22	48	0,06	0,03	0
24	0,07	0,03	0	49	0,2	0,21	0
25	0,48	0,35	0,14	50	0,06	0,03	0
$DHT_I\%$	125,53	22,22	2,92				
$DHT_V\%$	1,57	1,49	1,38				
$I_h(A)$	7,78	7,69	1,06*				

Das análises da Figura 5.1, Figura 5.2 e da Tabela 5.1, pode-se concluir que:

- A máquina síncrona funcionando como gerador em carga, em conexão com a rede, e em paralelo com uma carga não linear não funciona basicamente como filtro harmônico e não apresentou substancial atenuação das correntes harmônicas na barra. Observe que a corrente distorciva no barramento (fase A), vinda do sistema, medidas em $M1$, era de $7,78A$, quando só a

CNL estava ligada; quando a *MS* entrou no sistema este barramento passou a receber $7,69A$, uma diferença praticamente desprezível, enquanto a *MS* absorveu $1,06A$. Os resultados desse estudo de caso não confirmam as conclusões teóricas do final do Capítulo 3, que estabelece que a *MS* submetida a uma carga harmônica irá funcionar como um gerador de harmônicos.

5.2 Resultados do Estudo de Caso – Sistema 2

Os resultados apresentados neste tópico estão relacionados com o Tópico 4.2, Figura 3.3, Figura 3.4, Figura 3.5 e Tabela 4.2. Neste Estudo de Caso utiliza-se de um barramento não isolado, dois motores de indução de $5kW$, e dois bancos trifásicos de capacitores. A carga não linear, *CNL*, é a mesma utilizada no estudo de caso do Sistema 1.

Na Tabela 5.2 estão apresentadas grandezas medidas no barramento não isolado, M1, com a entrada da carga não linear *CNL*. São apresentadas as seguintes medições: corrente eficaz (I_{rms}), das Fases, *A*, *B* e *C*, considerando as ordens harmônicas até 50^a ordem, potência ativa (P), potência reativa (Q), potência aparente (S), potência harmônica (S_h), potência total aparente (S_t), distorção harmônica total de corrente (DHT_I), distorção harmônica total de tensão (DHT_V), fator de potência (FP) e fator de deslocamento ($Fdes$) das componentes de tensão e corrente fundamentais. As tensões de linha e de fase são $380V$ e $220V$, respectivamente.

Tabela 5.2 - Barramento não isolado com carga não linear (*CNL*).

Fases	$I_{rms}(A)$	$P(W)$	$Q(VAr)$	$S(VA)$	$S_h(VA)$	$S_t(VA)$	DHT_I	DHT_V	FP	$Fdes$
<i>A</i>	33,6	7147	1791(<i>I</i>)	7368	36	7404	9,7%	1,5%	0,965	0,97
<i>B</i>	23,4	5085	-94(<i>C</i>)	5086	109	5195	20,5%	1,5%	0,979	1
<i>C</i>	31,8	6868	688(<i>I</i>)	6902	147	7049	20,4%	1,4%	0,974	0,995
TOTAL		19100	2385	19356	292	19648	MÉDIA		0,973	0,988

As potências Ativa, Reativa e Aparente, P , Q e S , total consumida na barra, Fases *A*, *B* e *C*, não apresentam condições de equilíbrio. A carga não linear, S_h , proporciona fluxo harmônico de potência, na barra M1 de $292VA$, e distorção harmônica total de corrente, nas Fases *A*, *B* e *C*, de 9,7%, 20,5% e 20,4%, respectivamente. A distorção

harmônica total de tensão é irrelevante, menor do que 2,0%. O fator de potência, FP , nas Fases A , B e C , de 0,96, 0,98, 0,97, respectivamente, está acima do exigido por norma que é 0,92.

Na Tabela 5.3 estão apresentadas grandezas medidas no barramento não isolado, $M1$, com a entrada dos dois motores de indução. Uma atenção especial precisa ser dada ao fato que como o barramento não é controlado, cargas não discriminadas estão entrando e saindo a todo o momento.

Tabela 5.3 - Barramento não isolado com cargas não linear e indutiva ($CNL + MIT$).

Fases	$I_{rms}(A)$	$P(W)$	$Q(VAr)$	$S(VA)$	$S_h(VA)$	$S_t(VA)$	DHT_I	DHT_V	FP	$Fdes$
A	29,9	4972	4254(I)	6543	24	6567	8,2%	1,5%	0,76	0,76
B	30,2	5636	3451(I)	6609	95	6704	16,6%	1,4%	0,84	0,85
C	37,9	7026	4353(I)	8265	116	8381	16,6%	1,3%	0,84	0,85
TOTAL		17634	12058	21417	235	21652	MÉDIA		0,81	0,82

Observa-se significativa deterioração do fator de potência, que caiu para, valores médios nas três fases, $FP = 0,81$. Além disso, os níveis de distorção harmônica total de corrente sofreram pequena redução, em relação à situação da Tabela 5.2, de $S_h(VA) = 292 - 235 = 57$, isto está de acordo com Delbone (2012), que demonstrou que o MIT pode reduzir a distorção harmônica total de corrente na barra onde ele esteja ligado. A distorção harmônica total de corrente está entre 8% a 16%.

Após a inserção dos capacitores, a Tabela 5.4 contém os principais parâmetros do barramento.

Tabela 5.4 - Compensação capacitiva no barramento não isolado ($CNL + MIT + BC$).

Fases	$I_{rms}(A)$	$P(W)$	$Q(VAr)$	$S(VA)$	$S_h(VA)$	$S_t(VA)$	DHT_I	DHT_V	FP	$Fdes$
A	24,8	5400	179(I)	5403	65	5468	15,4%	1,7%	0,988	0,999
B	47,2	10378	1031(I)	10429	62	10491	10,4%	1,5%	0,989	0,995
C	29,9	6471	267(I)	6476	155	6631	21,8%	1,6%	0,976	0,999
TOTAL		22249	1477	22308	282	22590	MÉDIA		0,984	0,998

A compensação de reativos é observada, uma vez que o fator de potência é elevado para valores acima de 0,92, mais precisamente, 0,99, 0,99 e 0,98, para as Fases *A*, *B* e *C*, respectivamente. A distorção harmônica total de corrente, nas Fases *A*, *B* e *C*, é de 15,4%, 10,4% e 21,8%, respectivamente. A potência $S_h(VA)$ aumentou em 47VA, de 235VA para 282VA.

A Figura 5.4 apresenta o momento após a compensação capacitiva, com as formas de onda de corrente do sistema, o espectro harmônico da fase *A*, a modulação e defasagem vetorial e os valores dos componentes harmônicos da fase *A* até a 50ª ordem.

Ordens ímpares, como: 3ª, 5ª, 7ª, 11ª, 17ª e 19ª; possuem valores entre 2,7% e 9,3% do valor de corrente da frequência fundamental. No quadro dos vetores observa-se que há desequilíbrio de fases no sistema e pelas formas de onda certificam-se as ondas deformadas.

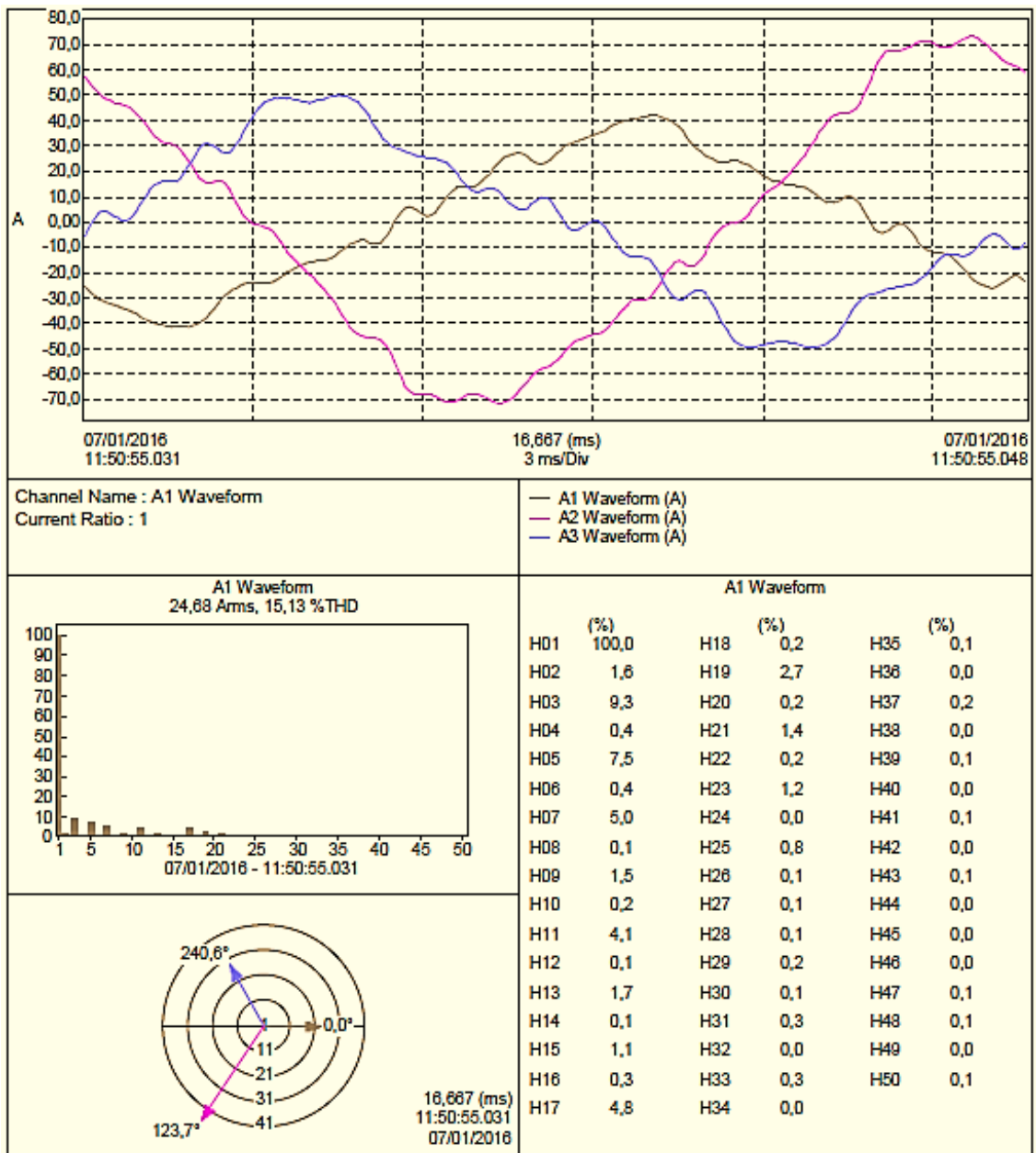


Figura 5.4 - Medições de corrente em *M1* com a *CNL + MIT + BC*, chaves *S1*, *S2* e *S3* ligadas.

A Tabela 5.5 apresenta os parâmetros elétricos após a saída e *BC* e entrada da *MS*.

Tabela 5.5 - Compensação síncrona no barramento não isolado ($CNL + MIT + MS$).

