

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

VALTER HENRIQUE DIEDRICH

**DESENVOLVIMENTO DE NOVA TOPOLOGIA DE CARRO-
PRIMÁRIO DE ATUADOR PLANAR DE INDUÇÃO**

Porto Alegre

2013

VALTER HENRIQUE DIEDRICH

**DESENVOLVIMENTO DE NOVA TOPOLOGIA DE CARRO-
PRIMÁRIO DE ATUADOR PLANAR DE INDUÇÃO**

Projeto de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para Graduação em Engenharia Elétrica.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Ály Ferreira Flores Filho

Porto Alegre

2013

VALTER HENRIQUE DIEDRICH

**DESENVOLVIMENTO DE NOVA TOPOLOGIA DE CARRO-
PRIMÁRIO DE ATUADOR PLANAR DE INDUÇÃO**

Este projeto foi julgado adequado para fazer jus aos créditos da Disciplina de “Projeto de Diplomação, do Departamento de Engenharia Elétrica”, e aprovado em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: Prof. Dr. Ály Ferreira Flores Filho

Coordenador: Prof. Dr. Ály Ferreira Flores Filho

BANCA EXAMINADORA

Prof. Ály Ferreira Flores Filho, UFRGS

Doutor pela Cardiff University – Cardiff, País de Gales

Prof. Roberto Petry Homrich, UFRGS

Doutor pela Universidade Estadual de Campinas – Campinas,
Brasil

Prof. Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro, UFRGS

Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul –
Porto Alegre, Brasil

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha família e em especial para meus pais, pois são meus maiores apoiadores nas buscas pelos meus objetivos.

AGRADECIMENTOS

Aos pais Airton Luis Diedrich e Rita Maria Diedrich pelo apoio durante toda minha vida acadêmica.

À namorada Gisele Marisa Klein pela motivação e força.

Ao Laboratório de Máquinas Elétricas, Acionamentos e Energia pela oportunidade para elaboração deste Trabalho de Conclusão de Curso e aos técnicos de laboratório que tanto auxiliaram no desenvolvimento do projeto.

À Universidade e aos demais professores do Departamento de Engenharia Elétrica, DELET, pela contribuição na minha formação.

“Uma paixão forte por qualquer objeto assegurará o sucesso, porque o desejo pelo objetivo mostrará os meios”.

William Hazlitt

RESUMO

O presente trabalho estuda, caracteriza e testa nova topologia de dispositivo eletromagnético formado por dois enrolamentos trifásicos ortogonais entre si de acionamento independente cuja construção foi desenvolvida sobre núcleo de material compósito magneticamente macio de grão isolado. Este dispositivo é formado por 36 dentes, sendo que em cada um estão alocadas duas bobinas independentes, formando um total de dois enrolamentos compostos por 72 bobinas no total. Através de um acionamento trifásico destes enrolamentos, há o desenvolvimento de campos magnéticos viajantes de trajetória linear e ortogonais entre si, fazendo com que correntes elétricas pelo efeito da indução apareçam nos materiais eletricamente condutores do secundário compreendido pela estrutura de uma chapa de alumínio paralelamente disposta a uma chapa de aço sob o atuador planar de indução. O resultado da interação entre as correntes do primário, parte móvel composta pelos enrolamentos trifásicos, com as do secundário, parte estática formada pelas chapas metálicas, é a produção de força de propulsão planar, resultando na movimentação do carro do atuador planar de indução. Realizou-se experimentos de carácter estático para o levantamento de dados de força planar linear exercido pela nova topologia de carro primário e ainda, foram realizados experimentos dinâmicos para dados de deslocamento e velocidade da nova topologia de carro primário.

Palavras chave: Atuador planar de indução, força planar de propulsão, enrolamentos ortogonais.

ABSTRACT

The present work studies, characterizes and tests a new electromagnetic device topology formed by two orthogonal three-phase windings independently driven whose assembly was on a grain insulated soft magnetic composite material. This device is formed by 36 teeth, and, in each tooth, two independent coils are placed, forming two windings consist in a total of 72 coils. Through the three-phase operation drive, the windings produce travelling magnetic fields along a linear trajectory and orthogonal with respect to each other, having the electric induced current to appear at the electrically conductor materials of the secondary, formed by the structure of the steel and aluminum plates under the actuator planar induction. The result of the interaction between the currents of the primary, the moving part consists of the three-phase windings, with the secondary, the static part formed by metal plates, is the traction force development, resulting in the movement of the induction planar actuator's car. Statics experiments were performed for planar traction force data acquisition and dynamic experiments were performed for velocity and displacement data acquisition about the new topology.

Key words: Induction planar actuator, planar traction force, orthogonal windings.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Desenho esquemático do corte de um motor elétrico e sua e sua expansão planar.	19
Figura 2 – Desenho esquemático de entreferro horizontal: (a, b). Entreferro vertical: (c, d).	21
Figura 3 – Desenho de parte móvel longa e face simples: (a). Parte móvel curta e face simples: (b).	21
Figura 4 – Desenho esquemático de Atuador Linear de Passo, ALP, apresentado caminho do fluxo magnético desenvolvido pela excitação em CC da respectiva bobina.	23
Figura 5 – Desenho esquemático de Atuador Linear de Corrente Contínua, ALCC.	24
Figura 6 – Vista em corte transversal do Gerador Linear: (a). Desenho esquemático dos Imãs Permanentes entre as sapatas polares da parte móvel: (b).	25
Figura 7 – Desenho esquemático de um Atuador Planar de Indução, API.	28
Figura 8 – Corte transversal de dispositivo eletromagnético. Linhas de fluxo magnético com material ferromagnético: (a). Linhas de fluxo magnético sem material ferromagnético: (b).	29
Figura 9 – Desenho esquemático de Motor Linear de Indução, MLI: (a). Correntes parasitas nas extremidades de um motor linear de indução: (b). Variação do fluxo magnético do secundário: (c).	30
Figura 10 – Gráfico correspondente à influência dos Efeitos Longitudinais de Extremidades de um motor linear.	31
Figura 11 – Campo magnético de um condutor percorrido por corrente elétrica I.	35
Figura 12 – Linhas de fluxo magnético e efeito de espraiamento em um solenoide.	36
Figura 13 – Linhas de fluxo magnético e efeito de espraiamento em entreferro de material ferromagnético.	36
Figura 14 – Desenho esquemático do API: primário (a) e secundário (b).	40
Figura 15 – Desenho esquemático da estrutura de dentes compostas pelo SMC.	41
Figura 16 – Bobinas e desenho esquemático de suas dimensões: (a). Fotografia do primário do API: (b).	42
Figura 17 – Desenho esquemático da estrutura do secundário do API.	43
Figura 18 – Desenho esquemático da estrutura de sustentação do primário e chapas do secundário.	44
Figura 19 – Fotografia da nova topologia de carro primário do API.	45

Figura 20 – Desenho esquemático da Nova Topologia do Carro Primário do API. Desenho completo do carro-primário: (a). Desenho parcial do carro primário: (b).....	46
Figura 21 – Vista 3D de um dos dente da nova topologia do API: (d). Desenho esquemático do dente do API: (a, b, c).....	48
Figura 22 – Vista 3D do conjunto dente, bobinas e parafuso: (a, b, c, d). Dentes com isolamento de papel embebido em verniz isolante: (e).	49
Figura 23 – Fotografia dos dentes da nova topologia de carro primário com isolamento de fita embebida em verniz isolante elétrico.	49
Figura 24 – Desenho esquemático das ligações das bobinas dos enrolamentos. Enrolamento Y: (a). Enrolamento X: (b).	50
Figura 25 – Fotografia do aparato utilizado para processo de bobinamento dos dentes.	51
Figura 26 – Desenho esquemático das bobinas da nova topologia de carro primário. Vistas laterais e vista frontal da bobina: (b). Vista 3D da bobina: (a).....	52
Figura 27 – Siglas para método de referência de posição das bobinas na nova topologia de carro primário.	53
Figura 28 - Representações dos perfis de vistas superior e inferior da nova topologia.	53
Figura 29 - Disposição das bobinas em camadas: primeira camada de bobinas e segunda camada de bobinas.....	54
Figura 30 - Vista inferior e indicações das bobinas da segunda camada de bobinas da nova topologia de carro primário e representação das fase de excitação.	54
Figura 31 - Vista superior e indicações das bobinas da primeira camada de bobinas da nova topologia de carro primário e representação das fases de excitação.	55
Figura 32 - Disposição e localização das bobinas da nova topologia.	55
Figura 33 – Fotografia representando um teste de isolamento entre o dente e suas respectivas bobinas com a utilização do instrumento megômetro.	56
Figura 34 – Vista frontal do desenho esquemático das ligações entre as bobinas.	56
Figura 35 – Vistas laterais e vista frontal da base de fixação dos dentes da nova topologia de carro primário: (a). Vista em 3D da base de aço da nova topologia de carro primário do API: (b).	57
Figura 36 – Fotografia da bancada com os instrumentos de medição instalados para realização dos experimentos e testes.	61
Figura 37 – Fotografia do sistema de engaste da célula de carga ao carro primário: medição da força planar no sentido do eixo x	61

Figura 38 – Fotografia do sistema de engaste da célula de carga ao carro primário: medição da força planar no sentido do eixo y	62
Figura 39 – Fotografia do sistema de engaste da célula de carga ao carro primário: medição da força planar no sentido do eixo x	63
Figura 40 – Fotografia do processo de calibração da célula de carga: (a). Fotografia dos pesos padrões utilizados na calibração: (b).	64
Figura 41 – Desenho esquemático da instalação da célula de carga do tipo S para medição da força planar na direção do eixo x	64
Figura 42 – Desenho esquemático da instalação da célula de carga do tipo S para medição da força planar na direção do eixo y	65
Figura 43 – Gráfico comparativo entre as forças planar no sentido do eixo x e y da nova topologia de carro primário.	69
Figura 44 – Dados de força planar de propulsão no sentido do eixo x	71
Figura 45 – Dados de força planar de propulsão no sentido do eixo y	72
Figura 46 – Gráfico comparativo entre as forças de propulsão em ambos os eixos adquiridas em ensaios realizados separadamente.....	72
Figura 47 – Gráfico de deslocamento no eixo y do carro primário. Tensão de excitação de 70 Vrms e frequência variável.....	74
Figura 48 – Curvas de velocidade no sentido do eixo x do carro primário. Tensão elétrica 70 Vrms e frequência variável.....	75
Figura 49 – Gráfico de deslocamento no eixo x do carro primário. Frequência de excitação variável e tensão elétrica fixa em 100 Vrms.....	75
Figura 50 – Gráfico de velocidade no eixo x do carro primário. Frequência de excitação variável e tensão elétrica fixa em 100 Vrms.....	76
Figura 51 – Curvas de deslocamento no sentido do eixo y do carro primário. Tensão elétrica 70 Vrms e frequência variável.....	77
Figura 52 – Curvas de velocidade no sentido do eixo y do carro primário. Tensão elétrica 70 Vrms e frequência variável.....	77
Figura 53 – Comparação entre as forças planares de propulsão desenvolvida em ambos os eixos de movimentação do carro primário da nova topologia.....	79
Figura 54 – Comparação entre as forças planares de propulsão desenvolvida em ambos os eixos de movimentação do carro primário da nova topologia.....	80
Figura 55 – Desenho esquemático do carro primário proposto por BAGGIO FILHO (2012).81	

Figura 56 – Gráfico em barras comparativo entre as forças planares no eixo x para as topologias analisadas: <i>NOVA TOPOLOGIA</i> e <i>ANTIGA TOPOLOGIA</i>	84
Figura 57 – Gráfico em barras comparativo entre as forças planares no eixo y para as topologias analisadas: <i>NOVA TOPOLOGIA</i> e <i>ANTIGA TOPOLOGIA</i>	84
Figura 58 – Gráfico em forma de barras referentes às correntes do enrolamento X.....	85
Figura 59 – Gráfico em forma de barras referentes às correntes do enrolamento Y.....	86
Figura 60 – Gráfico em forma de barras referentes às comparações das correntes do enrolamento Y e enrolamento X.....	87

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação das características dos materiais magnéticos.....	35
Tabela 2 – Analogia entre circuitos magnéticos e circuito elétricos.	39
Tabela 3 – Características do Aço recozido AISI 1020.....	43
Tabela 4 – Dados técnicos da nova topologia de carro primário do Atuador Planar de Indução, API.....	47
Tabela 5 – Características magnéticas do material 1P Somaloy 500.	48
Tabela 6 – Média da tensão elétrica eficaz e corrente elétrica eficaz nas fases do enrolamento X.	66
Tabela 7 – Média da tensão elétrica eficaz e corrente elétrica eficaz nas fases do enrolamento Y.	67
Tabela 8 – Força planar de propulsão média ao longo do eixo x para ambos os enrolamento excitados com tensão trifásica elétrica.	67
Tabela 9 – Força planar de propulsão média ao longo do eixo y para ambos os enrolamento excitados com tensão trifásica elétrica.	68
Tabela 10 – Resultados experimentais da força planar de propulsão média na direção x	70
Tabela 11 – Resultados experimentais da força planar de propulsão média na direção y	70
Tabela 12 – Comparação entre as forças planares de propulsão nos diferentes eixos para a nova topologia de carro primário.....	78
Tabela 13 – Comparação entre as forças planares de propulsão nos diferentes eixos para a nova topologia de carro primário.....	79
Tabela 14 – Dados comparativos de força planar de propulsão no sentido do eixo x entre a <i>NOVA TOPOLOGIA</i> e a <i>ANTIGA TOPOLOGIA</i>	82
Tabela 15 – Dados comparativos de força planar de propulsão no sentido do eixo y entre a <i>NOVA TOPOLOGIA</i> e a <i>ANTIGA TOPOLOGIA</i>	83
Tabela 16 – Comparativo entre as forças planares de propulsão no sentido do eixo x com ambos os enrolamentos excitados.....	88
Tabela 17 – Comparativo entre as forças planares de propulsão no sentido do eixo y com ambos os enrolamentos excitados.....	89
Tabela 18 – Efeitos das variações dos parâmetros em máquinas lineares de indução.	92

LISTA DE ABREVIADTURAS E SIGLAS

API	Atuador Planar de Indução
AEL	Atuador Eletromecânico Linear
AEP	Atuador Eletromecânico Planar
ALS	Atuador Linear Síncrono
ALI	Atuador Linear de Indução
ALP	Atuador Linear de Passo
ALCC	Atuador Linear de Corrente Contínua
SMC	Compósito Magneticamente Macio (<i>Soft Magnetic Composite</i>)
HMM	Materiais Magneticamente Duros (<i>Hard Magnetic Materials</i>)
SMM	Materiais Magneticamente Macios (<i>Soft Magnetic Materials</i>)
MLI	Motor Linear de Indução
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CNC	Controle Numérico Computadorizado
GL	Gerador Linear
LEE	Efeito Longitudinal de Extremidade (<i>Longitudinal End Effect</i>)
TEE	Efeito Transversal de Extremidade (<i>Transversal End Effect</i>)
\vec{B}	Vetor Densidade de Fluxo Magnético [T]
\vec{H}	Vetor Intensidade de Campo Magnético [A/m]
ϕ	Fluxo Magnético [Wb]
g	Comprimento do Entreferro [m]
i	Corrente elétrica instantânea [A]
\mathcal{R}_c	Relutância de Material Ferromagnético [1/Henry]
\mathcal{R}_g	Relutância de Entreferro [1/Henry]
f_{mm}	Força Magnetomotriz [A·esp]
f_{em}	Força Eletromotriz [V]
l_c	Comprimento Médio do Núcleo Ferromagnético [m]
l_g	Comprimento Médio do Entreferro [m]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	ATUADORES ELETROMECAˆNICOS LINEARES	17
1.2	ATUADORES LINEARES DE INDUˆCˆO	18
1.3	CLASSIFICAˆO DAS APLICAˆOES DE ATUADORES LINEARES DE INDUˆCˆO.....	20
1.4	CLASSIFICAˆO DOS ATUADORES LINEARES	20
1.5	TIPOS DE ATUADORES LINEARES DE INDUˆCˆO	22
1.6	ATUADOR LINEAR DE INDUˆCˆO	25
1.6.1	<i>Breve histˆria</i>	26
1.6.2	<i>Conceituacˆo dos Atuadores Lineares de Induˆcˆo</i>	27
1.6.3	<i>Efeito das Extremidades em Atuadores Lineares de Induˆcˆo</i>	29
1.6.4	<i>Escorregamento de Atuadores Planares de Induˆcˆo</i>	32
1.6.5	<i>Eficiˆncia e Perdas do Atuador Linear de Induˆcˆo</i>	33
2	MATERIAIS MAGNˆTICOS E CIRCUITOS MAGNˆTICOS.....	34
2.1	MATERIAIS MAGNˆTICOS.....	34
2.2	DEFINIˆO DE ALGUMAS GRANDEZAS MAGNˆTICAS.....	35
2.3	CIRCUITOS MAGNˆTICOS	37
3	O ATUADOR PLANAR DE INDUˆCˆO	40
3.1	ESTRUTURA DO CARRO PRIMˆRIO	41
3.2	ESTRUTURA DO SECUNDˆRIO.....	42
3.3	ESTRUTURA DE SUSTENTAˆO DO PRIMˆRIO DO API.....	43
4	A NOVA TOPOLOGIA DE ATUADOR PLANAR DE INDUˆCˆO.....	45
4.1	ESTRUTURA DETALHADA DA NOVA TOPOLOGIA DO CARRO PRIMˆRIO.....	46
4.1.1	<i>Dentes</i>	47
4.1.2	<i>Enrolamentos e Bobinas</i>	49
4.1.3	<i>Base de fixacˆo dos Dentes</i>	57
4.2	PRINCˆPIO DE FUNCIONAMENTO	57
5	ENSAIOS EXPERIMENTAIS.....	59
5.1	ENSAIOS DE FORˆA PLANAR DE PROPULSˆO (PARTE 1)	59
5.2	ENSAIOS DE FORˆA PLANAR DE PROPULSˆO (PARTE 2)	69
5.3	VELOCIDADE DE DESLOCAMENTO.....	73

5.3.1	<i>Velocidades experimentais do enrolamento X</i>	73
5.3.2	<i>Velocidades experimentais do enrolamento Y</i>	76
6	ANÁLISES EXPERIMENTAIS E COMPARAÇÕES	78
6.1	COMPARAÇÕES DOS PARÂMETROS DE FORÇA PLANAR DE PROPULSÃO NOS EIXOS X E Y NA NOVA TOPOLOGIA DE CARRO PRIMÁRIO	78
6.2	COMPARAÇÃO DOS PARÂMETROS DE FORÇA PLANAR DE PROPULSÃO ENTRE AS TOPOLOGIAS DE CARRO PRIMÁRIO ANALISADAS	80
6.3	COMPARAÇÃO DOS DADOS DE CORRENTE ELÉTRICA PARA OUTROS OS VALORES DE EXCITAÇÃO TRIFÁSICA	85
7	CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	90
	ANEXO A – TABELA COMPARATIVA DOS EFEITOS FRENTE ALTERAÇÕES EM DETERMINADOS PARÂMETROS	92
	REFERÊNCIAS	93

1 INTRODUÇÃO

Frente aos substanciais aumentos de estudo nas áreas relacionadas às aplicações de máquinas elétricas lineares, tais como em equipamentos para deslocamentos de carga e transporte ou então aplicações de posicionamento de dispositivos sobre determinadas superfícies que requerem precisão aliada à velocidade, este projeto trata da implantação de uma nova topologia para o dispositivo primário de motor linear de indução, mais especificamente, nova topologia de carro primário de um Atuador Planar de Indução, API.

