



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

PPGEE

**MODELAGEM E ACIONAMENTO DE UMA MÁQUINA DE
INDUÇÃO ENEAFÁSICA COM INJEÇÃO HARMÔNICA PARA
GANHO DE CONJUGADO ELETROMAGNÉTICO**

GEOVANI BASTOS VANDERLEY

João Pessoa - PB

Dezembro 2018

GEOVANI BASTOS VANDERLEY

**MODELAGEM E ACIONAMENTO DE UMA MÁQUINA DE
INDUÇÃO ENEAFÁSICA COM INJEÇÃO HARMÔNICA PARA
GANHO DE CONJUGADO ELETROMAGNÉTICO**

Relatório de Defesa Final do Programa de
Pós-graduação em Engenharia Elétrica da
Universidade Federal da Paraíba como
requisito para obtenção do título de Mestre
em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Isaac Soares de Freitas

**Coorientador: Prof. Dr. Ítalo Roger Ferreira Moreno Pinheiro da
Silva**

João Pessoa - PB

Dezembro 2018

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

V235m Vanderley, Geovani Bastos.

MODELAGEM E ACIONAMENTO DE UMA MÁQUINA DE INDUÇÃO
ENEAFÁSICA COM INJEÇÃO HARMÔNICA PARA GANHO DE
CONJUGADO ELETROMAGNÉTICO / Geovani Bastos Vanderley. -
João Pessoa, 2019.
94 f. : il.

Orientação: Isaac Freitas.

Coorientação: Ítalo Silva.

Dissertação (Mestrado) - UFPB/PPGEE.

1. Máquinas, Acionamento, Harmônicos, Modelagem. I.
Freitas, Isaac. II. Silva, Ítalo. III. Título.

UFPB/BC

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA – UFPB
CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS – CEAR
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA - PPGE

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a Dissertação

MODELAGEM E ACIONAMENTO DE UMA MÁQUINA DE INDUÇÃO
ENEAFÁSICA COM INJEÇÃO HARMÔNICA PARA GANHO DE CONJUGADO
ELETROMAGNÉTICO

Elaborado por

GEOVANI BASTOS VANDERLEY

como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Elétrica.

COMISSÃO EXAMINADORA


PROF. DR. ISAAC SOARES DE FREITAS (Presidente)


PROF. DR. FABIANO SALVADORI


PROF. DR. ÍTALO ROGER FERREIRA MORENO PINHEIRO DA SILVA


PROF. DR. VICTOR FELIPE MOURA BEZERRA MELO

João Pessoa/PB, 29 de outubro de 2018.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha família, meu pai, Hélio Andrade, que com tantas dificuldades esteve me apoiando sempre, minha irmã, Geórgia Bastos, que sempre esteve me ajudando, motivando e fazendo o possível para este trabalho ser desenvolvido, minha mãe Lúcia de Fátima, que durante a sua vida fez tudo para esse momento um dia chegar. Dedico este trabalho também aos meus tios Paulo e Graça e seus filhos Matheus e Gustavo, que me ajudaram tanto e apoiaram de tantas formas durante essa trajetória e dedico aos meus irmãos em Cristo Jesus, presentes em João Pessoa, que se tornaram uma verdadeira família na minha vida.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço ao nosso Deus que me fornece forças, me renova todos os dias e me dá capacidade para continuar caminhando na minha jornada, pois nada seria possível sem a sua vontade. Queria agradecer eternamente a minha mãe que durante a sua vida se entregou em favor de seus filhos, nos cuidou e tudo que somos hoje se deve ao seu imenso amor que teve por nós. Agradeço ao meu pai que com tantas limitações fez tudo o que podia até hoje para nos ajudar. A minha irmã que esteve todo o tempo me motivando, me ajudando e se fazendo presente sempre. Agradeço muito aos meus tios Paulo e Graça e aos seus filhos Matheus e Gustavo, que me ajudaram, tanto me dando condições, como me apoiando e motivando para que seguisse em frente. Queria agradecer aos meus colegas que me ajudaram no trabalho, Elves que com toda disposição, sempre esteve presente e disposto para nos ajudar, Marcos, uma pessoa incrível, que apesar de ser um grande profissional sempre foi humilde e sempre esteve conosco, nos motivando e enfrentando os desafios presentes no laboratório. Queria agradecer aos meus colegas Hélio, Emerson, Lucas, que durante as disciplinas me deram muito apoio em momentos difíceis. Sou muito grato aos professores Isaac e Ítalo que me orientaram ao longo de toda essa jornada com toda disposição. Queria agradecer em especial aos meus irmãos em Cristo que me auxiliaram em tudo e se fizeram como uma verdadeira família.

RESUMO

A técnica de injeção de harmônicos pode proporcionar a um sistema eletromecânico um ganho de conjugado em uma máquina com um número maior de fases em seu estator. Assim, máquinas trifásicas de dimensões maiores podem ser substituídas para suprir a necessidade de conjugados elevados. Este trabalho pode contribuir de forma significativa em sistemas nos quais seja necessária uma eficiência maior, sendo possível obter um sistema com maior conjugado ocupando uma menor área. Este trabalho propõe uma modelagem matemática e acionamento de uma máquina de indução de nove fases assimétrica, com o objetivo de se comprovar o aumento de conjugado eletromagnético com injeção harmônica. O modelo matemático foi desenvolvido de forma completa, apresentando o equacionamento para todas as componentes harmônicas. Posteriormente o ganho de conjugado foi comprovado através de simulação computacional e de procedimento experimental. Foram realizados testes com diferentes configurações da máquina eneafásica, na tensão de referência e nas conexões do estator, sendo cada situação avaliada individualmente. Nessas condições, foi avaliada em qual situação a máquina eneafásica apresentou um melhor desempenho.

Palavras-chave: Máquinas elétricas, Acionamento elétrico, Harmônicos, Modelagem.

ABSTRACT

The harmonic injection technique can provide an electromechanical system with a conjugate gain in a machine with a larger number of phases in its stator. Thus, three-phase machines of larger dimensions can be replaced to meet the need for high conjugates. This work can contribute significantly in systems in which a greater efficiency is necessary, being possible to obtain a system with greater conjugated occupying a smaller area. This work proposes a mathematical modeling and activation of an asymmetric nine - phase induction machine, in order to verify the increase of electromagnetic conjugate with harmonic injection. The mathematical model was developed in a complete way, presenting the equation for all the harmonic components. Subsequently the conjugate gain was verified through computational simulation and experimental procedure. Tests were carried out with different configurations of the nine-phase machine, at the reference voltage and at the stator connections, each situation being evaluated individually. Under these conditions, it was evaluated in which situation the e-phase machine presented a better performance.

Keywords: Electric machines, Electric drive, Harmonics, Modeling.

LISTA DE SÍMBOLOS

A_a – área de seção do anel
 b_0 – abertura da ranhura do estator
 C_e – conjugado eletromagnético
 C_m – conjugado de carga
 D_i – diâmetro interno do estator
 g – comprimento do entreferro
 g_h – índice de referencial no genérico
 h – ordem da componente harmônica
 i_{sh} – corrente do estator da harmônica “ h ”
 l_e – comprimento axial da máquina
 $L_{\delta s}$ – indutância de dispersão
 L_{sm} – indutância de magnetização do estator
 L_{rm} – indutância de magnetização do rotor
 $\mathbf{L}_{sr}$ – Matriz de indutâncias mútuas entre estator e rotor
 $\mathbf{L}_{rs}$ – Matriz de indutâncias mútua entre rotor e estator
 $\mathbf{L}_{ss}$ – matriz de indutâncias do estator
 $\mathbf{L}_{rr}$ – matriz de indutâncias do rotor
 $\mathbf{L}_{rrm}$ – matriz de indutâncias mútuas do rotor
 $\mathbf{L}_{rr\delta}$ – matriz de indutâncias de dispersão do rotor
 $\mathbf{L}_{ss\alpha\beta}$ - matriz de indutâncias transformadas do estator
 $\mathbf{L}_{rr\alpha\beta}$ - matriz de indutâncias transformadas do rotor
 $\mathbf{L}_{rsa\beta}$ – matriz de indutâncias do estator em relação ao rotor transformadas em $\alpha\beta$
 m_s – número de fases do estator
 m_r – número de fases do rotor
 p – número de pares de polos
 q – número de bobinas por polo de fase
 r_r – resistência do rotor
 r_s – resistência do estator
 r_h – índice de referencial no rotor
 $\mathbf{R}_{ss}$ – matriz de resistências do estator

$\mathbf{R}_{rr}$ – matriz de resistências do rotor

$\mathbf{R}_{rr\alpha\beta}$ - matriz de resistências transformadas do rotor

$\mathbf{R}_{ss\alpha\beta}$ - matriz de resistências transformadas do estator

S_r – número de barras do rotor

s_h – índice de referencial no estator

$\mathbf{T}_{s\alpha\beta}$ – matriz de transformação do estator

$\mathbf{T}_{r\alpha\beta}$ – matriz de transformação do rotor

α – ângulo elétrico entre grupos trifásicos

α_0 – ângulo de abertura das ranhuras do rotor

α_r – ângulo elétrico entre fases do rotor

α_s – ângulo de *skew*

β_r – ângulo de *skew* das barras do rotor

γ_e – ângulo de defasagem entre duas aberturas do estator

θ_m – ângulo mecânico do rotor

θ_e – ângulo elétrico medido a partir da primeira abertura da fase 1

θ_r – ângulo elétrico do rotor ($\theta_r = p\theta_m$)

δ_{gk} – ângulo genérico

τ_r – passo da ranhura do rotor

ρ_s – resistividade do condutor do estator

ϕ_k – ângulo de deslocamento da fase

μ_0 – permeabilidade magnética no vácuo

x – ângulo de abertura do *slot*

ω_r – velocidade angular

λ – fluxo magnético concatenado

W_g – coenergia nas ranhuras

LISTA DE ABREVIATURAS

DSP – *Digital Signal Processor*

FMM – Força magneto motriz

PWM - *Pulse Width Modulation*

CC – Corrente Contínua

CA – Corrente Alternada

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1- REPRESENTAÇÃO DAS BOBINAS PRESENTES NO ESTATOR.....	5
FIGURA 2.2- ENROLAMENTOS DAS FASES DO ESTATOR.	6
FIGURA 2.3- ENROLAMENTO DE BOBINAS NO ESTATOR SIMÉTRICO	6
FIGURA 2.4 – FASES PRESENTES NO ROTOR	7
FIGURA 3.1– CIRCUITO EQUIVALENTE DO MODELO DE REGIME PERMANENTE.	27
FIGURA 4.1- CURVAS GENÉRICA TORQUE × VELOCIDADE.	29
FIGURA 4.2- <i>TORQUE × ESCORREGAMENTO</i> PARA CADA COMPONENTE HARMÔNICO. ...	30
FIGURA 5.1 – EQUIPAMENTO UTILIZADO PARA REALIZAÇÃO DOS PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS.	35
FIGURA 5.2 - CHAVE (A) E MÓDULO DE CHAVES SEMICONDUTORAS (B).	36
FIGURA 5.3 - <i>DRIVER</i> SKHI 23/12.	36
FIGURA 5.4 - PLATAFORMA F28379D DELFINO EXPERIMENTER KIT.	37
FIGURA 5.5 - GERADOR CC DA DELORENZO.	38
FIGURA 5.6 – MEDIDOR DA DELORENZO.	38
FIGURA 5.7 – TACÔMETRO DIGITAL.	38
FIGURA 5.8 – SISTEMA DE BARRAS (A) VISTA SUPERIOR E (B) LATERAL.	39
FIGURA 6.1- TENSÃO NA FORMA DE ONDA A COM A SÉTIMA ORDEM HARMÔNICA.	40
FIGURA 6.2- TENSÃO NA FORMA DE ONDA B COM A SÉTIMA ORDEM HARMÔNICA.	41
FIGURA 6.3 – TENSÕES DE REFERÊNCIA PARA A FORMA DE ONDA A.	42
FIGURA 6.4 – TENSÕES DE REFERÊNCIA PARA A FORMA DE ONDA B.	42
FIGURA 6.5- TENSÃO E CORRENTE DA FASE 1 NA FORMA DE ONDA A.	44
FIGURA 6.6 – TENSÃO E CORRENTE DA FASE 1 NA FORMA DE ONDA B.	45
FIGURA 6.7 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS DE TORQUE X ESCORREGAMENTO, CONSIDERANDO APENAS A COMPONENTE FUNDAMENTAL (➡), COMPONENTE FUNDAMENTAL E HARMÔNICO DE ORDEM 3 (⋯), COMPONENTE FUNDAMENTAL E HARMÔNICO DE ORDEM 3 COM GANHO DE 50% EM AMPLITUDE (– ·), COMPONENTE FUNDAMENTAL E HARMÔNICOS DE ORDEM 3 E 5 (– –), COMPONENTE FUNDAMENTAL E HARMÔNICOS DE ORDEM 3, 5 E 7 (–).....	46
FIGURA 6.8 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS DE <i>CORRENTE NAS FASES X</i> <i>ESCORREGAMENTO</i> , CONSIDERANDO APENAS A COMPONENTE FUNDAMENTAL (➡), COMPONENTE FUNDAMENTAL E HARMÔNICO DE ORDEM 3 (⋯), COMPONENTE FUNDAMENTAL E HARMÔNICO DE ORDEM 3 COM GANHO DE 50% EM AMPLITUDE (– ·), COMPONENTE FUNDAMENTAL E HARMÔNICOS DE ORDEM 3 E 5 (– –), COMPONENTE FUNDAMENTAL E HARMÔNICOS DE ORDEM 3, 5 E 7 (–).....	46
FIGURA 6.9 - GANHOS DE CONJUGADO EM (%), CONSIDERANDO O GANHO DA INJEÇÃO HARMÔNICA EM RELAÇÃO COMPONENTE FUNDAMENTAL, COMPONENTE FUNDAMENTAL E HARMÔNICO DE ORDEM 3 (⋯), COMPONENTE FUNDAMENTAL E HARMÔNICO DE ORDEM 3 COM GANHO DE 50% EM AMPLITUDE (– ·), COMPONENTE FUNDAMENTAL E HARMÔNICOS DE ORDEM 3 E 5 (– –), COMPONENTE FUNDAMENTAL E HARMÔNICOS DE ORDEM 3, 5 E 7 (–).....	47
FIGURA 6.10 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS DE <i>POTÊNCIA ATIVA X ESCORREGAMENTO</i> , CONSIDERANDO APENAS A COMPONENTE FUNDAMENTAL (➡), COMPONENTE FUNDAMENTAL E HARMÔNICO DE ORDEM 3 (⋯), COMPONENTE FUNDAMENTAL E HARMÔNICO DE ORDEM 3 COM GANHO DE 50% EM AMPLITUDE (– ·), COMPONENTE FUNDAMENTAL E HARMÔNICOS DE ORDEM 3 E 5 (– –), COMPONENTE FUNDAMENTAL E HARMÔNICOS DE ORDEM 3, 5 E 7 (–).....	48
FIGURA 6.11 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS DE <i>POTÊNCIA MECÂNICA X</i> <i>ESCORREGAMENTO</i> , CONSIDERANDO APENAS A COMPONENTE FUNDAMENTAL (➡), COMPONENTE FUNDAMENTAL E HARMÔNICO DE ORDEM 3 (⋯), COMPONENTE FUNDAMENTAL E HARMÔNICO DE ORDEM 3 COM GANHO DE 50% EM AMPLITUDE (– ·), COMPONENTE FUNDAMENTAL E HARMÔNICOS DE ORDEM 3 E 5 (– –), COMPONENTE FUNDAMENTAL E HARMÔNICOS DE ORDEM 3, 5 E 7 (–).....	48
FIGURA 6.12 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS DE <i>RENDIMENTO X ESCORREGAMENTO</i> , CONSIDERANDO APENAS A COMPONENTE FUNDAMENTAL (➡), COMPONENTE FUNDAMENTAL E HARMÔNICO DE ORDEM 3 (⋯), COMPONENTE FUNDAMENTAL E	

HARMÔNICO DE ORDEM 3 COM GANHO DE 50% EM AMPLITUDE (— ·),	
COMPONENTE FUNDAMENTAL E HARMÔNICOS DE ORDEM 3 E 5 (— —),	
COMPONENTE FUNDAMENTAL E HARMÔNICOS DE ORDEM 3, 5 E 7 (—).....	49
FIGURA 6.13- RESULTADOS EXPERIMENTAIS DE <i>RENDIMENTO X TORQUE</i> ,	
CONSIDERANDO APENAS A COMPONENTE FUNDAMENTAL (—), COMPONENTE	
FUNDAMENTAL E HARMÔNICO DE ORDEM 3 (···), COMPONENTE FUNDAMENTAL E	
HARMÔNICO DE ORDEM 3 COM GANHO DE 50% EM AMPLITUDE (— ·),	
COMPONENTE FUNDAMENTAL E HARMÔNICOS DE ORDEM 3 E 5 (— —),	
COMPONENTE FUNDAMENTAL E HARMÔNICOS DE ORDEM 3, 5 E 7 (—).....	50
FIGURA 6.14 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS DE <i>FATOR DE POTÊNCIA X TORQUE</i> ,	
CONSIDERANDO APENAS A COMPONENTE FUNDAMENTAL (—), COMPONENTE	
FUNDAMENTAL E HARMÔNICO DE ORDEM 3 (···), COMPONENTE FUNDAMENTAL E	
HARMÔNICO DE ORDEM 3 COM GANHO DE 50% EM AMPLITUDE (— ·),	
COMPONENTE FUNDAMENTAL E HARMÔNICOS DE ORDEM 3 E 5 (— —).....	50
FIGURA 6.15- RESULTADOS EXPERIMENTAIS DE <i>CORRENTE NAS FASES X TORQUE</i> ,	
CONSIDERANDO APENAS A COMPONENTE FUNDAMENTAL (—), COMPONENTE	
FUNDAMENTAL E HARMÔNICO DE ORDEM 3 (···), COMPONENTE FUNDAMENTAL E	
HARMÔNICO DE ORDEM 3 COM GANHO DE 50% EM AMPLITUDE (— ·),	
COMPONENTE FUNDAMENTAL E HARMÔNICOS DE ORDEM 3 E 5 (— —),	
COMPONENTE FUNDAMENTAL E HARMÔNICOS DE ORDEM 3, 5 E 7 (—).....	51
FIGURA 6.16 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS DE TORQUE X ESCORREGAMENTO,	
CONSIDERANDO APENAS A COMPONENTE FUNDAMENTAL (—), COMPONENTE	
FUNDAMENTAL E HARMÔNICO DE ORDEM 3 (···), COMPONENTE FUNDAMENTAL E	
HARMÔNICO DE ORDEM 3 COM GANHO DE 50% EM AMPLITUDE (— ·),	
COMPONENTE FUNDAMENTAL E HARMÔNICOS DE ORDEM 3 E 5 (— —),	
COMPONENTE FUNDAMENTAL E HARMÔNICOS DE ORDEM 3, 5 E 7 (—).....	52
FIGURA 6.17 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS DE <i>CORRENTE NAS FASES X</i>	
<i>ESCORREGAMENTO</i> , CONSIDERANDO APENAS A COMPONENTE FUNDAMENTAL (—),	
COMPONENTE FUNDAMENTAL E HARMÔNICO DE ORDEM 3 (···), COMPONENTE	
FUNDAMENTAL E HARMÔNICO DE ORDEM 3 COM GANHO DE 50% EM AMPLITUDE	
(— ·), COMPONENTE FUNDAMENTAL E HARMÔNICOS DE ORDEM 3 E 5 (— —),	
COMPONENTE FUNDAMENTAL E HARMÔNICOS DE ORDEM 3, 5 E 7 (—).....	53
FIGURA 6.18- GANHOS DE CONJUGADO EM (%), CONSIDERANDO O GANHO DA INJEÇÃO	
HARMÔNICA EM RELAÇÃO COMPONENTE FUNDAMENTAL, COMPONENTE	
FUNDAMENTAL E HARMÔNICO DE ORDEM 3 (···), COMPONENTE FUNDAMENTAL E	
HARMÔNICO DE ORDEM 3 COM GANHO DE 50% EM AMPLITUDE (— ·),	
COMPONENTE FUNDAMENTAL E HARMÔNICOS DE ORDEM 3 E 5 (— —),	
COMPONENTE FUNDAMENTAL E HARMÔNICOS DE ORDEM 3, 5 E 7 (—).....	53
FIGURA 6.19- RESULTADOS EXPERIMENTAIS DE <i>POTÊNCIA ATIVA X ESCORREGAMENTO</i> , ,	
CONSIDERANDO APENAS A COMPONENTE FUNDAMENTAL (—), COMPONENTE	
FUNDAMENTAL E HARMÔNICO DE ORDEM 3 (···), COMPONENTE FUNDAMENTAL E	
HARMÔNICO DE ORDEM 3 COM GANHO DE 50% EM AMPLITUDE (— ·),	
COMPONENTE FUNDAMENTAL E HARMÔNICOS DE ORDEM 3 E 5 (— —),	
COMPONENTE FUNDAMENTAL E HARMÔNICOS DE ORDEM 3, 5 E 7 (—).....	54
FIGURA 6.20- RESULTADOS EXPERIMENTAIS DE <i>POTÊNCIA MECÂNICA X</i>	
<i>ESCORREGAMENTO</i> , , CONSIDERANDO APENAS A COMPONENTE FUNDAMENTAL	
(—), COMPONENTE FUNDAMENTAL E HARMÔNICO DE ORDEM 3 (···), COMPONENTE	
FUNDAMENTAL E HARMÔNICO DE ORDEM 3 COM GANHO DE 50% EM AMPLITUDE	
(— ·), COMPONENTE FUNDAMENTAL E HARMÔNICOS DE ORDEM 3 E 5 (— —),	
COMPONENTE FUNDAMENTAL E HARMÔNICOS DE ORDEM 3, 5 E 7 (—).....	55
FIGURA 6.21 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS DE <i>RENDIMENTO X ESCORREGAMENTO</i> , ,	
CONSIDERANDO APENAS A COMPONENTE FUNDAMENTAL (—), COMPONENTE	
FUNDAMENTAL E HARMÔNICO DE ORDEM 3 (···), COMPONENTE FUNDAMENTAL E	
HARMÔNICO DE ORDEM 3 COM GANHO DE 50% EM AMPLITUDE (— ·),	
COMPONENTE FUNDAMENTAL E HARMÔNICOS DE ORDEM 3 E 5 (— —),	
COMPONENTE FUNDAMENTAL E HARMÔNICOS DE ORDEM 3, 5 E 7 (—).....	55
FIGURA 6.22- RESULTADOS EXPERIMENTAIS DE <i>RENDIMENTO X TORQUE</i> , ,	
CONSIDERANDO APENAS A COMPONENTE FUNDAMENTAL (—), COMPONENTE	
FUNDAMENTAL E HARMÔNICO DE ORDEM 3 (···), COMPONENTE FUNDAMENTAL E	

HARMÔNICO DE ORDEM 3 COM GANHO DE 50% EM AMPLITUDE (— ·),	
COMPONENTE FUNDAMENTAL E HARMÔNICOS DE ORDEM 3 E 5 (— —),	
COMPONENTE FUNDAMENTAL E HARMÔNICOS DE ORDEM 3, 5 E 7 (—).....	56
FIGURA 6.23-RESULTADOS EXPERIMENTAIS DE <i>FATOR DE POTÊNCIA X TORQUE</i> , ,	
CONSIDERANDO APENAS A COMPONENTE FUNDAMENTAL (—), COMPONENTE	
FUNDAMENTAL E HARMÔNICO DE ORDEM 3 (···), COMPONENTE FUNDAMENTAL E	
HARMÔNICO DE ORDEM 3 COM GANHO DE 50% EM AMPLITUDE (— ·),	
COMPONENTE FUNDAMENTAL E HARMÔNICOS DE ORDEM 3 E 5 (— —).....	57
FIGURA 6.24-RESULTADOS EXPERIMENTAIS DE <i>CORRENTE NAS FASES X TORQUE</i> , ,	
CONSIDERANDO APENAS A COMPONENTE FUNDAMENTAL (—), COMPONENTE	
FUNDAMENTAL E HARMÔNICO DE ORDEM 3 (···), COMPONENTE FUNDAMENTAL E	
HARMÔNICO DE ORDEM 3 COM GANHO DE 50% EM AMPLITUDE (— ·),	
COMPONENTE FUNDAMENTAL E HARMÔNICOS DE ORDEM 3 E 5 (— —),	
COMPONENTE FUNDAMENTAL E HARMÔNICOS DE ORDEM 3, 5 E 7 (—).....	57
FIGURA 6.25- RESULTADOS EXPERIMENTAIS DE <i>TORQUE X ESCORREGAMENTO</i> ,	
CONSIDERANDO APENAS A COMPONENTE FUNDAMENTAL (—), COMPONENTE	
FUNDAMENTAL E HARMÔNICO DE ORDEM 3 (···), COMPONENTE FUNDAMENTAL E	
HARMÔNICO DE ORDEM 3 COM GANHO DE 50% EM AMPLITUDE (— ·),	
COMPONENTE FUNDAMENTAL E HARMÔNICOS DE ORDEM 3 E 5 (— —),	
COMPONENTE FUNDAMENTAL E HARMÔNICOS DE ORDEM 3, 5 E 7 (—).....	58
FIGURA 6.26 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS DE <i>CORRENTE NAS FASES X</i>	
<i>ESCORREGAMENTO</i> , CONSIDERANDO APENAS A COMPONENTE FUNDAMENTAL (—),	
COMPONENTE FUNDAMENTAL E HARMÔNICO DE ORDEM 3 (···), COMPONENTE	
FUNDAMENTAL E HARMÔNICO DE ORDEM 3 COM GANHO DE 50% EM AMPLITUDE	
(— ·), COMPONENTE FUNDAMENTAL E HARMÔNICOS DE ORDEM 3 E 5 (— —),	
COMPONENTE FUNDAMENTAL E HARMÔNICOS DE ORDEM 3, 5 E 7 (—).....	59
FIGURA 6.27- GANHOS DE CONJUGADO EM (%), CONSIDERANDO O GANHO DA INJEÇÃO	
HARMÔNICA EM RELAÇÃO COMPONENTE FUNDAMENTAL, COMPONENTE	
FUNDAMENTAL E HARMÔNICO DE ORDEM 3 (···), COMPONENTE FUNDAMENTAL E	
HARMÔNICO DE ORDEM 3 COM GANHO DE 50% EM AMPLITUDE (— ·),	
COMPONENTE FUNDAMENTAL E HARMÔNICOS DE ORDEM 3 E 5 (— —),	
COMPONENTE FUNDAMENTAL E HARMÔNICOS DE ORDEM 3, 5 E 7 (—).....	60
FIGURA 6.28- RESULTADOS EXPERIMENTAIS DE <i>POTÊNCIA ATIVA X ESCORREGAMENTO</i> ,	
CONSIDERANDO APENAS A COMPONENTE FUNDAMENTAL (—), COMPONENTE	
FUNDAMENTAL E HARMÔNICO DE ORDEM 3 (···), COMPONENTE FUNDAMENTAL E	
HARMÔNICO DE ORDEM 3 COM GANHO DE 50% EM AMPLITUDE (— ·),	
COMPONENTE FUNDAMENTAL E HARMÔNICOS DE ORDEM 3 E 5 (— —),	
COMPONENTE FUNDAMENTAL E HARMÔNICOS DE ORDEM 3, 5 E 7 (—).....	60
FIGURA 6.29- RESULTADOS EXPERIMENTAIS DE <i>POTÊNCIA MECÂNICA X</i>	
<i>ESCORREGAMENTO</i> , CONSIDERANDO APENAS A COMPONENTE FUNDAMENTAL (—),	
COMPONENTE FUNDAMENTAL E HARMÔNICO DE ORDEM 3 (···), COMPONENTE	
FUNDAMENTAL E HARMÔNICO DE ORDEM 3 COM GANHO DE 50% EM AMPLITUDE	
(— ·), COMPONENTE FUNDAMENTAL E HARMÔNICOS DE ORDEM 3 E 5 (— —),	
COMPONENTE FUNDAMENTAL E HARMÔNICOS DE ORDEM 3, 5 E 7 (—).....	61
FIGURA 6.30- RESULTADOS EXPERIMENTAIS DE <i>RENDIMENTO X ESCORREGAMENTO</i> ,	
CONSIDERANDO APENAS A COMPONENTE FUNDAMENTAL (—), COMPONENTE	
FUNDAMENTAL E HARMÔNICO DE ORDEM 3 (···), COMPONENTE FUNDAMENTAL E	
HARMÔNICO DE ORDEM 3 COM GANHO DE 50% EM AMPLITUDE (— ·),	
COMPONENTE FUNDAMENTAL E HARMÔNICOS DE ORDEM 3 E 5 (— —),	
COMPONENTE FUNDAMENTAL E HARMÔNICOS DE ORDEM 3, 5 E 7 (—).....	62
FIGURA 6.31- RESULTADOS EXPERIMENTAIS DE <i>RENDIMENTO X TORQUE</i> ,	
CONSIDERANDO APENAS A COMPONENTE FUNDAMENTAL (—), COMPONENTE	
FUNDAMENTAL E HARMÔNICO DE ORDEM 3 (···), COMPONENTE FUNDAMENTAL E	
HARMÔNICO DE ORDEM 3 COM GANHO DE 50% EM AMPLITUDE (— ·),	
COMPONENTE FUNDAMENTAL E HARMÔNICOS DE ORDEM 3 E 5 (— —),	
COMPONENTE FUNDAMENTAL E HARMÔNICOS DE ORDEM 3, 5 E 7 (—).....	62
FIGURA 6.32- RESULTADOS EXPERIMENTAIS DE <i>FATOR DE POTÊNCIA X TORQUE</i> ,	
CONSIDERANDO APENAS A COMPONENTE FUNDAMENTAL (—), COMPONENTE	
FUNDAMENTAL E HARMÔNICO DE ORDEM 3 (···), COMPONENTE FUNDAMENTAL E	