Fases	$I_{rms}(A)$	$P(W)$	$Q(VAr)$	$S(VA)$	$S_h(VA)$	$S_t(VA)$	DHT_I	DHT_V	FP	F_{des}
<i>A</i>	40,9	8983	453(<i>I</i>)	8994	34	9028	8,7%	1,5%	0,995	0,999
<i>B</i>	54,2	12002	-578(<i>C</i>)	12016	29	12045	7,0%	1,5%	0,996	0,999
<i>C</i>	36	7868	163(<i>I</i>)	7870	123	7993	17,4%	1,4%	0,984	1,0
TOTAL		28853	38	28880	186	29066	MÉDIA		0,992	0,999

Similarmente à compensação capacitiva, as Fases *A*, *B* e *C*, tiveram o fator de potência elevado para 0,99, 0,99 e 0,98, respectivamente. As distorções totais de corrente são 8,7%, 7,0% e 17,4%, para as Fases *A*, *B* e *C*, respectivamente. Porém, a potência harmônica S_h reduziu de 235VA para 186VA, uma redução de 49VA. O que demonstra que a máquina síncrona diminui o fluxo de potência distorciva na barra, ao contrário dos bancos de capacitores.

A Figura 5.5 apresenta o momento após a compensação síncrona.

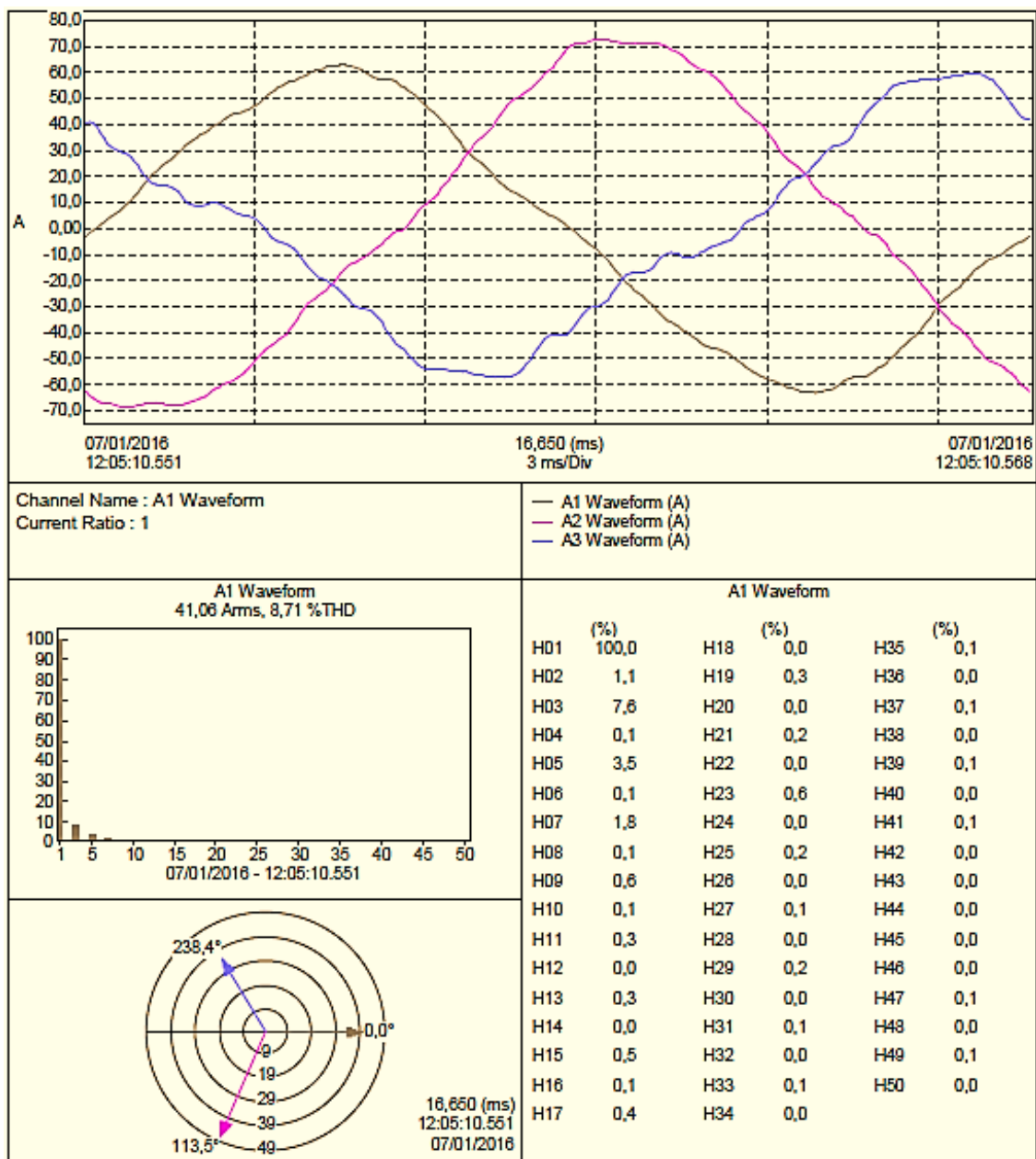


Figura 5.5 - Medições de corrente em $M1$ com a $CNL + MIT + MS$, chaves $S1$, $S2$ e $S4$ ligadas.

As ordens ímpares de 3ª e 5ª ordens possuem valores entre 3, 5% e 7,6% do valor de corrente da frequência fundamental, todos os outros valores são menos que 1%. No quadro dos vetores observa-se que o desequilíbrio é menor que no passo anterior.

A Tabela 5.6 traz todos os índices harmônicos até a 50ª ordem, de todas as situações

apresentadas anteriormente: *CNL*; *CNL + MIT*; *CNL + MIT + BC* e *CNL + MIT + MS*.

Tabela 5.6 - Resultado dos valores absolutos das correntes da Fase A para o Sistema 2.

Ordem harmônica h	Corrente $I_h(A)$			
	<i>CNL</i>	<i>CNL + MIT</i>	<i>CNL + MIT + BC</i>	<i>CNL + MIT + MS</i>
	<i>M1</i>	<i>M1</i>	<i>M1</i>	<i>M1</i>
1	33,5	29,8	24,5	40,7
2	0,40	0,45	0,42	0,33
3	3,15	2,20	2,25	3,01
4	0,03	0,06	0,05	0,04
5	0,13	0,63	1,84	1,46
6	0,07	0	0,07	0,04
7	0,37	0,48	1,22	0,73
8	0	0,03	0	0,04
9	0,23	0,18	0,37	0,24
10	0	0	0	0
11	0,10	0,06	0,98	0,08
12	0	0	0,02	0
13	0,20	0,18	0,44	0,08
14	0	0	0	0
15	0,17	0,21	0,32	0,20
16	0	0	0,05	0
17	0,13	0,12	1,25	0,16
18	0	0	0,02	0
19	0,10	0,09	0,66	0,12
20	0	0	0,02	0
21	0,03	0,03	0,37	0,08
22	0	0	0,02	0
23	0,07	0,09	0,34	0,24
24	0	0	0,02	0
25	0,07	0,09	0,2	0,08
26	0	0	0	0
27	0	0,03	0,02	0
28	0	0	0	0
29	0,07	0,06	0,02	0,08
30	0	0	0	0
31	0,03	0,06	0,07	0
32	0	0	0	0
33	0,03	0,03	0,05	0,04
34	0	0	0	0
35	0,03	0,03	0	0

Continua na próxima página

Tabela 5.6 – Resultado dos valores absolutos das correntes da Fase *A* para o Sistema 2.

Ordem harmônica <i>h</i>	Corrente $I_h(A)$			
	<i>CNL</i>	<i>CNL + MIT</i>	<i>CNL + MIT + BC</i>	<i>CNL + MIT + MS</i>
	<i>M1</i>	<i>M1</i>	<i>M1</i>	<i>M1</i>
36	0	0	0	0
37	0,03	0,03	0,02	0
38	0	0	0	0
39	0	0,03	0,02	0
40	0	0	0	0
41	0,03	0	0	0
42	0	0	0	0
43	0,03	0,03	0	0
44	0	0	0	0
45	0	0	0	0
46	0	0	0	0
47	0	0	0	0
48	0	0	0	0
49	0	0	0	0
50	0	0	0	0

Das análises feitas a partir dos resultados do Estudo de Caso do Sistema 2, tem-se:

- Analisando os índices para as duas compensações, as ordens ímpares acima da 3^a são sempre menores para o caso da *MS*, ordens pares também são reduzidas, exemplo: 5^a ordem foi de 1,8A com *BC* para 1,4A com *MS*; 7^a ordem foi de 1,2A com *BC* para 0,7A com *MS*, assim por diante. Importante lembrar que esses valores são valores absolutos de corrente.

5.3 Resultados do Estudo de Caso – Sistema 3

A metodologia para esse estudo de caso e a ordem de medições é similar ao Sistema 2. A diferença é que aqui foi inserido um transformador por conta da necessidade de adequar os níveis de tensão nos terminais da *MS* que é de 220V.

A Tabela 5.7 apresenta os valores após a entrada da carga harmônica para o barramento isolado. Como o barramento não alimenta cargas *a priori*, apenas a influência da carga não linear é percebida.

Tabela 5.7 - Barramento isolado com carga não linear (*CNL*).

Fases	$I_{rms}(A)$	$P(W)$	$Q(VAr)$	$S(VA)$	$S_h(VA)$	$S_t(VA)$	DHT_I	DHT_V	FP	F_{des}
<i>A</i>	2,8	159	154(<i>I</i>)	221	135	356	124%	1,8%	0,447	0,723
<i>B</i>	2,9	162	157(<i>I</i>)	225	142	367	127%	1,8%	0,442	0,711
<i>C</i>	2,6	128	154(<i>I</i>)	200	130	330	130%	1,8%	0,388	0,644
TOTAL		449	465	646	407	1053	MÉDIA		0,426	0,693

O fator de potência do sistema para as três fases está em torno de 0,4. Para as Fases *A*, *B* e *C*, as distorções harmônicas totais de corrente são 124%, 127% e 130%, respectivamente. A potência harmônica nas três fases é de 407VA, pois apenas a carga não linear está em operação e as perdas distorcivas são grandes.

A Tabela 5.8 apresenta os principais parâmetros do barramento isolado após *MIT*.

Tabela 5.8 - Barramento isolado com cargas não linear e indutiva (*CNL + MIT*).

Fases	$I_{rms}(A)$	$P(W)$	$Q(VAr)$	$S(VA)$	$S_h(VA)$	$S_t(VA)$	DHT_I	DHT_V	FP	F_{des}
<i>A</i>	10,4	214	1264(<i>I</i>)	1282	34	1316	22,3%	1,9%	0,163	0,168
<i>B</i>	10,3	260	1245(<i>I</i>)	1272	34	1306	23,4%	1,8%	0,199	0,206
<i>C</i>	9,7	191	1192(<i>I</i>)	1207	31	1238	22,6%	1,7%	0,154	0,159
TOTAL		665	3701	3761	99	3860	MÉDIA		0,172	0,178

Com a entrada do motor de indução, é possível observar considerável queda das distorções harmônicas, de cerca de 120% com *CNL* para 22% com *CNL + MIT* como comprova [Delbone \(2012\)](#). O fator de potência também caiu de 0,4 para aproximadamente 0,17 nas três fases, devido à potência reativa indutiva que foi inserida. As perdas harmônicas tiveram queda expressiva de 407VA apenas com *CNL*, para 99VA com *CNL + MIT*.

O banco de capacitor é inserido com intuito de compensar parte da potência reativa do barramento. A Tabela 5.9 apresenta os principais parâmetros após a entrada do banco de capacitor.

Após a entrada do banco de capacitores, o fator de potência foi aumentado de 0,17

Tabela 5.9 - Compensação capacitiva no barramento isolado (*CNL + MIT + BC*).