Este projeto, portanto, tem como objetivos principais o desenvolvimento experimental de uma nova topologia de carro-primário de um atuador planar de indução.

O trabalho desenvolvido consiste na aplicação de nova topologia para os enrolamentos do primário do atuador linear, com mudanças estruturais e eletromagnéticas: mudanças no número de dentes e suas dimensões, bem como mudança das dimensões das bobinas e o levantamento de suas características físico-elétricas. A partir deste novo protótipo proceder-se-á aos testes de ensaios estáticos e dinâmicos do atuador linear de indução, incluindo o levantamento de dados específicos aos devidos fins de análise experimental, contemplando o objetivo deste trabalho: a construção e a verificação das vantagens e desvantagens da nova topologia de carro primário do Atuador Planar de Indução, API.

A partir das implantações destas mudanças, os respectivos processos de teste, análise dos parâmetros desejados bem como a análise do desempenho desta nova topologia e a sua avaliação serão critérios abordados para correlacionar e avaliar o desempenho final desta nova estrutura e topologia adotada.

Em resumo, o estudo da nova topologia, sua construção, desenvolvimento e testes, são os focos principais deste trabalho.

Para uma melhor apresentação dos estudos que envolvem o projeto, as análises, testes e avaliações, juntamente com os resultados e conclusões, o presente trabalho está dividido em sete capítulos.

No primeiro capítulo são descritos, brevemente, a introdução e objetivos, fazendo exposição a partir de uma revisão bibliográfica sobre os estudos e aplicações dos motores lineares de indução, ou como também chamados de máquinas lineares de indução.

Nesta primeira parte serão descritos sucintamente algumas características construtivas das topologias de atuadores lineares ou máquinas lineares.

Posteriormente a estas descrições, serão apresentadas algumas topologias de atuadores lineares de indução.

São abordados em um segundo momento os tópicos: materiais ferromagnéticos e metodologia de análise de circuitos magnéticos. No capítulo dois há uma revisão bibliográfica dos materiais ferromagnéticos e a descrição de algumas grandezas de efeito eletromagnético. Ainda no capítulo dois, serão revisados alguns conceitos de circuitos magnéticos.

No capítulo três, é apresentada uma revisão bibliográfica para o Atuador Planar de Indução proposto e desenvolvido por BAGGIO FILHO (2012). Serão abordados tópicos como os parâmetros construtivos, físicos, elétricos e eletromagnéticos do API e a fundamentação teórica dos princípios de funcionamento deste equipamento. É especificamente sobre o dispositivo carro-primário deste projeto que se justifica este trabalho do desenvolvimento de nova topologia de carro primário.

A partir do capítulo quatro, serão abordados itens que incorporam e objetivam o presente trabalho. Neste capítulo é apresentado o desenvolvimento construtivo da nova topologia para o primário do Atuador Planar de Indução. Os processos construtivos, materiais utilizados, bem como a descrição dos testes preliminares de operacionalidade e demais etapas antecedentes aos ensaios experimentais finais.

O quinto capítulo apresenta os ensaios experimentais realizados sobre a nova topologia de carro primário. São testes laboratoriais que levantam parâmetros de forças desenvolvidas e deslocamentos ou velocidades adquiridas pelo novo carro primário.

O sexto capítulo mostra as análises, resultados, comparações e algumas considerações a cerca dos dados experimentais adquiridos. É neste capítulo, ainda, que as topologias de carro primário terão seus parâmetros comparados entre si. Os dados da topologia de carro primário desenvolvida por BAGGIO FILHO (2012) serão confrontados com os dados da nova topologia de carro primário desenvolvida.

No último capítulo, capítulos sete são descritas as conclusões finais deste projeto e algumas considerações.

1.1 Atuadores Eletromecânicos Lineares

Conforme Baggio Filho (2012, p. 29) “Atuadores eletromecânicos são dispositivos que podem produzir movimentos com um ou mais graus de liberdade. Basicamente, os

atuadores elétricos são máquinas que convertem a energia elétrica em energia mecânica associada ao movimento”.

Os dispositivos que desenvolvem movimentos associados aos processos eletromagnéticos gerando forças de propulsão de caráter linear, ou seja, movimentos orientados em uma única direção ou planos são classificados como Atuadores Lineares, AL.

1.2 Atuadores Lineares de Indução

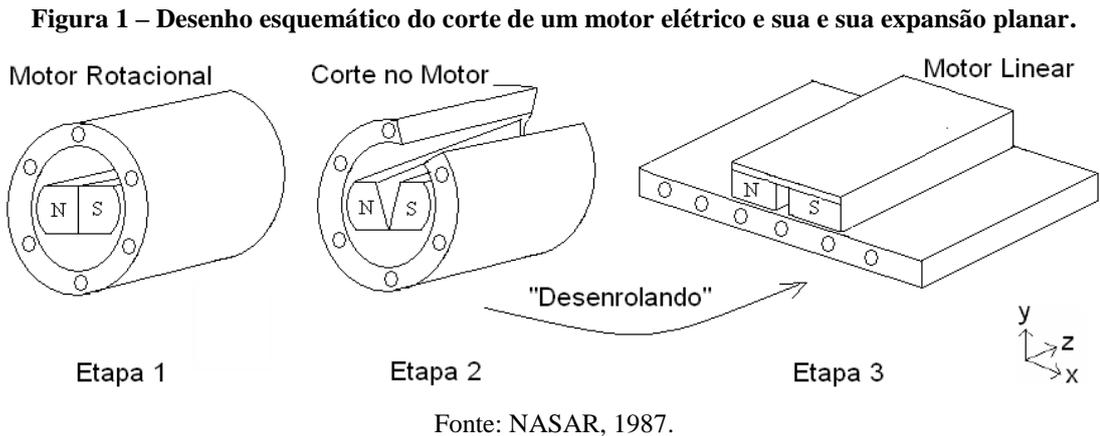
Diferentemente dos motores elétricos que produzem movimentos rotativos em resposta às excitações em seus enrolamentos, os atuadores lineares, de acordo com Baggio Filho (2012, p. 29), desenvolvem trajetórias lineares, que são definidos como:

“[...] máquinas elétricas que desenvolvem movimentação sobre uma trajetória linear, com apenas um grau de liberdade. Podem ainda ser definidos como um transdutor eletromagnético que converte uma excitação elétrica em um movimento de translação em linha. Essas máquinas são mais bem entendidas e explicadas quando tratadas como um motor rotativo que é aberto sobre um plano, possibilitando, pelos mesmos princípios eletromagnéticos, um movimento em linha, [...]”

Fitzgerald (2006) define os atuadores lineares ou máquinas lineares como formas planificadas de motores rotativos ou simplesmente motores lineares elétricos. Ainda, salienta as aplicações destes dispositivos e generalidades da seguinte forma:

“Tipicamente o ‘estator’ CA está no veículo em movimento, e um ‘rotor’ estacionário condutor constitui os trilhos. Nesses sistemas, além de propiciar a propulsão, as correntes induzidas nos trilhos podem ser usadas para produzir levitação, oferecendo assim um mecanismo de transporte à alta velocidade [...]”.

Conforme figura 1, é possível relacionar os motores elétricos com os atuadores lineares; para os motores elétricos haverá movimentos rotativos, velocidade angular e desenvolvimento de conjugado. Já para os atuadores lineares os movimentos têm características de trajetória em linha, velocidade de translação e desenvolvimento de força.



Segundo Gieras (1994), a ideia deste tipo de atuador linear data do século XIX, com posteriores aplicações de transporte de massas em velocidades relativamente altas, estes dispositivos foram estudados largamente nos Estados Unidos da América para aceleração de aeronaves.

De acordo com Fitzgerald (2006), os atuadores lineares encontraram aplicações na indústria de ferramentas e robótica onde o movimento do dispositivo ou primário que se coloca em movimento é linear.

Limitações em função das dimensões dos entreferros que eram maiores do que em máquinas rotativas, fizeram com que se perdesse o interesse nesta área de atuadores lineares eletromagnéticos, bem como, devido aos custos e limitações tecnológicas da época. Assim, estes atuadores foram deixados de lado, não prosperando a sua tecnologia até a segunda metade do século XX, quando, então, em aplicações de transportes de materiais em sistemas que necessitavam de altas velocidades destacaram-se os atuadores de corrente alternada.

Em muitos casos para manter o conceito original para os atuadores lineares de indução havia a necessidade de um novo material ferromagnético ou mesmo de tecnologias de acionamento e excitação para então dar continuidade nas potencialidades destes dispositivos, conforme Laithwaite (1969) descreve em seu livro.

O fluxo magnético no entreferro de um atuador linear não pode ser considerado uniforme ao longo de sua trajetória como nos motores elétricos, pois não encontra um caminho fechado e simétrico como no caso dos motores elétricos rotativos.

Há ainda a necessidade de aplicações de métodos mais complexos de controle para os atuadores lineares, já que ocorrem efeitos de borda ao final do curso destas máquinas lineares, efeito irrelevante para as máquinas rotativas.

1.3 Classificação das aplicações de atuadores lineares de indução

São definidas diversas funções para os atuadores lineares de indução e tais aplicações são separadas em três formas:

- Máquinas de força.
- Máquinas de energia.
- Máquinas de potência.

Máquinas de força ou atuadores lineares de indução de força são máquinas de operação estática ou baixas velocidades e normalmente são de pequeno porte.

As máquinas de energia são os atuadores cujas aplicações oferecem o transporte de alta velocidade, tornando-as atuadores lineares de grande porte, assim como, as máquinas de potência, porém diferenciando-se pela característica de alta eficiência.

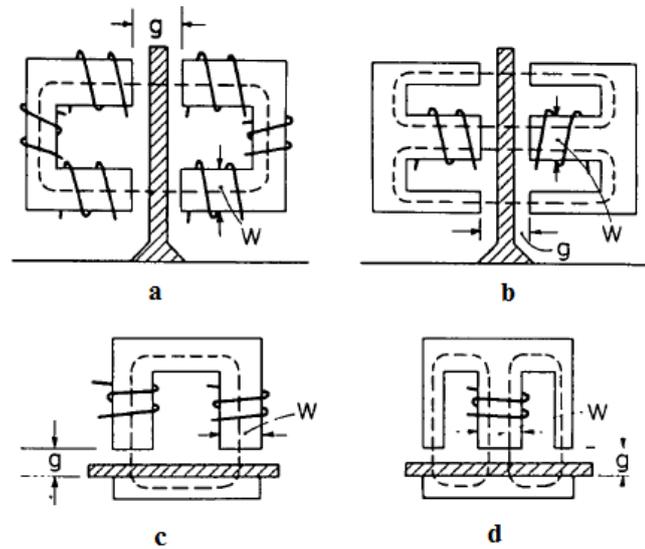
1.4 Classificação dos atuadores lineares

Conforme as definições de classificação dos atuadores lineares quanto às suas aplicações, estes ainda podem sofrer outra diferenciação que os classifica conforme o arranjo das estruturas móveis e fixas.

De acordo com Eastham e Laithwaite (1973), estes dispositivos tem classificação quanto à orientação do entreferro entre o primário e o secundário da máquina linear de indução.

Na figura 2 observam-se as duas diferentes formas: entreferro horizontal ou entreferro vertical. Note que são apresentadas as topologias de face-simples e face-dupla de enrolamentos.

Figura 2 – Desenho esquemático de entreferro horizontal: (a, b). Entreferro vertical: (c, d).

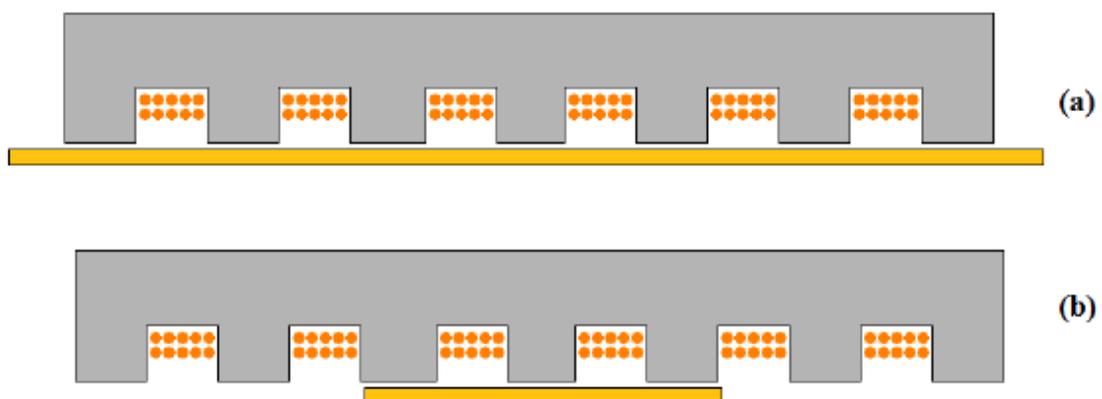


Fonte: EASTHAM, 1973.

Os atuadores lineares podem ainda ser classificados quanto ao comprimento do primário e/ou secundário. De acordo com as características da parte móvel e parte fixa, estas podem ser subdivididas em estator curto ou longo, ou então, parte móvel (*translador*) curta ou longa.

Na figura 3 são exemplificados os atuadores com partes móveis classificadas como curtas ou longas.

Figura 3 – Desenho de parte móvel longa e face simples: (a). Parte móvel curta e face simples: (b).



Fonte: NASAR, 1987.

1.5 Tipos de atuadores lineares de indução

Estes motores elétricos lineares, denominados atuadores lineares, podem ser classificados quanto à forma de desenvolvimento de translação do dispositivo que se movimenta ou então pela topologia e forma de excitação, genericamente da seguinte maneira:

- Atuadores Lineares Síncronos (ALS);
- Atuadores Lineares de Indução (ALI);
- Atuadores Lineares de Passo, relutância variável (ALP), ou;
- Atuadores Lineares de Corrente Contínua (ALCC).

Os Atuadores Lineares Síncronos, ALS, têm excitação dos enrolamentos através de excitação elétrica alternada, geralmente trifásica e equilibrada. Assim como os Atuadores Lineares de Indução, ALI, o objetivo para estes atuadores é a produção de um campo magnético viajante. A parte móvel dos Atuadores Lineares Síncronos é formada por uma fonte contínua de fluxo magnético, sendo configurado por ímãs permanentes ou enrolamento de campo com uma excitação por corrente contínua, CC.

A velocidade de movimento mecânico do carro dos ALS é diretamente proporcional à frequência da excitação aplicada ao enrolamento do estator e inversamente proporcional ao número de polos do primário, ou seja, está em sincronismo com o movimento do campo viajante da excitação. São dispositivos de simplicidade mecânica, simples sistema de controle da velocidade e força e relativa eficiência.

Os Atuadores Lineares de Indução, ALI, serão descritos posteriormente, pois como o estudo deste projeto envolve um dispositivo deste tipo serão necessários maiores detalhes que serão descritos ao longo deste trabalho.

Para estes dispositivos, as transformações da energia elétrica em energia mecânica os tornam especialmente utilizados no transporte de cargas que exijam elevada força de translação.

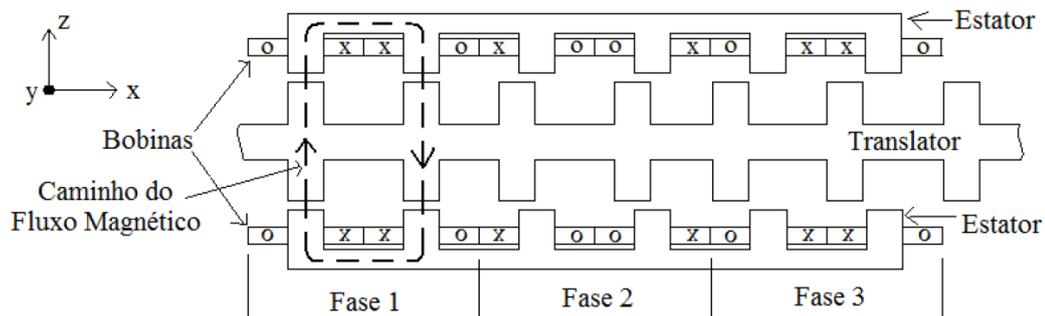
Os Atuadores Lineares de Passo (ALP) são dispositivos que englobam as mesmas topologias e tecnologias de controle que os motores-de-passo rotativos, encontrados, por exemplo, em mesas cartesianas, em impressoras ou então em mesas fresadoras CNC (Controle Numérico Computadorizado).

São atuadores de movimento incremental, ou seja, conforme a quantidade de pulsos periodicamente determinados injetados nas bobinas específicas o carro se movimenta em um

plano linearmente, assim como no motor-de-passo comuns com os movimentos angulares do eixo.

Conforme Basak (1996), os princípios de operação destes atuadores lineares, ALP, podem ser de relutância variável ou então híbrido com ímãs permanentes. Na figura 4 é mostrado este tipo de atuador linear.

Figura 4 – Desenho esquemático de Atuador Linear de Passo, ALP, apresentado caminho do fluxo magnético desenvolvido pela excitação em CC da respectiva bobina.



Fonte: BASAK, 1996

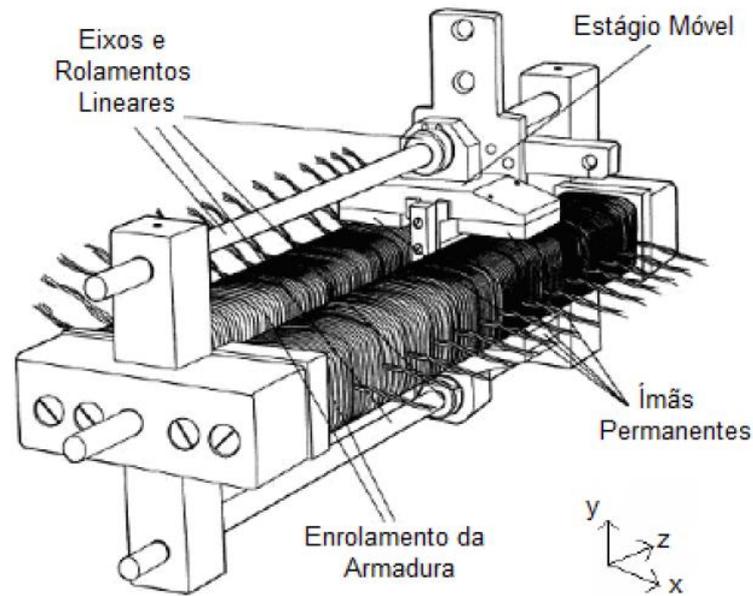
A precisão dos ALP para posicionamento se torna um grande benefício na aplicação destes dispositivos em determinados sistemas. O ALP têm suas aplicações não limitadas a pequenos deslocamentos o que lhes permite uma boa precisão em sistemas de posicionamento.

Como desvantagens destes atuadores, mencionam-se os limites de aplicação de carga e potência de saída, bem como a obrigatoriedade de sistema de chaveamento ou acionamento dedicado, normalmente um sistema eletrônico de acionamento.

Outro atuador linear que deve ser citado é o Atuador Linear de Corrente Contínua, ALCC. Da mesma forma como ocorre em motores de corrente contínua, CC, os ALCC são excitados por corrente elétrica contínua, sendo que o campo magnético é gerado por ímãs permanentes ou por enrolamentos de campo, que interage com a corrente elétrica que percorre as bobinas da armadura, desenvolvendo desta forma a força que resulta no deslocamento linear do carro para o ALCC.