HARMÔNICO DE ORDEM 3 COM GANHO DE 50% EM AMPLITUDE (— ·), COMPONENTE FUNDAMENTAL E HARMÔNICOS DE ORDEM 3 E 5 (— —).....	63
FIGURA 6.33- RESULTADOS EXPERIMENTAIS DE <i>CORRENTE NAS FASES X TORQUE</i> , CONSIDERANDO APENAS A COMPONENTE FUNDAMENTAL (—), COMPONENTE FUNDAMENTAL E HARMÔNICO DE ORDEM 3 (···), COMPONENTE FUNDAMENTAL E HARMÔNICO DE ORDEM 3 COM GANHO DE 50% EM AMPLITUDE (— ·), COMPONENTE FUNDAMENTAL E HARMÔNICOS DE ORDEM 3 E 5 (— —), COMPONENTE FUNDAMENTAL E HARMÔNICOS DE ORDEM 3, 5 E 7 (—).....	63
FIGURA 6.34- RESULTADOS EXPERIMENTAIS DE <i>TORQUE X ESCORREGAMENTO</i> , CONSIDERANDO APENAS A COMPONENTE FUNDAMENTAL (—), COMPONENTE FUNDAMENTAL E HARMÔNICO DE ORDEM 3 (···), COMPONENTE FUNDAMENTAL E HARMÔNICO DE ORDEM 3 COM GANHO DE 50% EM AMPLITUDE (— ·), COMPONENTE FUNDAMENTAL E HARMÔNICOS DE ORDEM 3 E 5 (— —), COMPONENTE FUNDAMENTAL E HARMÔNICOS DE ORDEM 3, 5 E 7 (—).....	64
FIGURA 6.35- RESULTADOS EXPERIMENTAIS DE <i>CORRENTE NAS FASES X ESCORREGAMENTO</i> , CONSIDERANDO APENAS A COMPONENTE FUNDAMENTAL (—), COMPONENTE FUNDAMENTAL E HARMÔNICO DE ORDEM 3 (···), COMPONENTE FUNDAMENTAL E HARMÔNICO DE ORDEM 3 COM GANHO DE 50% EM AMPLITUDE (— ·), COMPONENTE FUNDAMENTAL E HARMÔNICOS DE ORDEM 3 E 5 (— —), COMPONENTE FUNDAMENTAL E HARMÔNICOS DE ORDEM 3, 5 E 7 (—).....	65
FIGURA 6.36- GANHOS DE CONJUGADO EM (%), CONSIDERANDO O GANHO DA INJEÇÃO HARMÔNICA EM RELAÇÃO COMPONENTE FUNDAMENTAL, COMPONENTE FUNDAMENTAL E HARMÔNICO DE ORDEM 3 (···), COMPONENTE FUNDAMENTAL E HARMÔNICO DE ORDEM 3 COM GANHO DE 50% EM AMPLITUDE (— ·), COMPONENTE FUNDAMENTAL E HARMÔNICOS DE ORDEM 3 E 5 (— —), COMPONENTE FUNDAMENTAL E HARMÔNICOS DE ORDEM 3, 5 E 7 (—).....	66
FIGURA 6.37- RESULTADOS EXPERIMENTAIS DE <i>POTÊNCIA ATIVA X ESCORREGAMENTO</i> , CONSIDERANDO APENAS A COMPONENTE FUNDAMENTAL (—), COMPONENTE FUNDAMENTAL E HARMÔNICO DE ORDEM 3 (···), COMPONENTE FUNDAMENTAL E HARMÔNICO DE ORDEM 3 COM GANHO DE 50% EM AMPLITUDE (— ·), COMPONENTE FUNDAMENTAL E HARMÔNICOS DE ORDEM 3 E 5 (— —), COMPONENTE FUNDAMENTAL E HARMÔNICOS DE ORDEM 3, 5 E 7 (—).....	66
FIGURA 6.38- RESULTADOS EXPERIMENTAIS DE <i>POTÊNCIA MECÂNICA X ESCORREGAMENTO</i> , CONSIDERANDO APENAS A COMPONENTE FUNDAMENTAL (—), COMPONENTE FUNDAMENTAL E HARMÔNICO DE ORDEM 3 (···), COMPONENTE FUNDAMENTAL E HARMÔNICO DE ORDEM 3 COM GANHO DE 50% EM AMPLITUDE (— ·), COMPONENTE FUNDAMENTAL E HARMÔNICOS DE ORDEM 3 E 5 (— —), COMPONENTE FUNDAMENTAL E HARMÔNICOS DE ORDEM 3, 5 E 7 (—).....	67
FIGURA 6.39- RESULTADOS EXPERIMENTAIS DE <i>RENDIMENTO X ESCORREGAMENTO</i> , CONSIDERANDO APENAS A COMPONENTE FUNDAMENTAL (—), COMPONENTE FUNDAMENTAL E HARMÔNICO DE ORDEM 3 (···), COMPONENTE FUNDAMENTAL E HARMÔNICO DE ORDEM 3 COM GANHO DE 50% EM AMPLITUDE (— ·), COMPONENTE FUNDAMENTAL E HARMÔNICOS DE ORDEM 3 E 5 (— —), COMPONENTE FUNDAMENTAL E HARMÔNICOS DE ORDEM 3, 5 E 7 (—).....	68
FIGURA 6.40- RESULTADOS EXPERIMENTAIS DE <i>RENDIMENTO X TORQUE</i> , CONSIDERANDO APENAS A COMPONENTE FUNDAMENTAL (—), COMPONENTE FUNDAMENTAL E HARMÔNICO DE ORDEM 3 (···), COMPONENTE FUNDAMENTAL E HARMÔNICO DE ORDEM 3 COM GANHO DE 50% EM AMPLITUDE (— ·), COMPONENTE FUNDAMENTAL E HARMÔNICOS DE ORDEM 3 E 5 (— —), COMPONENTE FUNDAMENTAL E HARMÔNICOS DE ORDEM 3, 5 E 7 (—).....	68
FIGURA 6.41- RESULTADOS EXPERIMENTAIS DE <i>FATOR DE POTÊNCIA X TORQUE</i> , CONSIDERANDO APENAS A COMPONENTE FUNDAMENTAL (—), COMPONENTE FUNDAMENTAL E HARMÔNICO DE ORDEM 3 (···), COMPONENTE FUNDAMENTAL E HARMÔNICO DE ORDEM 3 COM GANHO DE 50% EM AMPLITUDE (— ·), COMPONENTE FUNDAMENTAL E HARMÔNICOS DE ORDEM 3 E 5 (— —).....	69
FIGURA 6.42- RESULTADOS EXPERIMENTAIS DE <i>CORRENTE NAS FASES X TORQUE</i> , CONSIDERANDO APENAS A COMPONENTE FUNDAMENTAL (—), COMPONENTE FUNDAMENTAL E HARMÔNICO DE ORDEM 3 (···), COMPONENTE FUNDAMENTAL E HARMÔNICO DE ORDEM 3 COM GANHO DE 50% EM AMPLITUDE (— ·),	

COMPONENTE FUNDAMENTAL E HARMÔNICOS DE ORDEM 3 E 5 (– –),	
COMPONENTE FUNDAMENTAL E HARMÔNICOS DE ORDEM 3, 5 E 7 (–).....	69

LISTA DE TABELAS

TABELA 4.1 - TORQUES MÁXIMOS PARA CADA COMPONENTE HARMÔNICO.	31
TABELA 4.2- IMPEDÂNCIAS DO CIRCUITO EQUIVALENTE.....	31
TABELA 6.1 - TENSÕES E BARRAMENTO CC UTILIZADOS NA FORMA DE ONDA A.	43
TABELA 6.2 - TENSÕES E BARRAMENTO CC UTILIZADOS NA FORMA DE ONDA B.....	43
TABELA 6.3 – GANHOS DE TORQUE EM (%) PARA TODAS AS FORMAS DE INJEÇÃO HARMÔNICA UTILIZADAS.....	71
TABELA 6.4 – CORRENTE NAS FASES EM TODAS AS FORMAS DE INJEÇÃO	72
TABELA 6.5 – VALORES DE RENDIMENTO PARA TODAS AS FORMAS DE INJEÇÃO HARMÔNICA UTILIZADAS.....	72

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO GERAL.....	1
1.1	Introdução.....	1
1.2	Revisão bibliográfica.....	2
1.3	Objetivo Geral	4
1.4	Objetivos específicos	4
1.5	Estrutura do trabalho	4
2	MODELAGEM DA MÁQUINA ENEAFÁSICA.....	5
2.1	Características construtivas da máquina eneafásica	5
2.2	Modelo matemático da máquina.....	7
2.3	Matriz de Indutâncias do estator – L_{ss}	9
2.4	Matriz de Resistências do estator - R_{ss}	11
2.5	Matriz Indutâncias do rotor - L_{rr}	11
2.6	Matriz de Resistências do rotor - R_{rr}	13
2.7	Matriz de Indutâncias mútuas entre estator e rotor - L_{rs}	14
2.8	Conclusões.....	15
3	TRANSFORMAÇÃO DO MODELO	16
3.1	Matrizes e expressões transformadas.....	18
3.1.1	Matriz de indutâncias transformadas do estator - $L_{ss\alpha\beta}$	19
3.1.2	Matriz de indutâncias transformadas do rotor - $L_{rr\alpha\beta}$	19
3.1.3	Matriz de resistências transformadas do rotor - $R_{rr\alpha\beta}$	19
3.1.4	Indutâncias mútuas entre estator e rotor transformadas - $L_{rs\alpha\beta}$	20
3.2	Modelo da máquina no referencial do estator - Transformada de Park	21
3.3	Modelo da Máquina em um referencial genérico.....	23
3.4	Representação complexa do Modelo da Máquina.....	24
3.5	Modelo de regime permanente.....	25

3.6 Conclusões.....	28
4 ANÁLISES DOS CIRCUITOS DE REGIME PERMANENTE.....	29
4.1 Análise em regime permanente.....	29
4.1.1 Tensões de fase em estado estacionário.....	31
4.2 Conclusões.....	34
5 DESCRIÇÃO DA BANCADA EXPERIMENTAL.....	35
5.1 Bancada e inversor	35
5.2 PROCESSADOR DIGITAL DE SINAIS (DSP)	37
5.3 SISTEMA ELETROMECAÂNICO DE FRENAGEM.....	37
5.4 Medidor de velocidade e Conjugado Eletromagnético	38
5.5 Conclusões.....	39
6 RESULTADOS EXPERIMENTAIS	40
6.1 Testes para a amplitude da componente fundamental em 170 V	42
6.1.1 Configuração assimétrica a forma de onda A.....	45
6.1.2 Configuração assimétrica com a forma de onda B	52
6.1.3 Configuração simétrica com a forma de onda A	58
6.1.4 Configuração simétrica com a forma de onda B.....	64
6.2 Análise quantitativa dos procedimentos experimentais	70
6.2.1 Contribuições de torque	71
6.2.2 Aumento de corrente nas fases.....	71
6.2.3 Análise de rendimento	72
6.3 Conclusões.....	73
7 CONCLUSÕES.....	74
7.1 Trabalhos futuros.....	74
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	76

1 INTRODUÇÃO GERAL

Nesta seção será abordada uma contextualização do tema do trabalho e uma análise de pesquisas desenvolvidas de vários autores dentro do contexto apresentado. Em seguida serão apresentados os objetivos do trabalho desenvolvido e a estrutura contida ao longo do texto.

1.1 INTRODUÇÃO

Historicamente o número de fases das máquinas elétricas era limitado pelo número de fases da rede elétrica, sendo mais presentes as máquinas monofásicas e as trifásicas. Entretanto, o desenvolvimento dos dispositivos de eletrônica de potência e dos processadores digitais teve forte impacto na operação e estrutura dos inversores de frequência e na aplicação das técnicas de controle até então utilizadas, permitindo o uso de técnicas avançadas e de alto desempenho. Desse modo, o número de fases das máquinas elétricas deixou de ser limitado pelo número de fases da rede elétrica (Dainez,2016).

A máquina de indução trifásica tem sido amplamente utilizada durante vários anos em várias aplicações devido a sua simplicidade e por apresentar o mesmo número de fases dos sistemas de potência.

Com o desenvolvimento tecnológico, a utilização de velocidade variável em máquinas de indução trifásicas foi rapidamente implantada nos processos industriais. Aplicações com acionamento de velocidade variável onde normalmente era utilizado um sistema com motores de corrente contínua foram sendo substituídos por sistemas com acionamento de motores de indução e inversores diante do surgimento de semicondutores cada vez mais rápidos, técnicas de controle inovadoras e microprocessadores modernos.

Motivada pelo mercado e redução de custos, a indústria privilegiou a fabricação de máquinas elétricas monofásicas ou trifásicas. No entanto, em aplicações de alta potência, para se adequarem os limites de alimentação das chaves eletrônicas de potência, as máquinas elétricas e seus inversores podem ser produzidos com um número maior de fases, reduzindo assim a corrente por fase, sem a necessidade de aumentar a tensão de alimentação (Rodrigo,2014).

Com o desenvolvimento da eletrônica de potência, alternativas de utilização das máquinas de indução foram surgindo, como a sua utilização com um número maior de fases. Em muitas aplicações por vezes é necessário se obter um maior valor de conjugado mecânico e a solução natural do problema seria adquirir uma máquina trifásica de maior porte.

No final da década de cinquenta, as máquinas multifásicas ressurgiram como uma alternativa para atenuar a pulsação de torque produzida pela modulação em onda quadrada. Mesmo com o posterior avanço nos semicondutores, permitindo a utilização de estratégias de chaveamento em alta frequência, como a modulação por largura de pulso (PWM), que atenuam a pulsação de torque em máquinas trifásicas, o interesse em máquinas polifásicas se manteve, pois, para algumas aplicações, a utilização dessas máquinas pode ser vantajosa, como por exemplo, maior produção de torque. (Ward, 1969).

1.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Máquinas de indução multifásicas são normalmente apropriadas para aplicações de alta potência, devido a sua maior confiabilidade, tais como propulsão de navios e veículos elétricos e híbridos, conforme proposto em (Renukadevi, 2012). Além disso, a capacidade de operar mesmo na falta de uma ou duas fases aumenta a confiabilidade do acionamento, o que torna a máquina multifásica adequada para aplicações como tração, aeroespacial e em sistemas de energia eólica em alto mar onde manutenção corretiva pode ser difícil e sob más condições de tempo (Guzman, 2016).

Outras vantagens de acionamentos multifásicos são: a possibilidade de redução nas correntes de fase, quando comparado com um conversor trifásico (Malvar, 2014), possibilidade de aumentar a produção de conjugado pela injeção de harmônicos de corrente de ordem mais alta (Raj, 2013), menor conteúdo de harmônicos espaciais, correntes harmônicas de rotor menores, perdas no cobre reduzidas, maior razão de potência por corrente para a mesma potência da máquina e maior confiabilidade (Malvar, 2014). Outras características podem ser observadas neste tipo de máquina: redução da amplitude da pulsação de conjugado com o aumento do número de fases, redução das perdas no rotor devido ao cancelamento de algumas correntes harmônicas, redução das perdas no estator, redução do ruído acústico, possibilidade de incremento na produção de torque através de injeção de corrente harmônica em máquinas com

enrolamentos concentrados, possibilidade de utilização de graus de liberdade adicionais em operações de tolerância à faltas, diminuição das correntes harmônicas no barramento CC (Parsa 2005).

A área de acionamentos de velocidade variável em geral e com motores de indução polifásicos em particular tem crescido substancialmente desde o início do século. Isto se deve às vantagens que eles apresentam com relação ao acionamento com máquinas trifásicas, como a capacidade de continuar operando mesmo com a presença de uma ou mais fases em falta, desde que no mínimo três fases estejam em funcionamento (Taherzadeh, 2014).

Segundo o trabalho feito por (Baudart, 2012), os motores síncronos de imã permanente polifásicos podem ser usados para desenvolver unidades tolerantes a falhas sendo possível atingir um alto nível de confiabilidade. Foi introduzida uma formulação geral, baseada no princípio de Lagrange, para determinar tanto em condições normais quanto nos modos de operação de falha, as formas de onda ideais para um dado conjugado.

O trabalho de (Parsa, 2005) analisou algumas características significativas da divisão de fase, estator duplo e máquinas polifásicas. Além de reduzir a pulsação de torque, as máquinas polifásicas podem ser empregadas para melhorar o desempenho geral do sistema.

Em (Rodrigo, 2014) é observado que as máquinas polifásicas, ou seja, com número de fases maior que três também permitem a utilização de correntes harmônicas para obtenção de ganho de torque. Foi mostrado passo a passo, a obtenção do circuito equivalente de regime permanente, para fundamental e terceiro harmônico, para um motor de nove fases com enrolamento concentrado e passo pleno.

Em (Lyra, 2002), é possível observar que os sistemas polifásicos são amplamente utilizados na indústria para alcançar níveis de potência mais elevados. Uma produção de conjugado adicional pode ser obtida nesses sistemas se um terceiro harmônico for injetado de modo a remodelar o fluxo distribuído na máquina, dessa forma, obtendo uma maior densidade de fluxo sem extrapolar os limites de fluxo e sem forçar a máquina à saturação. Através da análise analítica, assumindo a saturação dos dentes do estator como a restrição da densidade do fluxo, mostrou-se que um aumento de até 40% na produção de torque pode ser esperado quando comparado a uma máquina trifásica padrão, para a mesma distribuição de pico de fluxo.

1.3 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral do trabalho é verificar como a injeção harmônica em uma máquina de indução eneafásica pode contribuir para o aumento de conjugado eletromagnético.

1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar a modelagem matemática da máquina de indução eneafásica;
- Análise de regime permanente para verificação de ganho de torque;
- Analisar o desempenho da máquina sob diferentes aspectos como, forma de onda da tensão de alimentação, configuração das bobinas do estator (simétrica ou assimétrica) e ordem dos harmônicos utilizados.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta dissertação está estruturada da seguinte maneira:

- o capítulo 2 trata da modelagem matemática do motor de indução de nove fases assimétrico;
- o capítulo 3 apresenta a transformação do modelo proposto no capítulo 2;
- no capítulo 4 apresentam-se as análises de regime permanente;
- no capítulo 5 a descrição dos equipamentos utilizados;
- no capítulo 6 os resultados experimentais;
- e no capítulo 7 as conclusões do trabalho e uma apresentação dos trabalhos futuros a serem realizados e na sequência são apresentadas referências bibliográficas.

2 MODELAGEM DA MÁQUINA ENEAFÁSICA

Este capítulo apresenta a modelagem de uma máquina assíncrona de nove fases, sendo que inicialmente são apresentadas as características construtivas da máquina. Primeiramente é feito o cálculo das indutâncias e resistências, no intuito de determinar as equações para as tensões, correntes e conjugado para o modelo matemático geral da máquina.

2.1 CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS DA MÁQUINA ENEAFÁSICA

Este trabalho apresenta a modelagem matemática de uma máquina de indução feita de uma forma genérica a depender do número de fases do estator e rotor. As bobinas de uma máquina de indução de nove fases com $\alpha = 20^\circ$ são apresentadas na Figura 2.1. A distribuição de 36 bobinas em ranhuras do estator da máquina é apresentada na Figura 2.2.

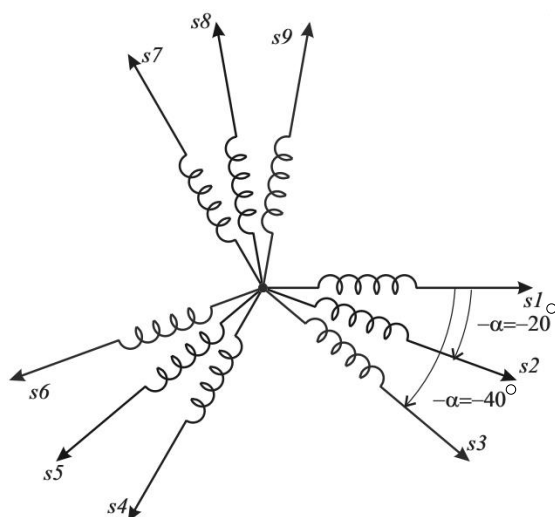


Figura 2.1- Representação das bobinas presentes no estator.

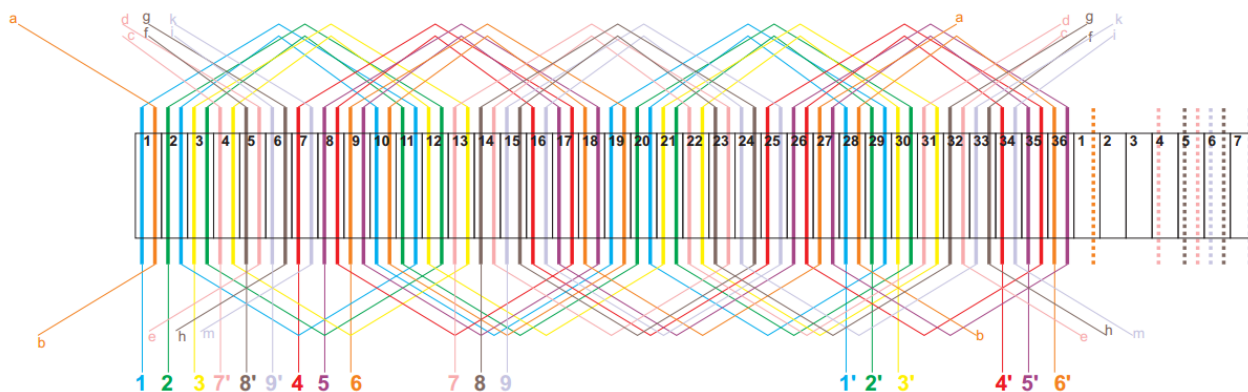


Figura 2.2- Enrolamentos das fases do estator.

É possível utilizar um enrolamento simétrico na realização dos procedimentos experimentais usando o mesmo enrolamento assimétrico, apenas fazendo a inversão das bobinas 2,5 e 8 que foram apresentadas na Figura 2.1. Conseguindo dessa forma uma configuração simétrica dos enrolamentos de bobinas conforme mostrado na Figura 2.3. Procedimento que irá ser necessário no procedimento experimental, onde vai ser comparado o desempenho da máquina utilizando uma configuração simétrica e assimétrica.

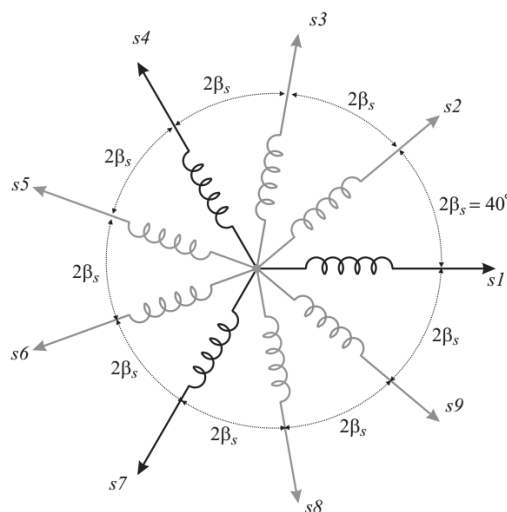


Figura 2.3- Enrolamento de bobinas no estator simétrico

A máquina em estudo possui rotor em gaiola de esquilo com 56 barras e dois pares de polos. Com o rotor em gaiola de esquilo, consideraremos que cada malha do rotor composta por duas barras consecutivas correspondem a uma fase, conforme

apresentado na figura 2.4. Dessa forma, as correntes de fase são as mesmas correntes de malha e o número de fases do rotor é igual ao número de malhas sob um par de polos.

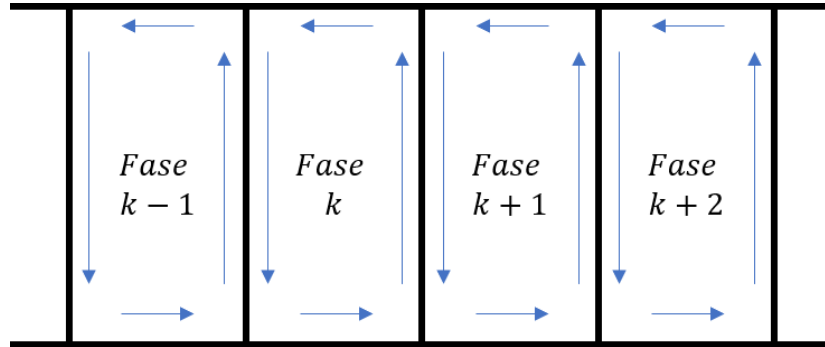


Figura 2.4 – Fases presentes no rotor

Se a razão entre o número de barras do rotor e o número de pares de polos da máquina for um número inteiro, só precisamos considerar as fases do rotor como sendo a relação entre número de barras e pares de polos. Se a relação não for um número inteiro, o modelo deve considerar mais pares de polos.

Sendo S_r o número total de barras do rotor e p o número de pares de pólos do estator da máquina, então o número de fases no rotor é dado por

$$m_r = \frac{S_r}{p} \quad (2.1)$$

2.2 MODELO MATEMÁTICO DA MÁQUINA

O modelo matemático geral da máquina é descrito segundo o modelo de indutores acoplados

$$\lambda_s = L_{ss}i_s + L_{sr}i_r \quad (2.2)$$

$$\lambda_r = L_{rr}i_r + L_{rs}i_s \quad (2.3)$$

$$V_s = R_{ss}i_s + \frac{d\lambda_s}{dt} \quad (2.4)$$

$$\mathbf{V}_r = \emptyset = \mathbf{R}_{rr}\mathbf{i}_r + \frac{d\lambda_r}{dt} \quad (2.5)$$

$$C_e = p\mathbf{i}_r^T \left[\frac{d}{d\theta_r} \mathbf{L}_{rs} \right] \mathbf{i}_s = p\mathbf{i}_s^T \left[\frac{d}{d\theta_r} \mathbf{L}_{sr} \right] \mathbf{i}_r. \quad (2.6)$$

A tensão induzida em uma bobina qualquer é dada por

$$v = \frac{d\lambda}{dt}. \quad (2.7)$$

Como receptor, a tensão nos terminais da bobina se encontra

$$v = ri + \frac{d\lambda}{dt}. \quad (2.8)$$

Assim, os vetores das tensões para o estator e rotor da máquina são dados por

$$\mathbf{V}_s = \mathbf{R}_{ss}\mathbf{i}_s + \frac{d\lambda_s}{dt} \quad (2.9)$$

$$\emptyset = \mathbf{R}_{rr}\mathbf{i}_r + \frac{d\lambda_r}{dt}. \quad (2.10)$$

Como o rotor é em gaiola de esquilo, sua construção possui barras curto circuitadas, logo não existe o termo $\mathbf{V}_r$ para tensão no rotor. Os termos λ_s e λ_r representam vetores dos fluxos do estator e rotor, respectivamente,

$$\lambda_s = \mathbf{L}_{ss}\mathbf{i}_s + \mathbf{L}_{sr}\mathbf{i}_r, \quad (2.11)$$

$$\lambda_r = \mathbf{L}_{rr}\mathbf{i}_r + \mathbf{L}_{rs}\mathbf{i}_s. \quad (2.12)$$

A expressão geral para a coenergia é dada por

$$W_g = \frac{1}{2} \mathbf{i}^T \mathbf{L} \mathbf{i}, \quad (2.13)$$

em que,

$$\mathbf{i} = \begin{bmatrix} \mathbf{i}_s \\ \mathbf{i}_r \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} \mathbf{L}_{ss} & \mathbf{L}_{sr} \\ \mathbf{L}_{rr} & \mathbf{L}_{rs} \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

O conjugado é obtido pela derivada da energia em relação ao ângulo mecânico θ_m

$$C_e = \frac{dW_g}{d\theta_m}. \quad (2.16)$$

2.3 MATRIZ DE INDUTÂNCIAS DO ESTATOR - $\mathbf{L}_{ss}$

O cálculo da indutância própria é feito considerando a densidade de fluxo produzida no entreferro por uma fase, a indutância é obtida expandindo a relação entre esse fluxo produzido e a corrente de fase, conforme apresentado em (Pereira, 2006).