Fases	$I_{rms}(A)$	$P(W)$	$Q(VAr)$	$S(VA)$	$S_h(VA)$	$S_t(VA)$	DHT_I	DHT_V	FP	$Fdes$
<i>A</i>	3,2	214	181(<i>I</i>)	280	121	401	101,4%	1,9%	0,532	0,762
<i>B</i>	3,5	271	181(<i>I</i>)	326	122	448	92,5%	1,9%	0,606	0,832
<i>C</i>	2,9	207	139(<i>I</i>)	249	117	366	107%	1,9%	0,566	0,835
TOTAL		692	501	855	360	1215	MÉDIA		0,568	0,81

para aproximadamente 0,6 nas três fases. As distorções harmônicas de corrente também tiveram aumento, as Fases *A*, *B* e *C*, foram de 22,3% para 101,4%; 23,4% para 92,5%; 22,6% para 107%, respectivamente. As perdas harmônicas também aumentaram, de 99VA para 360VA. O que demonstra que o banco de capacitores contribui para aumento das distorções harmônicas no sistema.

A Figura 5.6 apresenta o momento após a compensação capacitiva no sistema isolado, com as formas de onda de corrente do sistema, o espectro harmônico da fase *A*, a modulação e defasagem vetorial e os valores dos componentes harmônicos da fase *A* até a 50ª ordem.

Há alta taxa de distorção harmônica de corrente pela deformidade das formas de onda. Ordens ímpares e pares até a 37ª ordem possuem valores entre 2,7% e 64,1% do valor de corrente da frequência fundamental. No quadro dos vetores observa-se que há certo desequilíbrio de fases no sistema e o espectro harmônico ilustra a intensidade das frequências harmônicas.

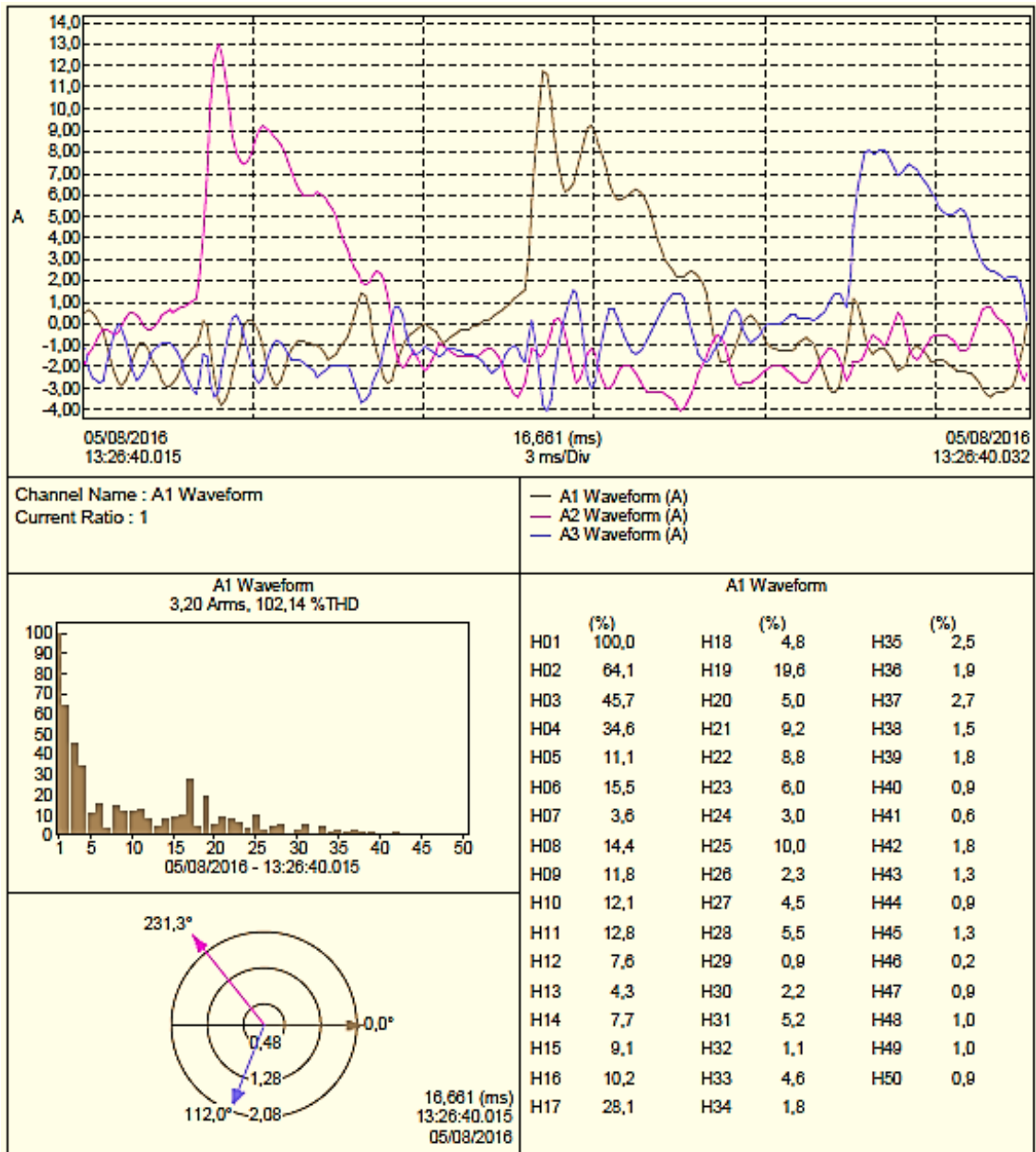


Figura 5.6 - Medições de corrente em $M1$ com a $CNL + MIT + BC$, chaves $S1$, $S2$ e $S3$ ligadas.

O banco de capacitores é retirado e a máquina síncrona é inserida no barramento até atingir o fator de potência conseguido pela compensação capacitiva, cerca de 0,6. A Tabela 5.10 apresenta os principais parâmetros do barramento após a compensação síncrona.

Tabela 5.10 - Compensação síncrona no barramento isolado ($CNL + MIT + MS$).

Fases	$I_{rms}(A)$	$P(W)$	$Q(VAr)$	$S(VA)$	$S_h(VA)$	$S_t(VA)$	DHT_I	DHT_V	FP	$Fdes$
<i>A</i>	5,3	302	531(<i>I</i>)	611	64	675	46,4%	1,9%	0,448	0,495
<i>B</i>	6,2	511	506(<i>I</i>)	719	68	787	44%	1,8%	0,65	0,711
<i>C</i>	4,4	351	330(<i>I</i>)	482	82	564	58,7%	1,9%	0,622	0,726
TOTAL		1164	1367	1812	214	2026	MÉDIA		0,573	0,644

Com a compensação síncrona, as Fases *A*, *B* e *C* ficaram com fator de potência de 0,448, 0,65 e 0,622, respectivamente. As distorções harmônicas de corrente para as Fases *A*, *B* e *C*, foram de 101,4% para 46,4%; 92,5% para 44%; 107% para 58,7%, respectivamente. As perdas harmônicas foram diminuídas de 360VA para 214VA. A operação da *MS* demonstrou que há considerável diminuição das perdas harmônicas quando comparada com as condições de operação apenas da *CNL* e das condições de operação com *BC*.

A Figura 5.7 apresenta o momento após a compensação síncrona no sistema isolado. A deformidade da onda de corrente é menor que no passo anterior, observando uma maior periodicidade. Ordens harmônicas até a 18^a ordem variam entre 2,5% e 29%. A partir da comparação com o passo anterior infere-se que a compensação síncrona melhora o perfil senoidal, se comparada com a compensação capacitiva.

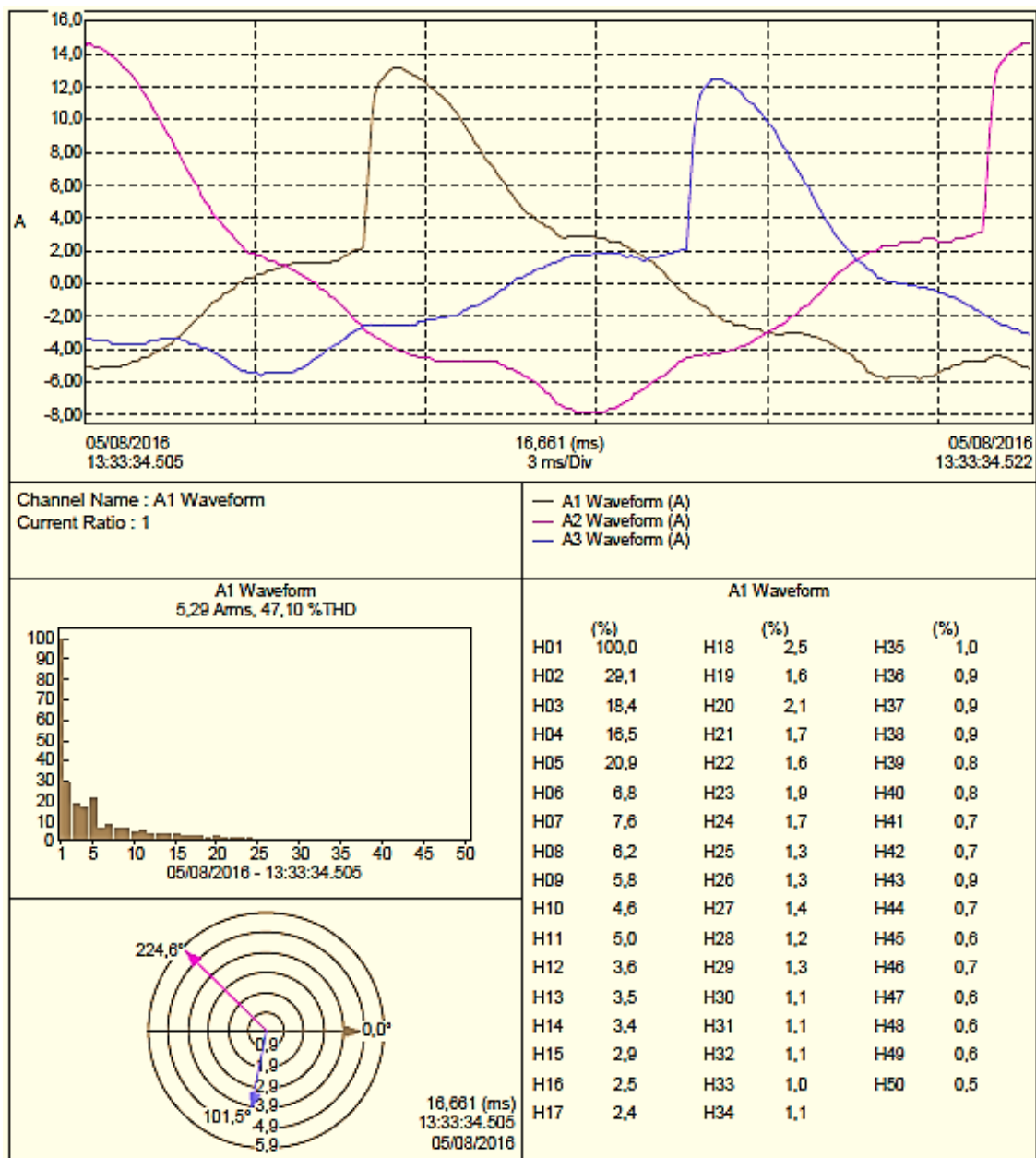


Figura 5.7 - Medições de corrente em $M1$ com a $CNL + MIT + MS$, chaves $S1$, $S2$ e $S4$ ligadas.