Além disso, as aplicações dos atuadores lineares de corrente contínua englobam sistemas para movimentação ou transporte de carga atingindo médias velocidades e que exijam elevada força.

Figura 5 – Desenho esquemático de Atuador Linear de Corrente Contínua, ALCC.



Fonte: FLORES FILHO, 1996.

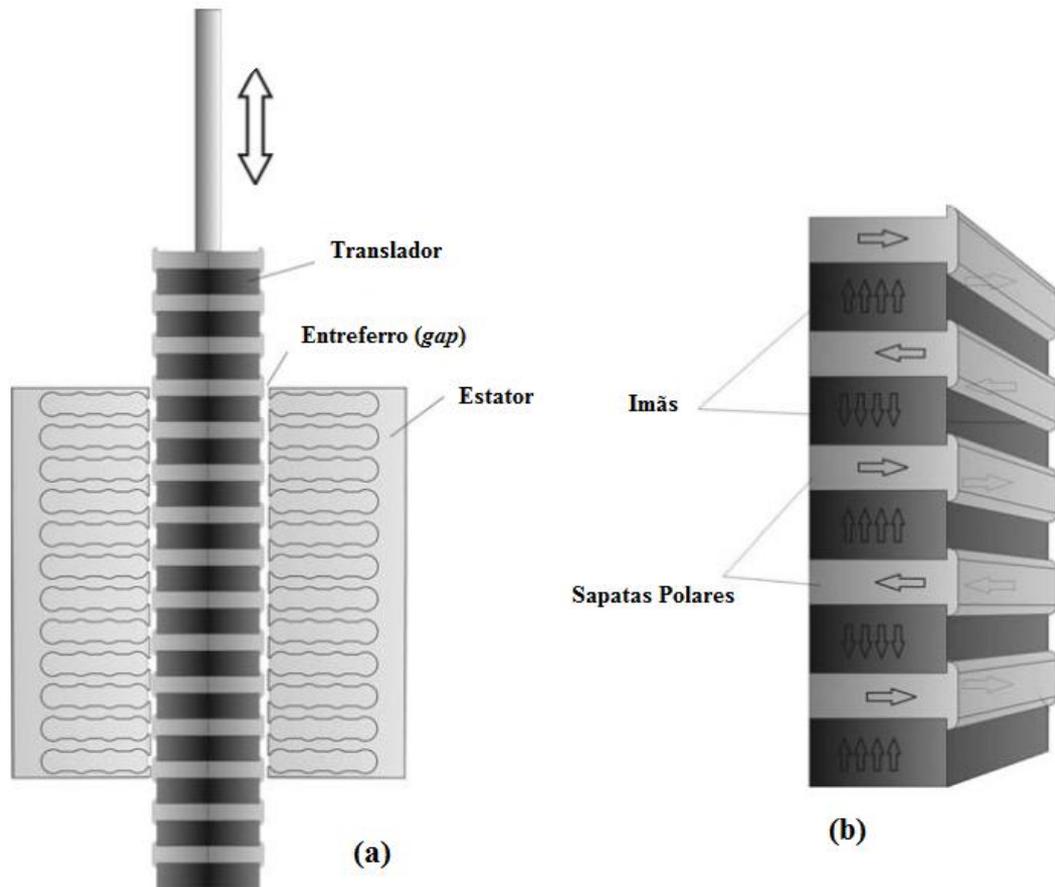
Conforme apresentado na figura 5, este Atuador Linear de Corrente Contínua, ALCC é formado por um carro que pode se movimentar sobre o eixo de acordo com a excitação de corrente contínua aplicada no enrolamento de dupla armadura, sem escovas e sem ranhuras.

Até o momento, apresentaram-se atuadores lineares que transformam a energia elétrica em movimentos, ou seja, energia mecânica.

De forma contrária, a conversão de energia mecânica em energia elétrica também é possível, implicando adaptações aos atuadores ou máquinas lineares.

É o caso dos Geradores Lineares acionados por motor tipo *Stirling*, representado na figura 6. De acordo com Danielsson (2003) este dispositivo é formado por uma parte estática e outra parte móvel, respectivamente formado por material ferromagnético envolvido por bobinas e “sapatas polares” em conjunto com ímãs permanentes.

Figura 6 – Vista em corte transversal do Gerador Linear: (a). Desenho esquemático dos Imãs Permanentes entre as sapatas polares da parte móvel: (b).



Fonte: DANIELSSON, 2003.

1.6 Atuador Linear de Indução

Os atuadores lineares de indução são ditos como os mais populares dentre os atuadores lineares existentes e apresentam crescente utilização em aplicações industriais, principalmente em deslocamentos horizontais de alta velocidade. Seu princípio de funcionamento é basicamente entendido a partir da planificação dos motores elétricos tipo gaiola de esquilo, que são motores rotativos. Assim, os parâmetros destes atuadores elétricos, como velocidade ou força de propulsão – definida como conjugado para os motores elétricos rotativos – são especificados pelas características construtivas dos enrolamentos e o tipo de excitação dos mesmos.

1.6.1 Breve história

A história destes dispositivos se iniciou por volta do final do século XIX, mais especificamente no ano de 1890, período o qual é encontrada a primeira patente para um equipamento de uma máquina linear de indução.

Dentre as primeiras aplicações ou os primeiros experimentos sobre os atuadores lineares de indução, citados, como, por exemplo, a pista de testes desenvolvida por Korda e reinventado por Rosenfeld, Zelennay e Dulait, com cerca de 400 metros de comprimento e 20 núcleos de enrolamentos primários (ZENELAY, 1902), ou então, nos experimentos realizados pela Marinha dos Estados Unidos da América, EUA, com aplicações militares para lançamento de aviões durante a década de 1940.

O estudo destes dispositivos tomou corpo, e ainda nos dias de hoje há inúmeras possibilidades de formas, estruturas, construções ou desenvolvimentos de uma tecnologia de atuador planar de indução.

É fato que estas máquinas lineares de indução, conforme já descrito anteriormente, acabaram esquecidas devido aos custos de construção, ou mesmo pela falta de tecnologia mais avançada para controle e acionamento na época, porém, na década de 1950, foi reaberto o uso de máquinas lineares de indução na Universidade de Manchester. O caso do *sheet-rotor* (rotor laminado) como fora chamado, usava um enrolamento primário para controlar um disco de alumínio. Tal projeto foi usado como demonstração deste dispositivo na universidade e mais tarde, com a colaboração das locomotivas Gorton, foram demonstradas em pistas de testes das ferrovias inglesas.

A saber, os atuadores planares de indução, ou genericamente chamados de máquinas lineares de indução, Motor Linear de Indução, MLI, sofrem efeitos de início e final de curso, efeito de borda, efeitos que têm influência negativa no desempenho do atuador e explicam suas características não lineares.

Em Yamamura (1979) encontram-se estudos teóricos dos efeitos de final de curso. Este efeito é denominado como Efeito Longitudinal de Extremidade – LEE, *Longitudinal End Effect*, está diretamente associado às dimensões do primário e secundário do atuador planar.

Já no livro de Gieras (1994), há, além de estudos e características construtivas, diversas aplicações referentes às máquinas lineares de indução e estudos envolvendo os seus efeitos eletromagnéticos.

Na literatura também podem ser encontrados conceitos sobre análise de motores lineares de indução abordando estudos a respeito dos efeitos de desequilíbrio de fases, suas

causas e consequências. Trabalhos que apresentam métodos de obtenção de parâmetros de motores de indução linear através de modelos de circuitos equivalentes ou então através de simulações numéricas: método dos elementos finitos.

A modelagem de um motor linear de indução considerando os efeitos de final de curso foi proposta por Faiz (2000). Neste trabalho foi analisado o desempenho de um motor linear de indução de face simples, baseado em um circuito equivalente, teoria unidirecional e bidirecional do campo magnético para análise das características de desempenho do dispositivo.

Um modelo para simulação de um motor linear de indução através do método de elementos finitos abrange os efeitos de borda transversal, efeito longitudinal de final de curso e efeitos de saturação dos materiais ferromagnéticos. Tal modelo pode ser usado para projetar um Motor Linear de Indução, MLI.

1.6.2 Conceituação dos Atuadores Lineares de Indução

Dentre as já mencionadas aplicações dos atuadores lineares de indução, de modo geral, utilizados em sistemas de transporte, movimentação de materiais para armazenamento e manuseio, lançadores de objetos e outros, citam-se as operações de máquinas e ferramentas, controle de abertura, portas ou cortinas automatizadas ou então em transportes de pessoas em trens de alta velocidade.

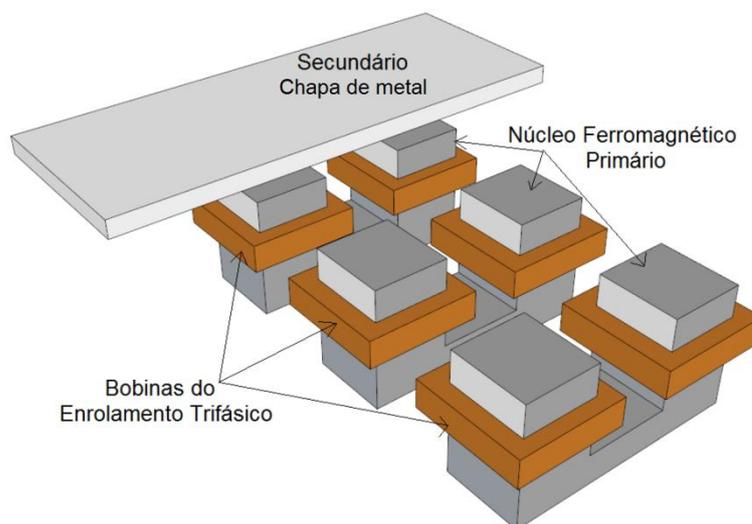
Estruturalmente, o atuador linear de indução é composto por uma parte estacionária, geralmente chamada de primário, que é formada por uma estrutura de material ferromagnético sobre a qual estão dispostos os enrolamentos ou bobinas. É composto ainda por uma parte móvel, também chamada de secundário, formada por uma placa de alta condutividade elétrica que ainda pode estar em conjunto com outra placa de material com alta permeabilidade magnética.

Analogamente aos motores rotativos, a excitação dos enrolamentos do primário é feito a partir de fonte trifásica de energia elétrica.

A movimentação da parte móvel do atuador linear de indução ocorre com a aplicação das tensões trifásicas e alternadas nos enrolamentos do primário, acarretando no surgimento de correntes nas bobinas, que, por sua vez, são responsáveis pela origem do campo magnético viajante ao longo da estrutura composta pelo primário. Este campo magnético induz o aparecimento de correntes no secundário.

Na figura 7 pode-se observar uma possível estrutura de um Atuador Linear de Indução, ALI.

Figura 7 – Desenho esquemático de um Atuador Planar de Indução, API.



Fonte: BAGGIO FILHO, 2012.

A estrutura composta pela parte estática ou o primário do atuador linear de indução é de material ferromagnético *ranhurado*. Nos dentes entre as ranhuras estão dispostas as bobinas que compõe o enrolamento polifásico. Conforme já mencionado, são estes enrolamentos que darão origem ao campo magnético viajante, a exemplo do que ocorre nos motores rotativos de indução onde a excitação, geralmente trifásica, é aplicada aos enrolamentos estáticos destes dispositivos.

Segunda a Lei de Faraday, uma força eletromotriz é induzida na placa de material de alta condutividade, parte móvel do API, assim gerando uma corrente elétrica no secundário, diretamente proporcional à variação do fluxo magnético estabelecido pelos enrolamentos do primário, energizados pela excitação trifásica alternada.

Segundo a Força de Laplace, gera-se no secundário uma força responsável pelo movimento do secundário, resultante da interação entre a corrente induzida no secundário e o campo magnético do primário. Esta força tem a mesma direção do campo viajante do primário.

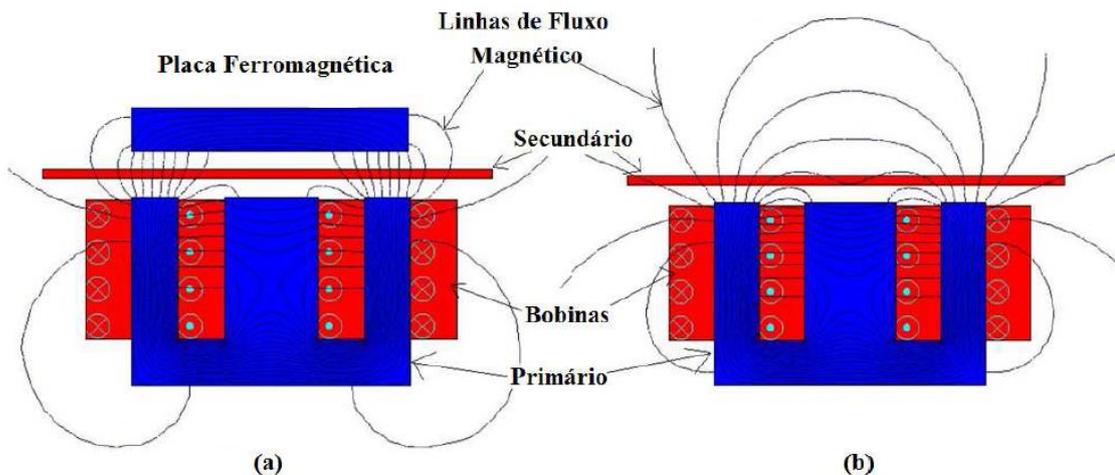
As vantagens e desvantagens das configurações de montagem dos atuadores lineares de indução confrontam-se com os custos de fabricação, manuseio e manutenção ou então a capacidade específica da aplicação destes dispositivos, onde há a necessidade, por exemplo, da melhor distribuição ou homogeneidade do fluxo magnético e campo magnético, ou então a

implementação de materiais cujas características contemplam as especificações da utilização do atuador linear de indução.

Na figura 8 é possível observar as linhas de fluxo sendo orientadas. Isto se deve ao material que compõe o secundário que proporciona um caminho de baixa relutância estabelecendo caminho para o fluxo magnético.

Este efeito é mais bem visualizado na figura 8.

Figura 8 – Corte transversal de dispositivo eletromagnético. Linhas de fluxo magnético com material ferromagnético: (a). Linhas de fluxo magnético sem material ferromagnético: (b).



Fonte: RODRIGUES, 1973.

1.6.3 Efeito das Extremidades em Atuadores Lineares de Indução

O efeito de fim de curso nos atuadores lineares de indução, efeito já mencionado em capítulos anteriores neste trabalho, pode ser subdividido em efeitos estáticos das extremidades e efeitos dinâmicos das extremidades dos atuadores lineares de indução.

Os efeitos estáticos de final de curso ocorrem devido ao circuito magnético apresentar características de circuito aberto. Ou seja, conforme a posição do primário em relação ao secundário, respectivamente, partes estáticas e móveis do atuador linear ocorrem assimetrias entre o posicionamento das fases com seu respectivo núcleo ferromagnético. Desta forma, a indutância mútua e a autoindutância das fases ou enrolamentos não são simétricas.

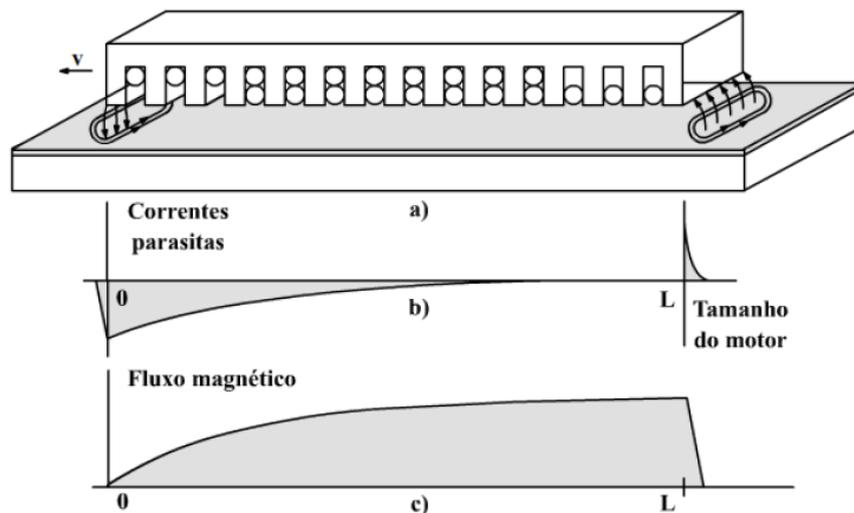
Tal efeito torna-se de menor relevância com um grande número de polos, apresentando maior superfície de interação entre o primário e o secundário, já que haverá um número maior de polos fechando o circuito magnético com o secundário em relação ao

número de polos que estarão sobre a extremidade da superfície de interação entre a parte estática, primário, e a parte móvel, secundário.

Semelhante a este efeito, porém com características dinâmicas, ocorrem os efeitos dinâmicos das extremidades dos atuadores lineares de indução. Este efeito causa uma distorção no fluxo magnético nos momentos em que a parte móvel em relação à parte estática do atuador está na posição de final de curso, mais especificamente nas regiões de entrada ou saída do entreferro.

De acordo com JULIANI (2011), na figura 9 é mostrado graficamente as correntes parasitas e o fluxo magnético ao longo do comprimento do secundário de um motor linear de indução.

Figura 9 – Desenho esquemático de Motor Linear de Indução, MLI: (a). Correntes parasitas nas extremidades de um motor linear de indução: (b). Variação do fluxo magnético do secundário: (c).

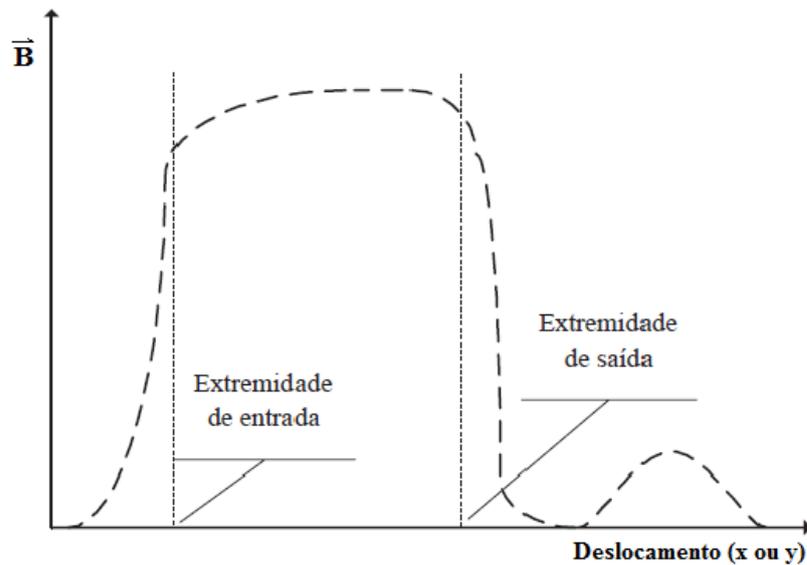


Fonte: JULIANI, 2011.

Ambos os efeitos mencionados e descritos nos parágrafos anteriores são referentes aos Efeitos Longitudinais de Extremidade, ELE. Na figura 10 é possível analisar o efeito dinâmico de extremidade ou final de curso. Nesta figura apresenta-se um gráfico que corresponde à variação do campo magnético em função da movimentação do secundário próximo das periferias do primário (enrolamentos estáticos).

Em uma máquina rotativa de indução, ou simplesmente motor de indução, o campo magnético no entreferro tem carácter periódico, diferentemente dos atuadores lineares de indução que apresentam um começo e um fim definidos pelas dimensões das peças que formam o primário e secundário.