A indutância própria de uma bobina sem considerar a dispersão será dada por

$$L_{M_{s_1s_1}} = L_{SM} \sum_{h=1,3,5\dots}^{+\infty} \left(\frac{k_h}{h} \right)^2. \quad (2.17)$$

sendo $L_{M_{s_1s_1}}$ a indutância própria da fase um

em que,

$$k_h = k_{dh} k_{ph} k_{sh} k_{xh}. \quad (2.18)$$

Em (2.18) k_h representa o fator de bobina, k_{dh} é o fator de distribuição da bobina, k_{ph} o fator de encurtamento, k_{sh} o fator de skew, e k_{xh} o fator de abertura de slot, (Lipo, 2017).

Em que L_{SM} em (2.17) é a indutância de magnetização e é dada por

$$L_{SM} = \frac{2}{\pi} N_t^2 \frac{\mu_0}{g} D_i l_e, \quad (2.19)$$

onde,

μ_0 - permeabilidade magnética no vácuo,

D_i - diâmetro interno do estator,

l_e - comprimento axial da máquina,

N_t - número de espiras por polo por fase.

A indutância própria de cada fase do estator é a soma da equação (2.17) com a indutância de dispersão $L_{\delta s}$. Como os enrolamentos possuem mesmo número de espiras, as indutâncias próprias serão iguais.

Já as indutâncias mútuas entre as fases do estator podem ser calculadas por

$$L_{M_{s_k s_l}} = L_{SM} \sum_{h=1,3,5,7,9}^{+\infty} \left[\left(\frac{k_h}{h} \right)^2 \cos(h(\theta_k - \theta_l)) \right], \quad (2.20)$$

sendo $L_{M_{s_k s_l}}$ a indutância mútua entre uma fase “ s_k ” e uma fase “ s_l ” e “ θ_k ” é o ângulo de uma fase “ s_k ” em relação a fase 1 e “ θ_l ” é o ângulo de uma fase “ s_l ” em relação a fase 1.

A matriz de indutâncias do estator pode ser encontrada por

$$\mathbf{L}_{ss} = \mathbf{L}_{SM} + L_{\delta s} \mathbf{I}_{m_s}, \quad (2.21)$$

onde

$$\mathbf{L}_{SM} = \begin{bmatrix} L_{M_{s_1 s_1}} & L_{M_{s_1 s_2}} & L_{M_{s_1 s_3}} & L_{M_{s_1 s_4}} & \cdots & L_{M_{s_1 s_9}} \\ L_{M_{s_2 s_1}} & L_{M_{s_2 s_2}} & L_{M_{s_2 s_3}} & L_{M_{s_2 s_4}} & \cdots & L_{M_{s_2 s_9}} \\ L_{M_{s_3 s_1}} & L_{M_{s_3 s_2}} & L_{M_{s_3 s_3}} & L_{M_{s_3 s_4}} & \cdots & L_{M_{s_3 s_9}} \\ L_{M_{s_4 s_1}} & L_{M_{s_4 s_2}} & L_{M_{s_4 s_3}} & L_{M_{s_4 s_4}} & \cdots & L_{M_{s_4 s_9}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ L_{M_{s_9 s_1}} & L_{M_{s_9 s_2}} & L_{M_{s_9 s_3}} & L_{M_{s_9 s_4}} & \cdots & L_{M_{s_9 s_9}} \end{bmatrix}, \quad (2.22)$$

onde $\mathbf{I}_{m_s}$ é uma matriz identidade de ordem m_s .

2.4 MATRIZ DE RESISTÊNCIAS DO ESTATOR - $\mathbf{R}_{ss}$

A resistência do estator pode ser encontrada através de

$$r_s = \rho_s l_{ms} \frac{1}{A_s} p N_t, \quad (2.23)$$

onde:

A_s - área do condutor do estator

ρ_s - resistividade do condutor do estator;

l_{ms} - comprimento médio de uma espira das bobinas do estator $l_{ms} \cong 2l_e + D_i \pi / p$;

l_e - comprimento axial da máquina.

Onde a matriz de resistências do estator é uma matriz identidade formada por valores r_s

$$\mathbf{R}_{ss} = [r_s \ r_s \ r_s \ r_s \ r_s \ r_s \ r_s \ r_s \ r_s] \quad (2.24)$$

2.5 MATRIZ INDUTÂNCIAS DO ROTOR - $\mathbf{L}_{rr}$

Com as m_r fases ocupando 2π (rad) em ângulos elétricos, cada barra distancia-se da vizinha por um ângulo elétrico α_r , dado por

$$\alpha_r = \frac{2\pi}{m_r}. \quad (2.25)$$

A indutância de magnetização L_{rM} do rotor deriva da expressão do fluxo concatenado com a fase do rotor, causado pela FMM criada pela corrente de malha (LIPO, 2017), e será dada por

$$L_{rM} = \mu_0 \frac{(m_r - 1)}{m_r^2} \frac{1}{g} l_e \frac{(\tau_r - b_0)}{\tau_r} \frac{2\pi r_r}{p} \quad (2.26)$$

sendo que onde τ_r é o comprimento do arco do deslocamento angular da fase do rotor

$\alpha_r = \frac{2\pi}{m_r}$ medido no entreferro e b_0 é o comprimento de abertura de cada ranhura do

rotor. Onde, r_r é a resistência de uma fase do rotor, sua expressão será apresentada posteriormente.

A indutância própria de cada malha do rotor, apresentada em (2.26) será dada pela soma de L_{rM} com a indutância de dispersão em (2.27) e a dispersão é dada em (2.28).

$$\mathbf{L}_{rr} = L_{rM} + L_{r\delta} \quad (2.27)$$

$$L_{r\delta} = L_{r\delta a} + L_{r\delta b} \quad (2.28)$$

Onde $L_{r\delta a}$ e $L_{r\delta b}$ são as indutâncias de dispersão das barras com os segmentos de anel.

As matrizes de indutâncias mútuas e de dispersão são calculadas como descrito em Pereira (2006) e são apresentadas em (2.29) e (2.30), respectivamente.

Como as fases do rotor são malhas, as correntes de fase são as correntes dessas malhas, assim a corrente de cada barra pertence a duas malhas, logo a indutância está associada a duas malhas vizinhas, assim a matriz de indutâncias não é diagonal.

$$\begin{aligned} &\mathbf{L}_{rrm} \\ &= \frac{L_{rM}}{m_r - 1} \begin{bmatrix} m_r - 1 & -1 & -1 & \dots & -1 & -1 & -1 \\ -1 & m_r - 1 & -1 & \dots & -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & m_r - 1 & \dots & -1 & -1 & -1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -1 & -1 & -1 & \dots & m_r - 1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & \dots & -1 & m_r - 1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & \dots & -1 & -1 & m_r - 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.29)$$

$$\begin{aligned} &\mathbf{L}_{r\delta} = \\ &\begin{bmatrix} L_{r\delta} & -L_{r\delta b} & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & -L_{r\delta b} \\ -L_{r\delta b} & L_{r\delta} & -L_{r\delta b} & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -L_{r\delta b} & L_{r\delta} & -L_{r\delta b} & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -L_{r\delta b} & L_{r\delta} & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & L_{r\delta} & -L_{r\delta b} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & -L_{r\delta b} & L_{r\delta} & -L_{r\delta b} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & -L_{r\delta b} & L_{r\delta} & -L_{r\delta b} \\ -L_{r\delta b} & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & -L_{r\delta b} & L_{r\delta} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.30)$$

2.6 MATRIZ DE RESISTÊNCIAS DO ROTOR - R_{rr}

As resistências próprias do rotor são calculadas em duas partes: a resistência das duas barras e a resistência das duas partes dos anéis que ligam as duas barras

$$R_r = 2(R_{ra} + R_{rb}) \quad (2.31)$$

onde R_{rb} é a resistência de uma barra do rotor e R_{ra} é a resistência do segmento de anel do rotor.

No caso do rotor, existem resistências mútuas relativas às barras compartilhadas entre malhas vizinhas: $R_{kj} = -R_{rb}$ para $j = k - 1$ e $j = k + 1$.

Através do comprimento do segmento de anel l_e , pode-se calcular a resistência das barras do rotor (2.33) e a resistência do segmento de anel (2.32).

$$R_{ra} = \rho_r \frac{D_i \pi}{\cos \beta_r} \frac{1}{A_a}. \quad (2.32)$$

$$R_{rb} = \rho_r \frac{l_e}{\cos \beta_r} \frac{1}{A_b}. \quad (2.33)$$

onde:

$S_r = pm_r$ – Número total de barras do rotor;

A_a – área de seção do anel;

D_i – diâmetro da máquina;

β_r – ângulo de *skew* das barras do rotor (Lipo 2017);

A_b – área de seção das barras do rotor.

De modo análogo ao apresentado para as indutâncias, a corrente de cada barra do rotor é compartilhada por duas malhas, logo a resistência está associada a duas malhas vizinhas, assim a matriz de resistências não é diagonal como apresentado em (2.34),

$$\mathbf{R}_{rr} = \begin{bmatrix} R_r & -R_{rb} & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & -R_{rb} \\ -R_{rb} & R_r & -R_{rb} & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -R_{rb} & R_r & -R_{rb} & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -R_{rb} & R_r & \ddots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -R_{rb} & \ddots & -R_{rb} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \ddots & R_r & -R_{rb} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & -R_{rb} & R_r & -R_{rb} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & -R_{rb} & R_r & -R_{rb} \\ -R_{rb} & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & -R_{rb} & R_r \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

2.7 MATRIZ DE INDUTÂNCIAS MÚTUAS ENTRE ESTATOR E ROTOR - $\mathbf{L}_{rs}$

A indutância mútua entre uma fase 'x' do estator e uma fase 'k' do rotor é:

$$L_{r_x s_k} = \sum_{h=1,3,5,7,9}^{+\infty} L_{rmh} \sin h(\theta_r - (2q-1)\frac{\gamma_e}{2} + (x - \frac{1}{2})\alpha_r - \phi_k) \quad (2.35)$$

onde L_{rmh} é dado por

$$L_{rmh} = \frac{\mu_0}{g} \frac{4}{\pi} \frac{N_t}{2} \frac{D_i l_e}{p} \frac{k_h}{h^2} \frac{\sin \frac{h\beta_r}{2}}{\frac{h\beta_r}{2}} \sin \frac{h(\alpha_r - \alpha_0)}{2}. \quad (2.36)$$

Como forma de simplificar a representação é possível definir

$$\theta'_r = \theta_r - (2q-1)\frac{\gamma_e}{2} + \frac{1}{2}\alpha_r \quad (2.37)$$

Então a indutância mútua entre o estator e rotor pode ser representada por:

$$L_{r_x s_k} = \sum_{h=1,3,5,7,9}^{+\infty} L_{rmh} \sin h(\theta'_r + (x-1)\alpha_r - \phi_k). \quad (2.38)$$

De acordo com o número de m_s e m_r , que são os números de fases do estator e rotor respectivamente da máquina utilizada, a matriz $\mathbf{L}_{rs}$ será da ordem de ($m_s \times m_r$), como mostrado em

$$\mathbf{L}_{rs} = \begin{bmatrix} L_{r_1s_1} & L_{r_1s_2} & L_{r_1s_3} & L_{r_1s_4} & \dots & L_{r_1s_9} \\ L_{r_2s_1} & L_{r_2s_2} & L_{r_2s_3} & L_{r_2s_4} & \dots & L_{r_2s_9} \\ L_{r_3s_1} & L_{r_3s_2} & L_{r_3s_3} & L_{r_3s_4} & \dots & L_{r_3s_9} \\ L_{r_4s_1} & L_{r_4s_2} & L_{r_4s_3} & L_{r_4s_4} & \dots & L_{r_4s_9} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ L_{r_9s_1} & L_{r_9s_2} & L_{r_9s_3} & L_{r_9s_4} & \dots & L_{r_9s_9} \end{bmatrix} \quad (2.39)$$

Como a máquina é linear, então:

$$\mathbf{L}_{sr} = \mathbf{L}_{rs}^T \quad (2.40)$$

2.8 CONCLUSÕES

Neste capítulo foi desenvolvimento o modelo da máquina eneafásica fazendo sua apresentação construtiva e descrevendo o seu modelo matemático. Sendo possível sua representação matemática dos elementos elétricos e mecânicos, e o estabelecimento de relações entre os mesmos. As equações desenvolvidas servem de base para as análises e cálculos nas representações posteriores.

3 TRANSFORMAÇÃO DO MODELO

O modelo da máquina (2.2) - (2.6), que é apresentado em termos das tensões, correntes e fluxos do estator e do rotor pode ser convertido para as variáveis “ $\alpha\beta$ ” descritas por (3.1)-(3.2). Esta transformação é feita com base nas matrizes ortonormais (3.1)-(3.2) a fim de se ter conservação de energia entre os modelos.

$$\mathbf{x}_{s\alpha\beta} = \mathbf{A}_s^T \mathbf{x}_s \quad (3.1)$$

$$\mathbf{x}_s = \mathbf{A}_s \mathbf{x}_{s\alpha\beta} \quad (3.2)$$

onde “ $\mathbf{x}_{s\alpha\beta}$ ” pode representar equações de fluxos do estator e rotor, correntes ou tensões, respectivamente. A matriz ortonormal $\mathbf{A}_s$ é dada por

$$\mathbf{A}_s = \sqrt{\frac{2}{m_s}} \mathbf{T}_s \quad (3.3)$$

Onde m_s é o número de fases do estator. $\mathbf{T}_s$ é a matriz de transformação do estator. Sendo que esta transformação é encontrada de acordo com a transformação de Clarke, visando simplificar a representação do modelo matemático. Considerando que as bobinas do estator e as barras do rotor estão acopladas magneticamente e que apenas as quatro primeiras componentes harmônicas produzem torque significativo, segundo a análise em regime permanente que irá ser explicada, é considerado que $m_s = 9$ e $m_r = 9$. Dessa forma são apresentadas as matrizes $\mathbf{T}_{s1}$ e $\mathbf{T}_{s2}$, que são as matrizes de transformação para a máquina eneafásica com enrolamento assimétrico e simétrico, respectivamente.

(3.4)

(3.5)

3.1 MATRIZES E EXPRESSÕES TRANSFORMADAS

As expressões para os fluxos, tensões e conjugado eletromagnético da máquina (2.2)-(2.6) sendo aplicadas a (3.1)-(3.5) são transformadas nas equações a seguir, todas estas variáveis transformadas em $\alpha\beta$

$$\lambda_{s\alpha\beta} = \mathbf{L}_{ss\alpha\beta} \mathbf{i}_{s\alpha\beta} + \mathbf{L}_{sr\alpha\beta} \mathbf{i}_{r\alpha\beta} \quad (3.6)$$

$$\lambda_{r\alpha\beta} = \mathbf{L}_{rr\alpha\beta} \mathbf{i}_{r\alpha\beta} + \mathbf{L}_{rs\alpha\beta} \mathbf{i}_{s\alpha\beta} \quad (3.7)$$

$$\mathbf{v}_{s\alpha\beta} = r_s \mathbf{i}_{s\alpha\beta} + \frac{d\lambda_{s\alpha\beta}}{dt} \quad (3.8)$$

$$\phi = \mathbf{R}_{rr} \mathbf{i}_{r\alpha\beta} + \frac{d\lambda_{r\alpha\beta}}{dt} \quad (3.9)$$

$$c_e = p \mathbf{i}_{s\alpha\beta}^T \frac{d\mathbf{L}_{sr\alpha\beta}}{d\theta_r} \mathbf{i}_{r\alpha\beta} = p \mathbf{i}_{r\alpha\beta}^T \frac{d\mathbf{L}_{rs\alpha\beta}}{d\theta_r} \mathbf{i}_{s\alpha\beta}. \quad (3.10)$$

Para realizar a transformação das matrizes de resistências e indutâncias aplicam-se as transformações apresentadas anteriormente, deste modo encontra-se a atualização dessas matrizes apresentadas

$$\mathbf{L}_{ss\alpha\beta} = \mathbf{A}_s^T \mathbf{L}_{ss} \mathbf{A}_s \quad (3.11)$$

$$\mathbf{L}_{rr\alpha\beta} = \mathbf{A}_r^T \mathbf{L}_{rr} \mathbf{A}_r \quad (3.12)$$

$$\mathbf{R}_{rr\alpha\beta} = \mathbf{A}_r^T \mathbf{R}_{rr} \mathbf{A}_r \quad (3.13)$$

$$\mathbf{L}_{sr\alpha\beta} = \mathbf{A}_s^T \mathbf{L}_{sr} \mathbf{A}_r \quad (3.14)$$

$$\mathbf{L}_{rs\alpha\beta} = \mathbf{A}_r^T \mathbf{L}_{rs} \mathbf{A}_s = \mathbf{L}_{sr\alpha\beta}^T. \quad (3.15)$$

Em geral, a máquina de indução com rotor gaiola de esquilo, tem o número de fases do rotor maior que o número de fases do estator, “ $m_r > m_s$ ”. Neste trabalho a ordem de harmônicos superiores em “ $\mathbf{L}_{rs\alpha\beta}$ ” são negligenciados, pois tais harmônicos não representam ganho significativo para o conjugado, como será discutido na seção 6. Dessa forma, pode-se considerar que o número de fases do rotor é igual ao número de fases do estator. A seguir serão apresentadas as variáveis necessárias para calcular o modelo matemático transformado de forma completa.

3.1.1 Matriz de indutâncias transformadas do estator - $\mathbf{L}_{ss\alpha\beta}$

A matriz $\mathbf{L}_{ss\alpha\beta}$ é diagonal com ordem m_s , e pode ser representada através de um único vetor como mostrado abaixo.

$$\mathbf{L}_{ss\alpha\beta} = [l_{s1} \quad l_{s1} \quad l_{s3} \quad l_{s3} \quad l_{s5} \quad l_{s5} \quad l_{s7} \quad l_{s7} \quad l_{s9}] \quad (3.16)$$

Cada elemento da matriz $\mathbf{L}_{ss\alpha\beta}$ pode ser calculado através de

$$l_{sh} = \frac{9}{2} L_{SM} \left(\frac{k_h}{h} \right)^2 + L_{\delta s}, \quad h = 1, 3, 5, 7 \quad (3.17)$$

$$l_{sh} = L_{\delta s}, \quad h = 9 \quad (3.18)$$

3.1.2 Matriz de indutâncias transformadas do rotor - $\mathbf{L}_{rr\alpha\beta}$

A matriz $\mathbf{L}_{rr\alpha\beta}$ é diagonal com ordem m_r , e pode ser representada através de um único vetor como mostrado abaixo.

$$\mathbf{L}_{rr\alpha\beta} = [l_{r1} \quad l_{r1} \quad l_{r3} \quad l_{r3} \quad l_{r5} \quad l_{r5} \quad l_{r7} \quad l_{r7} \quad l_{r9}]. \quad (3.19)$$

Onde cada indutância l_{rh} em (3.19) é encontrada por:

$$l_{rh} = \frac{9}{8} L_{rM} + L_{r\delta} - 2L_{r\delta b} \cos\left(\frac{2\pi h}{9}\right), \text{ onde } h = 1, 3, 5, 7 \quad (3.20)$$

$$l_{rh} = L_{r\delta} - 2L_{r\delta b} \cos\left(\frac{2\pi h}{9}\right) = 2L_{r\delta a}, \text{ para } h = 9. \quad (3.21)$$

3.1.3 Matriz de resistências transformadas do rotor - $\mathbf{R}_{rr\alpha\beta}$

A matriz $\mathbf{R}_{rr\alpha\beta}$ é uma matriz identidade de valores r_{rh}

$$\mathbf{R}_{rr\alpha\beta} = [r_{r1} \quad r_{r1} \quad r_{r3} \quad r_{r3} \quad r_{r5} \quad r_{r5} \quad r_{r7} \quad r_{r7} \quad r_{r9}], \quad (3.22)$$

onde cada resistência r_{rh} é dada por

$$r_{rh} = R_r - 2R_{rb} \cos \frac{2\pi h}{m_r}, \text{ para } h = 1, 3, 5, 7, 9 \quad (3.23)$$

3.1.4 Indutâncias mútuas entre estator e rotor transformadas - $\mathbf{L}_{rs\alpha\beta}$

Definem-se as seguintes submatrizes de indutância para simplificar a apresentação das matrizes de indutâncias mútuas $\mathbf{L}_{rs\alpha\beta}$ e $\mathbf{L}_{sr\alpha\beta}$, onde

$$\mathbf{L}_{rs\alpha\beta} = \mathbf{L}_{sr\alpha\beta}^T \quad (3.24)$$

$$\mathbf{N}_h = l_{mh} \begin{bmatrix} \sin(h\theta'_r) & \cos(h\theta'_r) \\ -\cos(h\theta'_r) & \sin(h\theta'_r) \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

$$z_h = l_{mh} \sin(h\theta'_r) \quad (3.26)$$

e

$$l_{mh} = \frac{\sqrt{m_r m_s}}{2} L_{rsh} \quad (3.27)$$

A seguir é apresentada a matriz $\mathbf{L}_{rs\alpha\beta}$,

$$\mathbf{L}_{rs\alpha\beta} = \begin{bmatrix} \mathbf{l}_{rs1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{l}_{rs3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{l}_{rs5} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mathbf{l}_{rs7} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mathbf{l}_{rsm_s} \end{bmatrix}. \quad (3.28)$$

Onde

$$l_{rs1} = \mathbf{N}_1 \quad (3.29)$$

$$l_{rs3} = \mathbf{N}_3 \quad (3.30)$$

$$l_{rs5} = \mathbf{N}_5 \quad (3.31)$$

$$l_{rs7} = \mathbf{N}_7 \quad (3.32)$$

$$\mathbf{l}_{rsm_s} = 2z_{m_s} \quad (3.33)$$

Os vetores de tensões, fluxos e correntes em (3.6) - (3.10), têm dimensões “ m_s ” e “ m_r ” para as variáveis do estator e do rotor, respectivamente. E definindo vetores de duas dimensões,

$$\lambda_{s\alpha\beta h} = \begin{bmatrix} \lambda_{sah} \\ \lambda_{s\beta h} \end{bmatrix}, \mathbf{i}_{s\alpha\beta h} = \begin{bmatrix} i_{sah} \\ i_{s\beta h} \end{bmatrix} \text{ e } \mathbf{v}_{s\alpha\beta h} = \begin{bmatrix} v_{sah} \\ v_{s\beta h} \end{bmatrix} \text{ com } h = 1,3,5,7; \quad (3.34)$$

$$\lambda_{r\alpha\beta h} = \begin{bmatrix} \lambda_{rah} \\ \lambda_{r\beta h} \end{bmatrix}, \mathbf{i}_{r\alpha\beta h} = \begin{bmatrix} i_{rah} \\ i_{r\beta h} \end{bmatrix} \text{ e } \mathbf{v}_{r\alpha\beta h} = \begin{bmatrix} v_{rah} \\ v_{r\beta h} \end{bmatrix} \text{ com } h = 1,3,5,7; \quad (3.35)$$

Dessa forma o modelo em (3.6) – (3.10) usando as simplificações em (3.34) e (3.35) encontra-se:

$$\lambda_{s\alpha\beta h} = l_{sh} \mathbf{i}_{s\alpha\beta h} + \mathbf{l}_{rsk}^T \mathbf{i}_{r\alpha\beta h}, \text{ com } h = 1,3,5,7; \quad (3.36)$$

$$\lambda_{r\alpha\beta h} = l_{rk} \mathbf{i}_{r\alpha\beta h} + \mathbf{l}_{rsk} \mathbf{i}_{s\alpha\beta h}, \text{ com } h = 1,3,5,7; \quad (3.37)$$

$$\mathbf{v}_{s\alpha\beta h} = r_s \mathbf{i}_{s\alpha\beta h} + \frac{d\lambda_{s\alpha\beta h}}{dt}, \text{ com } h = 1,3,5,7; \quad (3.38)$$

$$0 = r_r \mathbf{i}_{r\alpha\beta h} + \frac{d\lambda_{r\alpha\beta h}}{dt}, \text{ com } h = 1,3,5,7 \quad (3.39)$$

$$c_e = \sum_{h=1,3,5,7 \dots}^{m_s-2} \left(p h l_{mh} \mathbf{i}_{s\alpha\beta h}^T \begin{bmatrix} \cos(h\theta_r') & \sin(h\theta_r') \\ -\sin(h\theta_r') & \cos(h\theta_r') \end{bmatrix} \mathbf{i}_{r\alpha\beta h} \right) \quad (3.40)$$

3.2 MODELO DA MÁQUINA NO REFERENCIAL DO ESTATOR - TRANSFORMADA DE PARK

Como o modelo agora é desacoplado é possível realizar esta transformação, pois o número de variáveis do rotor e estator agora são os mesmos. Definindo $\mathbf{P}_h$ como,

$$\mathbf{P}_h = \begin{bmatrix} \sin(h\theta_r') & -\cos(h\theta_r') \\ \cos(h\theta_r') & \sin(h\theta_r') \end{bmatrix} \quad (3.41)$$

A matriz $\mathbf{P}_h$ fornece uma rotação no eixo na corrente do rotor $\mathbf{i}_{r\alpha\beta h}$ de tal maneira que as componentes do vetor são dadas por

$$\mathbf{i}_{r\alpha\beta h}^{\mathbf{P}_h} = \mathbf{P}_h \mathbf{i}_{r\alpha\beta h} \quad (3.42)$$

As componentes desse vetor estão alinhadas com os fluxos e correntes do estator $\lambda_{s\alpha\beta h}$ e $\mathbf{i}_{s\alpha\beta h}$. Se os fluxos e corrente do rotor forem rotacionados por $\mathbf{P}_h$ obtém-se uma nova representação do modelo ativo da máquina, em que todas as variáveis (rotor e estator) estarão em uma mesma referência das variáveis do estator $\lambda_{s\alpha\beta h}$, $\mathbf{i}_{s\alpha\beta h}$ e $\mathbf{v}_{s\alpha\beta h}$. Daqui em diante serão incluídas nas variáveis um índice para indicar em que quadro de referência estão sendo representadas. O índice que indica a referência do rotor é “r” e o do estator será “s”.

$$\mathbf{x}_{s\alpha\beta h}^s = \mathbf{x}_{s\alpha\beta h} \quad (3.43)$$

$$\mathbf{x}_{r\alpha\beta h}^r = \mathbf{x}_{r\alpha\beta h} \quad (3.44)$$

As componentes do vetor do rotor podem ser convertidas para o quadro de referência do estator através de

$$\mathbf{x}_{r\alpha\beta h}^s = \mathbf{P}_h \mathbf{x}_{r\alpha\beta h}^r \quad (3.45)$$

$$\mathbf{x}_{r\alpha\beta h}^r = \mathbf{P}_h^{-1} \mathbf{x}_{r\alpha\beta h}^s. \quad (3.46)$$

Assim para valores de ($h= 1,3,5,7$) modelo transformado será dado por

$$\lambda_{s\alpha\beta h}^s = l_{sh} \mathbf{i}_{s\alpha\beta h}^s + l_{mh} \mathbf{i}_{r\alpha\beta h}^s \quad (3.47)$$

$$\lambda_{r\alpha\beta h}^s = l_{rh} \mathbf{i}_{r\alpha\beta h}^s + l_{mh} \mathbf{i}_{s\alpha\beta h}^s \quad (3.48)$$

$$\emptyset = r_r \mathbf{i}_{r\alpha\beta h}^s + h\omega_r \mathbf{D} \lambda_{r\alpha\beta h}^s + \frac{d\lambda_{r\alpha\beta h}^s}{dt} \quad (3.49)$$

$$C_{eh} = phl_{mh} \mathbf{i}_{s\alpha\beta h}^{sT} \mathbf{C} \mathbf{i}_{ra\beta h}^s = phl_{mh} (\mathbf{i}_{sah}^s \mathbf{i}_{r\beta h}^s - \mathbf{i}_{rah}^s \mathbf{i}_{s\beta h}^s) \quad (3.50)$$

$$C_e = \sum_{h=1,3,5,7} C_{eh} \quad (3.51)$$

Em que:

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{C} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.52)$$

E $\omega_r = \frac{d\theta_r}{dt}$ é a velocidade da máquina em rad/s.