A Tabela 5.11 apresenta todos os índices harmônicos até a 50ª ordem, de todas as situações apresentadas anteriormente: CNL ; $CNL + MIT$; $CNL + MIT + BC$ e $CNL + MIT + MS$.

Tabela 5.11 - Resultado dos valores absolutos das correntes da Fase A para o Sistema 3.

Ordem harmônica h	Corrente $I_h(A)$			
	<i>CNL</i>	<i>CNL + MIT</i>	<i>CNL + MIT + BC</i>	<i>CNL + MIT + MS</i>
	<i>M1</i>	<i>M1</i>	<i>M1</i>	<i>M1</i>
1	1,8	10,1	2,2	4,8
2	1,46	1,39	1,40	1,38
3	1,12	1,08	1,02	0,83
4	0,78	0,76	0,77	0,76
5	0,48	0,81	0,23	1
6	0,33	0,34	0,34	0,34
7	0,33	0,37	0,07	0,35
8	0,33	0,31	0,32	0,30
9	0,27	0,26	0,26	0,26
10	0,22	0,21	0,26	0,22
11	0,18	0,19	0,28	0,23
12	0,18	0,17	0,18	0,17
13	0,18	0,18	0,08	0,15
14	0,16	0,16	0,17	0,17
15	0,14	0,12	0,21	0,13
16	0,12	0,12	0,23	0,11
17	0,12	0,15	0,58	0,13
18	0,12	0,12	0,12	0,11
19	0,11	0,12	0,41	0,10
20	0,09	0,09	0,11	0,09
21	0,08	0,07	0,22	0,07
22	0,09	0,08	0,2	0,08
23	0,09	0,09	0,12	0,09
24	0,08	0,07	0,08	0,08
25	0,07	0,06	0,21	0,06
26	0,06	0,06	0,06	0,06
27	0,06	0,06	0,08	0,06
28	0,07	0,06	0,11	0,06
29	0,06	0,05	0,03	0,06
30	0,05	0,05	0,06	0,05
31	0,05	0,04	0,12	0,05
32	0,05	0,05	0,01	0,05
33	0,05	0,05	0,10	0,04
34	0,05	0,04	0,06	0,04
35	0,04	0,04	0,05	0,04
36	0,04	0,04	0,05	0,04
37	0,04	0,04	0,07	0,03

Continua na próxima página

Tabela 5.11 - Resultado dos valores absolutos das correntes da Fase A para o Sistema 2.

Ordem harmônica h	Corrente $I_h(A)$			
	<i>CNL</i>	<i>CNL + MIT</i>	<i>CNL + MIT + BC</i>	<i>CNL + MIT + MS</i>
	<i>M1</i>	<i>M1</i>	<i>M1</i>	<i>M1</i>
38	0,04	0,04	0,03	0,04
39	0,04	0,03	0,03	0,03
40	0,03	0,03	0,02	0,03
41	0,03	0,03	0,01	0,03
42	0,03	0,03	0,04	0,03
43	0,03	0,03	0,03	0,03
44	0,03	0,02	0,01	0,03
45	0,03	0,02	0,02	0,02
46	0,03	0,02	0	0,02
47	0,03	0,02	0,01	0,02
48	0,03	0,02	0,03	0,02
49	0,02	0,02	0,01	0,02
50	0,02	0,01	0,01	0,02

Das análises feitas a partir dos resultados obtidos no Estudo de Caso do Sistema 3, tem-se:

- Nota-se que com a *MS* os valores absolutos são menores que com *BC*. Alguns casos como, 5^a , 7^a , 9^a , 13^a ordens, houve aumento com *MS*, porém, não foram aumentos significativos, o balanço geral demonstra que as potências devido às componentes distorcivas de corrente são maiores com o *BC* do que com a *MS*.

5.4 Comparação dos Resultados dos Sistemas 2 e 3

A Tabela 5.12 apresenta o resumo das comparações das duas compensações no sistema não isolado, Sistema 2.

Para a compensação síncrona, observou-se redução das perdas por potência harmônica, na compensação capacitiva o valor era de 282VA indo para 186VA com a *MS*. Os valores percentuais de potência harmônica por potência total em cada fase, também são inferiores para o caso da *MS*, para as Fases A, B e C, os valores foram de 1,2% para 0,4%; 0,6% para 0,2%; 2,3% para 1,5%, respectivamente.

Tabela 5.12 - Confrontação das compensações no sistema não isolado.

FASES	TIPO DE COMPENSAÇÃO							
	CAPACITIVA				SÍNCRONA			
	$S(VA)$	$S_h(VA)$	$S_t(VA)$	$S_h/S_t[\%]$	$S(VA)$	$S_h(VA)$	$S_t(VA)$	$S_h/S_t[\%]$
<i>A</i>	5403	65	5468	1,2%	8994	34	9028	0,4%
<i>B</i>	10429	62	10491	0,6%	12016	29	12045	0,2%
<i>C</i>	6476	155	6631	2,3%	7870	123	7993	1,5%
TOTAL	22308	282	22590	–	28880	186	29066	–

A Tabela 5.13 apresenta a confrontação das duas compensações no sistema isolado, Sistema 3.

Tabela 5.13 - Confrontação das compensações no sistema isolado.

FASES	TIPO DE COMPENSAÇÃO							
	CAPACITIVA				SÍNCRONA			
	$S(VA)$	$S_h(VA)$	$S_t(VA)$	$S_h/S_t[\%]$	$S(VA)$	$S_h(VA)$	$S_t(VA)$	$S_h/S_t[\%]$
<i>A</i>	280	121	401	30%	611	64	675	9,5%
<i>B</i>	326	122	448	27%	719	68	787	8,6%
<i>C</i>	249	117	366	32%	482	82	564	14,5%
TOTAL	855	360	1215	–	1812	214	2026	–

Para as Fases *A*, *B* e *C*, observa-se que os percentuais de potência harmônica por potência total foram de 30% com *BC* para 9,5% com *MS*; 27% com *BC* para 8,6% com *MS*; 32% com *BC* para 14,5% com *MS*, respectivamente. Há ainda uma redução de potência harmônica trifásica de 360VA para 214VA, totalizando 146VA.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

A máquina síncrona foi conectada com uma carga não linear no Sistema 1 e a compensação síncrona foi analisada para dois barramentos, não isolado e isolado, submetidos a correntes distorcidas nos Sistemas 2 e 3. Todos os estudos de caso foram sujeitos a medições e análises, os dados foram tratados a fim de se obter os resultados desejados.

Os resultados da aplicação da metodologia no Sistema 1, com a máquina síncrona submetida a correntes harmônicas de carga, não permitem afirmar que a *MS* em condições de alimentação distorcida é capaz de gerar harmônicas de ordens semelhantes a estas distorções e com isso atenuar as mesmas.

A comparação dos componentes harmônicos entre os dois tipos de compensação, capacitiva e síncrona, demonstrou que a máquina síncrona apresenta vantagem sobre os bancos de capacitores na melhoria do perfil senoidal de um barramento. A análise individual de harmônicos demonstrou que as ordens menores são minimizadas, mas principalmente as ordens maiores possuem relevantes reduções, especialmente no caso do barramento isolado, onde as potências são menores e as perdas por potência harmônica são maiores.

Em sistemas com fontes geradoras de harmônicos de alta frequência a compensação síncrona pode ser razoável alternativa, pois aumenta a eficiência do fluxo de potência ativa disponível no barramento.

Um estudo detalhado deve ser conduzido para averiguar a influência das harmônicas no interior da máquina síncrona. Sabe-se que para o caso dos capacitores, ressonâncias podem acontecer. Importante se faz verificar se há problemas das distorções harmônicas dentro da máquina, trabalhando como gerador, motor ou compensador. Também verificar quais as ordens harmônicas são mais prejudiciais.

6.1 Publicações Realizadas

Artigos submetidos e aprovados:

- MORAES, P. H. F.; MAGALHÃES, A. S.; FERREIRA, A. F.; PAIVA, J. R. B.; ALVES, A. J.; CALIXTO, W. P.; DOMINGOS, J. L.; ABRÃO, P. J. Synchronous compensation

versus capacitive compensation for reactive power in industrial systems subjected to harmonic distortion. In: **Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2016 IEEE 16th International Conference on**. IEEE, 2016.

- MAGALHÃES, A. S.; MORAES, P. H. F.; SILVA, A. H. F.; GOMES, P. H. G.; ALVES, A. J.; CALIXTO, W. P. Parallel operation repowering of synchronous and induction generator. In: **Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2016 IEEE 16th International Conference on**. IEEE, 2016.
- MATIAS, C. A.; MORAES, P. H. F.; FERNANDES, B. A.; ALVES, A. J.; CALIXTO, W. P.; FURRIEL, G. P. Simulation and analysis of an isolated full-bridge DC/DC boost converter operating with a modified P&O MPPT algorithm. In: **Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2016 IEEE 16th International Conference on**. IEEE, 2016.
- FERREIRA, A. F.; DOMINGOS, J. L.; SOUSA, T. P.; MIGUEL M. L. S.; MORAES, P. H. F.; DOMINGUES, E. G.; ALVES, A. J.; CALIXTO, W. P. Energy Efficiency and Distributed Generation: Case Study. In: **International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'16)**, Madrid, Spain, May 2016. Renewable Energy and Power Quality Journal (RE&PQJ) - ISSN 2172-038 X, No.14 May 2016.

Artigo submetido e aguardando publicação:

- MORAES, P. H. F.; MAGALHÃES, A. S.; FERREIRA, A. F.; PAIVA, J. R. B.; ALVES, A. J.; CALIXTO, W. P.; DOMINGOS, J. L.; ABRÃO, P. J. Synchronous versus capacitive compensation in systems with harmonic distortion. In: **Transactions on Environment and Electrical Engineering**. Vol 1, No 3. 2016.

6.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

Possíveis desdobramentos deste trabalho são:

- a) Avaliar, a partir de estudos da MS em condição de carga não linear, a presença de fluxo de corrente harmônica nos circuitos da excitação.