Figura 10 – Gráfico correspondente à influência dos Efeitos Longitudinais de Extremidades de um motor linear.



Fonte: LEITE, 2003.

Outro efeito relacionado à distribuição não uniforme do fluxo magnético é o Efeito Transversal de Borda, ETB. Em atuadores lineares de indução onde a região do primário, excede a largura do secundário, respectivamente, enrolamentos estáticos compondo o primário e placas metálicas que se movimentam compondo o secundário, estes efeitos se intensificam justo pela distribuição não uniforme de corrente circulante no secundário.

Tal efeito sofre atenuação de acordo com o número de polopolos do primário, assim como, o efeito estático descrito anteriormente. Mas em contra partida, com o aumento da velocidade da parte móvel com relação à parte fixa, este efeito torna a aumentar.

1.6.4 Escorregamento de Atuadores Planares de Indução

A exemplo dos efeitos de escorregamento em motores elétricos de indução, motores rotativos, há o surgimento de um escorregamento s nos atuadores lineares. Este escorregamento representa a diferença entre a velocidade síncrona de translação do campo viajante e a efetiva velocidade de deslocamento do secundário.

Assim como nas máquinas rotativas de indução, a equação que expressa o escorregamento é:

$$s = \frac{v_s - v}{v_s} \quad (1)$$

$$v_s = 2\tau f \quad (2)$$

onde v é a velocidade linear de deslocamento do secundário em relação ao primário e v_s é a velocidade linear síncrona (analogamente representada por N_s que é a velocidade síncrona do campo girante em motores elétricos de indução em rotações por minuto, *rpm*). A variável τ é o passo linear e f é a frequência da corrente elétrica de excitação.

Quando energizado com tensões trifásicas, o enrolamento do primário desenvolve um fluxo magnético viajante ao longo do secundário. Diante disto, o valor das correntes induzidas no secundário tem relação direta com a magnitude das tensões induzidas e pela impedância associada ao secundário.

Com o secundário parado em relação ao primário, o escorregamento tem valor unitário, $s = 1$, e a frequência das tensões trifásicas no primário é a mesma no secundário. Pode-se dizer que a força de propulsão que coloca em movimento o secundário, na direção do campo viajante, é devido à interação do campo magnético produzido pelas correntes induzidas.

A velocidade do secundário, parte móvel do atuador linear é sempre menor que a velocidade linear de deslocamento do campo magnético produzido pelo primário. Se as velocidades se tornassem iguais a resultante da força propulsora se tornaria nula, pois o secundário estaria estacionário em relação ao campo magnético do primário, não havendo corrente elétrica induzida.

1.6.5 Eficiência e Perdas do Atuador Linear de Indução

Conforme FIZTGERALD (2006), as considerações sobre as perdas das máquinas de indução são importantes por três razões: (1) as perdas determinam o rendimento da máquina e influenciam sobre os custos de operação; (2) determinam os efeitos térmicos e os limites de aquecimento sem deterioração excessiva da isolação; e (3) as quedas de tensão estão associadas às perdas e devem ser devidamente contabilizadas para uma modelagem e representação da máquina.

O rendimento em máquinas de indução pode ser expresso conforme equação 2.

$$\eta = \frac{P_{saída}}{P_{entrada}} \quad (3)$$

$$\eta = \frac{P_{entrada} - \text{Perdas}}{P_{entrada}} = 1 - \frac{\text{Perdas}}{P_{entrada}} = \frac{P_{saída}}{P_{saída} + \text{Perdas}}$$

Em termos de porcentagem é expressa conforme equação 3.

$$\eta_{\%} = 100 \cdot \left(\frac{P_{saída}}{P_{saída} - \text{Perdas}} \right) \quad (4)$$

Dentre as perdas dos atuadores lineares de indução são citadas: as perdas ôhmicas, encontradas nos enrolamentos do primário do atuador e no secundário, as perdas mecânicas, associadas aos elementos mecânicos que possibilitam o deslocamento do secundário, como por exemplo, os rolamentos dos eixos que suportam o peso do secundário, e as perdas magnéticas totais materiais magnéticos que compõe o atuador linear.

2 Materiais Magnéticos e Circuitos Magnéticos

Os materiais magnéticos são classificados frente as suas características específicas como as características de permeabilidade magnética, saturação, coercitividade, perdas magnéticas e mesmo resistividade elétrica.

Analogamente aos circuitos elétricos, os circuitos magnéticos são usados como parte da metodologia de representação e análise de dispositivos eletromagnéticos.

Com base nisto, o caminho para o fluxo magnético estabelecido em dispositivos com efeitos magnéticos é comparado com o caminho estabelecido da corrente elétrica em dispositivos ou circuitos elétricos.

2.1 Materiais Magnéticos

Os materiais ferromagnéticos são classificados em duas categorias principais: materiais magneticamente macios, *soft magnetic materials*, e materiais magneticamente duros, *hard magnetic materials*.

Os materiais magneticamente macios têm características de alta permeabilidade magnética, ou seja, são sensíveis a campos magnéticos externos. Esta propriedade permite a estes materiais a concentração de fluxo magnético e que estabeleçam um caminho de baixa relutância para o fluxo magnético. Além disso, estes tipos de materiais apresentam baixa coercitividade, ou seja, um material com características de baixa coercitividade significa dizer que a intensidade do campo magnético necessário para reduzir a magnetização do material após a magnetização desta amostra alcançar a saturação magnética é baixa, portanto sua susceptibilidade magnética é alta.

Já os materiais magneticamente duros são materiais que retêm o seu magnetismo e são mais difíceis de desmagnetizar. Estes materiais têm a característica de reter o seu magnetismo mesmo após a remoção do campo magnético aplicado; assim, estes materiais são amplamente utilizados para fabricação de magnetos ou ímãs permanentes.

Estes materiais tem permeabilidade magnética baixa inclusive baixa susceptibilidade, e ao contrário dos materiais magneticamente macios, têm características de alta coercitividade.

Na tabela 1 pode ser visualizada uma comparação entre estes tipos de materiais.

Tabela 1 – Comparação das características dos materiais magnéticos.

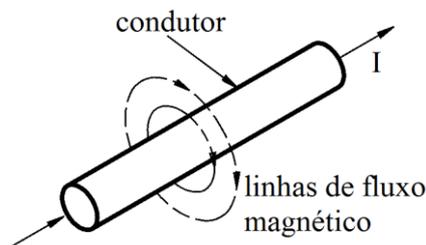
	<i>Materiais Magneticamente Macios (SMM)</i>	<i>Materiais Magneticamente Duros (HMM)</i>
Perdas por Correntes de Foucault	Baixas perdas (devido à alta resistividade)	Altas perdas
Máximo Produto de Energia	Baixo	Alto
Coercitividade Magnética	Baixa	Alta
Suceptibilidade Magnética	Alta	Baixa
Magnetização e Desmagnetização	Fácil (baixa energia)	Difícil (alta energia)

Fonte: SILVEIRA, 2003.

2.2 Definição de algumas Grandezas Magnéticas

Um campo magnético pode ser produzido por um ímã permanente, ou por um condutor percorrido por corrente elétrica, conforme a figura 11 a baixo.

Figura 11 – Campo magnético de um condutor percorrido por corrente elétrica I.



Fonte: o autor.

Uma corrente elétrica percorrendo um condutor elétrico em forma de um solenoide desenvolverá um campo magnético cujas linhas de força estarão concentradas principalmente no interior deste solenoide. Ao posicionar um material ferromagnético no interior do solenoide, as linhas de fluxo magnético ficarão concentradas no interior deste material, pois este material possui a propriedade de alta permeabilidade magnética.

É apresentada na figura 12 uma possível configuração de um solenoide percorrido por corrente elétrica.

O vetor \vec{B} é o símbolo que representa o vetor densidade de fluxo magnético e expressa a relação entre o fluxo magnético Φ através de uma determinada região ou superfície. O elemento de área da superfície que contém o fluxo magnético é definido por $d\vec{S}$.

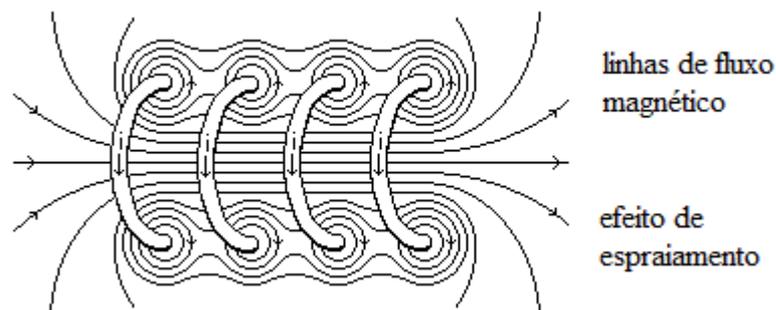
$$\phi = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S} \quad (5)$$

Já o fluxo magnético em uma superfície fechada é nulo, expressado pela equação 5. Este fato é facilmente compreendido já que as linhas de fluxo que possivelmente entram na determinada superfície obrigatoriamente devem sair, tão logo, o fluxo magnético resultante é nulo. Esta expressão afirma a não existência de cargas monopulares.

$$\phi = \oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0 \quad (6)$$

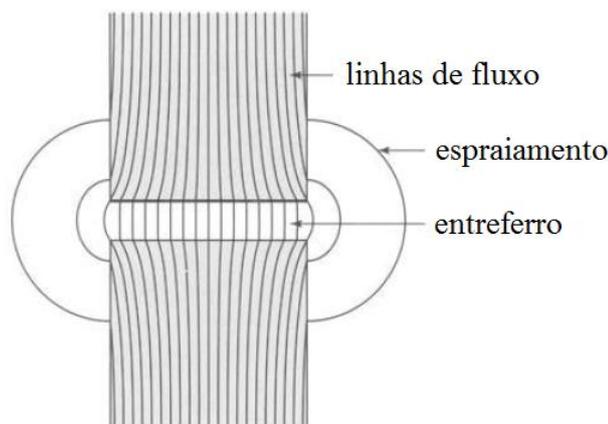
Quando o núcleo magnético do dispositivo não configura um circuito fechado, há o aparecimento de uma região definida como entreferro. É nesta região do entreferro que o fluxo magnético não se distribui uniformemente causando o surgimento do efeito chamado de espraçamento.

Figura 12 – Linhas de fluxo magnético e efeito de espraçamento em um solenoide.



Fonte: o autor.

Figura 13 – Linhas de fluxo magnético e efeito de espraçamento em entreferro de material ferromagnético.



Fonte: FITZGERALD, 2006.

Em solenoides que contém em seu núcleo material não ferromagnético a densidade de fluxo magnético \vec{B} é constante ao longo de toda a estrutura, tanto dentro como fora do solenoide, entreferro. O vetor campo magnético \vec{H} representa o número de *A·esp.*, ampères espiras, necessário para vencer a relutância do circuito magnético. Para este caso a relação

entre os vetores densidade de fluxo magnético e campo magnético é dada pela equação 7, onde μ_0 é a permeabilidade magnética do vácuo.

$$\vec{B} = \vec{H}\mu_0 \quad (7)$$

Para solenoides que contém em seu núcleo material ferromagnético à equação 4 é acrescentado outro vetor, chamado vetor intensidade de magnetização \vec{M} . Este vetor é nulo no ar e somente existe em meios materiais.

Em materiais ferromagnéticos \vec{M} tem o mesmo sentido que \vec{B} e a soma total da magnetização do material é a resultante entre a magnetização externa, \vec{H} e da magnetização \vec{M} .

$$\vec{B} = (\vec{H} + \vec{M})\mu_0 \quad (8)$$

A permeabilidade magnética do material ferromagnético, μ , relaciona os vetores \vec{B} e \vec{H} pela expressão $\vec{B} = \vec{H}\mu$ ou então a expressão $\vec{B} = \vec{H}\mu_0\mu_r$.

Outras observações e deduções analíticas mais aprofundadas de determinadas expressões que representam os efeitos eletromagnéticos não serão abordados. As expressões até aqui descritas tem carácter introdutório.

2.3 Circuitos Magnéticos

A força magnetomotriz \mathcal{F} de um circuito magnético pode ser escrita conforme a equação 8. Esta expressão relaciona os campos magnéticos às correntes que os produzem.

$$\mathcal{F} = \oint_c \vec{H} \cdot d\vec{l} = \int_s \vec{J} \cdot d\vec{S} = Ni \quad (9)$$

N é o número de espiras por bobina, i é a corrente elétrica instantânea que circula a bobina, \vec{H} é o vetor campo magnético, e \vec{J} é a densidade de corrente.

Um circuito magnético consiste em uma estrutura que é composta por material magnético de permeabilidade alta. Esta característica promove o confinamento do fluxo magnético de modo semelhante ao que os condutores elétricos confinam as corrente elétricas.

A expressão 5 que representa o fluxo magnético líquido em uma determinada área ou superfície fechada pode ser simplificada e reduzida na expressão 10.

$$\Phi = \int_s \vec{B} \cdot d\vec{S} \cong B_c \cdot A_c \quad (10)$$

B_c é a densidade de fluxo magnético no núcleo do material ferromagnético e A_c é a seção magnética deste material. Pode-se representar a expressão 10 para a região do entreferro:

$$\Phi = B_g \cdot A_g \quad (11)$$

A expressão da força magnetomotriz \mathcal{F} pode ser simplificada para a expressão 12.

$$\mathcal{F} = \oint_c \vec{H} \cdot d\vec{l} \cong H_c l_c \quad (12)$$

Com o acréscimo da parcela da *fmm* no entreferro na expressão 12 tem-se:

$$\mathcal{F} = H_c l_c + H_g l_g \quad (13)$$

$$\mathcal{F} = \frac{B_c}{\mu} l_c + \frac{B_g}{\mu_0} l_g \quad (14)$$

A expressão 14 apresenta a substituição da relação entre densidade de fluxo magnético e campo magnético, $\vec{B} = \vec{H}\mu_0$.

Considerando a relutância do núcleo e do entreferro, respectivamente $\mathcal{R}_c = l_c / \mu A_c$

$\mathcal{R}_g = l_g / \mu_0 A_g$, a expressão 14 se torna:

$$\mathcal{F} = \Phi(\mathcal{R}_c + \mathcal{R}_g) \quad (15)$$

Para fins de simplificação será adotado que a relutância do entreferro é muito maior que a relutância do núcleo, podendo assim a expressão 15 ser resumida na expressão 16.

$$\Phi = \mathcal{F} / (\mathcal{R}_c + \mathcal{R}_g) \cong \mathcal{F} / \mathcal{R}_g \quad (16)$$

Em sistemas de corrente alternada, as formas de onda de tensão e fluxo são muito semelhantes às funções senoidais de tempo.

$$\Phi(t) = \Phi_{max} \text{sen}(wt) = A_c B_{max} \text{sen}(wt) \quad (17)$$

Onde Φ_{max} é a amplitude do fluxo do núcleo do material ferromagnético, B_{max} é a amplitude da densidade de fluxo B_c , w é a frequência angular $2\pi f$.

Na tabela 2, há uma breve relação entre as grandezas magnéticas e elétricas.

Tabela 2 – Analogia entre circuitos magnéticos e circuito elétricos.

Circuitos Magnéticos	Circuitos Elétricos
$fmm = NI$	$fem = V$
Fluxo Magnético ϕ	Corrente Elétrica I
Intensidade de Campo Magnético \vec{H}	Densidade de Corrente Elétrica \vec{j}
Relutância	Resistência Elétrica R
Permeabilidade Magnética μ	Condutividade σ

Fonte: FITZGERALD, 2006.

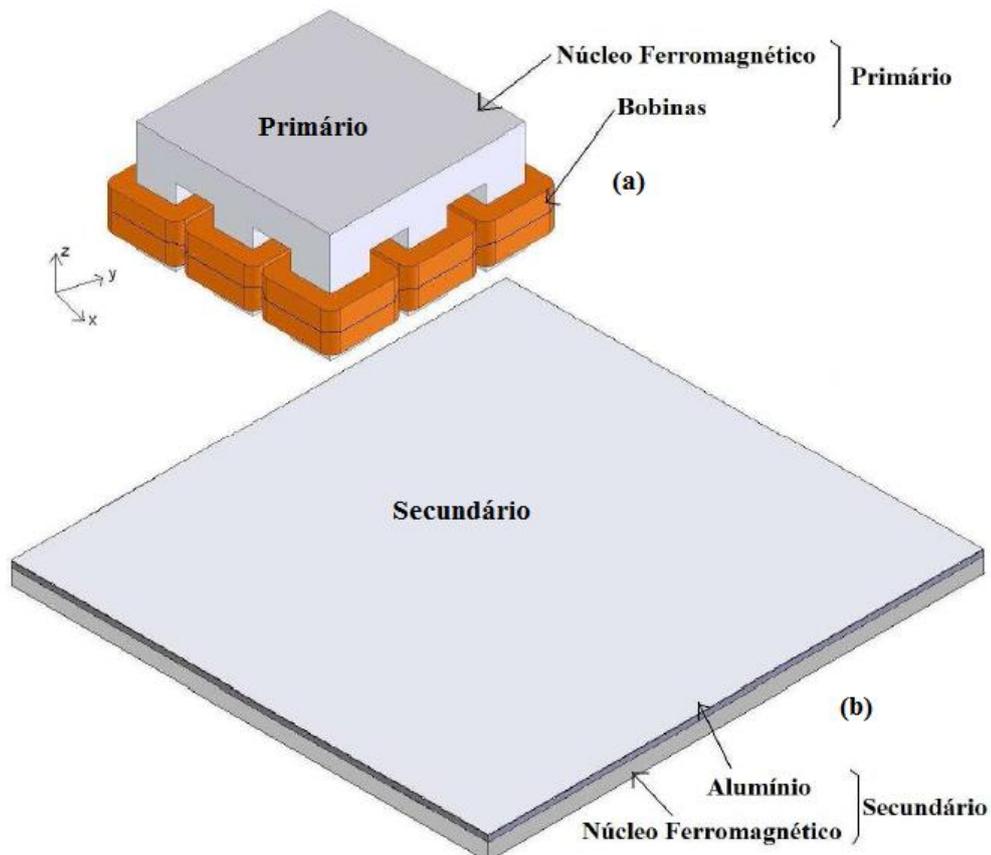
3 O Atuador Planar de Indução

O atuador planar de indução proposto por Baggio Filho (2012), é um dispositivo eletromagnético que desenvolve deslocamentos do carro primário em relação a uma área de operação definida pelo secundário, parte estática. Este deslocamento, com dois graus de liberdade, representa uma alternativa para determinadas aplicações, como por exemplo, mesas cartesianas XY.

Diferentemente dos atuadores apresentados e descritos até o momento neste trabalho, onde os enrolamentos do primário se encontravam parados e o secundário livre para os movimentos consequentes das forças resultantes dos efeitos eletromagnéticos do dispositivo, este atuador linear apresenta como parte móvel o primário e como parte estática o secundário.

Na figura 14 é apresentada tal topologia do atuador planar de indução, apresentando o primário e o secundário.

Figura 14 – Desenho esquemático do API: primário (a) e secundário (b).



Fonte: BAGGIO FILHO, 2012.