3.3 MODELO DA MÁQUINA EM UM REFERENCIAL GENÉRICO

O modelo da máquina no referencial do estator, apresentado anteriormente, pode ser convertido para um referencial genérico, rotacionando todos os vetores representados no referencial do estator (“s”) com um ângulo genérico δ_{gh} . Os vetores no novo quadro de referência são indicados por um índice “ g_h ”. Por fim a transformação pode ser aplicada para qualquer vetor do estator e rotor,

$$\mathbf{x}_{\alpha\beta h}^{g_h} = \mathbf{G}_h \mathbf{x}_{\alpha\beta h}^{s_h} \quad (3.53)$$

$$\mathbf{x}_{\alpha\beta h}^{s_h} = \mathbf{G}_h^{-1} \mathbf{x}_{\alpha\beta h}^{g_h} \quad (3.54)$$

$$\mathbf{G}_h = \begin{bmatrix} \text{sen}(\delta_{gh}) & \text{cos}(\delta_{gh}) \\ -\text{cos}(\delta_{gh}) & \text{sen}(\delta_{gh}) \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad \mathbf{G}_h^{-1} = \begin{bmatrix} \text{sen}(\delta_{gh}) & -\text{cos}(\delta_{gh}) \\ \text{cos}(\delta_{gh}) & \text{sen}(\delta_{gh}) \end{bmatrix} \quad (3.55)$$

O modelo transformado apresentado em (3.6)-(3.10) resultará para valores de ($h= 1,3,5,7$),

$$\lambda_{s\alpha\beta h}^{g_h} = l_{sh} \mathbf{i}_{s\alpha\beta h}^{g_h} + l_{mh} \mathbf{i}_{ra\beta h}^{g_h} \quad (3.56)$$

$$\lambda_{r\alpha\beta h}^{g_h} = l_{rh} \mathbf{i}_{r\alpha\beta h}^{g_h} + l_{mh} \mathbf{i}_{s\alpha\beta h}^{g_h} \quad (3.57)$$

$$\mathbf{v}_{s\alpha\beta h}^{g_h} = r_s \mathbf{i}_{s\alpha\beta h}^{g_h} + \frac{d\lambda_{s\alpha\beta h}^{g_h}}{dt} + \begin{bmatrix} 0 & -\omega_{gh} \\ \omega_{gh} & 0 \end{bmatrix} \lambda_{s\alpha\beta h}^{g_h} \quad (3.58)$$

$$\emptyset = r_r \mathbf{i}_{r\alpha\beta h}^{g_h} + \frac{d\lambda_{r\alpha\beta h}^{g_h}}{dt} + \begin{bmatrix} 0 & -(\omega_{gh} - h\omega_r) \\ (\omega_{gh} - h\omega_r) & 0 \end{bmatrix} \lambda_{r\alpha\beta h}^{g_h} \quad (3.59)$$

$$C_{eh} = phl_m \mathbf{i}_{s\alpha\beta h}^{g_h T} \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{i}_{r\alpha\beta h}^{g_h} = phl_m \left(\mathbf{i}_{rah}^{g_h} \mathbf{i}_{s\beta h}^{g_h} - \mathbf{i}_{sah}^{g_h} \mathbf{i}_{r\beta h}^{g_h} \right) \quad (3.60)$$

$$C_e = \sum_{h=1,3,5,7} C_{eh} \quad (3.61)$$

Onde $\omega_{gh} = \frac{d\delta_{gh}}{dt}$ é a velocidade no referencial genérico para cada componente espacial.

3.4 REPRESENTAÇÃO COMPLEXA DO MODELO DA MÁQUINA

Segue abaixo a representação complexa, com as partes reais e imaginárias para qualquer vetor de estator ou rotor $\mathbf{x}_{\alpha\beta h}^{g_h}$.

$$\hat{\mathbf{x}}_{s\beta ah}^{g_h} = \left(x_{s\beta h}^{g_h} + jx_{sah}^{g_h} \right) \quad (3.62)$$

$$\hat{\mathbf{x}}_{r\beta ah}^{g_h} = \left(x_{r\beta h}^{g_h} + jx_{rah}^{g_h} \right) \quad (3.63)$$

Essas quantidades complexas e seus conjugados podem ser obtidos pelas transformações abaixo

$$\begin{bmatrix} \hat{\mathbf{x}}_{s\beta ah}^{g_h} \\ \hat{\mathbf{x}}_{s\beta ah}^{g_h} \end{bmatrix} = \mathbf{T}_c \mathbf{x}_{s\alpha\beta h}^{g_h} \quad \text{e} \quad \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{x}}_{r\beta ah}^{g_h} \\ \hat{\mathbf{x}}_{r\beta ah}^{g_h} \end{bmatrix} = \mathbf{T}_c \mathbf{x}_{r\alpha\beta h}^{g_h}. \quad (3.64)$$

Sendo:

$$\mathbf{T}_c = \begin{bmatrix} j & 1 \\ -j & 1 \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad \mathbf{T}_c^{-1} = \begin{bmatrix} -j & j \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.65)$$

Aplicando a transformação obtêm-se o modelo da máquina simplificado para valores de $(h = 1, 3, 5, 7)$,

$$\hat{\lambda}_{s\beta\alpha h}^{g_h} = l_{sk}\hat{i}_{s\beta\alpha h}^{g_h} + l_{mh}\hat{i}_{r\beta\alpha h}^{g_h} \quad (3.66)$$

$$\hat{\lambda}_{r\beta\alpha h}^{g_h} = l_{sk}\hat{i}_{r\beta\alpha h}^{g_h} + l_{mh}\hat{i}_{s\beta\alpha h}^{g_h} \quad (3.67)$$

$$\hat{v}_{s\beta\alpha h}^{g_h} = r_s\hat{i}_{s\beta\alpha h}^{g_h} + j\omega_{gh}\hat{\lambda}_{s\beta\alpha h}^{g_h} + \frac{d\hat{\lambda}_{s\beta\alpha h}^{g_h}}{dt} \quad (3.68)$$

$$\emptyset = r_r\hat{i}_{r\beta\alpha h}^{g_h} + j(\omega_{gh} - h\omega_r)\hat{\lambda}_{r\beta\alpha h}^{g_h} + \frac{d\hat{\lambda}_{r\beta\alpha h}^{g_h}}{dt} \quad (3.69)$$

$$c_{eh} = jphl_{mh} \left(\hat{i}_{s\beta\alpha h}^{g_{h*}} \hat{i}_{r\beta\alpha h}^{g_h} - \hat{i}_{s\beta\alpha h}^{g_h} \hat{i}_{r\beta\alpha h}^{g_{h*}} \right) = phl_{mh} \left(\mathbf{i}_{s\alpha h}^{g_h} \mathbf{i}_{r\beta h}^{g_h} - \mathbf{i}_{r\alpha h}^{g_h} \mathbf{i}_{s\beta h}^{g_h} \right) \quad (3.70)$$

$$C_e = \sum_{h=1,3,5,7} C_{eh} \quad (3.71)$$

Cada FMM do modelo complexo pode ser visto como uma máquina de indução independente, que pode ser alimentada independentemente por um sistema balanceado de duas fases. A contribuição dos torques de cada máquina resulta em um torque equivalente apresentado em (3.71). Assim, ocorre um aumento de torque com a injeção de componentes harmônicos.

3.5 MODELO DE REGIME PERMANENTE

Como as máquinas estão desacopladas, cada par de componentes de tensão pode ter suas frequências escolhidas de forma independente. Assume-se que cada componente do estator no referencial estacionário, $\hat{v}_{s\alpha\beta h}^s$, como um sistema bifásico senoidal equilibrado com frequência ω_h .

Tomando o modelo da máquina para cada componente harmônico espacial na estrutura de referência síncrona dessa tensão específica, significa que, $\omega_{gh} = \omega_{vh}$, sendo possível obter

$$\delta_{gh} = \omega_{vh}t + \delta_{oh} \quad (3.72)$$

Na transformação do referencial genérico para o referencial síncrono de cada componente, $g_h \rightarrow v_h$. Portanto, no regime permanente as variáveis da máquina na referência síncrona serão dadas por

$$\hat{\lambda}_{s\beta\alpha h}^{v_h} = l_{sh}\hat{\mathbf{i}}_{s\beta\alpha h}^{v_h} + l_{mh}\hat{\mathbf{i}}_{r\beta\alpha h}^{v_h} \quad (3.73)$$

$$\hat{\lambda}_{r\beta\alpha h}^{v_h} = l_{sh}\hat{\mathbf{i}}_{r\beta\alpha h}^{v_h} + l_{mh}\hat{\mathbf{i}}_{s\beta\alpha h}^{v_h} \quad (3.74)$$

$$\hat{\mathbf{v}}_{s\beta\alpha h}^{v_h} = r_s\hat{\mathbf{i}}_{s\beta\alpha h}^{v_h} + j\omega_{vh}\hat{\lambda}_{s\beta\alpha h}^{v_h} \quad (3.75)$$

$$\emptyset = r_r\hat{\mathbf{i}}_{r\beta\alpha h}^{v_h} + j(\omega_{vh} - h\omega_r)\hat{\lambda}_{r\beta\alpha h}^{v_h} \quad (3.76)$$

$$c_{eh} = jphl_{mh} \left(\hat{\mathbf{i}}_{s\beta\alpha k}^{v_{h*}} \hat{\mathbf{i}}_{r\beta\alpha k}^{v_h} - \hat{\mathbf{i}}_{s\beta\alpha k}^{v_h} \hat{\mathbf{i}}_{r\beta\alpha k}^{v_{h*}} \right) = phl_{mh} \left(\hat{\mathbf{i}}_{s\alpha h}^{v_h} \hat{\mathbf{i}}_{r\beta h}^{v_h} - \hat{\mathbf{i}}_{r\alpha h}^{v_h} \hat{\mathbf{i}}_{s\beta h}^{v_h} \right) \quad (3.77)$$

$$C_e = \sum_{h=1,3,5,7} C_{eh} \quad (3.78)$$

As tensões e conjugado descritos anteriormente podem ser escritos em função das tensões e correntes abaixo.

$$\hat{\mathbf{v}}_{s\beta\alpha h}^{v_h} = r_s\hat{\mathbf{i}}_{s\beta\alpha h}^{v_h} + j\omega_{vh}l_{sh}\hat{\mathbf{i}}_{s\beta\alpha h}^{v_h} + j\omega_{vh}l_{mh}\hat{\mathbf{i}}_{r\beta\alpha h}^{v_h} \quad (3.79)$$

$$\emptyset = r_{rh}\hat{\mathbf{i}}_{r\beta\alpha h}^{v_h} + j\omega_{vhr}l_{rh}\hat{\mathbf{i}}_{r\beta\alpha h}^{v_h} + j\omega_{vhr}l_{mh}\hat{\mathbf{i}}_{s\beta\alpha h}^{v_h} \quad (3.80)$$

$$C_{eh} = jpk l_{mh} \left(\hat{\mathbf{i}}_{s\beta\alpha h}^{v_h} \hat{\mathbf{i}}_{r\beta\alpha h}^{v_h} - \hat{\mathbf{i}}_{s\beta\alpha h}^{v_h} \hat{\mathbf{i}}_{r\beta\alpha h}^{v_h} \right) \quad (3.81)$$

Sendo:

$$\omega_{vhr} = \omega_{vh} + h\omega_r \quad (3.82)$$

Definindo:

$$\hat{\mathbf{i}}_{m\beta\alpha h}^{v_h} = \hat{\mathbf{i}}_{s\beta\alpha h}^{v_h} + \hat{\mathbf{i}}_{r\beta\alpha h}^{v_h} \quad (3.83)$$

Assim sendo, as equações podem ser escritas como:

$$\hat{\mathbf{v}}_{s\beta\alpha h}^{v_h} = r_s \hat{\mathbf{i}}_{s\beta\alpha h}^{v_h} + j\omega_{vh} l_{lsh} \hat{\mathbf{i}}_{s\beta\alpha h}^{v_h} + j\omega_{vh} l_{mh} \hat{\mathbf{i}}_{m\beta\alpha h}^{v_h} \quad (3.84)$$

$$0 = \frac{r_{rh}}{\sigma_h} \hat{\mathbf{i}}_{r\beta\alpha h}^{v_h} + j\omega_{vh} l_{lrh} \hat{\mathbf{i}}_{r\beta\alpha h}^{v_h} + j\omega_{vh} l_{mh} \hat{\mathbf{i}}_{m\beta\alpha h}^{v_h} \quad (3.85)$$

Com o escorregamento definido por:

$$\sigma_h = \frac{\omega_{vh} - h\omega_r}{\omega_{vh}} \quad (3.86)$$

E as indutâncias:

$$l_{lsh} = l_{sh} - l_{mh} \quad (3.87)$$

$$l_{lrh} = l_{rh} - l_{mh} \quad (3.88)$$

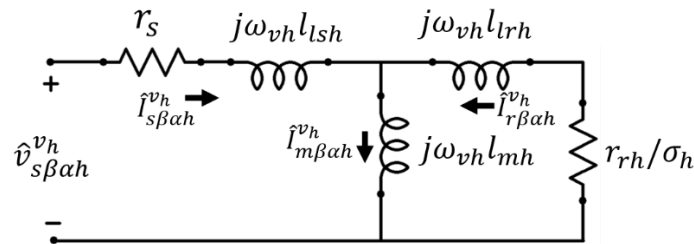


Figura 3.1– Circuito equivalente do modelo de regime permanente.

3.6 CONCLUSÕES

Neste capítulo foram apresentadas diferentes representações que simplificam e fornecem novas ferramentas de análise sobre a máquina. A transformação das variáveis permite não apenas a simplificação do modelo, mas também que o mesmo possa ser analisado em regime permanente, fornecendo assim os elementos necessários às análises de ganho de torque, as quais são alvo deste trabalho.

4 ANÁLISES DOS CIRCUITOS DE REGIME PERMANENTE

Neste capítulo é apresentada a análise do ganho de torque pela injeção de componentes harmônicas no modelo em estado estacionário ou regime permanente.

4.1 ANÁLISE EM REGIME PERMANENTE

A curva característica da Figura 4.1 apresenta o torque em função da velocidade rotórica ω_r ou do escorregamento σ_h .

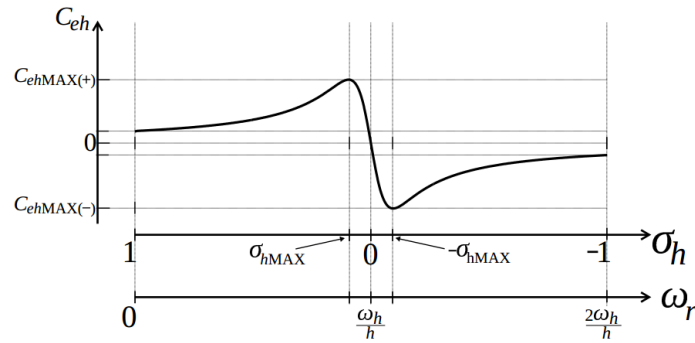


Figura 4.1- Curvas genérica Torque × Velocidade.

Analisando a curva da Figura 5.1 é possível observar que com uma frequência de alimentação igual a $\omega_h = h\omega_s$ a curva decresce no mesmo ponto ω_h / h . Se a frequência de estado estacionário de cada componente for escolhida para ser $\omega_h = h\omega_s$, todas as componentes harmônicas terão velocidade síncrona na mesma velocidade do rotor.

A partir das equações (3.84) e (3.85) a curva de torque de estado estacionário para cada componente harmônico pode ser encontrada através da equação (4.1).

$$C_{eh} = 2ph \frac{\omega_h l_{mh}^2}{\left(r_s \frac{r_{rh}}{\sigma_h} - \omega_h^2 \frac{l_{sh} l_{rh}}{\kappa_h}\right)^2 + \omega_h^2 \left(r_s l_{rh} + l_{sh} \frac{r_{rh}}{\sigma_h}\right)^2} \frac{r_{rh}}{\sigma_h} |\hat{v}_{s\beta ah}^{vh}|^2 \quad (4.1)$$

Sendo:

$$\kappa_h = \frac{l_{sh}l_{rh}}{l_{sh}l_{rh} - l_{mh}^2} = \frac{1}{1 - \frac{l_{mh}^2}{l_{sh}l_{rh}}} \quad (4.2)$$

A Figura 4.2 apresenta os gráficos *Torque* × *Escorregamento* simulados, considerando as quatro primeiras componentes harmônicas na máquina eneafásica.

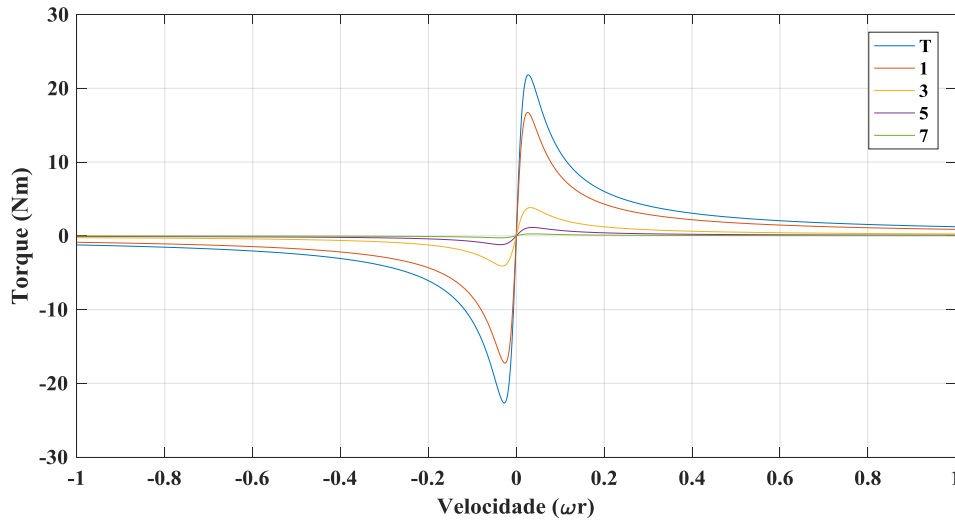


Figura 4.2- *Torque* × *escorregamento* para cada componente harmônico.

A legenda indica a curva correspondente à componente harmônica, o símbolo T na legenda indica a somatória da contribuição particular de cada torque.

Da Figura 4.2, pode-se observar que cada componente harmônico espacial se comporta como uma máquina de $p \times h$ polos. As curvas são apresentadas para uma frequência síncrona $\omega_s = 100 \frac{rad}{s}$, cada componente de frequência foi escolhido como $\omega_h = h\omega_s$, assim a amplitude da tensão é escolhida como:

$$|\hat{v}_{s\beta\alpha h}^{vh}| = \frac{|\hat{v}_{s\beta\alpha 1}^{v1}|}{h} \quad (4.3)$$

Dessa forma, o torque total é melhorado pela injeção das terceira e quinta componentes harmônicas nas tensões de fase. Percebe-se também que, à medida que a

ordem da componente harmônica aumenta, menor será sua contribuição no ganho de torque.

A componente de terceiro harmônico tem valor mais expressivo na contribuição do torque. Para efeitos de comparação a tabela 4.1 fornece um comparativo entre os valores máximos de torque obtidos para cada componente harmônico.

Tabela 4.1 - Torques máximos para cada componente harmônico.

$C_{e_{max}}$	$C_{e1_{max}}$	$C_{e3_{max}}$	$C_{e5_{max}}$	$C_{e7_{max}}$
21.8245 N.m	16.72 N.m	3.8305 N.m	1.1225 N.m	0.26 N.m
$C_{e_{max}}/C_{e1_{max}}$	$C_{e3_{max}}/C_{e1_{max}}$		$C_{e5_{max}}/C_{e1_{max}}$	$C_{e7_{max}}/C_{e1_{max}}$
1.305 N.m	0.229 N.m		0.073 N.m	0.0155 N.m

Nota-se que o torque total $C_{e_{max}}$ é 30% maior que o torque produzido pela componente fundamental $C_{e1_{max}}$ sozinho. Por outro lado, o torque produzido pela componente de sétimo harmônico pode ser considerado desprezível.

Através das equações apresentadas no capítulo anterior, pode-se perceber que os componentes do circuito de regime permanente sofrem modificação, a depender da componente harmônica injetada no modelo. A tabela 4.2 apresenta as principais impedâncias em função das componentes harmônicas simuladas.

Tabela 4.2- Impedâncias do circuito equivalente.

	1º Harmônico	3º Harmônico	5º Harmônico
Impedância Equivalente	0.0298 Ω	0.0173 Ω	0.0038 Ω

Além de baixo torque, como apresentado anteriormente, à medida que se aumenta a ordem da componente harmônica, é reduzida o valor da impedância equivalente da máquina. Isso acarretará um aumento na corrente na máquina.

4.1.1 Tensões de fase em estado estacionário

Se cada componente harmônico espacial, em seu quadro de referência síncrona, for alimentado pela tensão no regime permanente, encontra-se

$$\hat{\mathbf{v}}_{s\beta ah}^{v_h} = \sqrt{\frac{9}{2}} \frac{v_h}{\sqrt{2}} e^{j\phi_h} \quad (4.4)$$

De (3.72) e (4.4), encontra-se (5.5).

$$\mathbf{v}_{s\alpha\beta h}^{v_h} = \mathbf{T}_c^{-1} \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{v}}_{s\beta ah}^{v_h} \\ \hat{\mathbf{v}}_{s\beta ah}^{v_h} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{9}{2}} \frac{v_h}{\sqrt{2}} \text{sen}(\phi_h) \\ \sqrt{\frac{9}{2}} \frac{v_h}{\sqrt{2}} \text{cos}(\phi_h) \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

As tensões de (4.5) podem ser convertidas de volta para a referência estacionária através de (3.63).

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_{s\alpha\beta h}^{s_h} &= \mathbf{G}_h^{-1} \mathbf{v}_{\alpha\beta h}^{v_h} = \begin{bmatrix} \text{sen}(\delta_{gh}) & -\text{cos}(\delta_{gh}) \\ \text{cos}(\delta_{gh}) & \text{sen}(\delta_{gh}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{9}{2}} \frac{v_h}{\sqrt{2}} \text{sen}(\phi_h) \\ \sqrt{\frac{9}{2}} \frac{v_h}{\sqrt{2}} \text{cos}(\phi_h) \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} -\sqrt{\frac{9}{2}} \frac{v_h}{\sqrt{2}} \text{cos}(\delta_{gh} + \phi_h) \\ \sqrt{\frac{9}{2}} \frac{v_h}{\sqrt{2}} \text{sen}(\delta_{gh} + \phi_h) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4.6)$$

A frequência de cada componente é definida é dada por

$$\delta_{gh} = \omega_{vh} t = h\omega_s t \quad (4.7)$$

Assim é possível obter

$$\mathbf{v}_{s\alpha\beta h}^{s_h} = \begin{bmatrix} -\sqrt{\frac{9}{2}} \frac{v_h}{\sqrt{2}} \text{cos}(h\omega_s t + \phi_h) \\ \sqrt{\frac{9}{2}} \frac{v_h}{\sqrt{2}} \text{sen}(h\omega_s t + \phi_h) \end{bmatrix}. \quad (4.8)$$

Finalmente as tensões de fase podem ser transformadas em (4.9).

$$\mathbf{v}_s^s = \sqrt{\frac{2}{9}} \mathbf{T}_{s\alpha\beta} \mathbf{v}_{s\alpha\beta}^s = \sqrt{\frac{2}{9}} \mathbf{T}_{s\alpha\beta} \begin{bmatrix} -\sqrt{\frac{9}{2}} \frac{v_1}{\sqrt{2}} \cos(\omega_s t + \phi_1) \\ \sqrt{\frac{9}{2}} \frac{v_1}{\sqrt{2}} \sin(\omega_s t + \phi_1) \\ -\sqrt{\frac{9}{2}} \frac{v_3}{\sqrt{2}} \cos(3\omega_s t + \phi_3) \\ \sqrt{\frac{9}{2}} \frac{v_3}{\sqrt{2}} \sin(3\omega_s t + \phi_3) \\ -\sqrt{\frac{9}{2}} \frac{v_5}{\sqrt{2}} \cos(5\omega_s t + \phi_5) \\ \sqrt{\frac{9}{2}} \frac{v_5}{\sqrt{2}} \sin(5\omega_s t + \phi_5) \\ -\sqrt{\frac{9}{2}} \frac{v_7}{\sqrt{2}} \cos(7\omega_s t + \phi_7) \\ \sqrt{\frac{9}{2}} \frac{v_7}{\sqrt{2}} \sin(7\omega_s t + \phi_7) \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

O que resulta em

$$\hat{\mathbf{v}}_s^s = \sum_{h=1,3,5,7} \begin{bmatrix} -v_h \cos h(\omega_s t + \phi_h) \\ -v_h \cos h(\omega_s t + \phi_h + \pi/9) \\ -v_h \cos h(\omega_s t + \phi_h + 2\pi/9) \\ -v_h \cos h(\omega_s t + \phi_h + 6\pi/9) \\ -v_h \cos h(\omega_s t + \phi_h + 7\pi/9) \\ -v_h \cos h(\omega_s t + \phi_h + 8\pi/9) \\ -v_h \cos h(\omega_s t + \phi_h + 9\pi/9) \\ -v_h \cos h(\omega_s t + \phi_h + 10\pi/9) \end{bmatrix}. \quad (4.10)$$

As tensões de fase em (4.9) são os quatro primeiros harmônicos ímpares da série Fourier de um sinal periódico, que pode ser escolhido para se adequar a vários tipos de sinais periódicos simétricos. Portanto, a forma de onda de tensão estável pode ser escolhida arbitrariamente. A tensão de fase para as características de velocidade de torque tem magnitudes definidas em (4.3), mas os ângulos de fase ϕ_h podem ser escolhidos arbitrariamente. Sendo que nos resultados será explicado como foram escolhidos os valores de ângulos para compor as formas de onda utilizadas.

4.2 CONCLUSÕES

Este capítulo constitui a análise teórica do ganho de torque em função da injeção de componentes harmônicos no modelo da máquina. Assim foi possível definir que as primeiras componentes contribuem de forma mais significativa para o ganho de torque.

Além disso, é possível analisar a redução da impedância da máquina com a elevação da ordem do harmônico injetado, ou seja, as componentes de ordem mais elevada, além de ter baixíssima contribuição na elevação do conjugado eletromagnético, provocam um aumento na corrente o que pode afetar a vida útil da máquina.

5 DESCRIÇÃO DA BANCADA EXPERIMENTAL

Este capítulo apresenta os equipamentos utilizados no desenvolvimento do trabalho. Usados para fazer os testes e obter os resultados experimentais.

5.1 BANCADA E INVERSOR

A bancada para coleta de resultados experimentais é apresentada na figura 5.1.

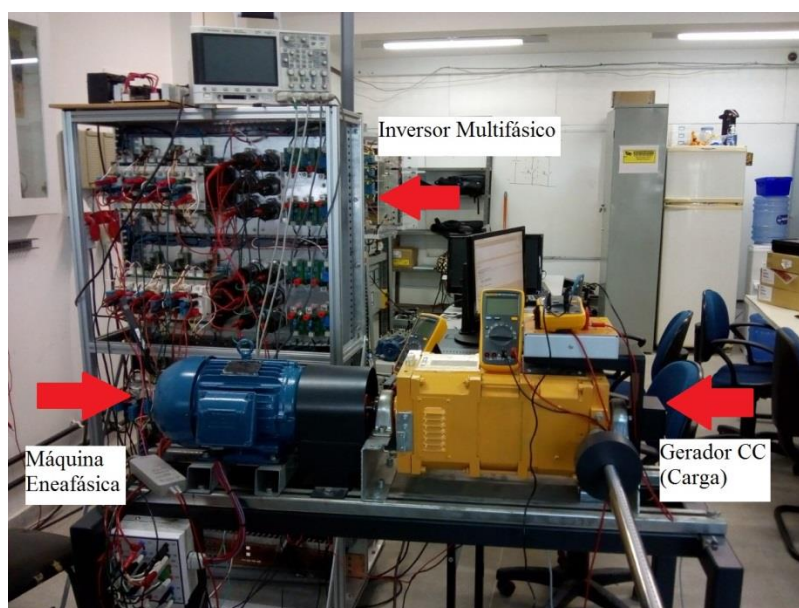


Figura 5.1 – Equipamento utilizado para realização dos procedimentos experimentais.

No total, o inversor possui um total de 18 braços de chaves semicondutoras. Um braço é apresentado na Figura 5.2 (a), já a Figura 5.2 (b) apresenta os braços compondo um módulo de doze braços montado no inversor.



(a)



(b)

Figura 5.2 - Chave (a) e Módulo de chaves semicondutoras (b).

O dispositivo que faz a interface entre os sinais e os tornam adequados para a potência das chaves é o *driver*, apresentado na Figura 5.3.

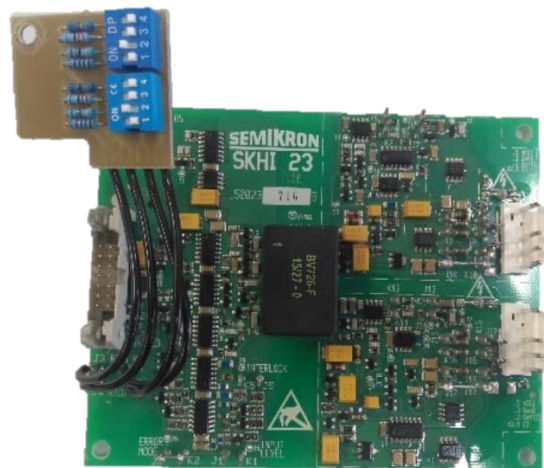


Figura 5.3 - Driver SKHI 23/12.