ANEXO A

Comportamento da máquina síncrona submetida a distorções harmônicas

A.1 Forças Magneto Motrizes Girantes

Inicialmente considera-se um enrolamento trifásico balanceado e supõe-se que nesse barramento circulam correntes i_a , i_b e i_c , não senoidais. Admite-se que ao decompô-las pela série de Fourier suas componentes harmônicas de mesma ordem h formam um sistema trifásico balanceado, surgindo então as expressões de (A.1) a (A.3).

$$i_a = \sum i_{ah} = \sum_h I_h \cdot \cos(h \cdot \omega t + \phi_h) \quad (\text{A.1})$$

$$i_b = \sum i_{bh} = \sum_h I_h \cdot \cos(h \cdot (\omega t - 120^\circ) + \phi_h) \quad (\text{A.2})$$

$$i_c = \sum i_{ch} = \sum_h I_h \cdot \cos(h \cdot (\omega t + 120^\circ) + \phi_h) \quad (\text{A.3})$$

Nas expressões anteriores tem-se: h índice harmônico, I_h valor máximo da componente harmônica h , $\omega = 2\pi f$, onde f é a frequência da componente fundamental e ϕ_h defasamento angular da componente harmônica h de i_a . Considerando apenas a componente fundamental espacial da fmm produzida pelas correntes de estator, pode-se escrever (A.4).

$$fmm = k[i_a \cdot \cos(\theta) + i_b \cdot \cos(\theta - 120^\circ) + i_c \cdot \cos(\theta + 120^\circ)] \quad (\text{A.4})$$

Como apresentado, a constante k condensa todas as características construtivas do enrolamento, tais como: números de espiras e bobinas, fatores de passo e distribuição espacial fundamental. O ângulo θ localiza qualquer ponto na circunferência média do entreferro e tem sua origem no eixo da fase A . Substituindo (A.1) a (A.3) em (A.4), aplicando a propriedade trigonométrica que transforma produto em soma de cossenos, tem-se (A.5).

$$fmm = \frac{k}{2} \sum_h I_h \cdot \{ \cos(\alpha) + \cos[\alpha - (h+1)120^\circ] + \cos(\alpha) + \cos[\alpha + (h+1)120^\circ] \} \\ + \sum_h I_h \cdot \{ \cos(\beta) + \cos[\beta - (h-1)120^\circ] + \cos[\beta + (h-1)120^\circ] \} \quad (\text{A.5})$$

Em (A.5), α e β são dadas por (A.6) e (A.7), respectivamente:

$$\alpha = \theta + h\omega t + \phi_h \quad (\text{A.6})$$

$$\beta = \theta - h\omega t + \phi_h \quad (\text{A.7})$$

Considerando o índice h assumindo valores ímpares, condição mais provável produzida pelas cargas não lineares, tem-se (A.8).

$$fmm = \frac{3k}{2} \left[\sum_{h=1,7,13,\dots} I_h \cdot \cos(\alpha) + \sum_{h=5,11,17,\dots} I_h \cdot \cos(\beta) \right] \quad (\text{A.8})$$

A fmm dada por (A.8), é formada por uma superposição de forças magneto motrizes girantes produzidas pelas componentes harmônicas das correntes de fase. Desta expressão podem-se retirar as expressões horárias das fmm girantes, expressões (A.9) e (A.10).

$$\theta = h\omega t + \phi_h \rightarrow h = 1, 7, 13, \dots \quad (\text{A.9})$$

$$\theta = -h\omega t - \phi_h \rightarrow h = 5, 11, 17, \dots \quad (\text{A.10})$$

De (A.9) e (A.10) obtém-se as velocidades angulares ω_h das fmm girantes, (A.11) e (A.12).

$$\omega_h = h\omega \rightarrow h = 1, 7, 13, \dots \quad (\text{A.11})$$

$$\omega_h = -h\omega \rightarrow h = 5, 11, 17, \dots \quad (\text{A.12})$$

Observa-se que as *fmm* girantes fundamental ($h = 1$) e de ordens harmônicas 7, 13,... possuem velocidades angulares em relação ao estator no sentido positivo do eixo θ . As *fmm* girantes para h igual a 5, 11, 17,... têm velocidades angulares no sentido oposto ao eixo θ , como na Figura A.1, reproduzida de Delbone (2012).

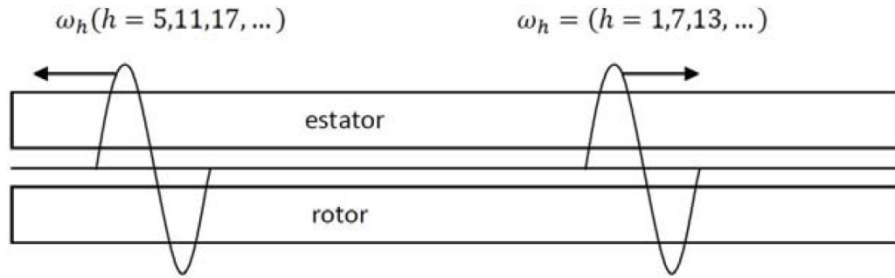


Figura A.1 - *fmm* girantes.

A.2 Gerador Síncrono Trifásico em Regime Permanente Senoidal

Um corte linearizado de uma máquina síncrona trifásica de polos lisos é apresentado na Figura 3.2, onde a fase *A* do enrolamento do estator é esquematicamente representada pelo corte transversal dos dois lados, *a1* e *a2*, de uma bobina considerada como central da fase. Para efeito desta análise, considera-se apenas a distribuição espacial fundamental de cada *fmm*, bem como sua relação linear com a respectiva distribuição espacial de densidade de fluxo magnético, ou seja, não se considera o efeito da distorção provocado pela saturação magnética.

Na Figura A.2, reproduzida de Delbone (2012) a força magneto motriz fmm_R é a distribuição espacial produzida pela corrente contínua de excitação que circula no enrolamento do rotor, responsável pela distribuição espacial da densidade de fluxo magnético de rotor. Considerando-se que no instante da Figura A.2, $t = 0$, o valor máximo de fmm_R coincide com a posição do lado *a1* da fase *A* do estator, a tensão senoidal induzida na fase *A* devido a velocidade relativa entre seus condutores e

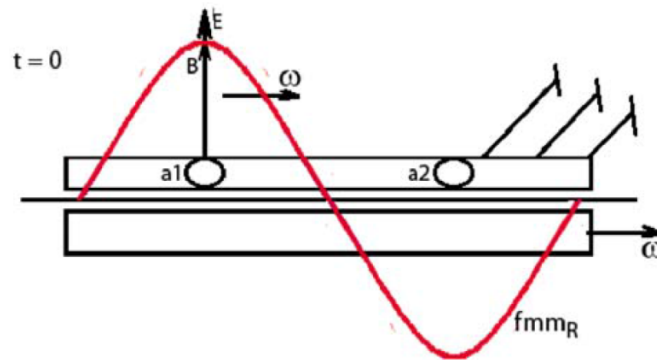


Figura A.2 - Corte linearizado da máquina síncrona – fmm_R .

fmm_R , tem o seu valor máximo. A Figura A.3, reproduzida de Delbone (2012) indica a polaridade da tensão induzida no condutor $a1$.

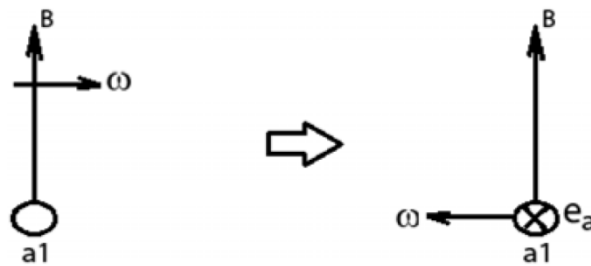


Figura A.3 - Polaridade da tensão induzida – fase A estator.

Ligando o estator da máquina síncrona a uma carga resistiva e indutiva, a tensão e_a produz uma corrente i_a , bem como as tensões nas fases b e c produzem as respectivas correntes. As tensões induzidas nas fases do estator formam um sistema trifásico balanceado, que aplicado a uma carga trifásica balanceada resulta em um sistema trifásico balanceado de correntes. A Figura A.4, reproduzida de Delbone (2012) representa o diagrama fasorial no instante $t = 0$, onde e_a passa por máximo.

Tensão e corrente, e_a e i_a , estão representadas pelos fasores E_a e I_a , respectivamente. Ao passar o intervalo de tempo relativo ao ângulo do fator de potência da carga, ϕ_a , a corrente i_a assume seu valor máximo, como indica a Figura A.5, reproduzida de Delbone (2012).

Como a corrente na fase A tem o seu valor máximo em $t = \frac{\phi_a}{2\pi f}$, a sua força magneto

$t=0$

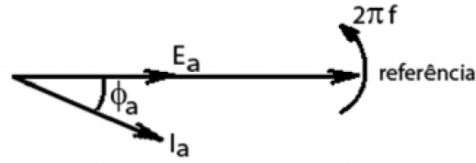


Figura A.4 - Diagrama fasorial – $t = 0$ carga RL .

$t = \phi_a / 2\pi f$

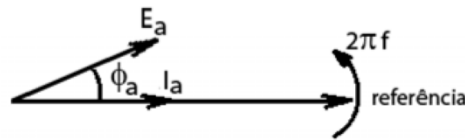


Figura A.5 - Diagrama fasorial – $t = \frac{\phi_a}{2\pi f}$, carga RL .

motriz pulsante, fmm_a , também assume a máxima pulsação. Pela teoria da fmm girante, esta tem sua posição coincidente com a fmm pulsante que passa por máximo. Portanto, a força magneto motriz girante produzida pelas correntes de fase, i_a , i_b e i_c , ou seja, fmm_E , tem a sua posição coincidente com fmm_a no instante $t = \frac{\phi_a}{2\pi f}$, Figura A.6, reproduzida de Delbone (2012).

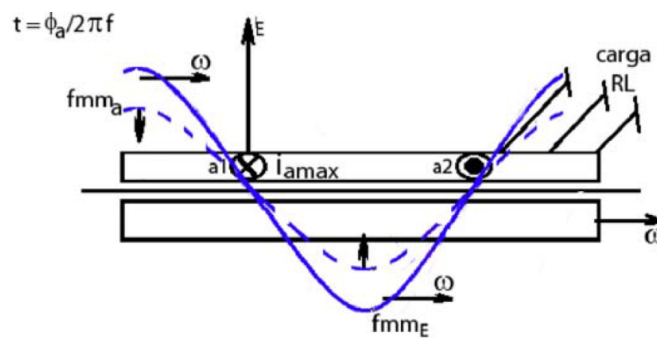


Figura A.6 - Corte linearizado da máquina síncrona – fmm_a , fmm_E .

Durante o intervalo de tempo entre os instantes da Figura A.2, $t = 0$, e da Figura A.6, $t = \frac{\phi_a}{2\pi f}$, a distribuição fmm_R percorre o ângulo ϕ_a a partir do eixo E fixo no estator.

A Figura A.7, reproduzida de Delbone (2012) mostra fmm_R e fmm_E exatamente no instante $t = \frac{\phi_a}{2\pi f}$.

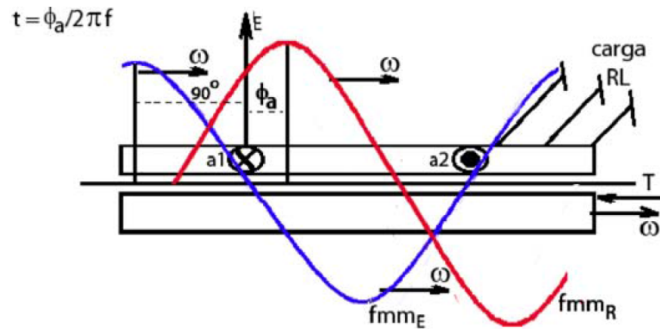


Figura A.7 - Corte linearizado da máquina síncrona – fmm_R , fmm_E , carga RL .

Na Figura A.7 as distribuições fmm_R e fmm_E estão deslocadas de $90 + \phi_a$, e pela posição relativa indicada o conjugado eletromagnético T no rotor, que surge com a tendência de alinhamento das mesmas, é no sentido contrário a velocidade síncrona.

Esta análise física mostra a máquina funcionando como gerador, uma vez que alimenta nos seus terminais de estator uma carga elétrica, no caso, resistiva e indutiva, e ao mesmo tempo no seu terminal mecânico exige um conjugado externo para equilibrar o conjugado eletromagnético T , para manter uma velocidade constante, e, portanto gerar uma tensão de frequência constante e valor máximo constante.

Se a carga elétrica for resistiva e capacitiva (RC), o diagrama fasorial análogo ao da Figura A.4 está indicado na Figura A.8, reproduzida de Delbone (2012).