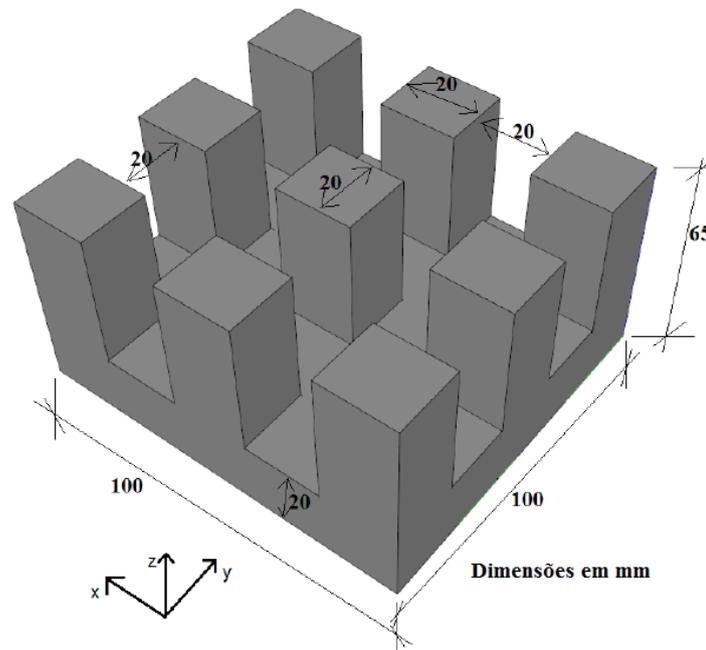
A localização dos enrolamentos trifásicos está no primário, ou seja, parte móvel do atuador linear. O primário é composto por enrolamentos ortogonais dispostos sobre uma estrutura de material ferromagnético compósito, SMC (Compósito Magneticamente Macio). Tal estrutura é formada por nove dentes onde estão instaladas em cada dente duas bobinas que compõem os enrolamentos, conforme mostrado na figura 14 (a).

3.1 Estrutura do Carro Primário

O primário, que configura a parte móvel do atuador linear de indução, é formado por núcleo de material compósito magneticamente macio de grão isolado, especificamente chamado de 1P Somaloy 500.

Na figura 15 é apresentada tal estrutura formando um conjunto de nove dentes separados simetricamente e de iguais dimensões.

Figura 15 – Desenho esquemático da estrutura de dentes compostas pelo SMC.



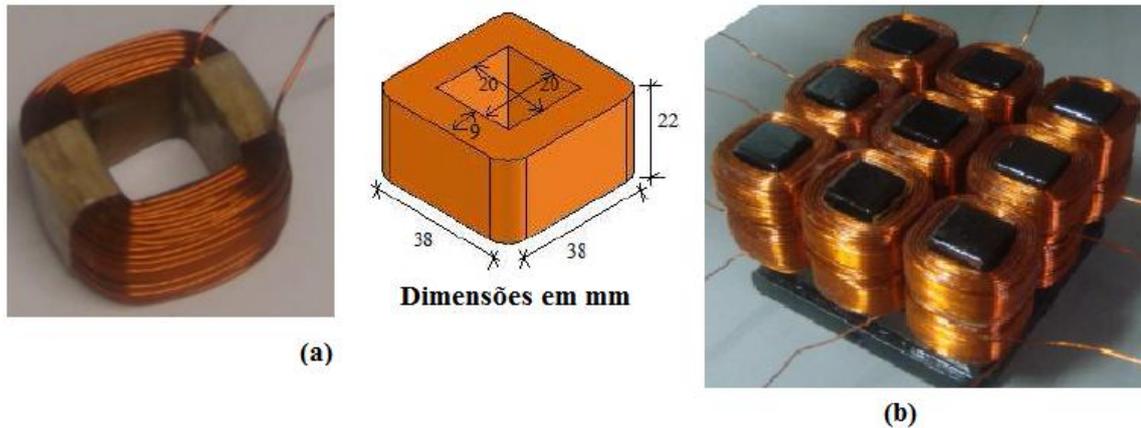
Fonte: BAGGIO FILHO, 2012.

Em cada um dos dentes estão instaladas duas bobinas eletricamente independentes, num total de dezoito bobinas que correspondem aos dois enrolamentos trifásicos. A saber, cada enrolamento é responsável diretamente pela força de propulsão que deslocará o primário nos sentidos x e y , ou seja, um conjunto de bobinas formando o enrolamento responsável pelo

fluxo magnético viajante no sentido x e o outro conjunto de bobinas formando o enrolamento responsável pelo fluxo magnético viajante no sentido y .

Nas próximas imagens, figura 16, é mostrada respectivamente uma das bobinas dos dois enrolamentos trifásicos independentes e o conjunto dos enrolamentos e o núcleo “ranhurado”, compondo o primário de o Atuador Planar de Indução.

Figura 16 – Bobinas e desenho esquemático de suas dimensões: (a). Fotografia do primário do API; (b).



Fonte: BAGGIO FILHO, 2012.

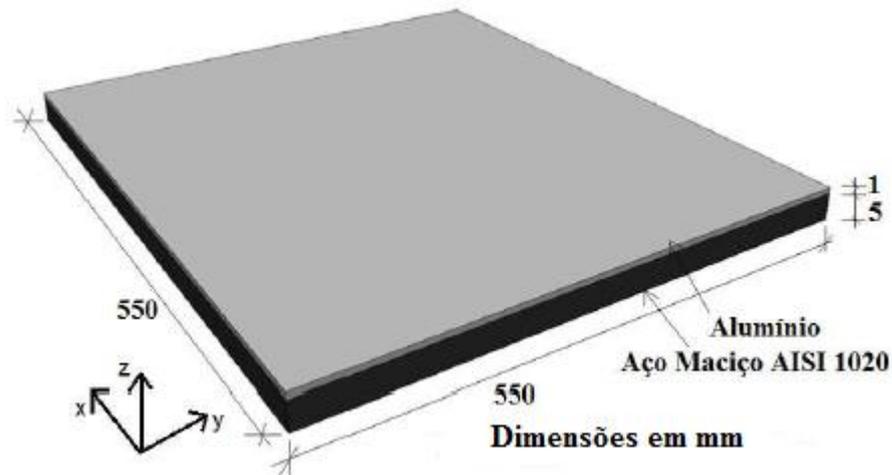
3.2 Estrutura do Secundário

O secundário é compreendido por duas chapas metálicas: uma de alumínio, com características de elevada condutibilidade e espessura de 1 mm, e uma chapa de aço maciço (AISI 1020), de permeabilidade elevada e 5 mm de espessura.

Na figura 17 são apresentadas ambas as chapas fixadas uma na outra. A chapa de aço passou por processos térmicos de recozimento de modo a melhorar a permeabilidade magnética. Tanto a chapa de alumínio como a de aço também passaram por cortes, retificações e planificações.

Na tabela 3 são apresentadas algumas propriedades do aço recozido AISI 1020.

Figura 17 – Desenho esquemático da estrutura do secundário do API.



Fonte: BAGGIO FILHO, 2012.

Tabela 3 – Características do Aço recozido AISI 1020.

Peso Específico do aço recozido AISI 1020	7,85 g/cm³
Máxima Permeabilidade Magnética Relativa (μ_r)	3.800
Resistividade Elétrica Nominal	0,2 $\mu\Omega \cdot m$
Densidade de Fluxo Magnético de Saturação	1,95 T

Fonte: LALL, 1992.

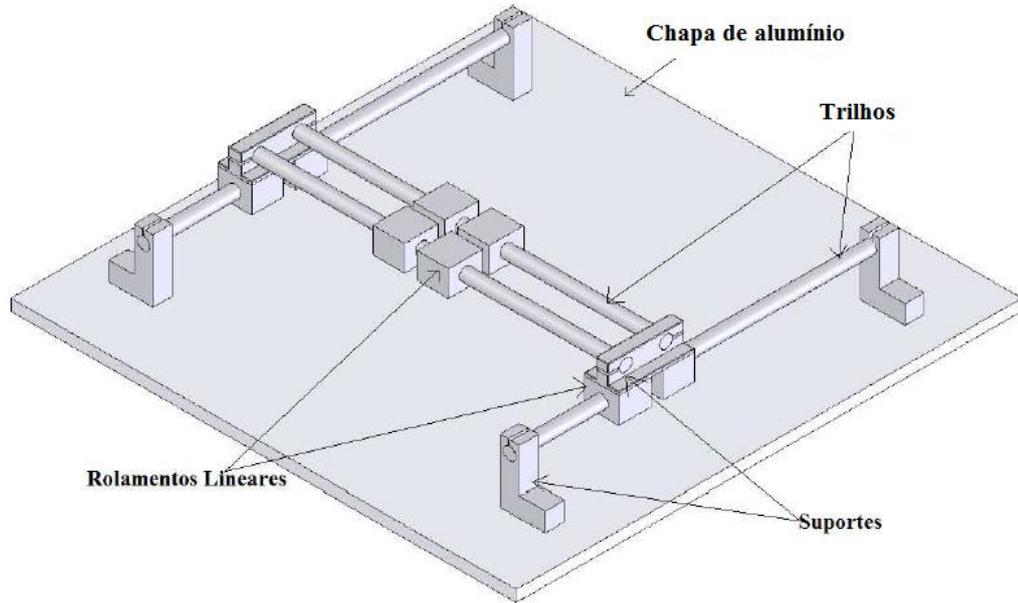
3.3 Estrutura de Sustentação do Primário do API

A estrutura do atuador planar de indução é formada por quatro trilhos que sustentam 8 rolamentos. É nesta estrutura que é fixada o primário. Dois dos quatro trilhos de sustentação permitem que o primário se movimente no sentido y enquanto que o outro par de trilhos permite os deslocamentos no sentido do eixo x .

Envolvendo os trilhos estão os rolamentos lineares dispostos aos pares permitindo que o deslizamento ou deslocamento do carro primário.

Na figura 18 pode-se observar o desenho esquemático da estrutura.

Figura 18 – Desenho esquemático da estrutura de sustentação do primário e chapas do secundário.



Fonte: BAGGIO FILHO, 2012.

4 A Nova Topologia de Atuador Planar de Indução

A nova topologia de carro primário do Atuador Planar de Indução é um dispositivo composto por dois enrolamentos trifásicos eletricamente independentes e ortogonais dispostos em dentes de material ferromagnético. Esta nova topologia é composta por 36 dentes de material ferromagnético, 1P Somaloy 500, e em cada dente estão dispostas duas bobinas independentes e isoladas eletricamente entre si.

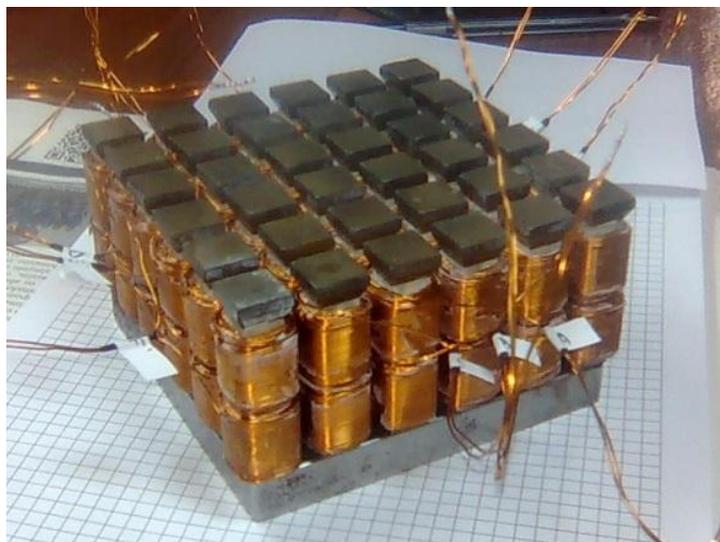
Uma destas bobinas compõe o enrolamento X – responsável pelos movimentos do carro-primário na direção do eixo x .

A outra bobina compõe o enrolamento Y – responsável pela movimentação do carro na direção y .

A ideia principal do desenvolvimento da nova topologia de carro primário do Atuador Linear de Indução são os estudos e análises experimentais para validação de teorias compostas sobre os possíveis benefícios desta topologia

Na figura 19 é apresentada uma fotografia da nova topologia de carro primário.

Figura 19 – Fotografia da nova topologia de carro primário do API.



Através do estudo das características eletromagnéticas deste dispositivo visando à obtenção de resultados satisfatórios de desenvolvimento de translações do carro-primário e de forças planares de propulsão poderão se determinar os pontos fortes e os pontos fracos desta nova topologia, dentre outras considerações.

A nova topologia apresenta dois polos com passo polar entre dentes de material ferromagnético de acordo com a disposição das bobinas.

4.1 Estrutura detalhada da Nova Topologia do Carro Primário

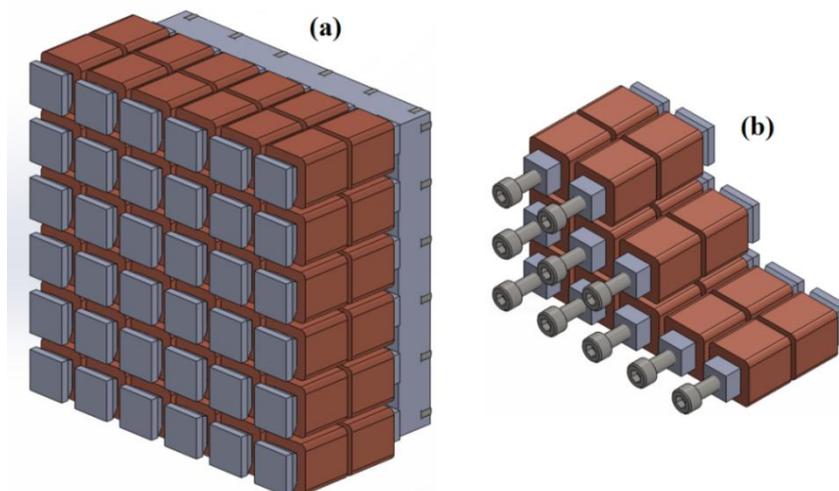
A figura 20 (a) apresenta o desenho esquemático básico da nova topologia de carro primário de Atuador Planar de Indução. Esta nova topologia é formada por 36 dentes de material ferromagnético (compósito magneticamente macio – SMC: material 1P Somaloy 500).

Estes dentes estão alocados e dispostos sob uma placa de aço, presas cada uma por um parafuso. Cada dente contém em uma de suas extremidades o alongamento compreendendo o formato de uma “sapata”. Esta forma permite amenizar o fluxo disperso no entreferro orientando as linhas de fluxo magnético no espaço entre o primário e o secundário. Na figura 21 pode-se observar a “sapata” dos dentes e suas características dimensionais.

Na figura 20 (a) é apresentado o desenho esquemático da nova topologia de carro primário. Na figura 20 (b) é apresentado um desenho, não completo, da disposição dos conjuntos dentes, bobinas e parafusos, apontando outra visão 3D da nova topologia.

Em cada dente há duas bobinas: uma que compõe enrolamento trifásico X que desenvolverá movimentos do carro primário na direção x , e outra bobina que compõe o enrolamento trifásico Y, responsável pelo desenvolvimento dos movimentos do carro primário na direção y . As ligações entre as bobinas serão descritas detalhadamente mais adiante.

Figura 20 – Desenho esquemático da Nova Topologia do Carro Primário do API. Desenho completo do carro-primário: (a). Desenho parcial do carro primário: (b).



Na tabela 4 é feita uma descrição breve das principais características da nova topologia de carro primário.

Tabela 4 – Dados técnicos da nova topologia de carro primário do Atuador Planar de Indução, API.

Características da nova topologia de carro primário	
Peso	4,110 Kg
Dimensões (altura, comprimento, largura)	66,0 x 116,25 x 116,25 mm
Material do dente	1P Somaloy 500
Material da base	Aço
Material das bobinas	Fio de cobre esmaltado 24 AWG
Número de bobinas	72 bobinas
Número de dentes	36 dentes
Número de bobinas por dente	2 bobinas
Número de espiras em cada bobina	180 espiras/bobina

4.1.1 Dentes

Os dentes da nova topologia de carro primário são compostos por material ferromagnético, 1P Somaloy 500. Este material é o mesmo utilizado na construção do núcleo dos enrolamentos do carro primário proposto por BAGGIO FILHO (2012).

É um material obtido pelas técnicas de metalurgia do pó, técnica esta que se tornou importante na fabricação de novos materiais de composição e formas complexas. Esta técnica facilita o controle da composição química do material e apresenta facilidades de usinagem ou manufaturas de peças com geometrias diversas.

Dentre algumas características deste material, é o efeito quando operado em sistemas de excitação alternada por tensões elétricas de frequências relativamente baixas, abaixo de 100 Hz, pois apresentam características de distribuição de campo magnético no seu volume com permeabilidade e resistividade independentes da direção do campo magnético no qual está inserido.

São listadas, na tabela 5, algumas das características do material 1P Somaloy 500. Na figura 21 é mostrado o desenho esquemático de um dente e suas dimensões.

Figura 21 – Vista 3D de um dos dentes da nova topologia do API: (d). Desenho esquemático do dente do API: (a, b, c).

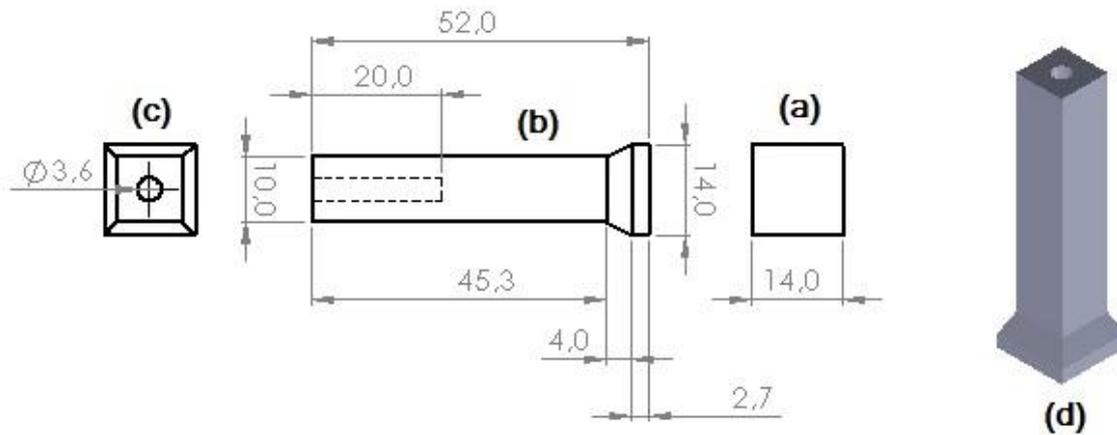


Tabela 5 – Características magnéticas do material 1P Somaloy 500.

1P Somaloy 500	
Permeabilidade Magnética Relativa Máxima (μ_r)	500
Resistividade Elétrica	70 $\mu\Omega\cdot m$
Densidade de Fluxo Magnético Máximo	B_{max} @ 4000 A/m 1,23 T
	B_{max} @ 10000 A/m 1,51 T

Fonte: JANSSON, 1998.

Na figura 22 é mostrado um desenho em 3D do conjunto dente, bobina e parafuso e uma fotografia do dente após o processo de isolamento que compreende a colocação de fita no seu entorno e aplicação de camada de verniz impermeabilizante e isolante elétrico.

Figura 22 – Vista 3D do conjunto dente, bobinas e parafuso: (a, b, c, d). Dentes com isolamento de papel embebido em verniz isolante: (e).