Tanto o *driver* como as chaves semicondutoras são do mesmo fabricante, a SEMIKRON®. O *Driver* SKHI 23/12 é compatível com tensões de entrada de 5V a 15V, pode comandar duas chaves de forma independente, comanda chaves que podem operar com tensões de até 1200V, possui isolamento e tempo morto.

5.2 PROCESSADOR DIGITAL DE SINAIS (DSP)

O processador utilizado no acionamento das chaves e para toda a programação foi o TMS320F28379, plataforma F28379D Delfino Experimenter Kit da empresa Texas Instruments®. Uma imagem da plataforma é apresentada na Figura 5.4.

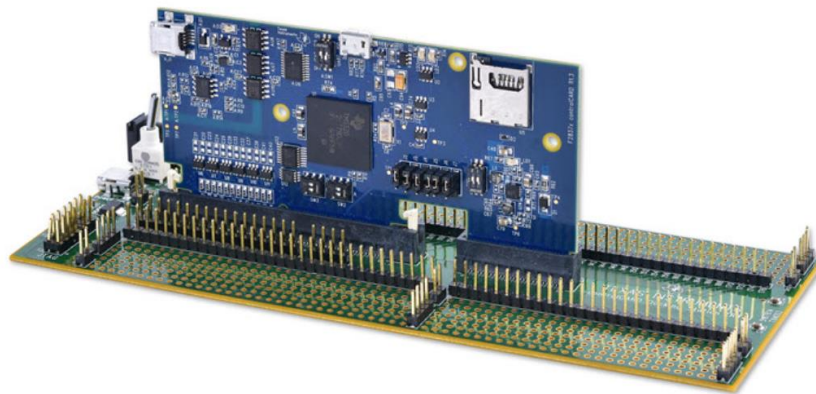


Figura 5.4 - Plataforma F28379D Delfino Experimenter Kit.

5.3 SISTEMA ELETROMECAÂNICO DE FRENAGEM

Com a finalidade de se testar a máquina operando com cargas em seu eixo foi acoplada ao eixo da máquina, um gerador CC do fabricante DeLorenzo®, mostrado na figura 6.5. A carga resistiva deve ser alimentada pelo circuito de armadura da máquina CC., como a máquinas CC e a eneafásica estão conectadas pelo eixo, o gerador CC impõe uma carga, elevando o conjugado da máquina. Dessa forma podem ser coletados os resultados para a máquina de nove fases com carga.



Figura 5.5 - Gerador CC da DeLorenzo.

5.4 MEDIDOR DE VELOCIDADE E CONJUGADO ELETROMAGNÉTICO

O equipamento que foi utilizado de forma auxiliar para fazer medições de velocidade e conjugado eletromagnético da máquina, conforme mostrado na figura 5.6, para se obter uma comparação com os equipamentos utilizados que foram um tacômetro digital usado para medir velocidade mostrado na figura 5.7 e um sistema de barras para auferir o conjugado mecânico da máquina mostrado na figura 5.8.



Figura 5.6 – Medidor da DeLorenzo.



Figura 5.7 – Tacômetro digital.

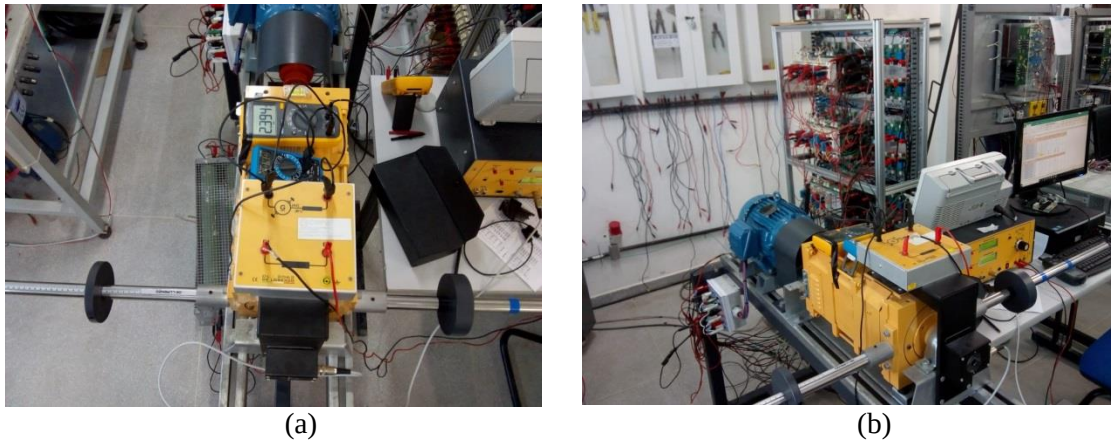


Figura 5.8 – Sistema de barras (a) vista superior e (b) lateral.

O medidor mostrado na figura 5.6 foi utilizado para alimentar o campo do gerador CC para gerar carga à máquina. Sendo que o intervalo de tensão usado nos terminais do gerador CC nos testes realizados foi de 0V a 180V, pois com a tensão em 180V o gerador CC atinge o limite de corrente permitida que é de 11 A. Então, as medições de torque, velocidade, correntes nas fases, foram feitas baseados em pontos distribuídos neste intervalo de tensão.

5.5 CONCLUSÕES

Este capítulo apresentou os detalhes da bancada experimental. Com a capacidade de acionamento do conversor e os equipamentos disponíveis, pôde-se realizar não apenas o acionamento, mas realizar testes onde o equipamento simula a aplicação com cargas reais.

6 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Para realizar os procedimentos experimentais foi adotada uma metodologia de testes e quatro resultados diferentes foram adquiridos para cada nível de amplitude da componente fundamental.

De acordo com (4.4), (4.9) e (4.10) é possível manipular a forma de onda utilizada. A seguir são descritos os dois tipos de forma de onda utilizados no procedimento experimental.

O ângulo ϕ_h em (4.10) pode ser escolhido de forma arbitrária, gerando diferentes formas de onda.

A primeira forma de onda utilizada foi gerada de acordo com os dados a seguir e mostrada na figura 6.1 com a injeção harmônica até a sétima ordem.

$$v_h = \frac{v_s}{h}, h = 1,3,5,7, \quad (6.1)$$

$$\phi_h = 0, h = 1,5, \quad (6.2)$$

$$\phi_h = \pi, h = 3,7 \quad (6.3)$$

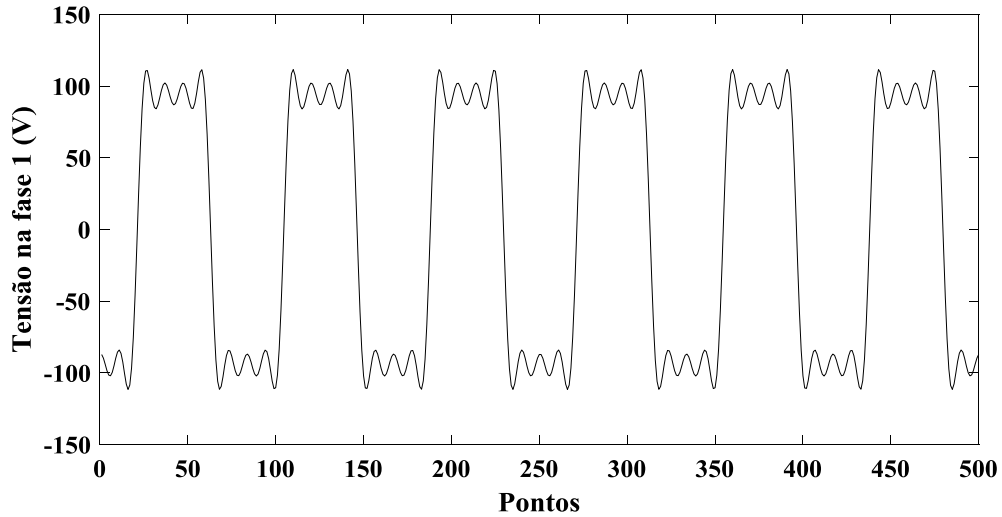


Figura 6.1- Tensão na forma de onda A com a sétima ordem harmônica.

Sendo que v_s é a componente da soma das contribuições harmônicas conforme apresentado em (4.10). Para simplificar a discussão ao decorrer do procedimento experimental, adota-se como termo de referência para esta forma de onda como “A”.

A segunda forma de onda utilizada foi gerada de acordo com os dados a seguir e mostrada na figura 6.2 com injeção harmônica até a sétima ordem.

$$v_h = \frac{v_s}{h}, h = 1,3,5,7, \quad (6.4)$$

$$\phi_h = 0, h = 1,3, \quad (6.5)$$

$$\phi_h = \pi, h = 5,7 \quad (6.6)$$

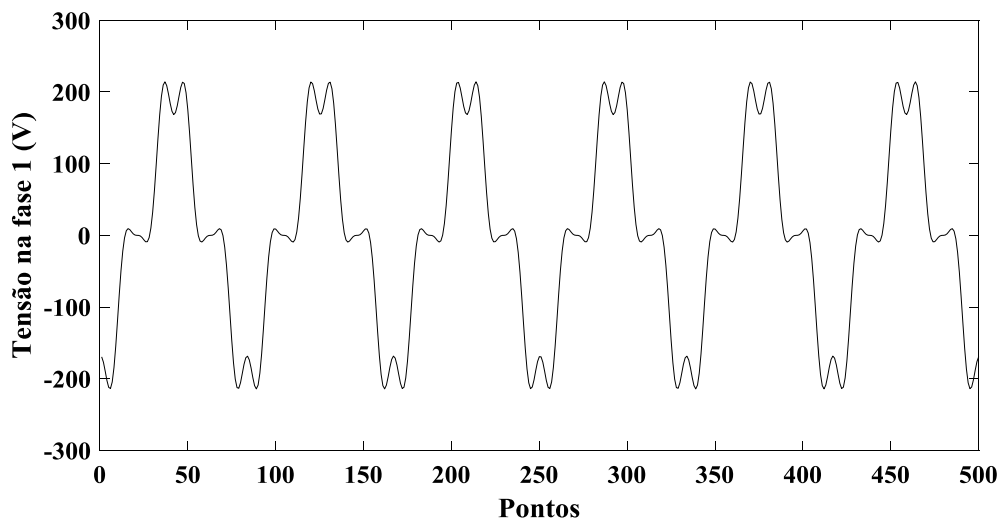


Figura 6.2- Tensão na forma de onda B com a sétima ordem harmônica.

Para simplificar a discussão ao decorrer do procedimento experimental, adota-se como termo de referência para esta forma de onda como “B”.

A seguir serão apresentadas as formas de onda A na figura 6.3 e na forma de onda B segundo a figura 6.4. Gráficos que foram retirados dos valores apresentados no *Code Composer Studio*. Sendo que são apresentadas (a) com apenas a componente fundamental, (b) componente fundamental mais terceiro harmônico, (c) componente fundamental somado com terceiro e quinto harmônico e (d) componente fundamental somado com terceiro, quinto e sétimo harmônico.

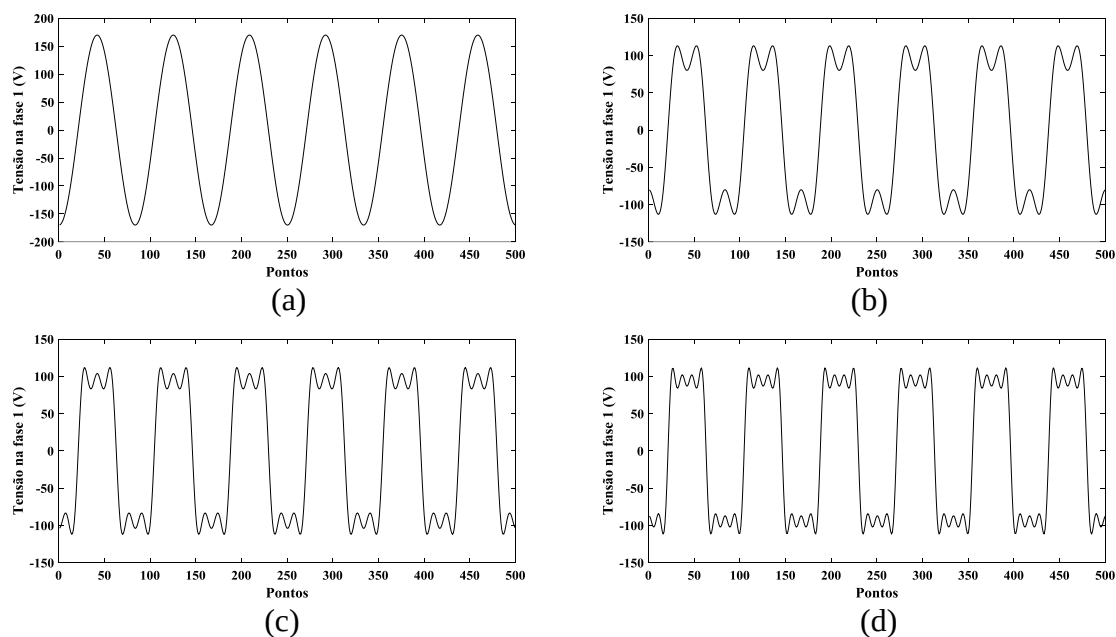


Figura 6.3 – Tensões de referência para a forma de onda A.

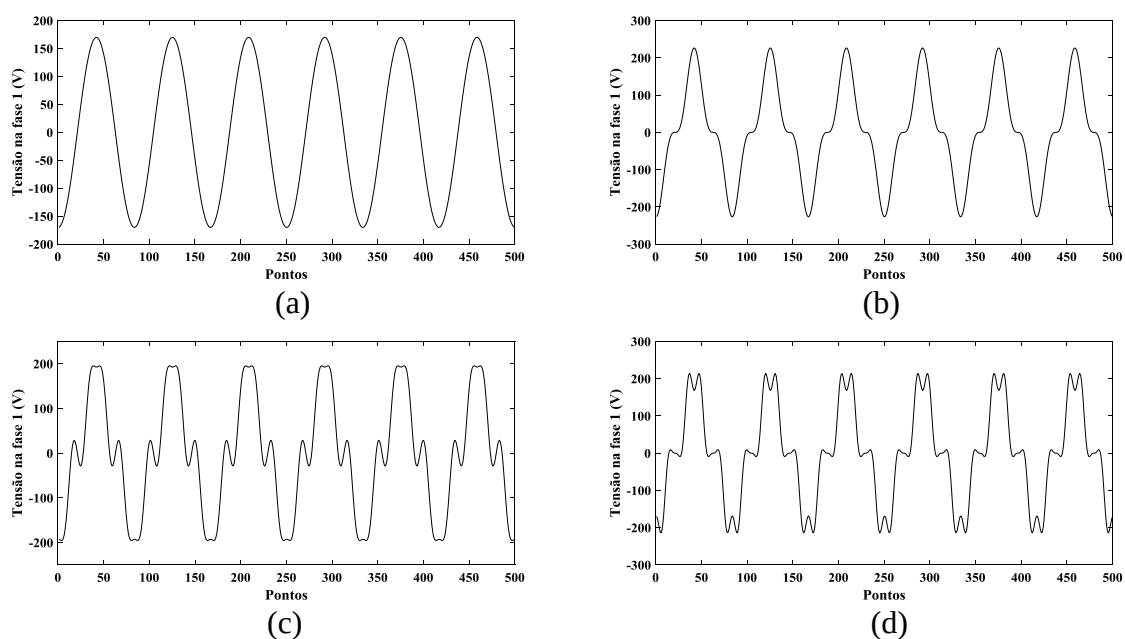


Figura 6.4 – Tensões de referência para a forma de onda B.

6.1 TESTES PARA A AMPLITUDE DA COMPONENTE FUNDAMENTAL EM 170 V

De acordo com a configuração utilizada, o barramento CC foi alterado para se ter o índice de modulação utilizado próximo de 0,9. A tabela 6.1 mostra os valores de tensão utilizados no barramento CC para o nível de amplitude da componente fundamental em 170V para o formato de onda A. Nas tabelas abaixo (6.1) e (6.2) todas

as formas de injeção seguem (6.1)-(6.6) com exceção de uma medição (componente fundamental mais terceiro harmônico), caso em que a amplitude de fase é dividida por dois no terceiro harmônico aumentando assim sua amplitude.

Tabela 6.1 - Tensões e barramento CC utilizados na forma de onda A.

Tensões	Barramento (V)
Apenas componente fundamental	370
Fundamental mais terceiro harmônico	350
Fundamental mais terceiro e quinto harmônico	340
Fundamental mais terceiro, quinto e sétimo harmônico	350
Fundamental mais terceiro harmônico com amplitude aumentada	410

A tabela 6.2 mostra os valores de tensão utilizados no barramento CC para o nível da componente fundamental em 170V para o formato de onda B.

Tabela 6.2 - Tensões e barramento CC utilizados na forma de onda B.

Tensões	Barramento (V)
Apenas componente fundamental	370
Fundamental mais terceiro harmônico	480
Fundamental mais terceiro e quinto harmônico	430
Fundamental mais terceiro, quinto e sétimo harmônico	440

Fundamental mais terceiro harmônico com amplitude aumentada	530
---	-----

A seguir serão apresentadas as imagens coletadas pelo osciloscópio da tensão e corrente observadas em uma das fases da máquina eneafásica para a forma de onda A na figura 6.5 e B na figura 6.6, (a) primeira harmônica, (b) primeira harmônica somada com a terceira, (c) primeira harmônica somada com terceira e quinta e (d) primeira harmônica somada com terceira, quinta e sétima de maneira respectiva. Ressaltando que todas estas imagens foram coletadas na situação de plena carga que foi estabelecida em um nível de tensão de 180V no gerador CC utilizado como freio mecânico.

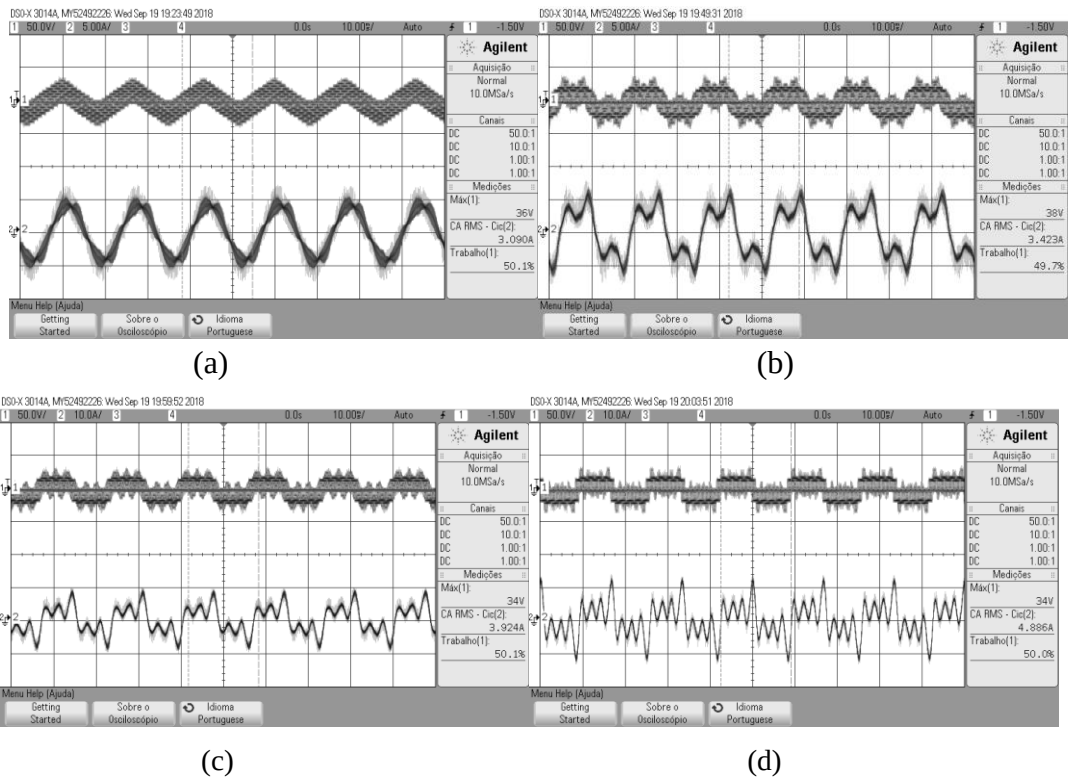


Figura 6.5- Tensão e corrente da fase 1 na forma de onda A.

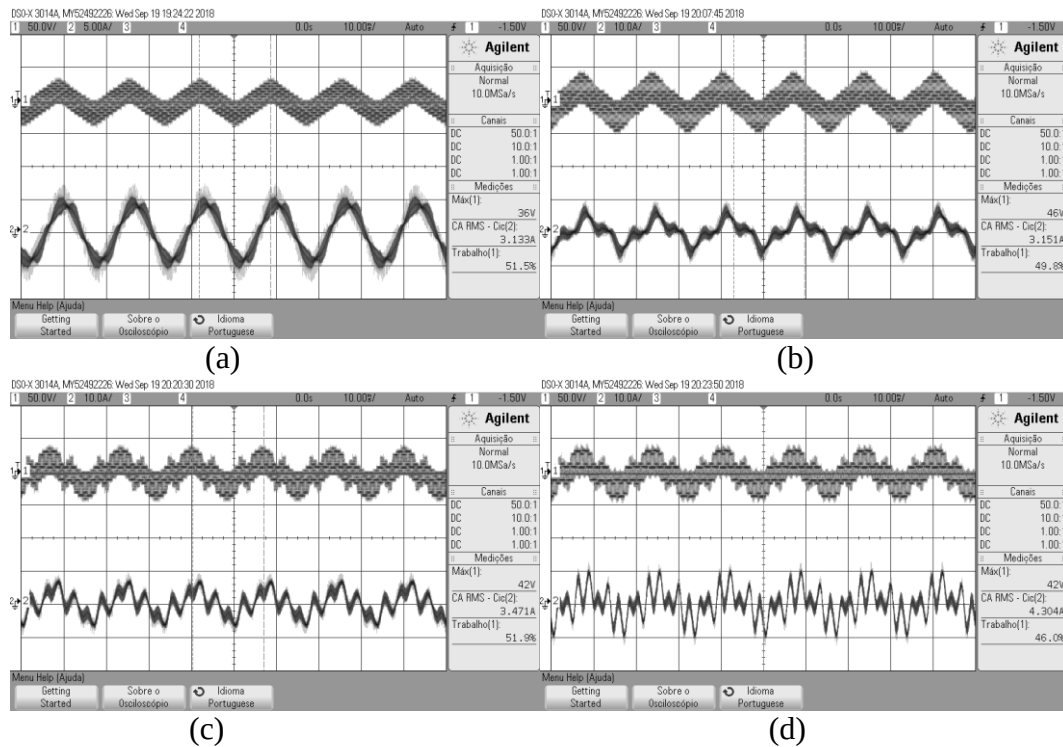


Figura 6.6 – Tensão e corrente da fase 1 na forma de onda B.

6.1.1 Configuração assimétrica a forma de onda A

Primeiramente os testes foram realizados com a máquina eneafásica na configuração assimétrica com o ângulo $\alpha = 20^\circ$ entre as bobinas conforme apresentado na figura 2.1, usando a forma de onda A.

É apresentado a seguir o gráfico do conjugado mecânico em relação ao escorregamento na figuras 6.7.

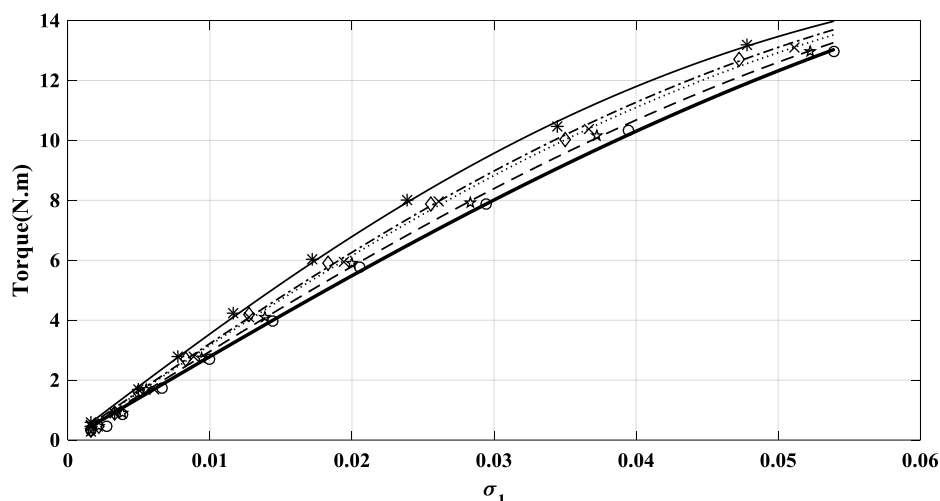


Figura 6.7 - Resultados experimentais de Torque x escorregamento, considerando apenas a componente fundamental (—○), componente fundamental e harmônico de ordem 3 (···△), componente fundamental e harmônico de ordem 3 com ganho de 50% em amplitude (—·△), componente fundamental e harmônicos de ordem 3 e 5 (---☆), componente fundamental e harmônicos de ordem 3, 5 e 7 (—☆).

É apresentado o gráfico de correntes de fase em relação ao escorregamento na figura 6.8.

Sendo que é possível observar na figura 6.7 que a maior contribuição de torque foi com a injeção da componente fundamental e harmônicos de ordem 3, 5 e 7.

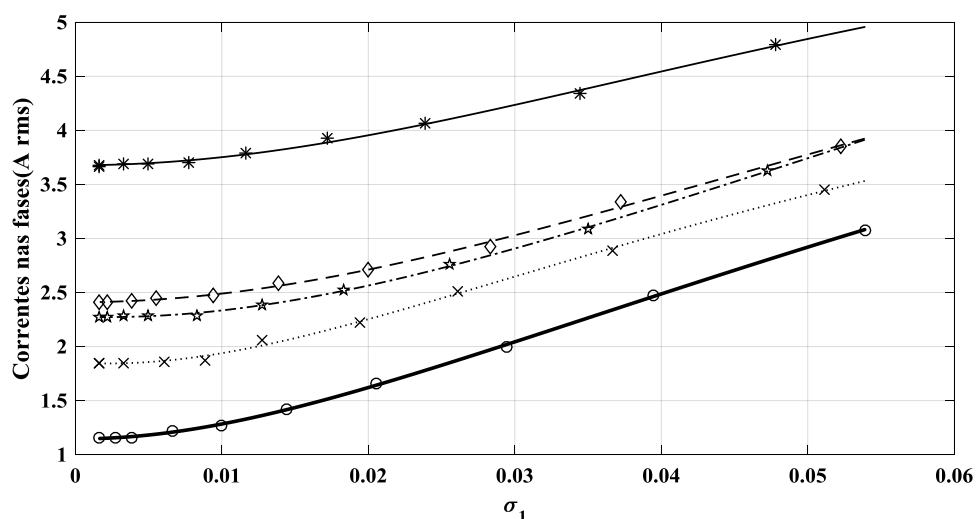


Figura 6.8 - Resultados experimentais de Corrente nas fases x escorregamento, considerando apenas a componente fundamental (—○), componente fundamental e harmônico de ordem 3 (···△), componente fundamental e harmônico de ordem 3 com ganho de 50% em amplitude (—·△), componente fundamental e harmônicos de ordem 3 e 5 (---☆), componente fundamental e harmônicos de ordem 3, 5 e 7 (—☆).

Através da figura 6.8 observa-se que o maior nível de corrente nas fases acontece com a injeção da componente fundamental e harmônicos de ordem 3,5 e 7.

A seguir é apresentado o gráfico dos ganhos de conjugado com a injeção harmônica em relação a componente fundamental na figura 6.9.

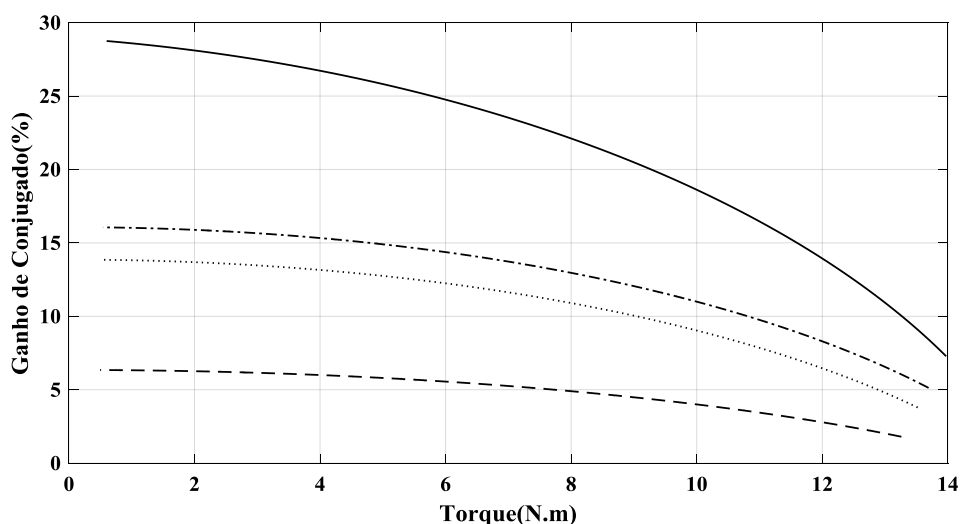


Figura 6.9 - Ganhos de conjugado em (%), considerando o ganho da injeção harmônica em relação componente fundamental, componente fundamental e harmônico de ordem 3 (···), componente fundamental e harmônico de ordem 3 com ganho de 50% em amplitude (- · -), componente fundamental e harmônicos de ordem 3 e 5 (- -), componente fundamental e harmônicos de ordem 3, 5 e 7 (—).