$t = 0$

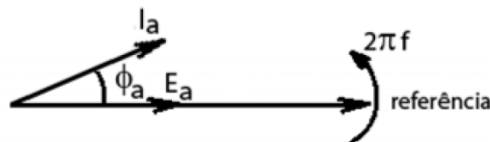


Figura A.8 - Diagrama fasorial – $t = 0$ carga RC .

Para a carga RC , o instante em que ocorre a corrente máxima na fase A é antes de

$t = 0$, ou seja, em $t = -\frac{\phi_a}{2\pi f}$, Figura A.9, reproduzida de Delbone (2012).

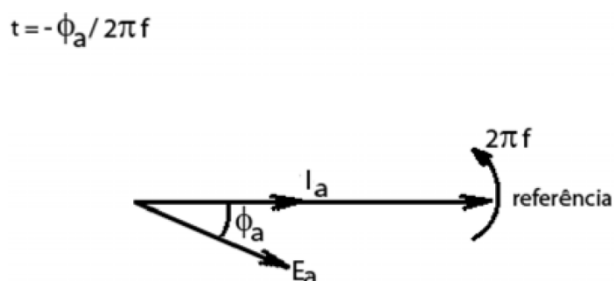


Figura A.9 - Diagrama fasorial – $t = -\frac{\phi_a}{2\pi f}$.

Considerando o tempo negativo para o diagrama fasorial da Figura A.9, o esquema análogo ao da Figura A.7 está representado na Figura A.10, reproduzida de Delbone (2012).

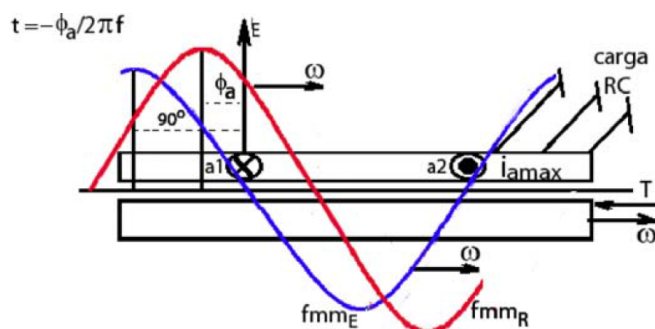


Figura A.10 - Corte linearizado da máquina síncrona – fmm_R , fmm_E , carga RC .

A distribuição fmm_R está deslocada de ϕ_a , a esquerda, em relação ao eixo E . Isto significa que fmm_R deve percorrer o ângulo ϕ_a para que no instante $t = 0$ seu máximo coincida com o eixo E .

Na Figura A.9 observa-se o sentido do conjugado eletromagnético, também oposto ao da velocidade síncrona, ω , caracterizando o funcionamento como gerador, como aconteceu na análise anterior, para a carga RL .

A.3 Gerador Trifásico em Regime Permanente Não Senoidal

Para a situação em que o gerador alimenta uma carga elétrica não linear as correntes do estator i_a , i_b , e i_c variam de forma não senoidal. Decompondo as correntes nas componentes fundamental e harmônicas, neste caso, as de ordem ímpar, têm-se produzidas no enrolamento do estator as respectivas distribuições espaciais fundamentais de fmm girante, como desenvolvido na Seção A.1.

Além disso, a fmm girante produzida pelas componentes fundamentais das correntes do estator é exatamente a distribuição da análise feita na Seção A.2. A corrente contínua no enrolamento do rotor, conhecido como enrolamento de campo ou de excitação, produz a força magneto motriz fmm_R .

Agora se pretende analisar a máquina submetida às correntes harmônicas de i_a , i_b , e i_c . Como será visto posteriormente, o enrolamento do rotor sofre a influência das referidas componentes harmônicas. Para analisar a influência sem outras possíveis interferências, considera-se o enrolamento do rotor alimentado por tensão contínua. Esta tensão produz única e exclusivamente a corrente contínua que faz parte da análise do gerador somente com as componentes fundamentais de i_a , i_b , e i_c .

Considerando a condição da máquina com as componentes harmônicas, temporais de carga, i_a , i_b , e i_c apenas de uma ordem h , tem-se estabelecido uma força magneto motriz girante com velocidade angular diferente da velocidade síncrona do rotor, ω , como pode-se verificar na Seção A.1. Esta fmm produz uma distribuição espacial de densidade de fluxo magnético com velocidade relativa ao enrolamento do rotor, induzindo a tensão. Como o enrolamento do rotor possui um circuito elétrico fechado, a referida tensão induzida produz uma corrente, e, portanto uma fmm de rotor. Como inicialmente existia apenas a fmm do estator, com o surgimento da fmm do rotor, o fluxo magnético que enlaça o enrolamento de cada fase do estator sofre uma alteração. Pela lei de Faraday - Lenz surge a tensão induzida por fase no estator que produz uma nova componente de corrente, cuja fmm resultante das 3 fases contraria à fmm de rotor.

Considerando-se inicialmente as harmônicas de ordem $h = 5 + 6m$, com $m = 0, 1, 2, \dots$, tem-se o corte linearizado do gerador síncrono apresentado na Figura A.11, reproduzida de Delbone (2012), onde fmm_{E0h} é a força magneto motriz girante inicial produzida pelas componentes harmônicas das correntes de carga, i_{aoh} , i_{boh} , e i_{coh} ,

e o enrolamento do rotor representado esquematicamente pelos cortes transversais dos condutores $R1$ e $R2$ que compõem a sua bobina central. O valor e o sentido da velocidade angular de fmm_{E0h} vem da Seção A.1.

A distribuição espacial de densidade de fluxo magnético produzido por fmm_{E0h} induz tensão no enrolamento do rotor. No instante da Figura A.11, $t = 0$, as tensões induzidas em $R1$ e $R2$ são máximas e com o passar do tempo se transformam em tensões senoidais de frequência, f_{E0h} , onde $2\pi f_{E0h} = h\omega + \omega = (h+1) \cdot \omega$, provocando correntes harmônicas de ordem $(h + 1)$ no circuito do rotor, este efeito será melhor detalhado na Figura A.12 e A.13, reproduzidas de Delbone (2012).

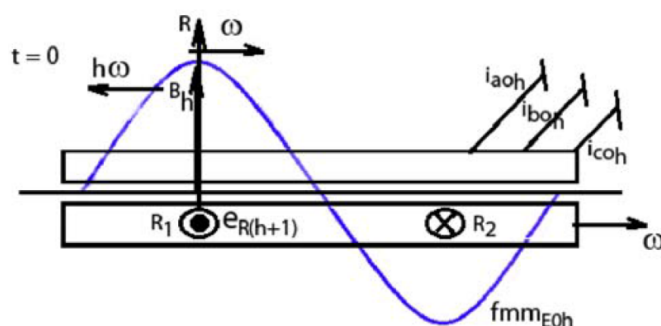


Figura A.11 - Corte linearizado do gerador síncrono – fmm_{E0h} – ($h = 5, 11, \dots$).

A Figura A.12 mostra a polaridade da tensão induzida em $R1$.

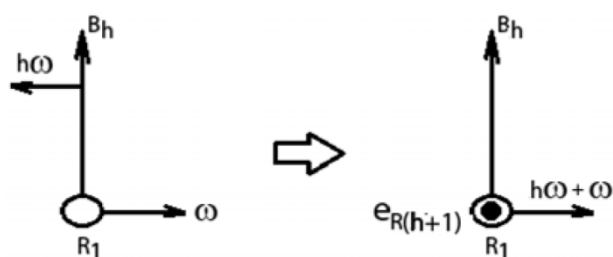


Figura A.12 - Tensão induzida em $R1$ – ($h = 5, 11, \dots$).

Como a velocidade relativa do condutor $R1$ e a densidade de fluxo magnético B_h é $(h + 1) \cdot \omega$, esta também é a frequência da tensão induzida no enrolamento do rotor. Assim, a tensão sendo senoidal de frequência $(h + 1) \cdot \omega$, representado pelo

fator $E_{R(h+1)}$, produz uma corrente no enrolamento do rotor, também senoidal e de mesma frequência, representada pelo fator $I_{R(h+1)}$.

Como o circuito que relaciona $E_{R(h+1)}$ e $I_{R(h+1)}$ é resistivo e indutivo, pode-se construir o diagrama fasorial indicado na Figura A.13, no instante da Figura A.11, $t = 0$. Neste diagrama, a tensão passa por máximo, e o ângulo do fator de potência do circuito do enrolamento do rotor é $\phi_{R(h+1)}$.

$t = 0$

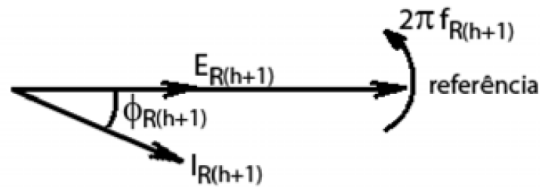


Figura A.13 - Diagrama fasorial do enrolamento do rotor - $t = 0$, ($h = 5, 11, \dots$).

Ao passar o intervalo de tempo relativo ao ângulo $\phi_{R(h+1)}$, a corrente do rotor passa por máximo, e, portanto pode-se construir o diagrama fasorial da Figura A.14, reproduzida de Delbone (2012), referente ao instante $t = \frac{\phi_{R(h+1)}}{2\pi f_{R(h+1)}}$.

$t = \phi_{R(h+1)} / 2\pi f_{R(h+1)}$

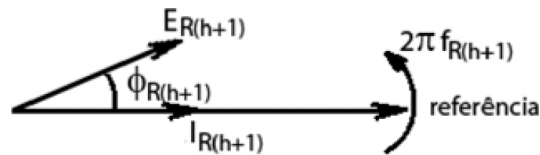


Figura A.14 - Diagrama fasorial do enrolamento do rotor - $t = \frac{\phi_{R(h+1)}}{2\pi f_{R(h+1)}}$, ($h = 5, 11, \dots$).

A corrente $I_{R(h+1)}$ produz no enrolamento do rotor uma fmm pulsante, $fmm_{R(h+1)}$, cuja frequência de pulsação é $2\pi f_{R(h+1)} = (h + 1) \cdot \omega$. A Figura A.15, reproduzida de Delbone (2012), ilustra o corte linearizado do rotor do gerador síncrono em $t = \frac{\phi_{R(h+1)}}{2\pi f_{R(h+1)}}$, apresentando a fmm , pulsante, $fmm_{R(h+1)}$.

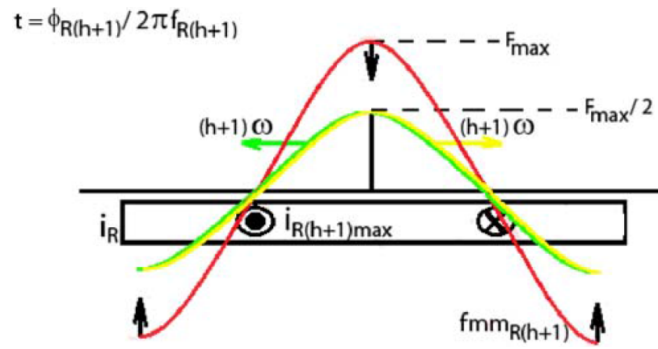


Figura A.15 - Corte linearizado do rotor – fmm pulsante $fmm_{R(h+1)}$ – ($h = 5, 11, \dots$).