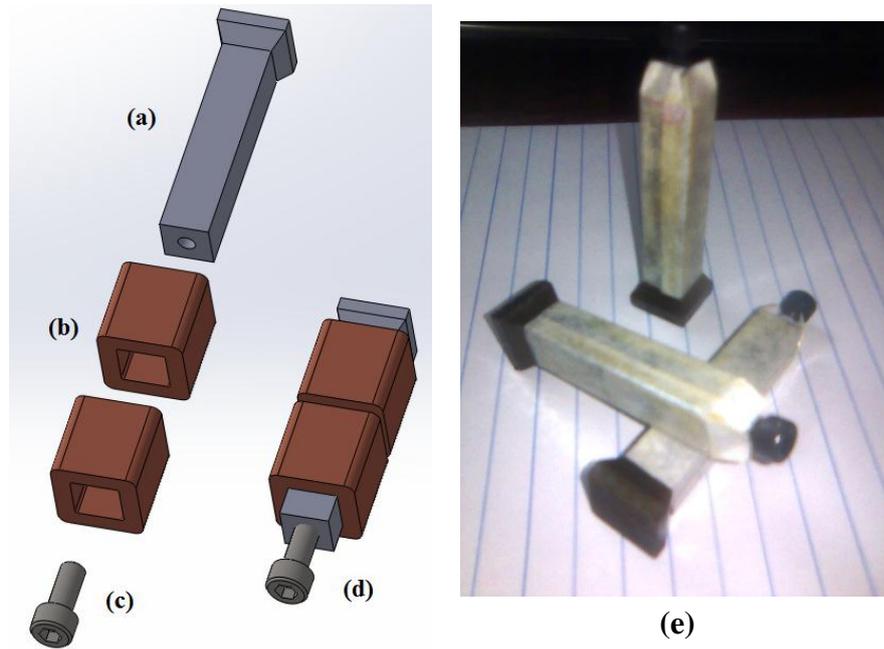


Figura 23 – Fotografia dos dentes da nova topologia de carro primário com isolamento de fita embebida em verniz isolante elétrico.



4.1.2 Enrolamentos e Bobinas

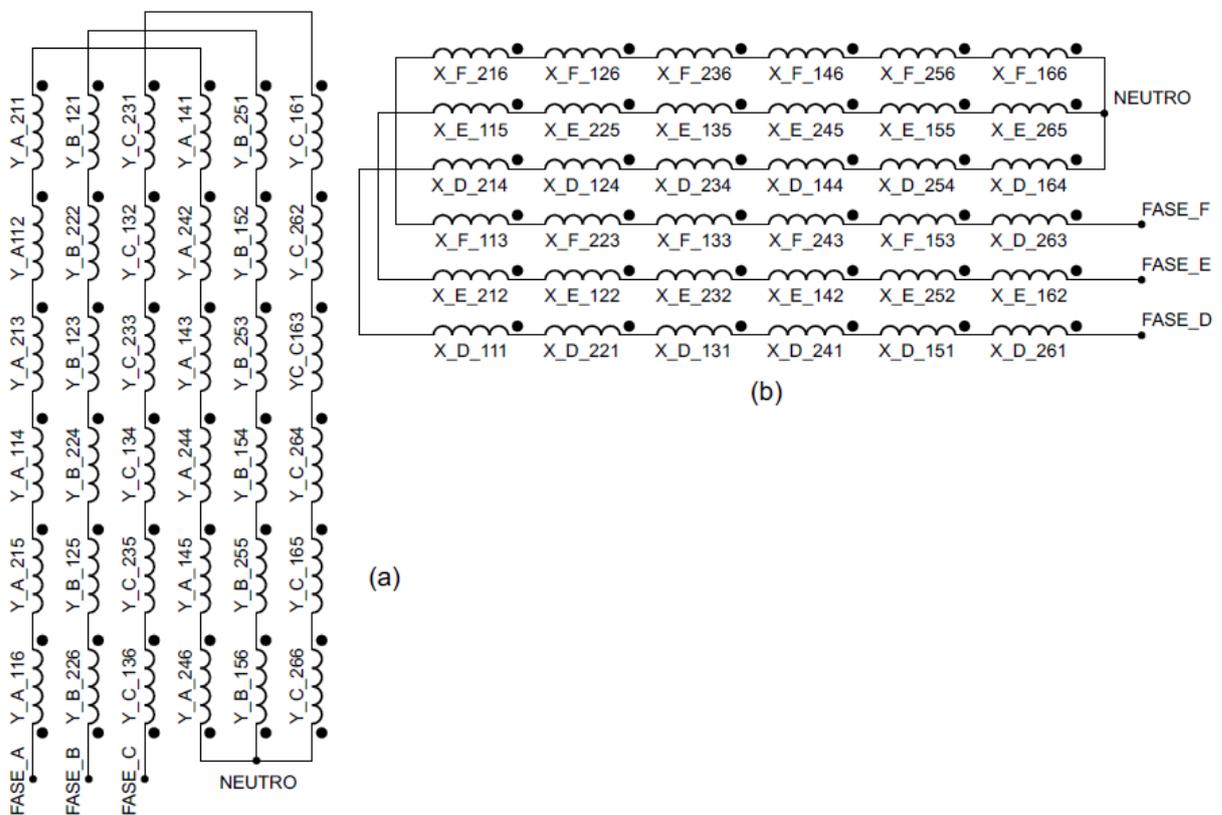
As bobinas responsáveis pela translação no eixo x do carro primário formam o enrolamento X, assim como as bobinas responsáveis pelo movimento do carro primário no sentido do eixo y formam o enrolamento Y. São enrolamentos trifásicos ortogonais entre si e eletricamente independentes sendo que em cada fase de cada enrolamento há a quantidade de

12 bobinas: dois conjuntos em ligação série de seis bobinas que estão ligadas em polaridades invertidas, ou seja, o primeiro conjunto contém todas as bobinas com o mesmo sentido de polaridade enquanto que o segundo conjunto têm todas as bobinas com sentido de polaridade contrário ao conjunto anterior. Esta disposição das polaridades das bobinas desenvolve o surgimento de um polopolo na região do entreferro do API.

Na figura 24 é apresentado o desenho esquemático do circuito que compõe os enrolamentos X e Y da nova topologia de carro primário. As nomeações ou indicações de cada uma das bobinas neste esquemático de circuito elétrico, ou seja, o nome que cada bobina leva consigo, representa a sua localização no núcleo do primário da nova topologia. Este foi o modelo adotado para poder-se representar a localização de cada bobina e em seu respectivo dente ou a que enrolamento, X ou Y, e a qual fase pertence.

As iniciais *Y* ou *X* nas indicações das bobinas determinam se estas pertencem ao enrolamento Y ou ao enrolamento X. As letras A, B, C, D, E ou F indicam a qual fase esta bobina faz parte. As numerações seguintes às letras indicam o posicionamento das bobinas conforme a qual “linha” ou “coluna” pertence a bobina analisada.

Figura 24 – Desenho esquemático das ligações das bobinas dos enrolamentos. Enrolamento Y: (a). Enrolamento X: (b).



Cada enrolamento trifásico é composto por 36 bobinas, cada fase deste enrolamento têm 12 bobinas, cujo processo de bobinamento foi realizado manualmente com o auxílio de um aparato. Este aparato engastava o dente em um eixo giratório, permitindo assim que fossem realizados movimentos rotativos para a construção das camadas de espiras das bobinas. Tal aparato permitia também a contagem do número de voltas de cada bobina, sendo realizado desta forma o controle do número de voltas realizadas ou número de espiras das bobinas.

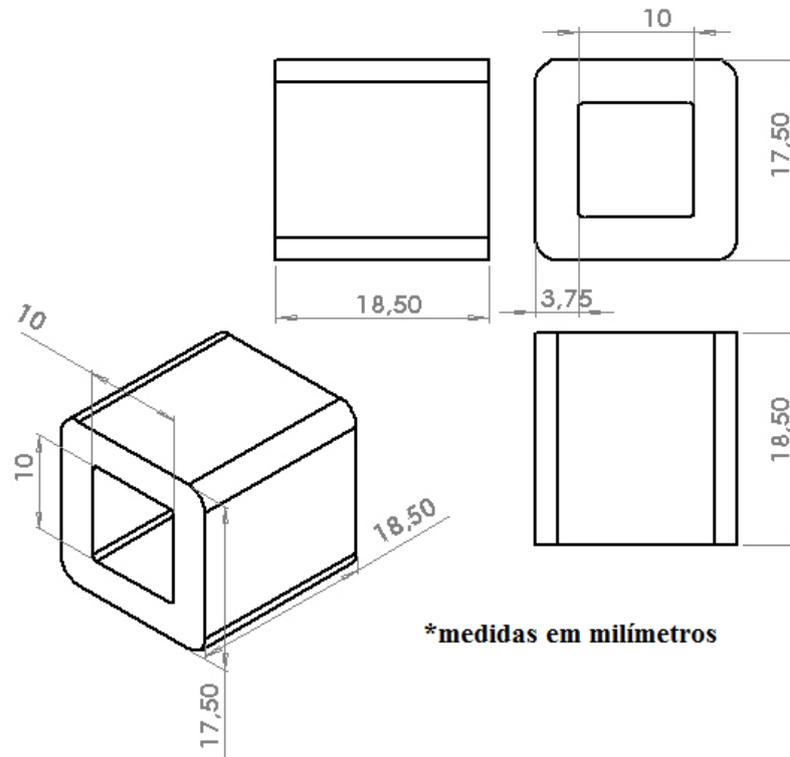
Apesar de antigo, este dispositivo de bobinamento permitiu a construção das bobinas sobre os dentes de forma igualitária e com razoável precisão. Na figura 25 é apresentado o aparato em que foram bobinadas cada dente do novo carro primário.

Cada bobina contém 180 espiras aglomeradas em 6 camadas e feitas de fio esmaltado 24 AWG. A área interna das bobinas é de aproximadamente 10,4mm x 10,4mm ou 108,16mm². Suas dimensões estão apresentadas no desenho esquemático da figura 26. A resistência ôhmica média de cada bobina é de 0,56 Ω .

Figura 25 – Fotografia do aparato utilizado para processo de bobinamento dos dentes.



Figura 26 – Desenho esquemático das bobinas da nova topologia de carro primário. Vistas laterais e vista frontal da bobina: (b). Vista 3D da bobina: (a).



Após cada dente estar envolto por suas bobinas, partiu-se para o processo de ligação entre os terminais das bobinas.

Respeitando a polaridade de cada uma das bobinas foi-se dispendo os dentes com as bobinas sobre a chapa de aço e fixando-as uma a uma. Nos intervalos de fixação dos dentes foram executadas as soldas e isolação das emendas entre bobinas.

As ligações entre as bobinas de dentes diferentes formou um circuito cujas ligações são na forma com que alternasse as conexões entre bobinas, tanto entre as bobinas orientadas ao longo do eixo x como as bobinas orientadas ao longo do eixo y . Este esquema de ligação das bobinas deixa ambos os enrolamentos, X e Y, à mesma distância média do secundário, deixando os enrolamentos equidistantes em relação ao entreferro. Tais ligações podem ser melhor visualizadas na figura 34.

Utilizou-se de uma forma matricial para representação do posicionamento das bobinas. Na figura 28 apresenta-se o desenho esquemático das vistas inferior e superior da nova topologia de carro primário. Na figura 29 é apresentado desenho esquemático demonstrando as bobinas da nova topologia na forma de “camadas”, e na figura 30 e figura 31 são apresentados tais vistas com a indicação por nomes das bobinas que nas respectivas vistas são assinaladas. Na figura 32 apresenta-se outra forma de verificação de apresentar a disposição das bobinas.

As indicações ou siglas que referenciam cada bobina representam o seu posicionamento no carro primário. A primeira letra das indicações representa a qual enrolamento as bobinas pertencem, enrolamento X ou enrolamento Y. A segunda letra indica a qual fase estas bobinas pertencem e estão sendo excitadas. E por último as sequências de números indicam respectivamente o posicionamento da bobina referente à qual camada de bobinas esta se encontra, seguido respectivamente da numeração que indica em qual linha e coluna pertencem.

Na figura 27 é apresentado na forma exemplar de como são indicadas e nomeadas cada bobina, sendo que cada bobina tem uma numeração única. Nas figuras subsequentes são apresentados os desenhos esquemáticos de algumas vistas da nova topologia com assinalações que permitem auxiliar o reconhecimento da disposição de cada bobina. Na figura 30 e figura 31 são apresentadas as vistas inferior e superior da nova topologia com as indicações das respectivas bobinas vistas neste perfil.

Figura 27 – Siglas para método de referência de posição das bobinas na nova topologia de carro primário.

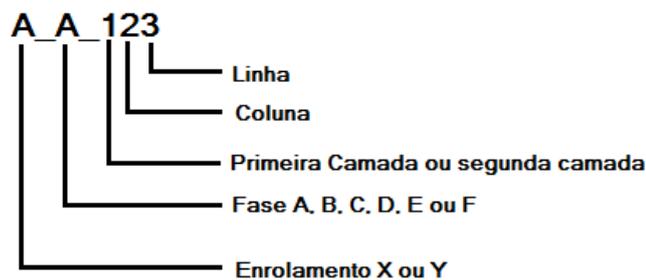


Figura 28 - Representações dos perfis de vistas superior e inferior da nova topologia.

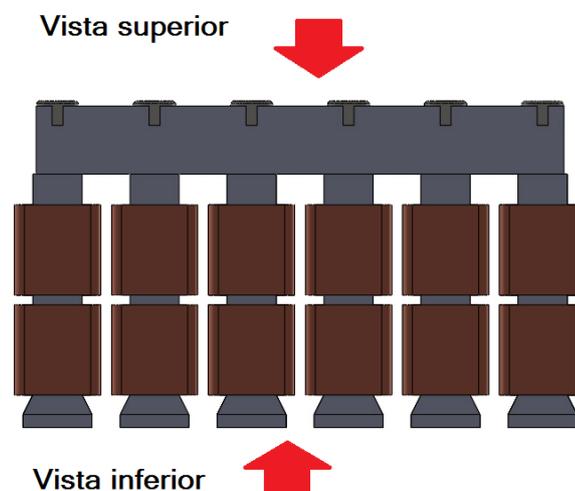


Figura 29 - Disposição das bobinas em camadas: primeira camada de bobinas e segunda camada de bobinas.

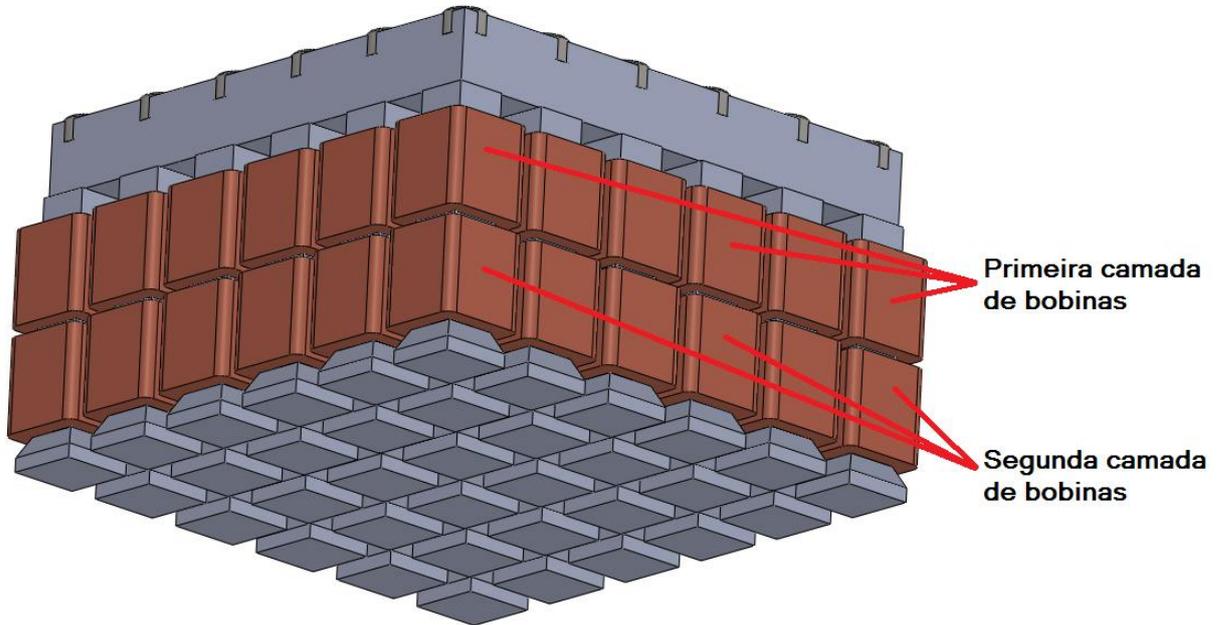


Figura 30 - Vista inferior e indicações das bobinas da segunda camada de bobinas da nova topologia de carro primário e representação das fase de excitação.

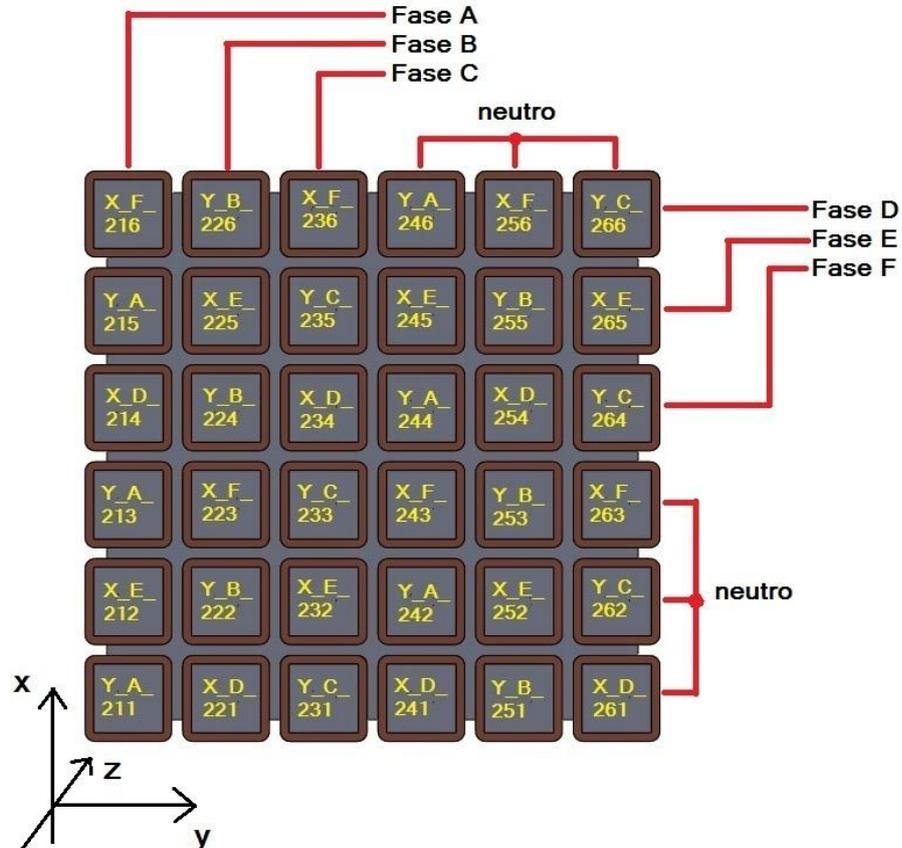


Figura 31 - Vista superior e indicações das bobinas da primeira camada de bobinas da nova topologia de carro primário e representação das fases de excitação.