Sendo que no caso da figura 6.9 a maior contribuição de torque aconteceu com a injeção da componente fundamental e harmônicos de ordem 3,5 e 7. A seguir é apresentado o gráfico da potência ativa de entrada em relação ao escorregamento na figura 6.10.

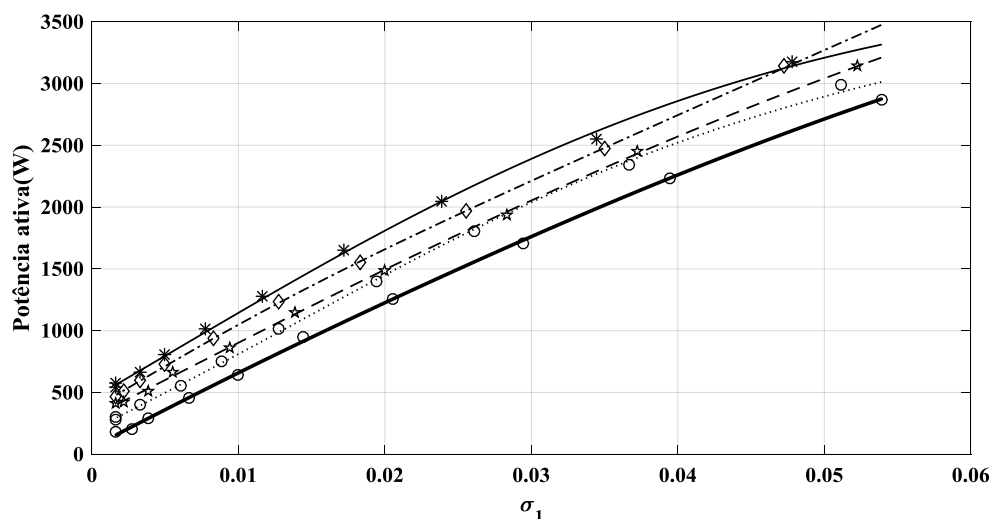


Figura 6.10 - Resultados experimentais de *Potência ativa x deslizamento*, considerando apenas a componente fundamental (—), componente fundamental e harmônico de ordem 3 (---), componente fundamental e harmônico de ordem 3 com ganho de 50% em amplitude (— ·), componente fundamental e harmônicos de ordem 3 e 5 (— · ·), componente fundamental e harmônicos de ordem 3, 5 e 7 (— · · ·).

Verifica-se na figura 6.10 que a maior potência ativa foi encontrada com a injeção da componente fundamental e harmônicos de ordem 3, 5 e 7.

O gráfico da relação entre a potência mecânica e deslizamento é apresentado na figura 6.11.

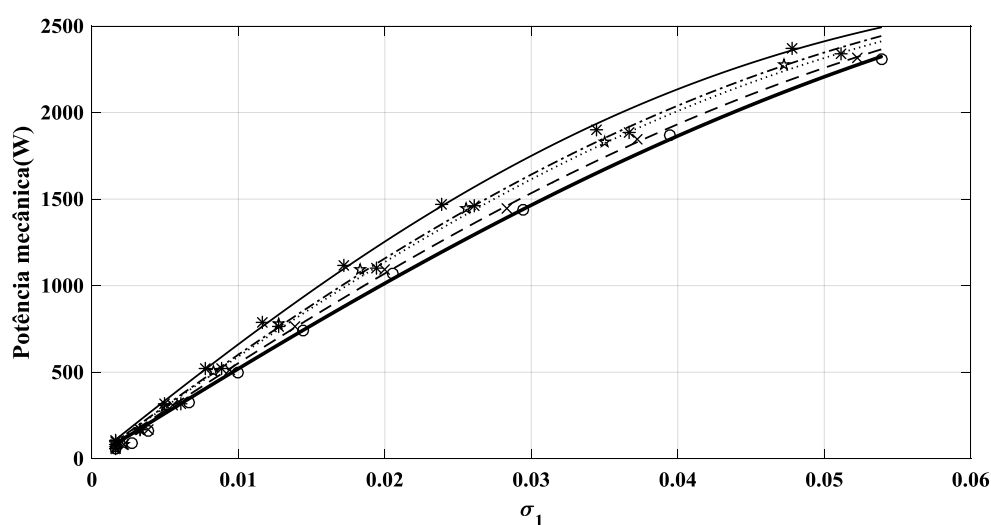


Figura 6.11 - Resultados experimentais de *Potência mecânica x deslizamento*, considerando apenas a componente fundamental (—), componente fundamental e harmônico de ordem 3 (---), componente fundamental e harmônico de ordem 3 com ganho de 50% em amplitude (— ·),

componente fundamental e harmônicos de ordem 3 e 5 (— —), componente fundamental e harmônicos de ordem 3, 5 e 7 (—).

Como foi visto nas figura 6.11, a maior potência mecânica foi encontrada com a injeção da componente fundamental e harmônicos de ordem 3,5 e 7. O gráfico de *Rendimento x escorregamento* é apresentado na figura 6.12.

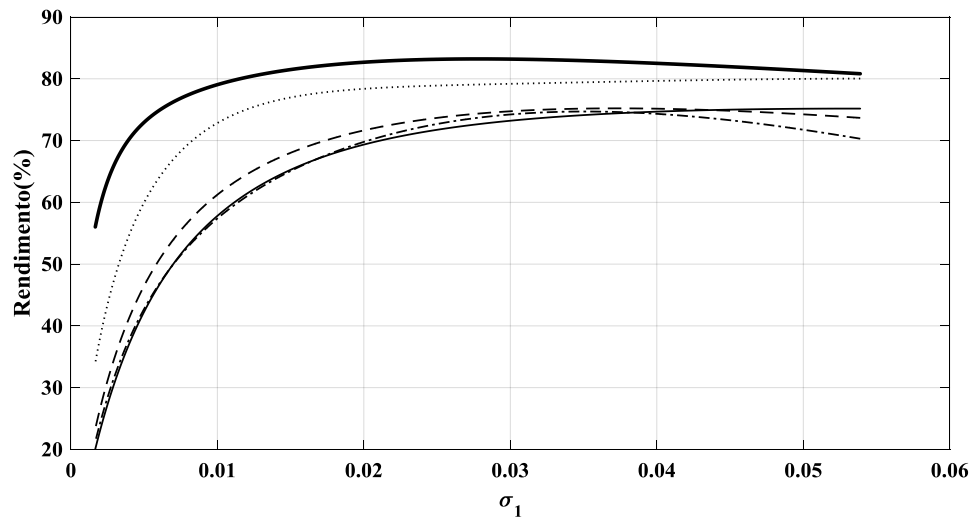


Figura 6.12 - Resultados experimentais de *Rendimento x escorregamento*, considerando apenas a componente fundamental (—), componente fundamental e harmônico de ordem 3 (···), componente fundamental e harmônico de ordem 3 com ganho de 50% em amplitude (— ·), componente fundamental e harmônicos de ordem 3 e 5 (— —), componente fundamental e harmônicos de ordem 3, 5 e 7 (—).

Conforme visto na figura 6.12, o maior rendimento foi obtido com a injeção apenas da componente fundamental e o menor rendimento foi encontrado com a injeção da componente fundamental e harmônicos de ordem 3,5 e 7. A relação entre rendimento e torque é apresentado na figura 6.13.

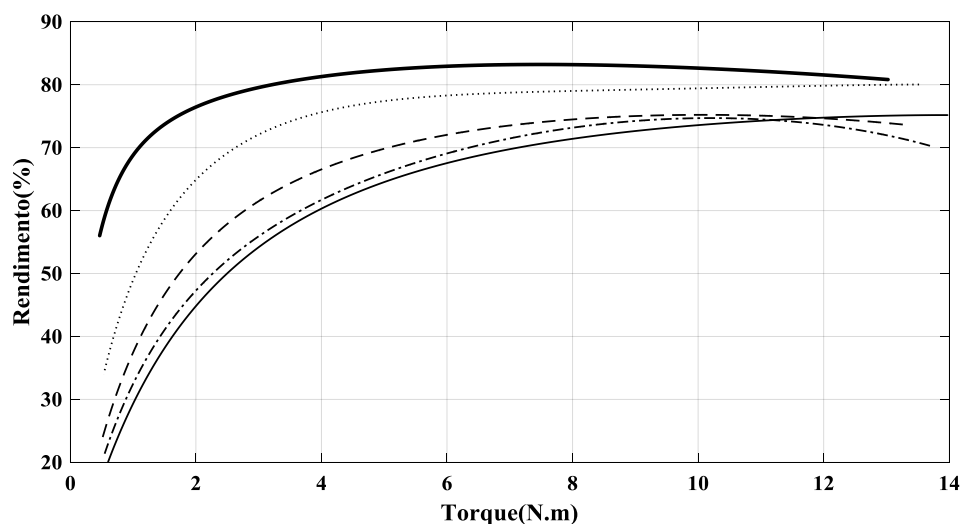


Figura 6.13- Resultados experimentais de *Rendimento x torque*, considerando apenas a componente fundamental (—), componente fundamental e harmônico de ordem 3 (···), componente fundamental e harmônico de ordem 3 com ganho de 50% em amplitude (— ·), componente fundamental e harmônicos de ordem 3 e 5 (— —), componente fundamental e harmônicos de ordem 3, 5 e 7 (—).

Conforme visto na figura 6.13, o maior rendimento foi obtido com a injeção apenas da componente fundamental. O gráfico do *fator de potência x torque* é mostrado na figura 6.14.

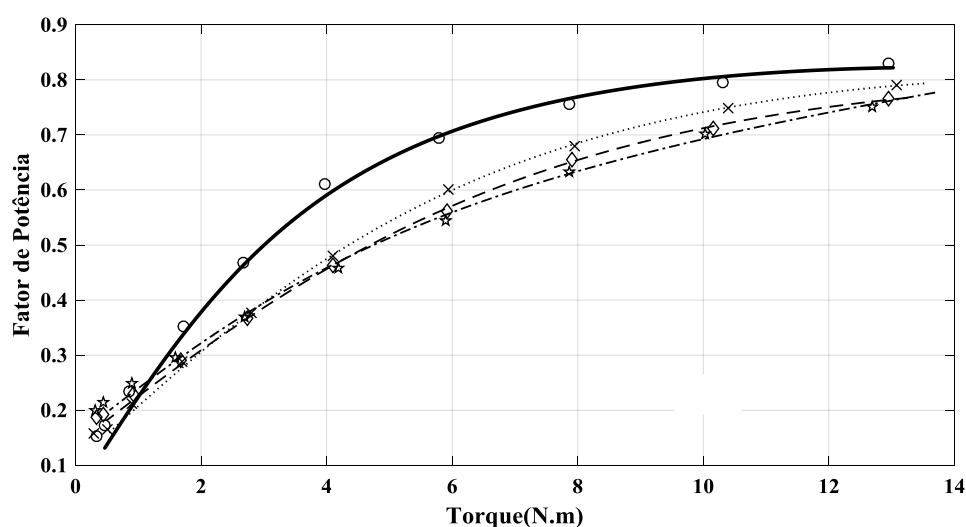


Figura 6.14 - Resultados experimentais de *fator de potência x torque*, considerando apenas a componente fundamental (—), componente fundamental e harmônico de ordem 3 (···), componente fundamental e harmônico de ordem 3 com ganho de 50% em amplitude (— ·), componente fundamental e harmônicos de ordem 3 e 5 (— —).

Diante da figura 6.14 é observado que o maior fator de potência é encontrado através da injeção apenas da componente fundamental. A figura 6.15 mostra o aumento da corrente nas fases conforme o torque é aumentado.

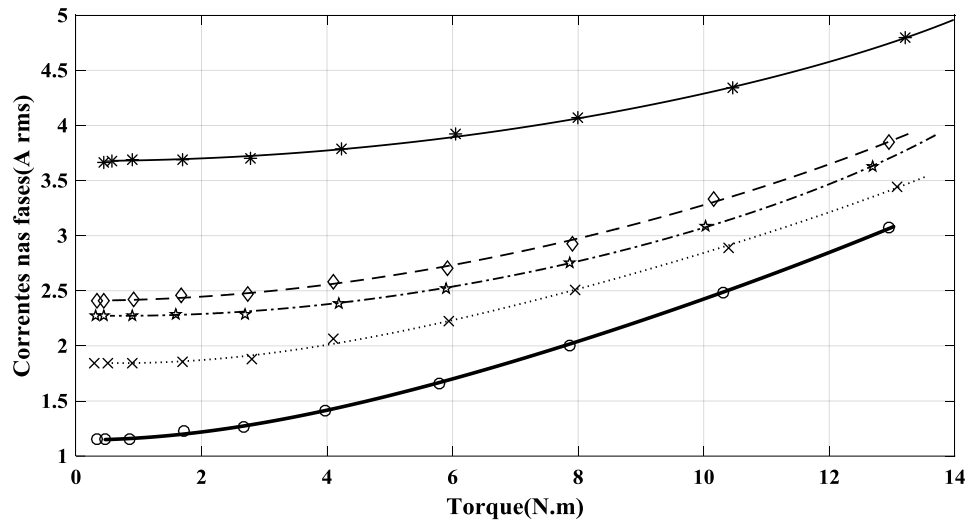


Figura 6.15- Resultados experimentais de *Corrente nas fases x torque*, considerando apenas a componente fundamental (—), componente fundamental e harmônico de ordem 3 (---), componente fundamental e harmônico de ordem 3 com ganho de 50% em amplitude (— · —), componente fundamental e harmônicos de ordem 3 e 5 (— —), componente fundamental e harmônicos de ordem 3, 5 e 7 (—).

Observações feitas sobre esse teste:

- O ganho de torque da componente fundamental juntamente com terceiro, quinto e sétimo harmônico foi o maior, mas decadente com o acréscimo de carga;
- O rendimento geral foi estável, sendo que o menor rendimento foi obtido com a injeção das componentes harmônicas de terceira, quinta e sétima ordem. E a injeção da componente fundamental e harmônico de ordem 3 com ganho de 50% em amplitude, o rendimento apresenta leve queda com o aumento da carga mecânica;
- O fator de potência diminui com a injeção harmônica;
- A amplitude da corrente nas fases se eleva conforme aumenta-se o nível de injeção harmônica;

- Redução no barramento CC com o uso da forma de onda A.

6.1.2 Configuração assimétrica com a forma de onda B

Este teste foi realizado com a máquina eneafásica na configuração assimétrica com o ângulo $\alpha = 20^\circ$ entre as bobinas conforme apresentado na figura 2.1, usando a forma de onda B.

É apresentado a seguir o gráfico do conjugado mecânico em relação ao escorregamento na figura 6.16.

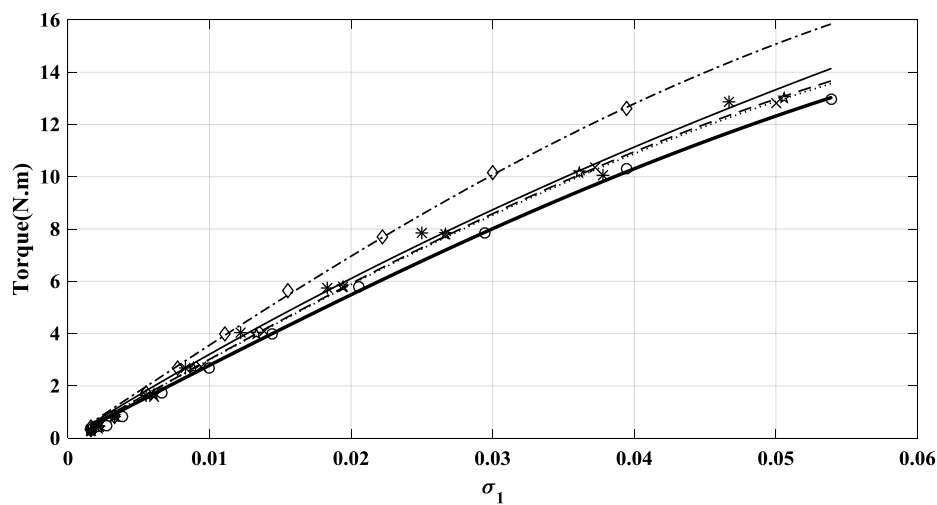


Figura 6.16 - Resultados experimentais de Torque x escorregamento, considerando apenas a componente fundamental (—), componente fundamental e harmônico de ordem 3 (---), componente fundamental e harmônico de ordem 3 com ganho de 50% em amplitude (— ·), componente fundamental e harmônicos de ordem 3 e 5 (— —), componente fundamental e harmônicos de ordem 3, 5 e 7 (—).

Neste teste o maior ganho de torque foi encontrado pela injeção da componente fundamental e harmônico de ordem 3 com ganho de 50% em amplitude, conforme observado na figura 6.16.

O gráfico de *corrente nas fases x escorregamento* é apresentado na figura 6.17.

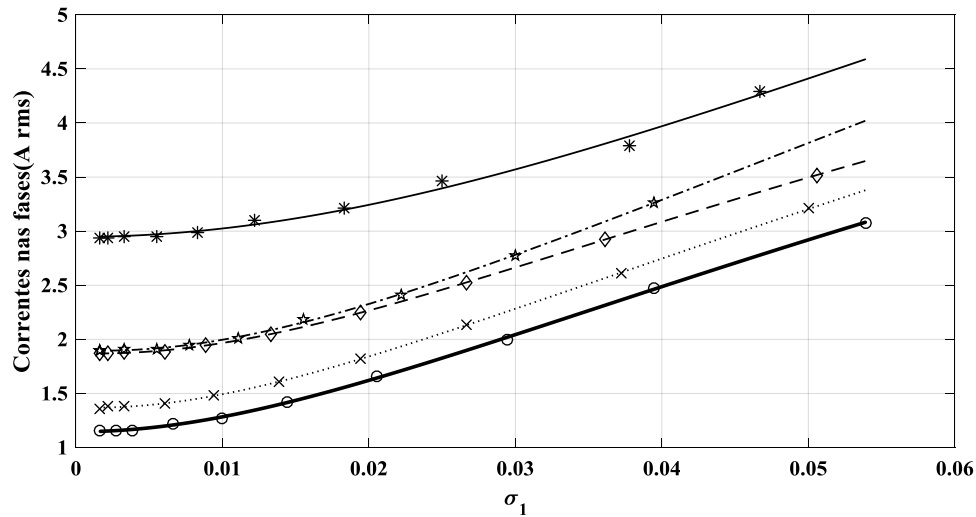


Figura 6.17 - Resultados experimentais de *Corrente nas fases x escorregamento*, considerando apenas a componente fundamental (—), componente fundamental e harmônico de ordem 3 (···), componente fundamental e harmônico de ordem 3 com ganho de 50% em amplitude (— ·), componente fundamental e harmônicos de ordem 3 e 5 (— —), componente fundamental e harmônicos de ordem 3, 5 e 7 (—).

Através da figura 6.17 observa-se que o maior nível de corrente nas fases acontece com a injeção da componente fundamental e harmônicos de ordem 3, 5 e 7.

A seguir é apresentado o gráfico dos ganhos de conjugado com a injeção harmônica em relação a componente fundamental na figura 6.18.

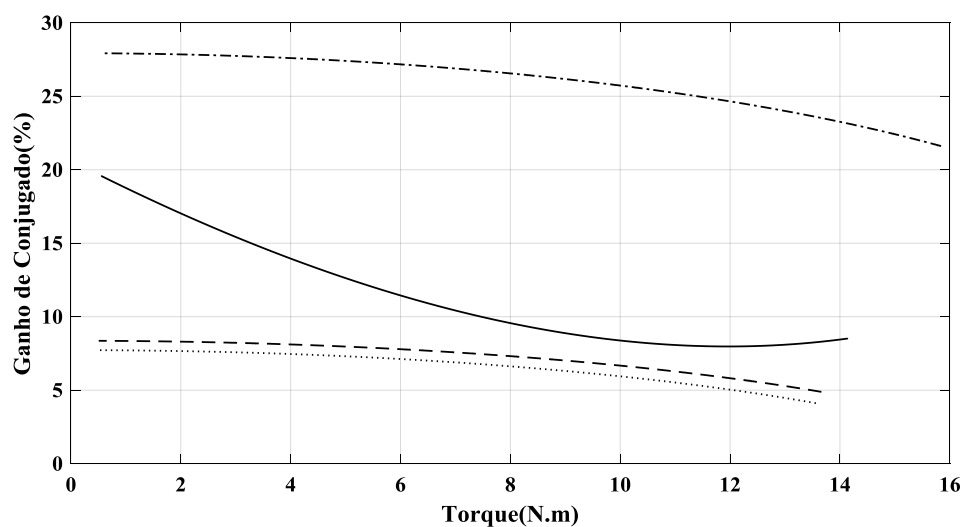


Figura 6.18- Ganhos de conjugado em (%), considerando o ganho da injeção harmônica em relação componente fundamental, componente fundamental e harmônico de ordem 3 (···), componente fundamental e harmônico de ordem 3 com ganho de 50% em amplitude (— ·),

componente fundamental e harmônicos de ordem 3 e 5 (— —), componente fundamental e harmônicos de ordem 3, 5 e 7 (—).

Sendo que no caso da figura 6.18 a maior contribuição de torque aconteceu com a injeção da componente fundamental e harmônico de ordem 3 com ganho de 50% em amplitude. A seguir é apresentado o gráfico da potência ativa de entrada em relação ao escorregamento na figura 6.19.

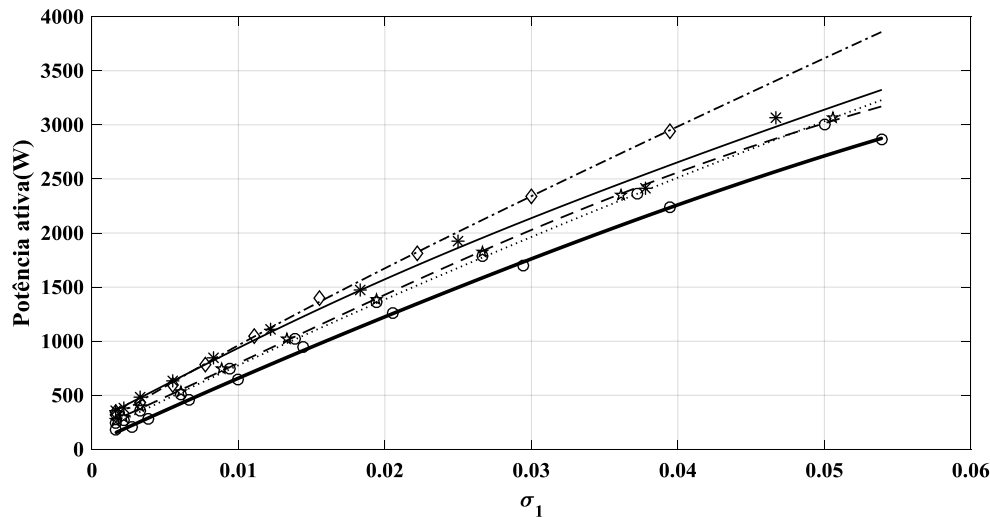


Figura 6.19- Resultados experimentais de *Potência ativa x escorregamento*, considerando apenas a componente fundamental (—), componente fundamental e harmônico de ordem 3 (---), componente fundamental e harmônico de ordem 3 com ganho de 50% em amplitude (— ·), componente fundamental e harmônicos de ordem 3 e 5 (— —), componente fundamental e harmônicos de ordem 3, 5 e 7 (—).

Verifica-se na figura 6.19 que a maior potência ativa foi encontrada com a injeção da componente fundamental e harmônico de ordem 3 com ganho de 50% em amplitude.

O gráfico da relação entre a potência mecânica e escorregamento é apresentado na figura 6.20.

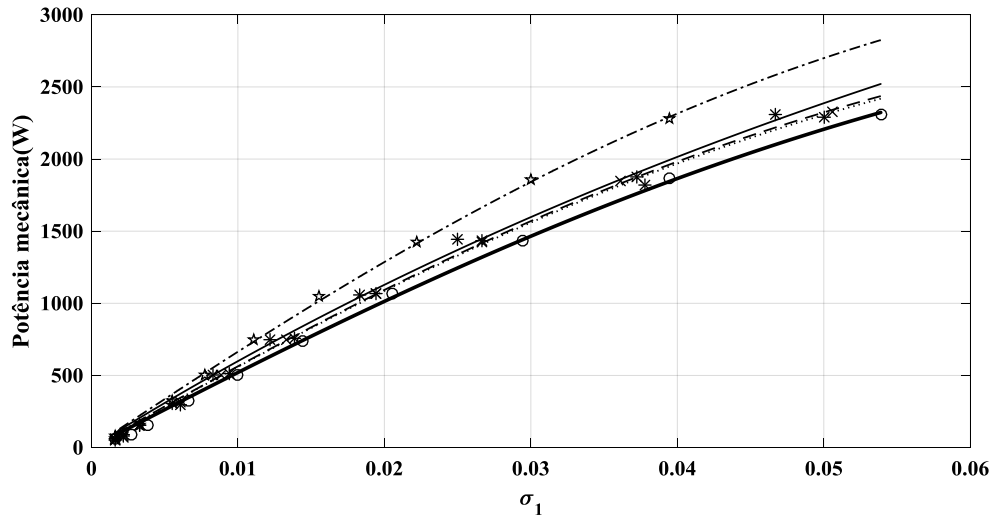


Figura 6.20- Resultados experimentais de *Potência mecânica x deslizamento*, considerando apenas a componente fundamental (—), componente fundamental e harmônico de ordem 3 (⋯), componente fundamental e harmônico de ordem 3 com ganho de 50% em amplitude (— ·), componente fundamental e harmônicos de ordem 3 e 5 (— —), componente fundamental e harmônicos de ordem 3, 5 e 7 (—).

Como foi visto na figura 6.20, a maior potência mecânica foi encontrada com a injeção da componente fundamental e harmônico de ordem 3 com ganho de 50% em amplitude. O gráfico de *Rendimento x deslizamento* é apresentado na figura 6.21.

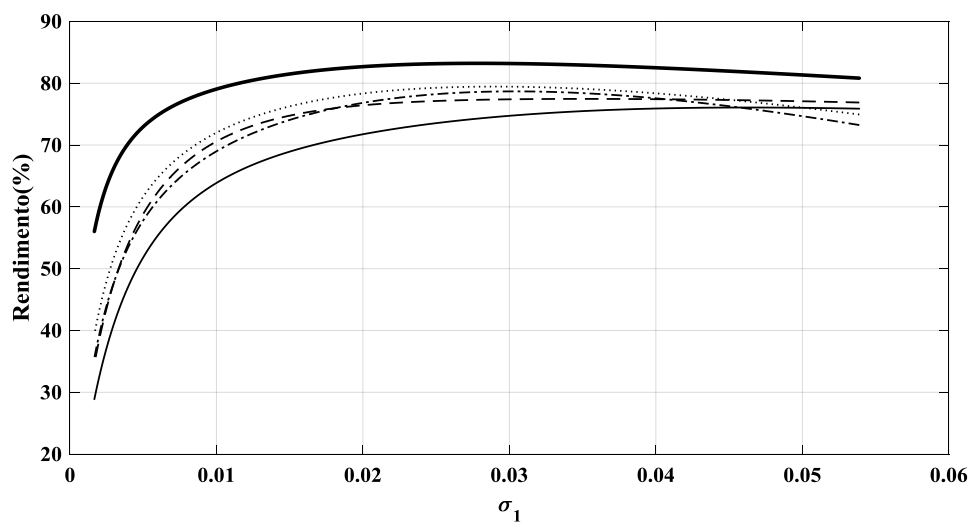


Figura 6.21 - Resultados experimentais de *Rendimento x deslizamento*, considerando apenas a componente fundamental (—), componente fundamental e harmônico de ordem 3 (⋯), componente fundamental e harmônico de ordem 3 com ganho de 50% em amplitude (— ·),

componente fundamental e harmônicos de ordem 3 e 5 (— —), componente fundamental e harmônicos de ordem 3, 5 e 7 (—).

Através da figura 6.21 é possível observar que o maior rendimento aconteceu com a injeção da componente fundamental e o menor com a injeção da componente fundamental e componentes harmônicos de ordem 3,5 e 7.