No instante da Figura A.15, $t = \frac{\phi_{R(h+1)}}{2\pi f_{R(h+1)}}$, a corrente do rotor passa pelo seu valor máximo, e, portanto sua força magneto motriz pulsante $fmm_{R(h+1)}$, com frequência $(h + 1) \cdot \omega$, atinge a sua pulsação máxima F_{max} . Segundo Delbone (2012), pode-se decompor $fmm_{R(h+1)}$ em duas fmm girantes iguais, superpostas no instante da Figura A.15, com velocidades opostas iguais a $(h + 1) \cdot \omega$. É importante observar que a velocidade $(h + 1) \cdot \omega$ de ambas as fmm girantes é em relação ao rotor. Assim substituindo-se $fmm_{R(h+1)}$ pelas duas fmm girantes tem-se a Figura A.16, reproduzida de Delbone (2012).

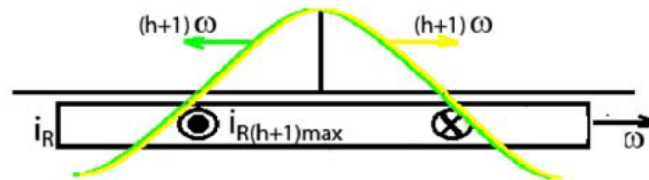


Figura A.16 - Corte linearizado do rotor fmm girantes produzidas no rotor e suas velocidades em relação ao rotor – ($h = 5, 11, \dots$).

Tomando-se como referência o estator, a Figura A.16 se torna a Figura A.17, reproduzida de Delbone (2012).

Para completar a análise do gerador síncrono submetido às componentes harmônicas de ordem $h = 5, 11, \dots$ de i_a , i_b , e i_c , se faz necessário a implementação no esquema da Figura A.17 da fmm girante fmm_{Eh} , apresentada na Figura A.11.

No intervalo de tempo entre os instantes da Figura A.11 e Figura A.17 a distribuição fmm_{E0h} percorre o ângulo $\phi_{R(h+1)}$ a partir do eixo R , uma vez que este eixo está fixo

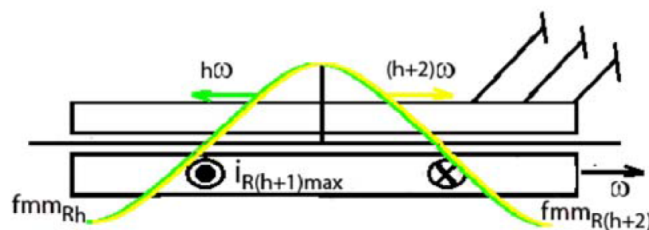


Figura A.17 - Corte linearizado do gerador síncrono – fmm girantes com velocidade em relação ao estator.

no rotor e fmm_{E0h} tem uma velocidade angular igual a $(h + 1) \cdot \omega$, para a esquerda, em relação ao rotor.

Da Figura A.18, reproduzida de Delbone (2012), observa-se que as forças magneto motrizes fmm_{E0h} e fmm_{Rh} estão paradas entre si, uma vez que $\phi_{R(h+1)}$ não é variável no tempo. Com a tendência de alinhamento de ambas as forças magneto motrizes, surge o conjugado eletromagnético no sentido contrário a velocidade síncrona ω .

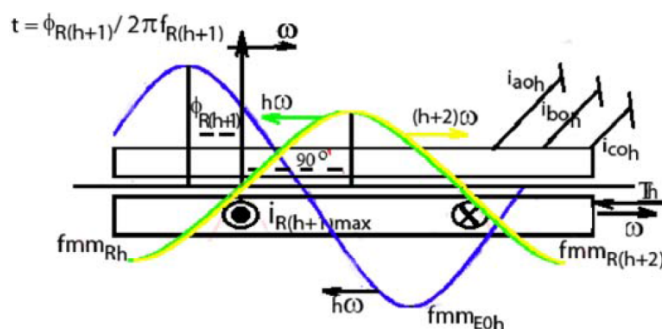


Figura A.18 - Corte linearizado do gerador síncrono – fmm_{E0h} , fmm_{Rh} , $fmm_{R(h+2)}$ - ($h = 5, 11, \dots$).

Do lado elétrico ao aplicar a lei de Faraday - Lenz na estrutura magnética da Figura A.18, observa-se que o enrolamento de cada fase do estator sofre uma variação de fluxo magnético, uma vez que inicialmente tem-se apenas fmm_{E0h} para depois surgir fmm_{Rh} , situação análoga ao gerador de indução. Para manter o fluxo magnético inicial, o estator deve produzir uma nova fmm que contraria integralmente fmm_{Rh} (reação do estator). A Figura A.19, reproduzida de Delbone (2012), complementa esta análise, onde a nova fmm de estator é denotada por $f'mm_{E0h}$, e as componentes harmônicas de ordem h que a produzem são as componentes de carga i'_{ah} , i'_{bh} e i'_{ch} . Assim as componentes harmônicas de ordem h , ou seja, i_{ah} , i_{bh} e i_{ch} ,

são as superposições das componentes iniciais i_{aoh} , i_{boh} e i_{coh} com as componentes de carga i'_{ah} , i'_{bh} e i'_{ch} .

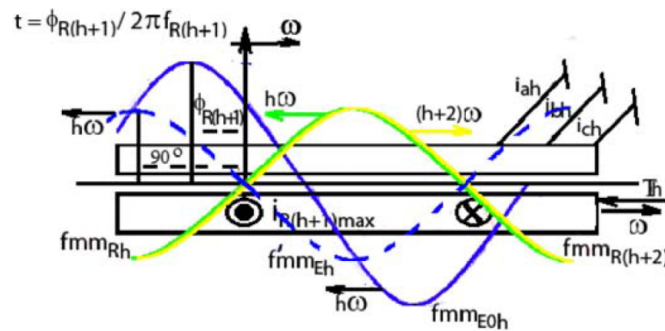


Figura A.19 - Corte linearizado do gerador síncrono – fmm_{E0h} , fmm_{Rh} , $fmm_{R(h+2)}$, fmm_{Eh} – ($h = 5, 11, \dots$).

Na Figura A.19 existe uma fmm girante produzida no rotor que ainda não foi analisada, trata-se de $fmm_{R(h+2)}$. Esta fmm girante tem uma velocidade angular igual a $(h + 2) \cdot \omega$ em relação ao estator, e portanto como a ordem harmônica $h + 2$. Nesta análise, h assume valores 5, 11, ..., ou seja, $5 + 6m$ com $m = 0, 1, 2, 3, \dots$, a velocidade angular $(h + 2) \cdot \omega$ se refere as harmônicas de índice 7, 13, ..., ou seja, $7 + 6n$ com $n = 0, 1, 2, 3, \dots$. Assim a força magneto motriz $fmm_{R(h+2)}$ que aparece na Figura A.19 deve-se compor com a próxima análise a ser feita para o gerador síncrono, considerando a ordem $h = 7, 13, \dots$

Seguindo o mesmo desenvolvimento feito para a ordem $h = 5, 11, \dots$, pode-se considerar $h = 7, 13, \dots$. Assim sendo, a Figura A.11 torna-se a Figura A.20, reproduzida de Delbone (2012), observando a Seção A.1 e a Figura A.12 que se torna a Figura A.21, reproduzida de Delbone (2012).

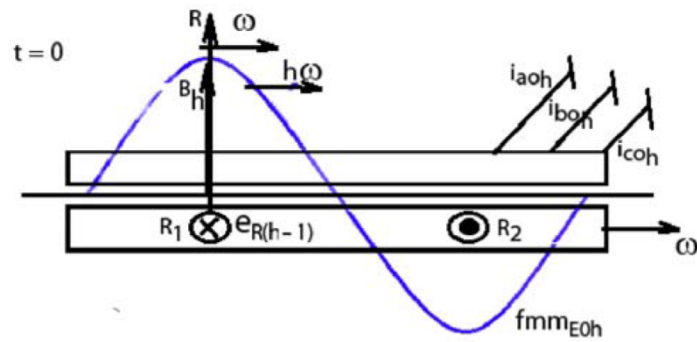


Figura A.20 - Corte linearizado do gerador síncrono – $f_{mm_{E0h}}$ – ($h = 7, 13, \dots$).

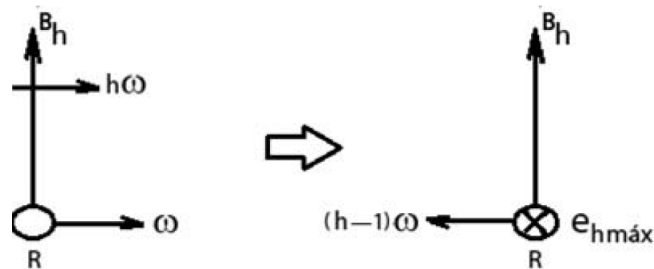


Figura A.21 - Tensão induzida em R_1 – ($h = 7, 13, \dots$).

A tensão induzida no rotor, $E_{R(h-1)}$, e sua respectiva corrente, $I_{R(h-1)}$, são senoidais com frequência $(h - 1) \cdot \omega$. Os diagramas fasoriais da Figura A.13 e Figura A.14 se tornam Figura A.22 e Figura A.23, reproduzidas de Delbone (2012).

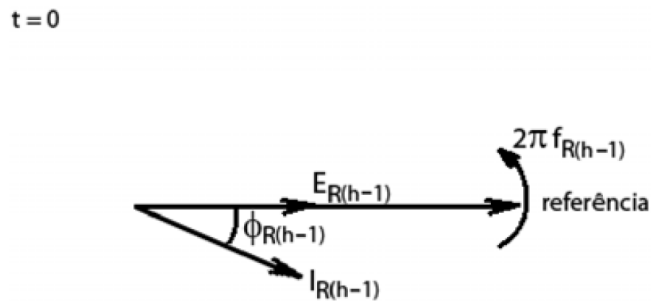


Figura A.22 - Diagrama fasorial do enrolamento do rotor – $t = 0$ – ($h = 7, 13, \dots$).

$$t = \phi_{R(h-1)} / 2\pi f_{R(h-1)}$$

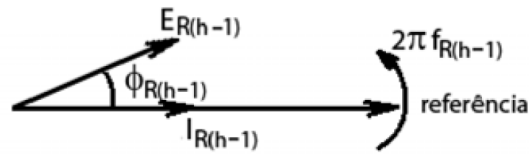


Figura A.23 - Diagrama fasorial do enrolamento do rotor – $t = \frac{\phi_{R(h-1)}}{2\pi f_{R(h-1)}}$.

A corrente $I_{R(h-1)}$ produz no enrolamento do rotor a fmm pulsante $fmm_{R(h-1)}$, cuja frequência de pulsação é $2\pi f_{R(h-1)} = (h-1) \cdot \omega$. As Figura A.15 à Figura A.17 se tornam as Figura A.24 à Figura A.26, reproduzidas de Delbone (2012).

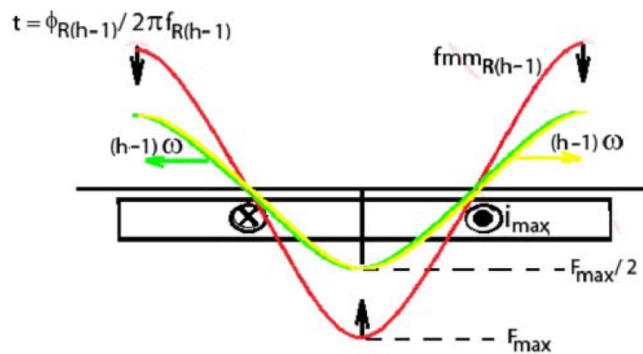


Figura A.24 - Corte linearizado do rotor fmm pulsante $fmm_{R(h-1)}$ – ($h = 7, 13, \dots$).