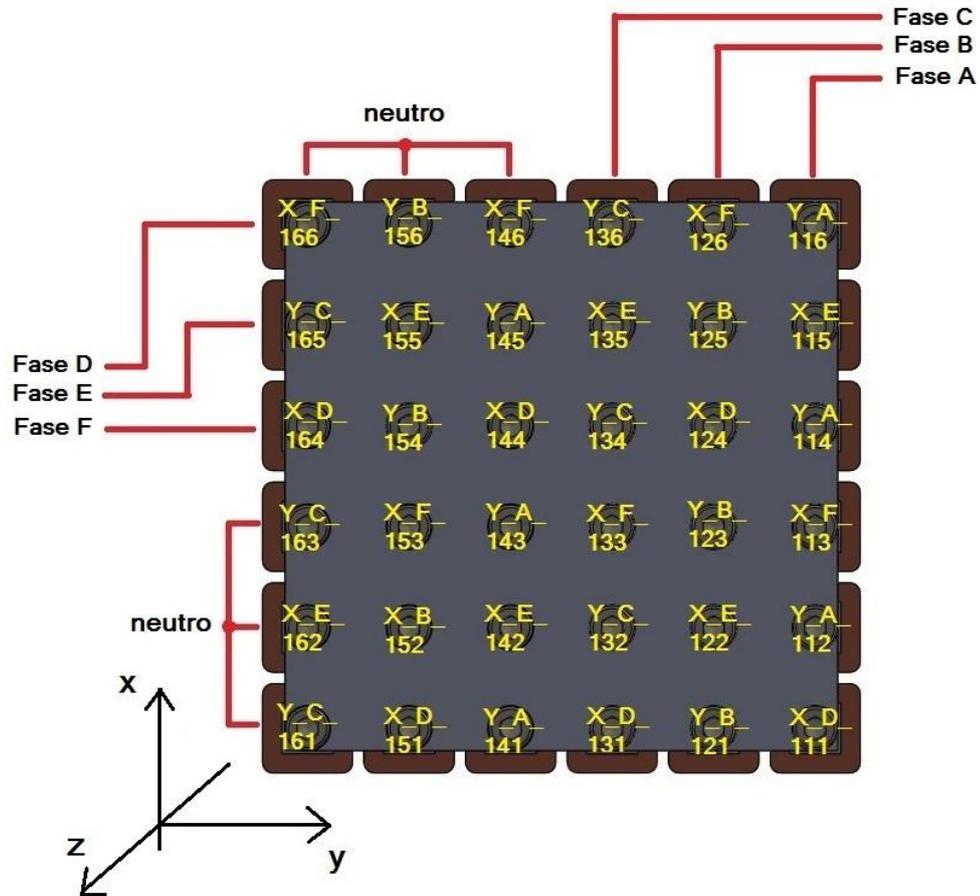
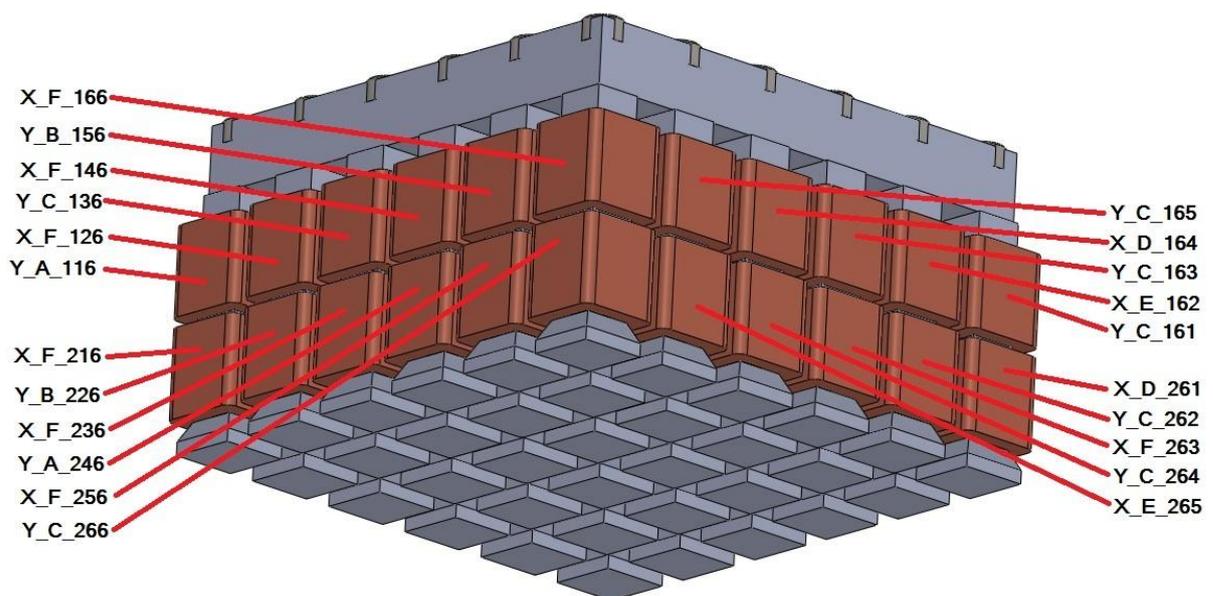


Figura 32 - Disposição e localização das bobinas da nova topologia.



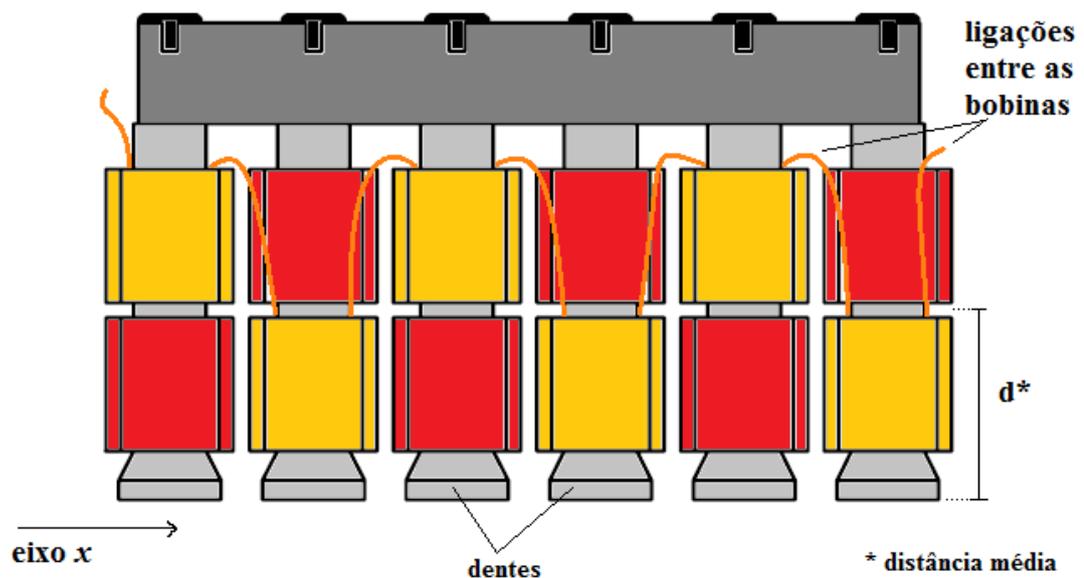
É importante lembrar que após o processo de bobinado dos dentes cada um destes dispositivos passou por testes de isolamento elétrica. Estes testes foram realizados com a utilização de megômetro. As análises de correntes de fuga por falhas de isolamento ou curto circuito são facilmente detectadas por este equipamento. Na figura 33 é mostrada a execução de um destes testes citados.

Na figura 34 é apresentado um desenho esquemático das ligações entre as bobinas.

Figura 33 – Fotografia representando um teste de isolamento entre o dente e suas respectivas bobinas com a utilização do instrumento megômetro.



Figura 34 – Vista frontal do desenho esquemático das ligações entre as bobinas.

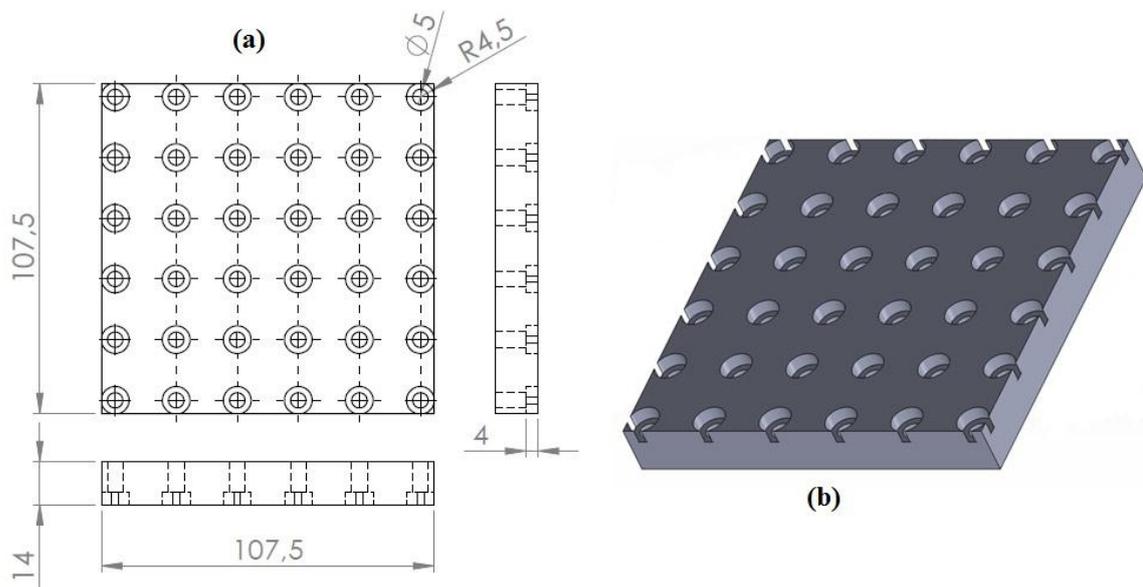


4.1.3 Base de fixação dos Dentes

A base de suporte dos dentes é uma chapa de aço como mostrado na figura 29 (b). Ela conte 36 furos para fixação de cada dente através de parafusos do tipo sextavados. Na figura 29 (a) estão apontadas as dimensões desta base de aço.

Em conjunto com os dentes, esta base de aço forma a armadura do carro primário da nova topologia construída.

Figura 35 – Vistas laterais e vista frontal da base de fixação dos dentes da nova topologia de carro primário: (a). Vista em 3D da base de aço da nova topologia de carro primário do API: (b).



4.2 Princípio de Funcionamento

O princípio de funcionamento ou movimento do carro primário do atuador planar de indução é baseado na Força de Laplace.

O campo magnético gerado pelas correntes elétricas trifásicas nos enrolamentos do primário induz uma força eletromotriz fem no secundário, principalmente na placa de alumínio, pois este tem características de alta condutividade elétrica. Esta fem produz corrente elétrica no secundário que interage com o campo magnético gerado pelo primário.

Este efeito desenvolve uma força planar de propulsão, além de contribuir com a força normal entre o carro primário e o secundário. Pelo fato da livre movimentação planar do carro primário com relação ao secundário, com dois graus de liberdade, este se movimenta de acordo com a intensidade da corrente elétrica e a frequência da excitação trifásica.

O sentido destes movimentos pode ser controlado pela sequência da excitação trifásica e a intensidade da força que põe o carro primário em movimento pode ser controlada pela corrente elétrica e a frequência da excitação.

É importante lembrar que a corrente induzida no alumínio causa o aparecimento de um campo magnético proporcional a esta corrente induzida. Este campo magnético se opõe às variações do campo magnético dos enrolamentos do primário, tal como ocorrem nas máquinas rotativas de indução.

A força planar de propulsão que atua sobre o secundário é baseada na expressão da força de Laplace. No entanto, o secundário se encontra estático e somente o primário é livre para movimentar-se. Tão logo, a expressão da força de Laplace se torna, para este caso:

$$\overrightarrow{F_{carro}} = -\overrightarrow{F_F} = - \int_{V_F} (\overrightarrow{J_F} \times \overrightarrow{B_{gF}}) dV_F = \int_{V_F} (\overrightarrow{B_{gF}} \times \overrightarrow{J_F}) dV_F \quad (18)$$

$\overrightarrow{J_F}$ é o vetor densidade de corrente induzida no secundário, $\overrightarrow{B_{gF}}$ é a densidade de campo magnético no entreferro e V_F é o volume do secundário que está imerso no campo magnético $\overrightarrow{B_{gF}}$.

De forma simplificada a expressão que define a intensidade do fluxo magnético está apresentada na equação 19. Esta expressão caracteriza e justifica os diferentes valores de força de propulsão entre as topologias de carro primária analisadas.

$$\Phi = \frac{E}{k \frac{N_f}{D_f}} \quad (19)$$

Na expressão 19, k é uma constante que depende especialmente da forma estrutural e material utilizado para construção do carro primário. N_f é o número de espiras por fase e D_f o número de dentes por fase. E é a tensão de fase aplicada no respectivo enrolamento.

5 Ensaio Experimentais

Os testes experimentais desenvolvidos sobre a nova topologia de carro primário do Atuador Planar de Indução têm como objetivo principal a sua caracterização e levantamento de parâmetros relevantes ao seu estudo.

Os dados extraídos dos testes experimentais são comparados com a antiga topologia do carro primário, proposta por BAGGIO FILHO (2012), topologia esta que foi descrita brevemente em capítulos anteriores neste trabalho.

Estes resultados são importantes para avaliar o desempenho desta nova topologia.

Todos os ensaios realizados têm como secundário as placas de alumínio e aço AISI 1020, e como primário, os enrolamentos do carro primário da nova topologia.

Os experimentos foram separados em dois casos: ensaios estáticos e ensaios dinâmicos, respectivamente, ensaios de medição de a força de propulsão e ensaios de medição de velocidade planar linear do carro primário em relação ao secundário.

5.1 Ensaio de Força Planar de Propulsão (parte 1)

O objetivo dos ensaios realizados é o levantamento da força planar de propulsão linear que atua sobre a nova topologia de carro quando este se encontra fixo ou engastado e aplica-se uma excitação trifásica nos seus enrolamentos de forma a desenvolver uma reação entre o primário e o secundário que promove o aparecimento de uma força de propulsão. Esta força tende movimentar o carro primário, parte móvel, com relação ao secundário, parte fixa, na direção paralela ao plano formado pelo estator.

Os ensaios foram feitos de modo a adquirir quantitativamente os dados de força nos sentidos dos eixos x e y , quando os enrolamentos responsáveis pelo desenvolvimento das forças nestes sentidos eram excitados em separado ou então ao mesmo tempo. Portanto, em um primeiro momento, os ensaios de força foram realizados em cinco distintos casos:

- Caso 1 – excitação do enrolamento trifásico X que é responsável pela movimentação do carro na direção x , e aquisição dos dados de força;
- Caso 2 – excitação do enrolamento trifásico Y que é responsável pela movimentação do carro na direção y , e aquisição dos dados de força;
- Caso 3 – excitação de ambos os enrolamentos, X e Y, levantamento dos dados de força de propulsão na direção do eixo x ;

- Caso 4 – excitação de ambos os enrolamentos, X e Y, levantamento dos dados de força de propulsão na direção do eixo y;
- Caso 5 – excitação individual dos enrolamentos com valores de tensão elétrica e frequência extrapolados de forma a complementar os experimentos.

Os experimentos classificados como caso 5 são os mesmos experimentos do caso 1 e caso 2, porém com valores de tensão elétrica e frequência de excitação diferente.

Além dos casos experimentais descritos acima, em um segundo momento foram realizados ensaios com a intenção de extrapolar os valores de excitação trifásica aplicados nos enrolamentos.

Os ensaios experimentais foram realizados com dois parâmetros controláveis: tensão elétrica trifásica de excitação dos enrolamentos e frequência desta excitação trifásica.

A faixa de tensão elétrica eficaz, por fase, aplicada nos primeiros – caso 1, caso 2, caso 3 e caso 4 – ensaios nos enrolamentos foi de 45 V até 60 V (conforme parâmetros de realização dos ensaios no trabalho proposto por BAGGIO FILHO, 2012). Da mesma forma, a faixa de frequência é de 45 Hz até 60 Hz. Tanto os valores da tensão trifásica como os valores de frequência desta tensão tiveram um passo fixo de três unidades para a realização dos ensaios.

Para os demais ensaios, caso 5, a faixa de tensão elétrica eficaz, por fase, aplicada nos enrolamentos foi de 45 V até 105 V espaçados de 10 em 10 V.

Para cada valor de tensão elétrica e frequência, foram feitas as médias de 10 medidas de força e amostradas relacionando tensão elétrica e sua respectiva frequência de excitação dos enrolamentos. Estes ensaios foram executados aleatoriamente dentro das faixas de tensão elétrica e frequência de modo a diminuir erros provindos de variáveis como temperatura e umidade.

As medições dos valores de tensão elétrica eficaz e a sua associada frequência aplicada em cada caso experimental foram realizadas com dois osciloscópios (um de dois canais e outro de quatro canais).

A medição da força foi feita com a instalação de uma célula de carga do tipo *S*, transformando suas deformações em sinais de tensão elétrica. Esta tensão elétrica ou sinal elétrico passa por um dispositivo condicionador de sinais que permite a leitura em unidade proporcional à força.

Algumas características desta célula de carga são: *strain gauges* de sensibilidade de 2mV/V e resistência de 350 Ω , e célula de carga fabricada para suportar até 5 kgf.

A célula de carga foi engastada em uma de suas extremidades enquanto que a outra extremidade foi acoplada ao carro primário de forma alinhada à direção da força planar desenvolvida pelo respectivo enrolamento que desenvolverá tal força planar.

A figura 36 mostra a bancada onde foram ensaiados e adquiridos os dados e parâmetros da nova topologia de carro primário.

Figura 36 – Fotografia da bancada com os instrumentos de medição instalados para realização dos experimentos e testes.

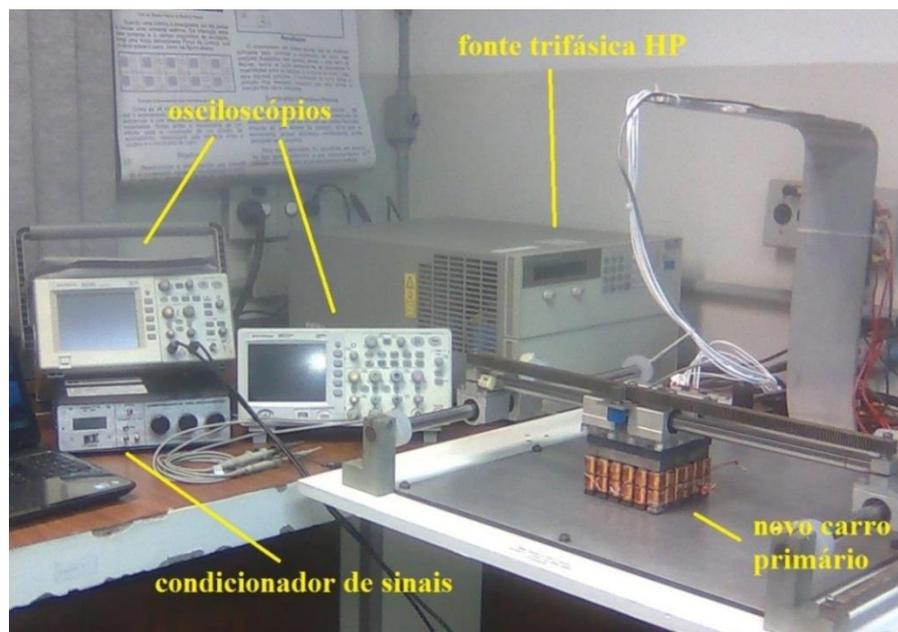
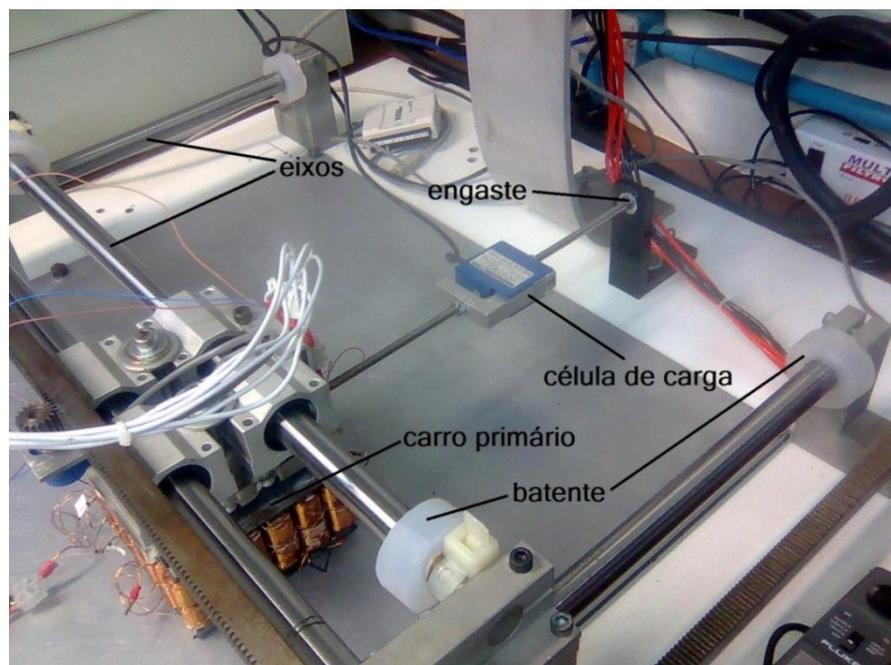


Figura 37 – Fotografia do sistema de engaste da célula de carga ao carro primário: medição da força planar no sentido do eixo x .