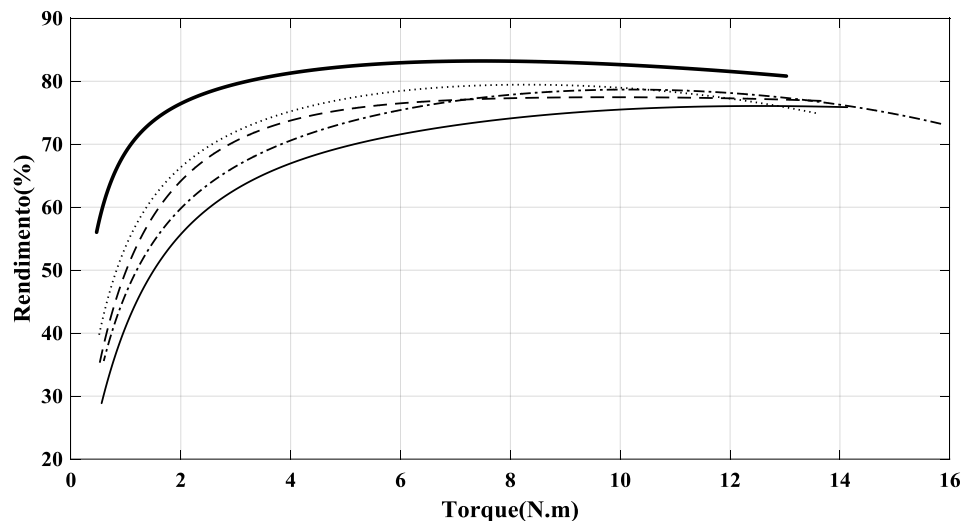


Figura 6.22- Resultados experimentais de *Rendimento x torque*, , considerando apenas a componente fundamental (—), componente fundamental e harmônico de ordem 3 (···), componente fundamental e harmônico de ordem 3 com ganho de 50% em amplitude (— ·), componente fundamental e harmônicos de ordem 3 e 5 (— —), componente fundamental e harmônicos de ordem 3, 5 e 7 (—).

Conforme visto na figura 6.22, o maior rendimento foi obtido com a injeção apenas da componente fundamental. O gráfico do *fator de potência x torque* é mostrado na figura 6.23.

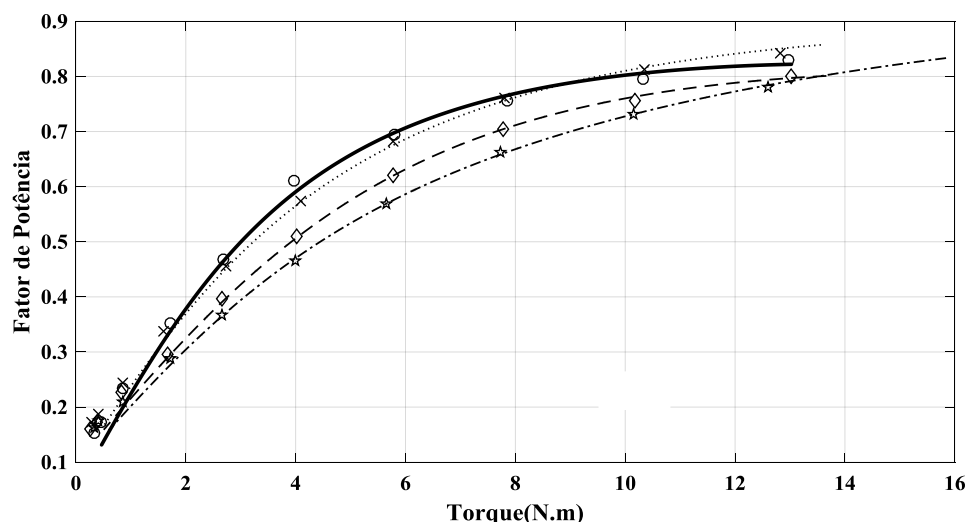


Figura 6.23-Resultados experimentais de *fator de potência x torque*, considerando apenas a componente fundamental (—), componente fundamental e harmônico de ordem 3 (···), componente fundamental e harmônico de ordem 3 com ganho de 50% em amplitude (— ·), componente fundamental e harmônicos de ordem 3 e 5 (— —).

Diante da figura 6.23 é observado que o maior fator de potência é encontrado através da injeção apenas da componente fundamental. A figura 6.24 mostra o aumento da corrente nas fases conforme o torque é aumentado.

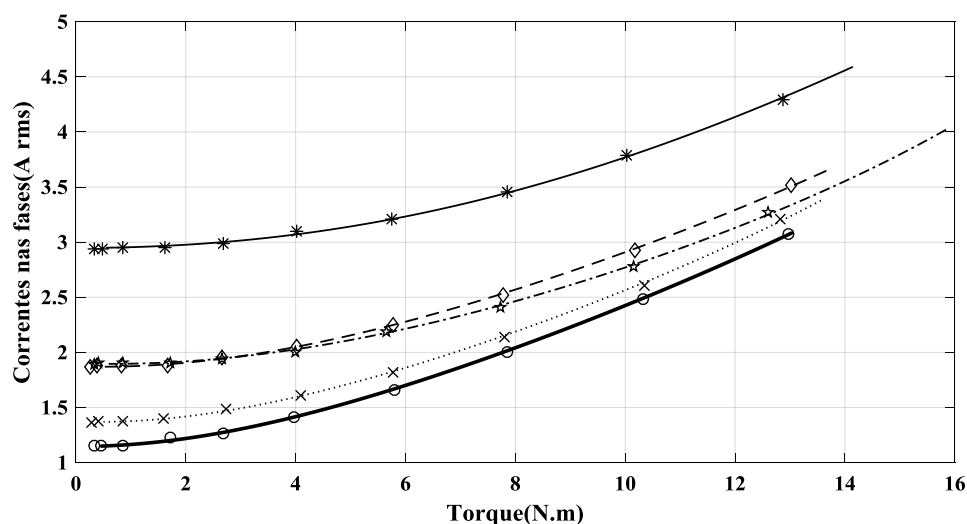


Figura 6.24-Resultados experimentais de *Corrente nas fases x torque*, considerando apenas a componente fundamental (—), componente fundamental e harmônico de ordem 3 (···), componente fundamental e harmônico de ordem 3 com ganho de 50% em amplitude (— ·), componente fundamental e harmônicos de ordem 3 e 5 (— —), componente fundamental e harmônicos de ordem 3, 5 e 7 (—).

Observações feitas sobre esse teste:

- O ganho de torque da componente fundamental juntamente com o terceiro harmônico dividido por dois foi o maior, com menor queda com o aumento de carga em relação a forma de onda A;
- O rendimento geral foi estável, sendo que o menor rendimento foi com injeção de todas as harmônicas. A componente fundamental juntamente com o terceiro harmônico dividido com aumento de 50% em amplitude, apresenta uma leve queda com o aumento de carga;
- O fator de potência diminui com a injeção harmônica;
- Maiores correntes nas fases conforme se aumenta o nível de injeção harmônica, sendo que esse aumento é menor utilizando a forma de onda B;
- Aumento do barramento CC com o uso da forma de onda B.

6.1.3 Configuração simétrica com a forma de onda A

Este teste foi realizado com a máquina eneafásica na configuração simétrica com o ângulo $\alpha = 40^\circ$ entre as bobinas, usando a forma de onda A.

É apresentado a seguir o gráfico do conjugado mecânico em relação ao escorregamento na figura 6.25.

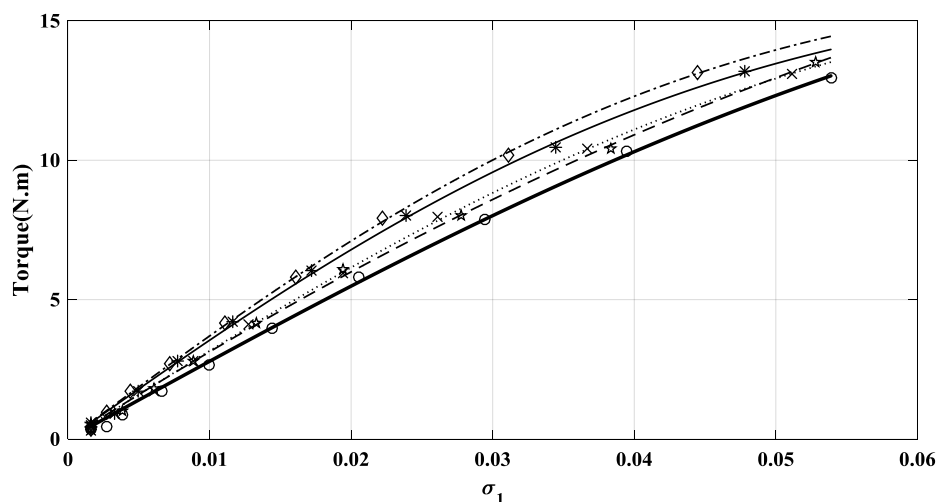


Figura 6.25- Resultados experimentais de Torque x escorregamento, considerando apenas a componente fundamental (—), componente fundamental e harmônico de ordem 3 (---),

componente fundamental e harmônico de ordem 3 com ganho de 50% em amplitude ($- \cdot$), componente fundamental e harmônicos de ordem 3 e 5 ($- -$), componente fundamental e harmônicos de ordem 3, 5 e 7 ($-$).

A seguir é apresentado o gráfico de correntes de fase em relação ao escorregamento na figura 6.26.

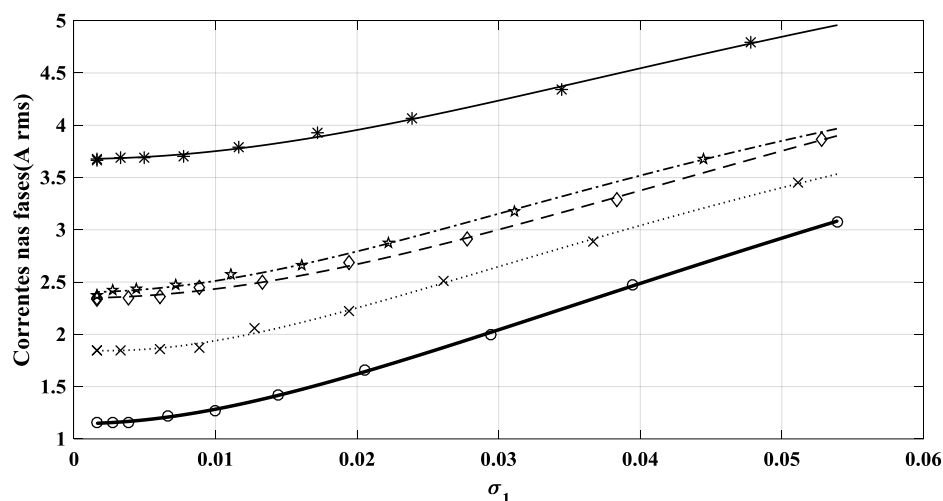


Figura 6.26 - Resultados experimentais de *Corrente nas fases x escorregamento*, considerando apenas a componente fundamental ($-$), componente fundamental e harmônico de ordem 3 ($\cdots$), componente fundamental e harmônico de ordem 3 com ganho de 50% em amplitude ($- \cdot$), componente fundamental e harmônicos de ordem 3 e 5 ($- -$), componente fundamental e harmônicos de ordem 3, 5 e 7 ($-$).

Através da figura 6.26 observa-se que o maior nível de corrente nas fases acontece com a injeção da componente fundamental e harmônicos de ordem 3, 5 e 7.

A seguir é apresentado o gráfico dos ganhos de conjugado com a injeção harmônica em relação a componente fundamental na figura 6.27.

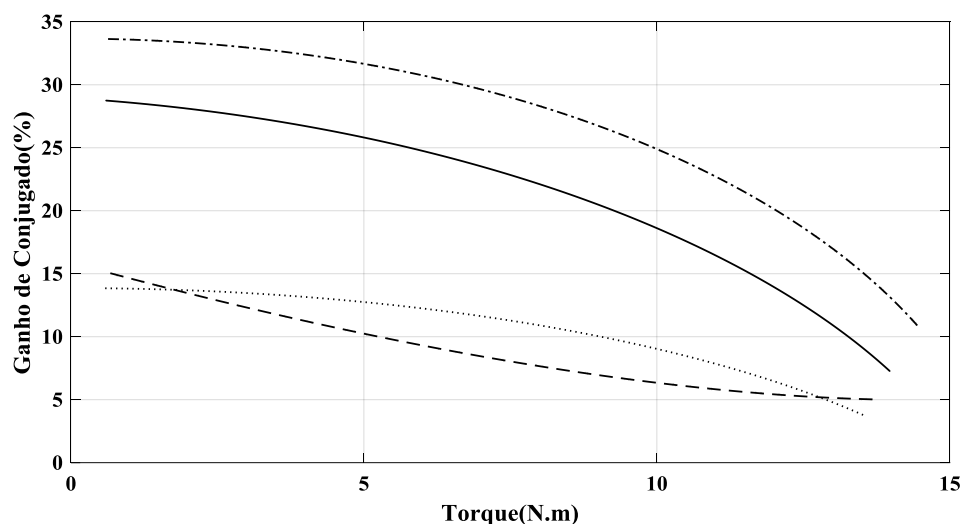


Figura 6.27- Ganhos de conjugado em (%), considerando o ganho da injeção harmônica em relação componente fundamental, componente fundamental e harmônico de ordem 3 ($\cdots$), componente fundamental e harmônico de ordem 3 com ganho de 50% em amplitude ($- \cdot$), componente fundamental e harmônicos de ordem 3 e 5 ($- -$), componente fundamental e harmônicos de ordem 3, 5 e 7 ($-$).

Sendo que no caso da figura 6.27 a maior contribuição de torque aconteceu com a injeção da componente fundamental e harmônico de ordem 3 com ganho de 50% em amplitude. A seguir é apresentado o gráfico da potência ativa de entrada em relação ao escorregamento na figura 6.28.

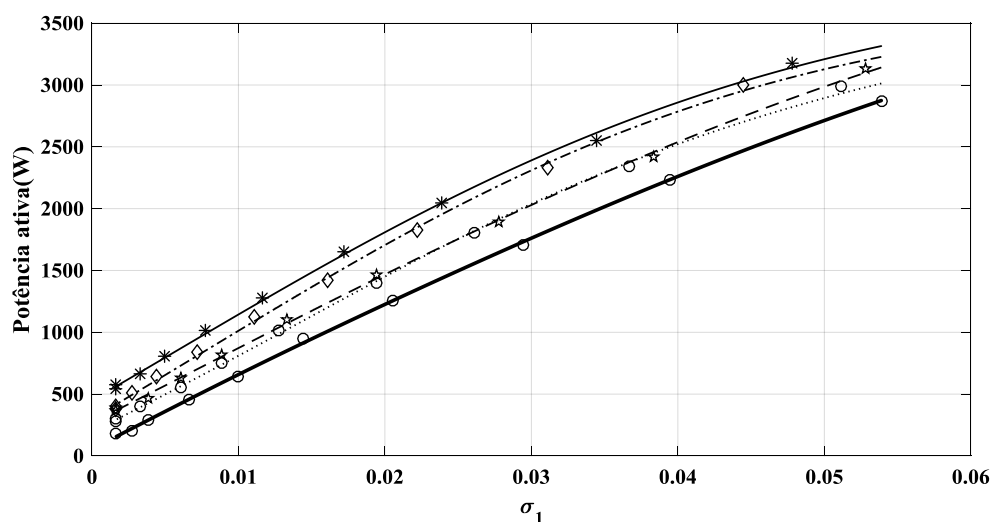


Figura 6.28- Resultados experimentais de *Potência ativa* x *escorregamento*, considerando apenas a componente fundamental ($-$), componente fundamental e harmônico de ordem 3 ($\cdots$), componente fundamental e harmônico de ordem 3 com ganho de 50% em amplitude ($- \cdot$),

componente fundamental e harmônicos de ordem 3 e 5 (— —), componente fundamental e harmônicos de ordem 3, 5 e 7 (—).

Verifica-se na figura 6.28 que a maior potência ativa foi encontrada com a injeção da componente fundamental e harmônicos de ordem 3,5 e 7. O gráfico da relação entre a potência mecânica e escorregamento é apresentado na figura 6.29.

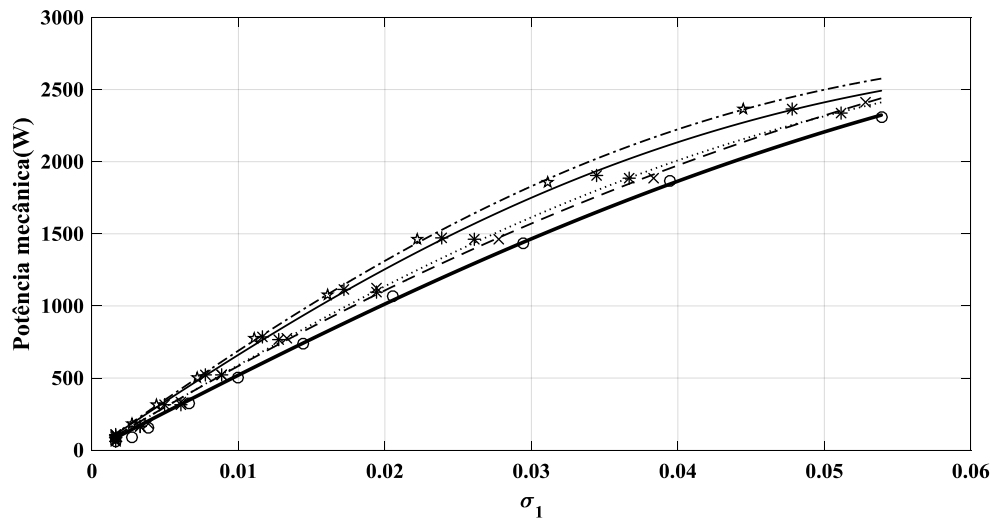


Figura 6.29- Resultados experimentais de *Potência mecânica x escorregamento*, considerando apenas a componente fundamental (—), componente fundamental e harmônico de ordem 3 (···), componente fundamental e harmônico de ordem 3 com ganho de 50% em amplitude (— ·), componente fundamental e harmônicos de ordem 3 e 5 (— —), componente fundamental e harmônicos de ordem 3, 5 e 7 (—).

Como foi visto na figura 6.29, a maior potência mecânica foi encontrada com a injeção da componente fundamental e harmônico de ordem 3 com ganho de 50% em amplitude. O gráfico de *Rendimento x escorregamento* é apresentado na figura 6.30.

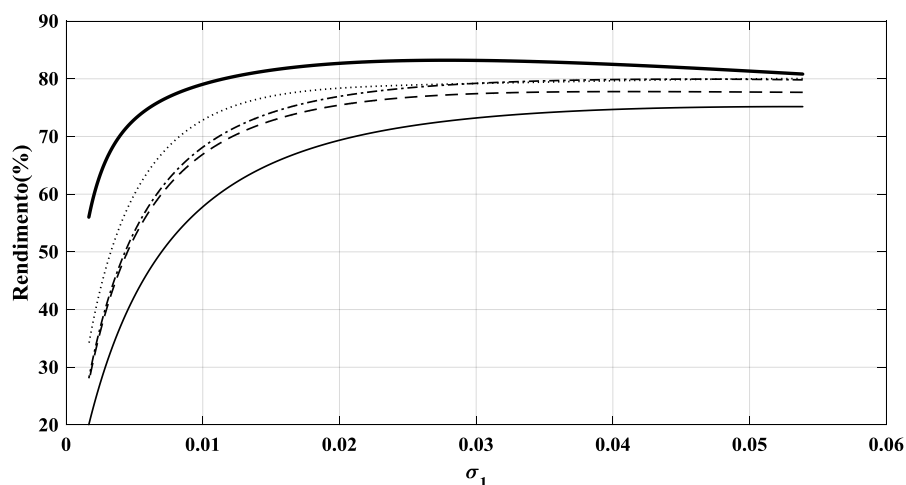


Figura 6.30- Resultados experimentais de *Rendimento x escorregamento*, considerando apenas a componente fundamental (—), componente fundamental e harmônico de ordem 3 (⋯), componente fundamental e harmônico de ordem 3 com ganho de 50% em amplitude (— ·), componente fundamental e harmônicos de ordem 3 e 5 (— —), componente fundamental e harmônicos de ordem 3, 5 e 7 (—).

Através da figura 6.30 é possível observar que o maior rendimento aconteceu com a injeção da componente fundamental e o menor com a injeção da componente fundamental e componentes harmônicos de ordem 3,5 e 7.

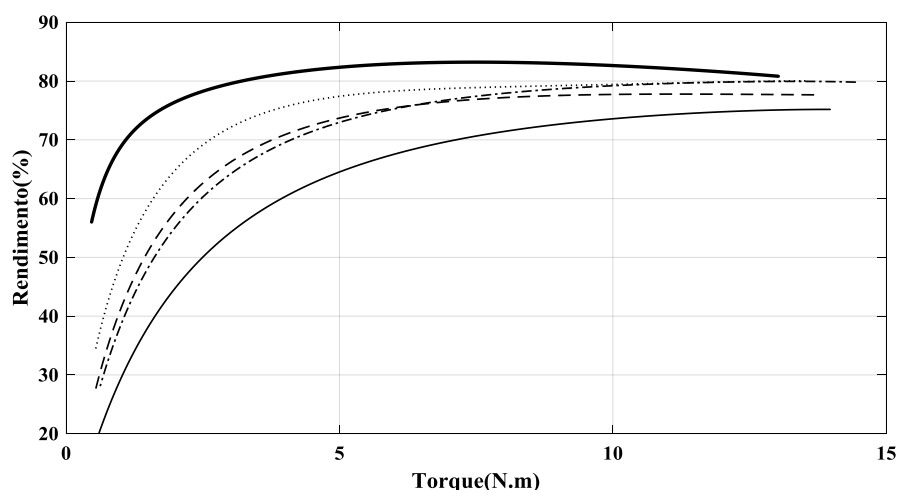


Figura 6.31- Resultados experimentais de *Rendimento x torque*, considerando apenas a componente fundamental (—), componente fundamental e harmônico de ordem 3 (⋯), componente fundamental e harmônico de ordem 3 com ganho de 50% em amplitude (— ·), componente fundamental e harmônicos de ordem 3 e 5 (— —), componente fundamental e harmônicos de ordem 3, 5 e 7 (—).

Conforme visto na figura 6.31, o maior rendimento foi obtido com a injeção apenas da componente fundamental. O gráfico do *fator de potência x torque* é mostrado na figura 6.32.

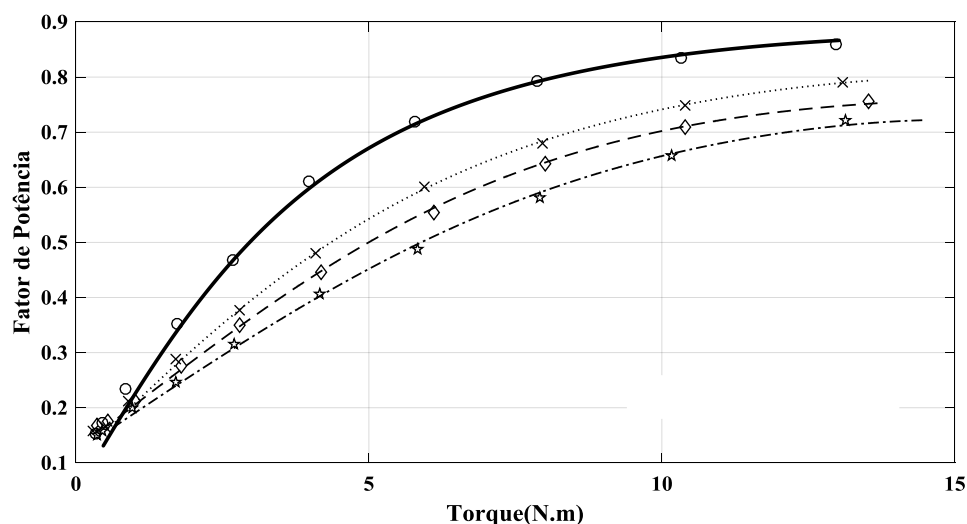


Figura 6.32- Resultados experimentais de *fator de potência x torque*, considerando apenas a componente fundamental (—), componente fundamental e harmônico de ordem 3 (···), componente fundamental e harmônico de ordem 3 com ganho de 50% em amplitude (— ·), componente fundamental e harmônicos de ordem 3 e 5 (— · —).

Diante da figura 6.32 é observado que o maior fator de potência é encontrado através da injeção apenas da componente fundamental. A figura 6.33 mostra o aumento da corrente nas fases conforme o torque é aumentado.

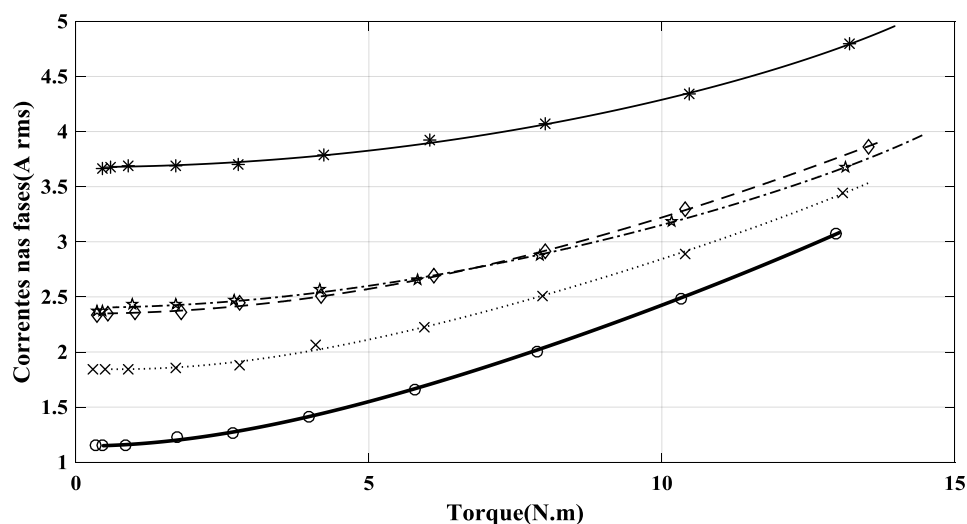


Figura 6.33- Resultados experimentais de *Corrente nas fases x torque*, considerando apenas a componente fundamental (—), componente fundamental e harmônico de ordem 3 (···), componente fundamental e harmônico de ordem 3 com ganho de 50% em amplitude (— ·), componente fundamental e harmônicos de ordem 3 e 5 (— · —).

componente fundamental e harmônicos de ordem 3 e 5 (— —), componente fundamental e harmônicos de ordem 3, 5 e 7 (—).

Observações feitas sobre esse teste:

- O ganho de torque da componente fundamental juntamente com o terceiro harmônico dividido por dois foi o maior, mas decadente com o acréscimo de carga;
- O rendimento geral foi estável, sendo que o menor rendimento foi com injeção de todas as harmônicas;
- O fator de potência diminui com a injeção harmônica;
- Maior correntes nas fases conforme se aumenta o nível de injeção harmônica;
- Redução no barramento CC com o uso da forma de onda A.

6.1.4 Configuração simétrica com a forma de onda B

Este teste foi realizado com a máquina eneafásica na configuração simétrica com o ângulo $\alpha = 40^\circ$ entre as bobinas, usando a forma de onda B.

É apresentado a seguir o gráfico do conjugado mecânico em relação escorregamento na figura 6.34.

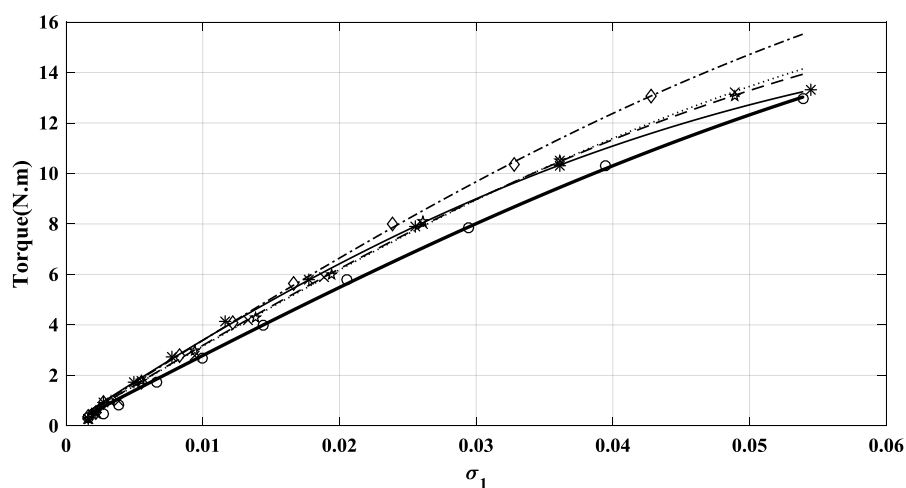


Figura 6.34- Resultados experimentais de Torque x escorregamento, considerando apenas a componente fundamental (—), componente fundamental e harmônico de ordem 3 (---), componente fundamental e harmônico de ordem 3 com ganho de 50% em amplitude (— ·),

componente fundamental e harmônicos de ordem 3 e 5 (— —), componente fundamental e harmônicos de ordem 3, 5 e 7 (—).