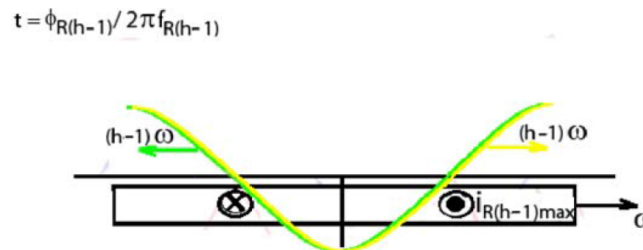


Figura A.25 - Corte linearizado do rotor – fmm girantes produzidas no rotor e suas velocidades em relação ao rotor.

$$t = \phi_{R(h-1)} / 2\pi f_{R(h-1)}$$

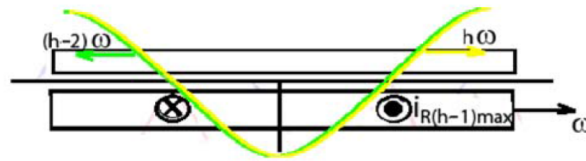


Figura A.26 - Corte linearizado do gerador síncrono – fmm girantes com velocidades em relação ao estator.

Ao incluir fmm_{E0h} no esquema da Figura A.26, tem-se a Figura A.27, reproduzida de Delbone (2012). Aplicando a lei de Faraday-Lenz na estrutura magnética da Figura A.27, tem-se a Figura A.28, reproduzida de Delbone (2012).

$$t = \phi_{R(h-1)} / 2\pi f_{R(h-1)}$$

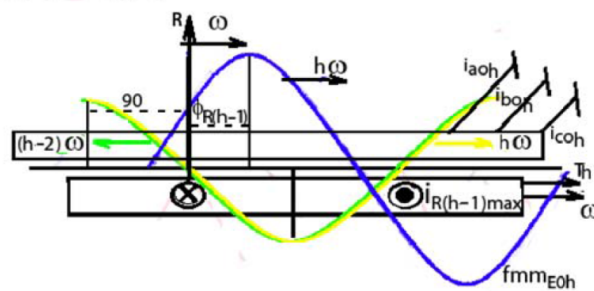


Figura A.27 - Corte linearizado do gerador síncrono – fmm_{E0h} , fmm_{Rh} , $fmm_{R(h-2)}$ – ($h = 7, 13, \dots$).

$$t = \phi_{R(h-1)} / 2\pi f_{R(h-1)}$$

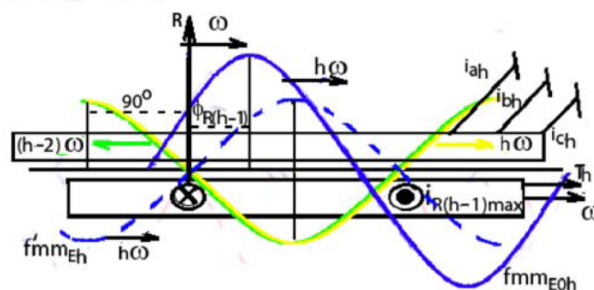


Figura A.28 - Corte linearizado do gerador síncrono – fmm_{E0h} , fmm_{Rh} , $fmm_{R(h-2)}$, $f'_{mm_{Eh}}$ – ($h = 7, 13, \dots$).

Considerado as componentes harmônicas de ordem h igual a 5 e 7, pode-se construir a Figura A.29 e Figura A.30, reproduzidas de Delbone (2012), que correspondem respectivamente a Figura A.18, com $h = 5$, e Figura A.24, com $h = 7$.

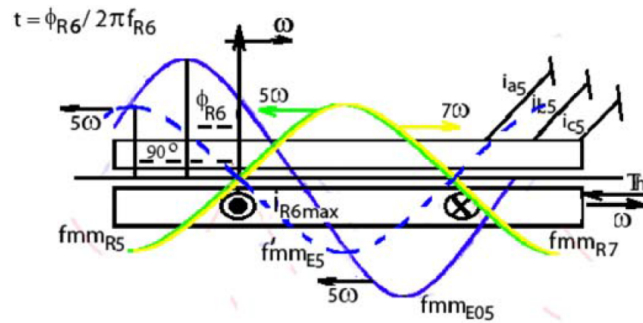


Figura A.29 - Figura A.18 com $h = 5$.

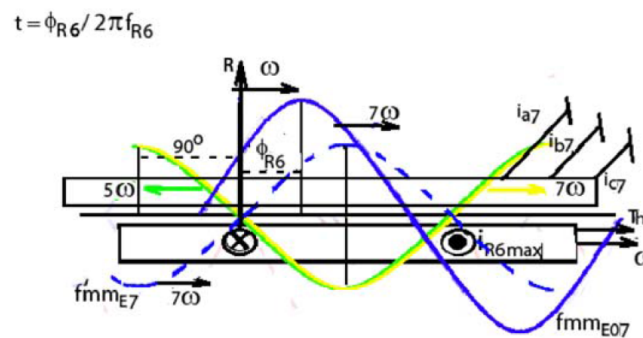


Figura A.30 - Figura A.24 com $h = 7$.

Embora a Figura A.29 apresente as harmônicas de ordem $h = 5$, observa-se uma fmm girante produzida no rotor de ordem $h = 7$, fmm_{R7} , e conseqüentemente irá produzir uma reação do estator fmm_{E7} contrária. Esta última vem de componentes de ordem $h = 7$ das correntes de estator. Esta observação também é validada para a Figura A.30, apenas no sentido oposto, ou seja, as componentes harmônicas de ordem $h = 7$ provocam componentes harmônicas de ordem $h = 5$. Basta observar a presença de fmm_{E5} na Figura A.29.

Este anexo teve por objetivo apresentar detalhadamente e de forma conceitual o

comportamento da MS submetida a distorções harmônicas baseando-se em sua geometria interna. O intuito é o de se fazer compreender os mecanismos internos que a MS utiliza e como essa máquina se comporta na presença de correntes harmônicas de carga. Pode-se concluir, baseando-se nos argumentos apresentados, que a MS , no regime permanente não senoidal, se comporta como uma fonte de harmônicos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALDABÓ, R. **Qualidade na energia elétrica**. [S.l.]: São Paulo: Artliber, 2001.

26

ANEEL. **Agência Nacional de Energia Elétrica - Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST: Módulo 8 – qualidade da energia elétrica**. [S.l.]: Revisão 1, 2016.

25, 38

CELG. **Companhia Energética de Goiás – Boletim Tarifário**. 2015.

44

CHIANG, J.-C.; WU, C.-J.; YEN, S.-S. Mitigation of harmonic disturbance at pumped storage power station with static frequency converter. **IEEE**

transactions on energy conversion, IEEE, v. 12, n. 3, 1997.

29

COLAK, I.; BAYINDIR, R.; SEFA, I. Experimental study on reactive power compensation using a fuzzy logic controlled synchronous motor. **Energy**

Conversion and Management, Elsevier, v. 45, n. 15, 2004.

26

DAS, J. **Power system harmonics and passive filter designs**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2015.

29

DELBONE, E. **Atenuação de harmônicas nos geradores síncronos provenientes das cargas não lineares utilizando geradores de indução:**

150f. Tese (Doutorado) — Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2012. 29, 54, 55, 74, 81, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 104, 105, 106, 107

DETJEN, D.; JACOBS, J.; DONCKER, R. W. D.; MALL, H.-G. A new hybrid filter to dampen resonances and compensate harmonic currents in industrial power systems with power factor correction equipment. **IEEE Transactions on Power Electronics**, IEEE, v. 16, n. 6, 2001.

29

DIXON, J.; MORAN, L.; RODRIGUEZ, J.; DOMKE, R. Reactive power compensation technologies: State-of-the-art review. **Proceedings of the IEEE**, IEEE, v. 93, n. 12, 2005.

26

ECHEVERRI, M. G. **Planejamento e Despacho Ótimo de Reativos (VAR) em Sistemas de Energia Elétrica Multiáreas**: 179 f. Tese (Doutorado) —

Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2011. [26](#)

EMANUEL, A. E.; MINGHAO, Y. On the harmonic compensation in nonsinusoidal systems. **IEEE transactions on Power Delivery**, Institute of Electrical and Electronics Engineers, v. 8, n. 1, 1993. [28](#)

IEEE. **Standard for Shunt Power Capacitors: Ieee std 18-2012**. [S.l.: s.n.], 1992. [48](#)

KEPKA, J. **Reactive Power Compensation**: 97 f. Dissertação (Mestrado) — Faculty of Electrical Engineering, Wroclaw University of Technology, Wroclaw, 2007. [26](#)

KJÆR, S. B. **Design and control of an inverter for photovoltaic applications**. Tese (Doutorado) — Aalborg University, 2005. [28](#)

KUNDUR, P.; BALU, N. J.; LAUBY, M. G. **Power system stability and control**. [S.l.]: McGraw-hill New York, 1994. [27](#)

MEIER, A. V. **Electric power systems: a conceptual introduction**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2006. [37](#), [38](#)

NAKAMURA, R. D. R. **Instalação de capacitores de potência em redes poluídas por harmônicos e com baixa potência de curto-circuito**: 118 f. Dissertação (Mestrado) — Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011. [28](#), [44](#), [46](#), [48](#)

PIZZALI, L. F. O. **Desempenho de Redes de Distribuição com Geradores Distribuídos**: 158 f. Tese (Doutorado) — Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2006. [25](#)

POTTKER, F. **Correção do fator de potência de cargas não lineares monofásicas empregando filtro ativo**: 245 f. Dissertação (Mestrado) — Instituto de Eletrônica de Potência, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1997. [27](#)

RAGNEV, W. **Estudo de Potência Reativa, Tensão, Contingência e Perdas em Empresas de Energia Elétrica Localizadas na Grande São Paulo**: 104 f. Dissertação (Mestrado) — Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2005. [26](#), [49](#), [50](#)

ROCCO, A. **Máquinas síncronas e cargas não lineares, efeitos da distorção harmônica: uma análise numérico experimental**: 172 f. Tese (Doutorado) — Escola Politécnica de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998. [29](#)

ROSA, F. De la. **Harmonics and power systems**. [S.l.]: CRC press, 2006. [28](#), [36](#), [40](#)

SALIM, R. H. **Uma Nova Abordagem para a Análise de Estabilidade a Pequenas Perturbações em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica com Geradores Síncronos Distribuídos**: 200 f. Tese (Doutorado) — Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011. [25](#)

SANTOS, S. Penin y. **Harmônicas em Geração Distribuída**: 231 f. Tese (Doutorado) — Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2011. [28](#), [41](#)

SILVA, M. C. I. **Correção do Fator de Potência de Cargas Industriais com Dinâmica Rápida**: 241 f. Dissertação (Mestrado) — Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009. [25](#), [26](#)

STEEPER, D.; STRATFORD, R. Reactive compensation and harmonic suppression for industrial power systems using thyristor converters. **IEEE Transactions on Industry Applications**, IEEE, IA-12, n. 3, 2007. [27](#)

WAGNER, V.; BALDA, J. C.; GRIFFITH, D.; MCEACHERN, A.; BARNES, T.; HARTMANN, D.; PHILEGGI, D.; EMANNUEL, A.; HORTON, W. F.; REID, W. E. et al. Effects of harmonics on equipment. **IEEE Transactions on Power Delivery**, IEEE, v. 8, n. 2, 2002. [28](#)

ZHANG, X.-P.; REHTANZ, C.; PAL, B. **Flexible AC transmission systems: modelling and control**. [S.l.: s.n.], 2012. [27](#)