Abaixo é apresentado o gráfico de correntes de fase em relação ao escorregamento na figura 6.35.

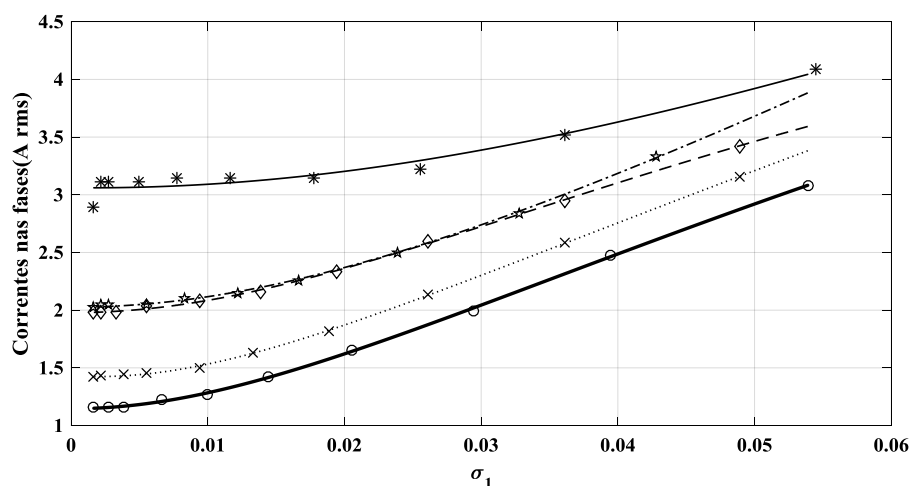


Figura 6.35- Resultados experimentais de *Corrente nas fases x escorregamento*, considerando apenas a componente fundamental (—●—), componente fundamental e harmônico de ordem 3 (· · ·), componente fundamental e harmônico de ordem 3 com ganho de 50% em amplitude (- · -), componente fundamental e harmônicos de ordem 3 e 5 (- - -), componente fundamental e harmônicos de ordem 3, 5 e 7 (*).

Através da figura 6.35 observa-se que o maior nível de corrente nas fases acontece com a injeção da componente fundamental e harmônicos de ordem 3, 5 e 7.

A seguir é apresentado o gráfico dos ganhos de conjugado com a injeção harmônica em relação a componente fundamental na figura 6.36.

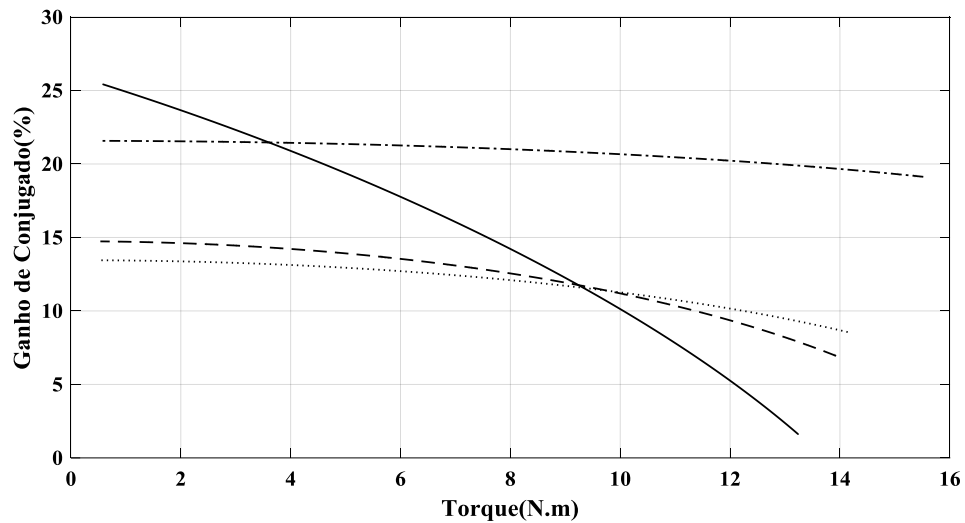


Figura 6.36- Ganhos de conjugado em (%), considerando o ganho da injeção harmônica em relação componente fundamental, componente fundamental e harmônico de ordem 3 ($\cdots$), componente fundamental e harmônico de ordem 3 com ganho de 50% em amplitude ($- \cdot$), componente fundamental e harmônicos de ordem 3 e 5 ($- -$), componente fundamental e harmônicos de ordem 3, 5 e 7 ($- \cdot \cdot$).

Sendo que no caso da figura 6.36 a maior contribuição de torque aconteceu com a injeção da componente fundamental e harmônico de ordem 3 com ganho de 50% em amplitude. A seguir é apresentado o gráfico da potência ativa de entrada em relação ao escorregamento na figura 6.37.

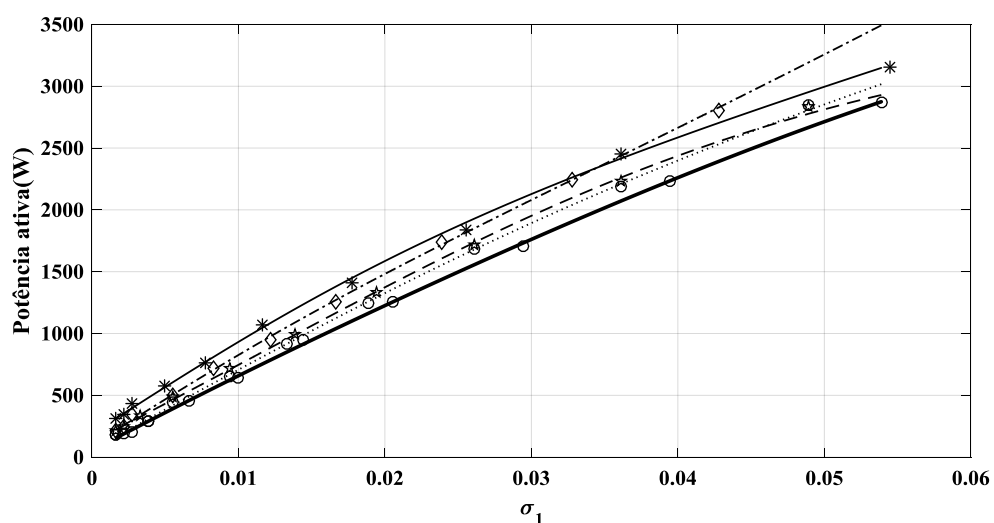


Figura 6.37- Resultados experimentais de *Potência ativa* $\times$ *escorregamento*, considerando apenas a componente fundamental ($-$), componente fundamental e harmônico de ordem 3 ($\cdots$), componente fundamental e harmônico de ordem 3 com ganho de 50% em amplitude ($- \cdot$),

componente fundamental e harmônicos de ordem 3 e 5 (— —), componente fundamental e harmônicos de ordem 3, 5 e 7 (—).

Verifica-se na figura 6.37 que a maior potência ativa foi encontrada com a injeção da componente fundamental e harmônicos de ordem 3,5 e 7. O gráfico da relação entre a potência mecânica e escorregamento é apresentado na figura 6.38.

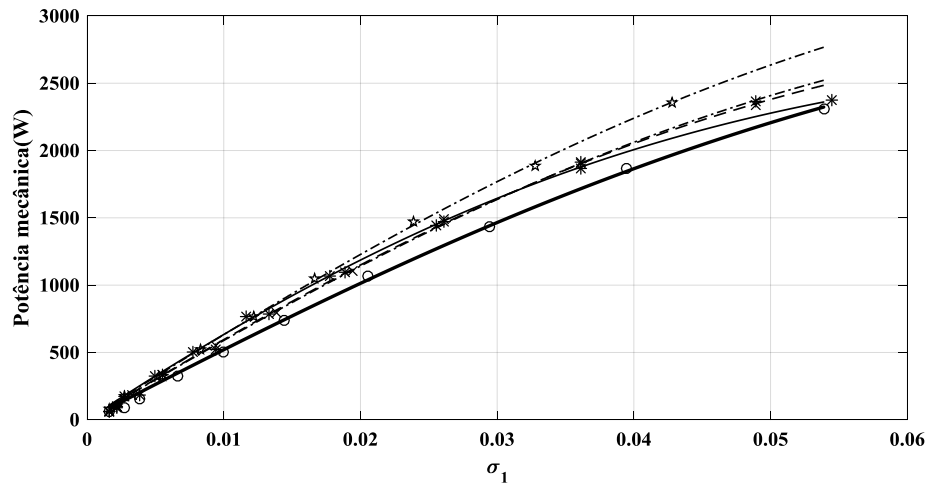


Figura 6.38- Resultados experimentais de *Potência mecânica x escorregamento*, considerando apenas a componente fundamental (—), componente fundamental e harmônico de ordem 3 (---), componente fundamental e harmônico de ordem 3 com ganho de 50% em amplitude (— · —), componente fundamental e harmônicos de ordem 3 e 5 (— —), componente fundamental e harmônicos de ordem 3, 5 e 7 (—).

Como foi visto na figura 6.38, a maior potência mecânica foi encontrada com a injeção da componente fundamental e harmônico de ordem 3 com ganho de 50% em amplitude. O gráfico de *Rendimento x escorregamento* é apresentado na figura 6.39.

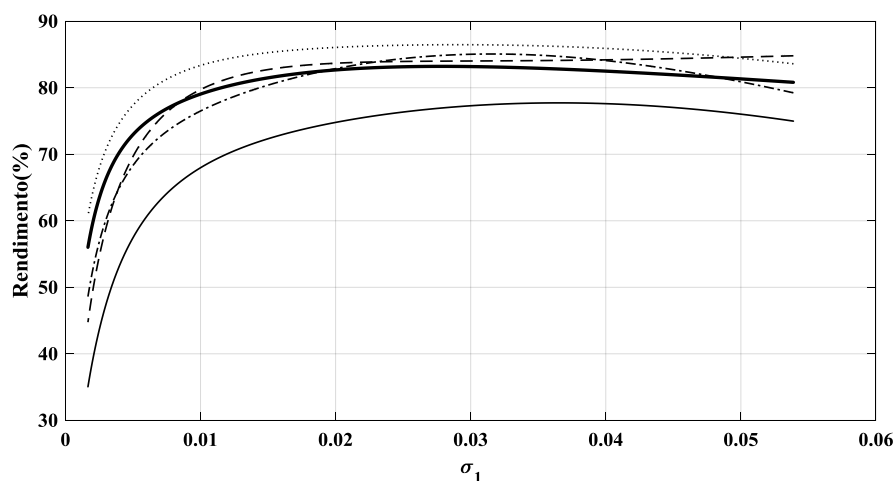


Figura 6.39- Resultados experimentais de *Rendimento x escorregamento*, considerando apenas a componente fundamental (—), componente fundamental e harmônico de ordem 3 (⋯), componente fundamental e harmônico de ordem 3 com ganho de 50% em amplitude (— ·), componente fundamental e harmônicos de ordem 3 e 5 (— —), componente fundamental e harmônicos de ordem 3, 5 e 7 (—).

Através da figura 6.39 é possível observar que o maior rendimento aconteceu com a injeção da componente fundamental e harmônico de ordem 3 e o menor com a injeção da componente fundamental e componentes harmônicos de ordem 3,5 e 7.

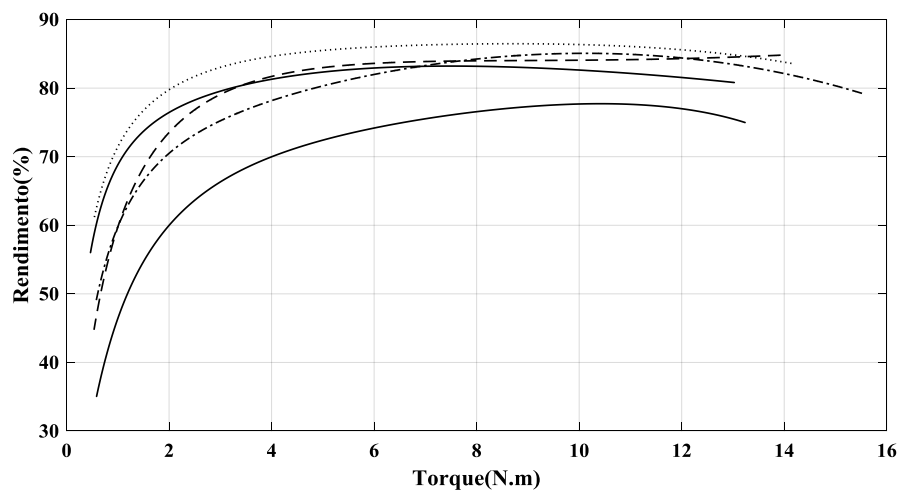


Figura 6.40- Resultados experimentais de *Rendimento x torque*, considerando apenas a componente fundamental (—), componente fundamental e harmônico de ordem 3 (⋯), componente fundamental e harmônico de ordem 3 com ganho de 50% em amplitude (— ·), componente fundamental e harmônicos de ordem 3 e 5 (— —), componente fundamental e harmônicos de ordem 3, 5 e 7 (—).

Conforme visto na figura 6.40, o maior rendimento foi obtido com a injeção apenas da componente fundamental e harmônico de ordem 3. O gráfico do *fator de potência x torque* é mostrado na figura 6.41.

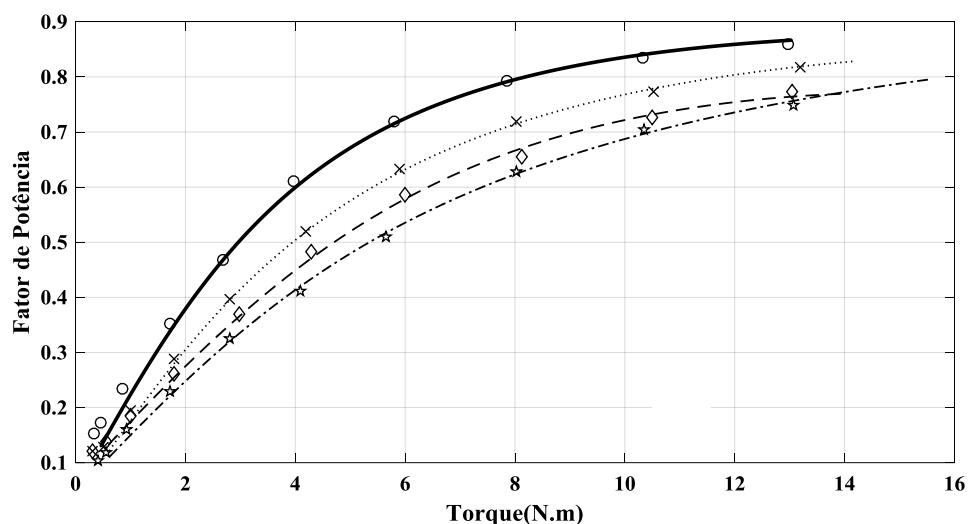


Figura 6.41- Resultados experimentais de *fator de potência x torque*, considerando apenas a componente fundamental (—), componente fundamental e harmônico de ordem 3 (···), componente fundamental e harmônico de ordem 3 com ganho de 50% em amplitude (— ·), componente fundamental e harmônicos de ordem 3 e 5 (— —).

Diante da figura 6.41 é observado que o maior fator de potência é encontrado através da injeção apenas da componente fundamental. A figura 6.42 mostra o aumento da corrente nas fases conforme o torque é aumentado.

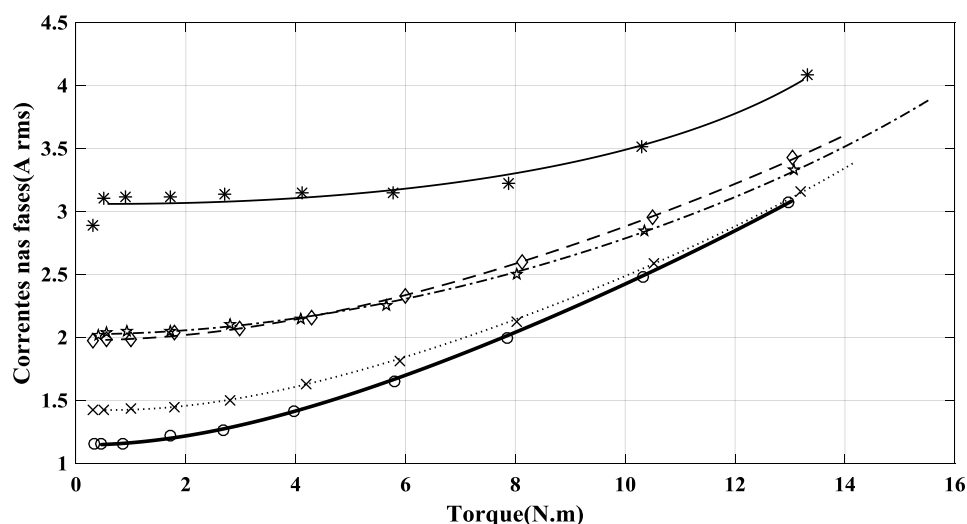


Figura 6.42- Resultados experimentais de *Corrente nas fases x torque*, considerando apenas a componente fundamental (—), componente fundamental e harmônico de ordem 3 (···), componente fundamental e harmônico de ordem 3 com ganho de 50% em amplitude (— ·), componente fundamental e harmônicos de ordem 3 e 5 (— —), componente fundamental e harmônicos de ordem 3, 5 e 7 (— —).

Observações feitas sobre esse teste:

- O ganho de torque da componente fundamental juntamente com o terceiro harmônico dividido por dois foi o maior, com menor queda com o aumento de carga em relação à forma de onda A;
- O rendimento geral foi estável, sendo que o menor rendimento foi com injeção de todas as harmônicas;
- O fator de potência diminui com a injeção harmônica;
- Maior correntes nas fases conforme se aumenta o nível de injeção harmônica, sendo que esse aumento é menor utilizando a forma de onda B;
- Aumento do barramento CC com o uso da forma de onda B.

De uma forma geral foi possível concluir os seguintes pontos para os testes com a amplitude da componente fundamental em 170V:

- Curvas de rendimento estáveis, sendo que, foi visto que o rendimento da injeção da componente fundamental juntamente com o terceiro harmônico dividido por dois cai levemente com o aumento de carga;
- Baixo escorregamento;
- Ganhos de torque expressivos, sendo que, com a utilização da forma de onda B foi visto uma maior estabilização, com uma menor queda de torque com o aumento da carga;
- Aumento de correntes nas fases com o aumento da carga e com a injeção harmônica;
- Redução do fator de potência com a injeção harmônica;
- Nível de corrente nas fases maior com a utilização da forma de onda A;

6.2 ANÁLISE QUANTITATIVA DOS PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

A seguir serão feitas análises sobre os resultados experimentais coletados, sendo que irão ser observadas as contribuições de torque nas diferentes amplitudes da componente fundamental, ganhos de corrente em relação à injeção harmônica e forma de onda utilizada e rendimento e escorregamento em diferentes situações.

6.2.1 Contribuições de torque

A seguir serão apresentados na tabela 6.3 os ganhos de torque para a amplitude da componente fundamental e harmônico de ordem 3 com ganho de 50% em amplitude, considerando os valores de ganho de torque para um valor de 10 N.m de torque. Este valor de torque escolhido foi considerado um ponto próximo do regime nominal da máquina, de acordo com algumas informações como correntes nas fases e ponto de estabilização do rendimento da máquina.

Tabela 6.3 – Ganhos de torque em (%) para todas as formas de injeção harmônica utilizadas

Configuração	Fundamental com terceiro harmônico (%)	Fundamental com terceiro harmônico de amplitude aumentada (%)	Fundamental com terceiro, quinto e sétimo harmônico (%)
Assimétrica com forma de onda A	4,85	18	18,3
Assimétrica com forma de onda B	8,83	25	18,2
Simétrica com forma de onda A	6,43	26	10,2
Simétrica com forma de onda B	9,81	21	9,89

Sendo possível observar na tabela 6.3 que a injeção da componente fundamental e terceiro harmônico com amplitude aumentada em 50% possui um bom ganho de torque alcançando 26% de ganho de torque na configuração de bobinas assimétrica e injetando a forma de onda A.

6.2.2 Aumento de corrente nas fases

Considerando a curva com resultado mais expressivo de ganho de torque que foi a injeção da componente fundamental e harmônico de ordem 3 com ganho de 50% em amplitude, observando os aumentos de corrente para um valor de 0,05 de escorregamento chega-se na tabela 6.4.

Tabela 6.4 – Corrente nas fases em todas as formas de injeção

Configuração	Componente fundamental (A rms)	Fundamental com terceiro harmônico de amplitude aumentada (A rms)	Fundamental com terceiro, quinto e sétimo harmônico (A rms)
Assimétrica com forma de onda A	2,6	3,75	4,81
Assimétrica com forma de onda B	2,7	3,76	4,78
Simétrica com forma de onda A	2,8	3,53	4,41
Simétrica com forma de onda B	2,9	3,51	3,91

Através da tabela 6.4 é possível perceber que conforme se aumenta a ordem da injeção harmônica, existe um aumento na amplitude das correntes nas fases.

6.2.3 Análise de rendimento

Considerando a curva da componente fundamental e harmônico de ordem 3 com ganho de 50% em amplitude, que foi a forma de injeção harmônica com maior ganho de torque, observando o rendimento para um valor de 10 N.m de torque chega-se na tabela 6.5.

Tabela 6.5 – Valores de rendimento para todas as formas de injeção harmônica utilizadas

Configuração	Fundamental com terceiro harmônico (%)	Fundamental com terceiro harmônico de amplitude aumentada (%)	Fundamental com terceiro, quinto e sétimo harmônico (%)
Assimétrica com forma de onda A	83,21	79,12	73,21
Assimétrica com forma de onda B	82,13	79,34	74,34
Simétrica com forma de onda A	82,17	78,21	76,43

Simétrica com forma de onda B	84,21	82,13	77,32
----------------------------------	-------	-------	-------

Conforme foi visto nos gráficos anteriormente, o rendimento diminui com o aumento da ordem de injeção harmônica, sendo possível observar esse fato também na tabela 6.5.

6.3 CONCLUSÕES

Foi possível concluir alguns aspectos de uma forma geral em todos os testes:

- A forma de onda A necessita de um nível de tensão no barramento CC menor do que a forma de onda B;
- O ganho de torque se mostrou mais estável utilizando a forma de onda B, tendo uma menor diminuição com o aumento da carga;
- O fator de potência diminui com o aumento da injeção harmônica;
- O nível de corrente nas fases aumenta conforme se aumenta o nível de injeção harmônica e o nível de carga mecânica;
- O rendimento diminui com o aumento da injeção harmônica;
- A injeção harmônica da componente fundamental juntamente com o terceiro harmônico dividido por dois é uma forma eficiente de injeção, pois além de se obter um maior ganho de torque, apresenta um nível de corrente nas fases muito menor do que com a injeção de todas as harmônicas. Além de ter um rendimento superior se comparado a injeção até a sétima harmônica;

7 CONCLUSÕES

Através de outros trabalhos desenvolvidos de outras máquinas com um número de fases maior que três e pela modelagem matemática realizada para a máquina de indução eneafásica, analisando as contribuições de conjugado para a primeira, terceira, quinta e sétima harmônica, é possível verificar a possibilidade de ganho de conjugado com a injeção das primeiras harmônicas. Isto também foi verificado através das simulações que foram desenvolvidas. Posteriormente foram realizados os procedimentos experimentais e novamente foi constatada a possibilidade de aumento de conjugado mecânico com a injeção harmônica. Diferentes configurações e padrões foram adotados nos testes procedimentais com o intuito de verificar em quais situações que a máquina eneafásica teria um melhor desempenho, sendo que foi verificado que a injeção da componente fundamental juntamente com o terceiro harmônico com amplitude aumentada se mostrou eficiente, pois teve um bom ganho de torque, menos corrente nas fases e maior rendimento do que a injeção até o sétimo nível harmônico. Foi utilizado um sistema de sensoramento e uma análise do barramento CC com o propósito de verificar a eficiência do sistema, fazendo desta forma a aquisição de todas as variáveis importantes relacionadas ao sistema para um estudo mais completo do projeto executado. Análises que foram bastante comentadas no capítulo 8.

A técnica de injeção de harmônicos proporciona a um sistema eletromecânico um ganho de torque em uma máquina, assim, máquinas de dimensões maiores podem ser substituídas por um sistema de injeção harmônico adequado juntamente com uma máquina de maior número de fases. Dessa forma podendo contribuir de forma significativa em sistemas que seja necessário um grau de eficiência maior, ou seja, um maior torque ocupando menos espaço.

7.1 TRABALHOS FUTUROS

Depois de realizar os procedimentos experimentais e verificar quais as configurações de alimentação da máquina foram mais eficientes, projetos futuros podem ser realizados dentro desse contexto da máquina eneafásica. Trabalhos com sistemas de controle baseados nas informações coletadas nesta pesquisa, sistemas de confiabilidade,

desenvolvendo projetos que venham verificar as perdas e aumentar a capacidade de tolerância a falhas da máquina.

Referências Bibliográficas

TAHERZADEH, M; CARRIERE, S.; BETIN, F.; JOORABIAN, M.; KIANINEZHAD, R. AND CAPOLINO, G. A, “**Online Controller Modifying of a Six-Phase Induction Generator in Phase Opening Ocurrances**”, Proc. Int. Conf. on Electrical Machines (ICEM), pp. 836-842

RAJ, L. R. L.; JIDIN, A.; IBRAHIM, Z.; KARIM, K. A.; SAID, M. A. AND JOPRI, M. H, “**Optimal Torque Control Performance of DTC of 5-Phase Induction Machine**”, International Conference on Electrical Machines and Systems, pp. 2094-2099.

MALVAR, J.; LÓPEZ, O.; YEPES, A. G.; VIDAL, A.; FREI-JEDO, F. D. AND COMESAÑA, P. F, “**Graphical Diagram for Subspace and Sequence Identification of Time Harmonics in Symmetrical Multiphase Machines**”, IEEE Trans. on Ind. Elect., Vol. 61, No. 9, pp. 29-42.

RENUKADEVI, G. AND RAJAMBAL, K., 2012, “**Generalized d-q Model of n-Phase Induction Motor Drive**”, International Science Index, Electrical and Computer Engineering, Vol. 6, No. 9, pp. 1066-1075.

GUZMAN, H.; DURAN, M. J.; BARRERO, F.; ZARRI, L.; BO-GADO, B.; PRIETO, I. G. AND ARAHAL, M. R., January 2016, “**Comparative Study of Predictive and Res-onant Controllers in Fault-Tolerant Five-Phase Induction Motor Drives**”, IEEE Trans. on Ind. Elect., Vol. 63, No. 1, pp.606-617.

DAINEZ. S. “**Modelagem de um Motor de Indução Hexafásico Assimétrico e redução de seus Harmônicos de corrente por um controlador P-BSNN**”, Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas, 2016

R. O. C. LYRA, “**Torque Density Improvement in a Six- Phase Induction Motor with Third Harmonic Current Injection**,” University of Winsconsin-Madison, 2002.

E. E. WARD AND H. HARER, “**Preliminary investigation of an inverter-fed 5-phase induction motor**,” *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, vol. 116, no. 6. p. 980, 1969

R. RODRIGO, A. LEONARDO, M. VALLE, “**Modelagem de uma máquina de indução de nove fases**”, *Anais do XX Congresso Brasileiro de Automática*, Belo Horizonte, 2014.

L. PARSA, “**On Advantages of Multi-Phase Machines**”, *IEEE transactions on industry applications*, vol 21, Janeiro de 2005.

BRIAN A. WELCHKO, THOMAS A. LIPO, THOMAS M. JAHNS, STEVEN E. SHULZ, “**Fault Tolerant Three-Phase AC Motor Drive Topologies: A comparison of features Cost, and limitations**”, *IEEE transactions on power electronics*, vol 19, Julho de 2004.

F. BAUDART, B. DEHEZ, E. MATAGNE, “**Torque Control Strategy of Polyphase Permanent-Magnet Synchronous Machines With Minimal Controller Reconfiguration Under Open-Circuit Fault of One Phase**”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol 59, Junho de 2012.

LIPO, T. A. **Introduction to AC Machine Design**. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA, aug 2017.

PEREIRA, L. A. SCHARLAU, C. C. PEREIRA, L. F. A. AND HAFFNER, J. F. **General model of a five-phase induction machine allowing for harmonics in the air gap field**. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 21(4):891-899, Dec 2006.

LYRA, R. O. C.; LIPO, T. A. **Torque Density Improvement in a Six-Phase Induction Motor With Third Harmonic Current Injection**, *IEEE Transactions on Industry Applications*, p. 1351-1360, Sep. 2002.