Com o enrolamento excitado por tensão elétrica trifásica e o desenvolvimento de forças que tendem a movimentar o carro primário em função das correntes induzidas, a célula de carga percebe por suas deformações a força realizada pelo carro, em virtude de sua sensibilidade que provoca uma deformação proporcional a esta força ou tendência de movimento do carro primário em relação ao secundário do atuador planar de indução.

Note que para a realização dos ensaios de força no sentido do eixo x a célula de carga foi fixada ao engaste que se encontra fora da área de abrangência do secundário do atuador planar de indução. Já para a realização dos ensaios de força no sentido do eixo y foi engastada a célula de carga em uma estrutura de alumínio presa ao próprio protótipo de movimentação, mais especificamente, a célula de carga foi fixada sob os guias de sustentação dos rolamentos lineares. Esta forma de engaste da célula de carga está apresentada na figura 38.

Na figura 38 e figura 39 é possível verificar a instalação e a fixação da célula de carga tanto no engaste como ao carro primário. Na figura 41 e figura 42 são apresentados os desenhos esquemáticos da disposição da célula de carga.

Figura 38 – Fotografia do sistema de engaste da célula de carga ao carro primário: medição da força planar no sentido do eixo y .

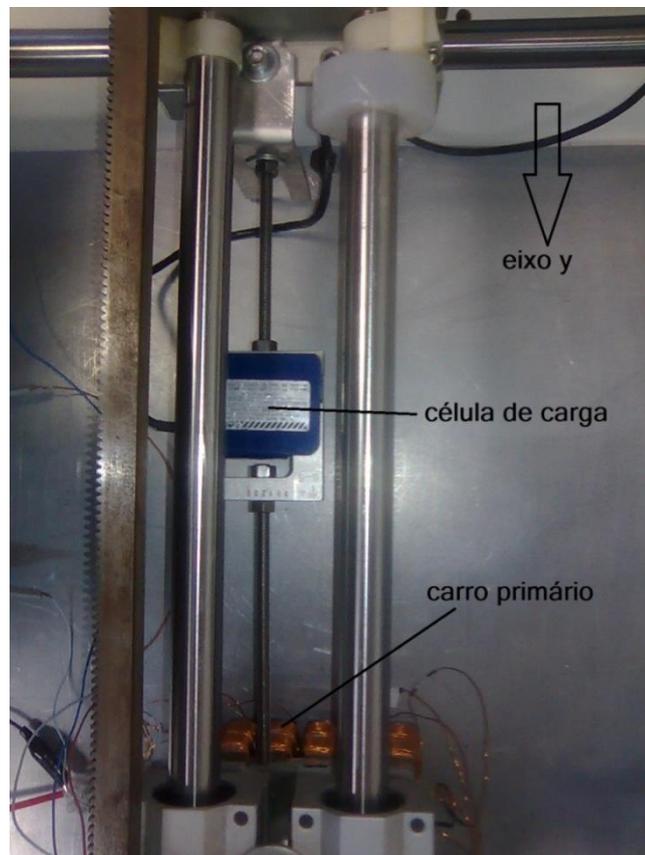
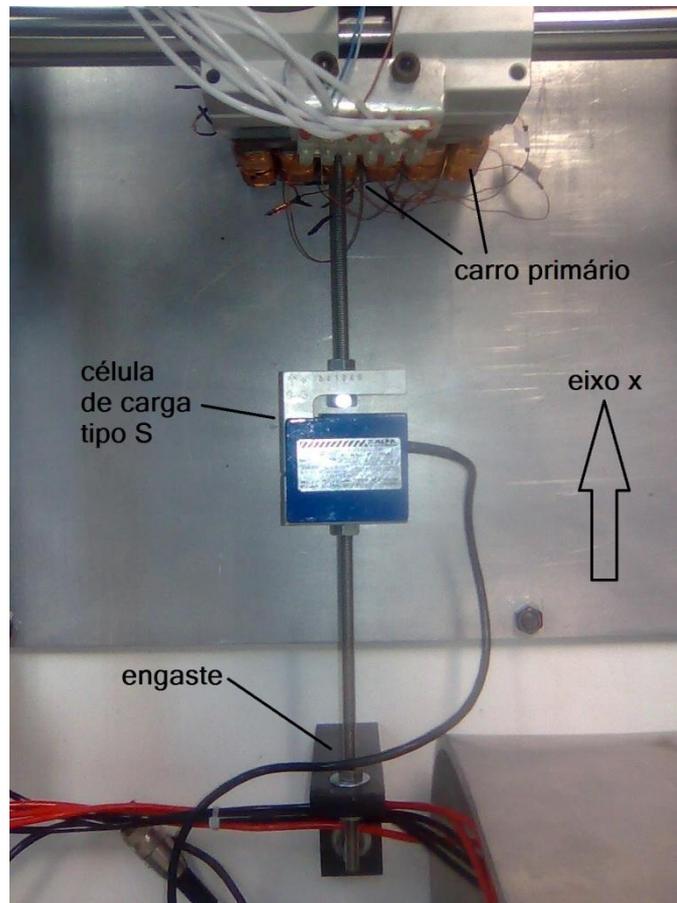


Figura 39 – Fotografia do sistema de engaste da célula de carga ao carro primário: medição da força planar no sentido do eixo x.



É importa salientar que a célula de carga utilizada nos ensaios passou por um processo de calibração. Utilizou-se de pesos padrões específicos para realizar este processo de calibração da célula de carga. Na figura 40 é apresentada uma fotografia demonstrando esta calibração.

Figura 40 – Fotografia do processo de calibração da célula de carga: (a). Fotografia dos pesos padrões utilizados na calibração: (b).

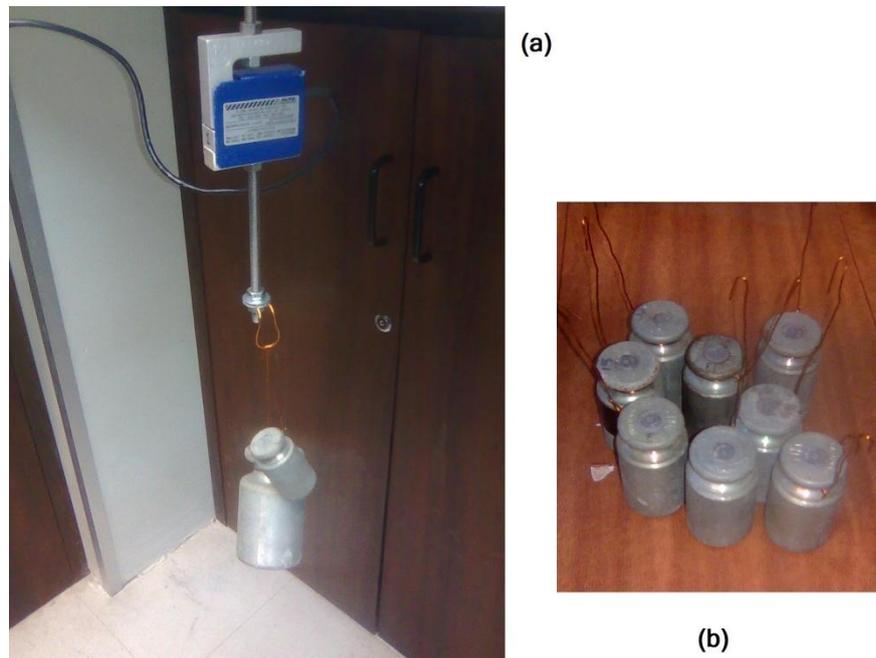
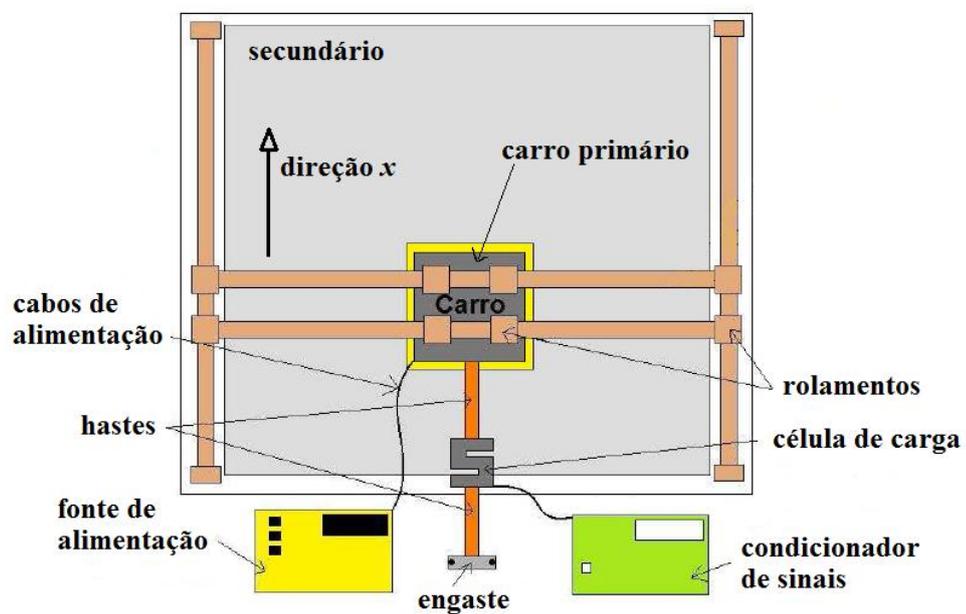
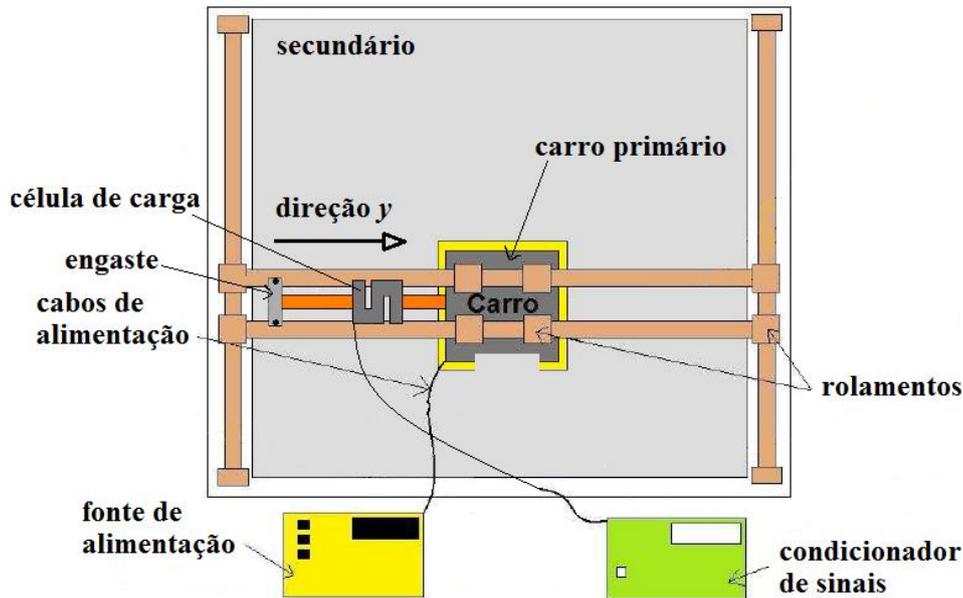


Figura 41 – Desenho esquemático da instalação da célula de carga do tipo S para medição da força planar na direção do eixo x .



Fonte: BAGGIO FILHO, 2012.

Figura 42 – Desenho esquemático da instalação da célula de carga do tipo S para medição da força planar na direção do eixo y.



Fonte: BAGGIO FILHO, 2012.

Para a melhor dinâmica e qualidade na aquisição dos parâmetros de força e posteriormente dados de velocidade da nova topologia do carro primário montou-se a bancada de ensaios de forma que tanto os dados de tensão elétrica, corrente elétrica e frequência, e ainda os dados de força fossem monitorados adequadamente e adquiridos.

Um exemplo desta dinâmica forma de aquisição dos dados foi a utilização dos recursos de exportação de dados dos osciloscópios utilizados nos experimentos. Com a conexão de um cabo entre estes equipamentos e o notebook utilizado, possibilitou-se o salvamento em formas matriciais (tabelas) dos dados de tensão elétrica e corrente elétrica. Estes arquivos foram tratados posteriormente em softwares com ferramentas matemáticas e gráficas.

O osciloscópio de quatro canais, mais especificamente da marca Agilent Technologies modelo DSO1014A, fora utilizado para monitoramento da tensão trifásica aplicada nos enrolamentos. O osciloscópio de dois canais, também da marca Agilent Technologies DSO3102A fora utilizado para monitorar as correntes elétricas nas bobinas de cada enrolamento. Note que para a aquisição dos dados de corrente elétrica utilizou-se de ponteiros de corrente da marca Fluke, cuja relação é de 100 mV/A.

A fonte de tensão elétrica trifásica utilizada para excitar os enrolamentos, hora em separado ou então mesmo tempo, é de 4500 VA de potência da marca Hewlett Packard,

modelo 6834B. Esta fonte permite operações nas faixas de tensão de zero V até 300 V eficazes, frequências entre 45 Hz e 5000 Hz.

Ao monitorar a tensão nos enrolamentos trifásicos nos ensaios de força planar, os conectores negativos das ponteiros dos osciloscópios foram conectados ao centro do enrolamento excitado com tensão elétrica. Ou seja, as medidas de tensão elétrica foram feitas entre cada fase e o centro da ligação estrela de cada enrolamento. Na tabela 6 e tabela 7 são apresentadas as médias de tensão elétrica e corrente de excitação dos ensaios realizados, bem como os dados de força de propulsão desenvolvida para seus respectivos experimentos. Deve-se lembrar de que o centro da ligação estrela foi conectado ao terminal neutro da fonte de excitação.

Na tabela 6 e tabela 7 são apresentados os dados referentes aos ensaios do enrolamento X e enrolamento Y em que se aplicou os mesmos parâmetros de excitação do primário conforme indicado nos experimentos realizados por BAGGIO FILHO (2012). Já na tabela 10 e tabela 11 são apresentados os dados de ensaios com outras formas de excitação para o enrolamento X intencionalmente para extrapolar os limites dos experimentos. Estes experimentos estão descritos no próximo subcapítulo.

Assim como foram realizados o monitoramento e aquisição dos dados de tensão elétrica sobre os enrolamentos trifásicos da nova topologia do carro primário, os dados de força para cada um dos casos de excitação aplicada no respectivo enrolamento estão mostrados na tabela 8 e tabela 9.

Tabela 6 – Média da tensão elétrica eficaz e corrente elétrica eficaz nas fases do enrolamento X.

Tensão e Frequência de excitação	Enrolamento X excitado						Força planar de propulsão na direção x (N)
	Bobina D		Bobina E		Bobina F		
	Vrms* (V)	Arms** (A)	Vrms (V)	Arms (A)	Vrms (V)	Arms (A)	
45 V / 45 Hz	45,75	1,52	45,85	1,54	46,30	2,14	2,585
48 V / 48 Hz	48,95	1,55	48,27	1,57	50,55	2,22	2,767
51 V / 51 Hz	51,75	1,62	51,82	1,59	52,27	2,27	2,905
54 V / 54 Hz	54,62	1,67	54,62	1,62	55,95	2,33	3,008
57 V / 57 Hz	57,95	1,72	57,60	1,64	60,12	2,39	3,148
60 V / 60 Hz	61,25	1,77	62,02	1,69	62,02	2,46	3,340

*Vrms – valor eficaz da tensão elétrica; **Arms – valor eficaz da corrente elétrica.

Tabela 7 – Média da tensão elétrica eficaz e corrente elétrica eficaz nas fases do enrolamento Y.

Tensão e Frequência de excitação	Enrolamento Y excitado						Força planar de propulsão na direção y (N)
	Bobina A		Bobina B		Bobina C		
	Vrms* (V)	Arms** (A)	Vrms (V)	Arms (A)	Vrms (V)	Arms (A)	
45 V / 45 Hz	45,90	1,57	45,80	1,56	46,45	2,15	2,512
48 V / 48 Hz	49,10	1,62	48,25	1,62	50,65	2,24	2,671
51 V / 51 Hz	51,70	1,69	51,77	1,65	52,40	2,31	2,782
54 V / 54 Hz	54,70	1,73	54,50	1,68	55,97	2,36	2,974
57 V / 57 Hz	57,85	1,78	57,60	1,69	60,20	2,43	3,082
60 V / 60 Hz	61,62	1,84	61,85	1,72	62,10	2,47	3,094

*Vrms – valor eficaz da tensão elétrica; **Arms – valor eficaz da elétrica.

Com a obtenção dos dados de tensão elétrica, corrente elétrica e força de propulsão planar para os casos 1 e 2, onde somente um dos enrolamentos trifásicos da nova topologia de carro primário foi excitado, partiu-se para a obtenção destes mesmos parâmetros com a excitação de tensão trifásica sendo aplicada ao mesmo instante em ambos os enrolamentos X e Y, e monitorando os valores das tensões elétricas, correntes elétricas e as forças de propulsão simultaneamente no eixo x e no eixo y , caso 3 e caso 4 respectivamente.

As médias dos dados destes ensaios realizados estão nas tabelas 8 e 9.

Tabela 8 – Força planar de propulsão média ao longo do eixo x para ambos os enrolamento excitados com tensão trifásica elétrica.

Tensão e Frequência de excitação	Ambos os enrolamentos excitados						Força planar de propulsão na direção x (N)
	Bobina D		Bobina E		Bobina F		
	Vrms* (V)	Arms** (A)	Vrms (V)	Arms (A)	Vrms (V)	Arms (A)	
45 V / 45 Hz	43,55	1,59	44,05	1,82	46,30	2,46	2,614
48 V / 48 Hz	46,81	1,65	47,37	1,84	49,35	2,51	2,871
51 V / 51 Hz	50,62	1,73	51,32	1,87	51,07	2,55	3,020
54 V / 54 Hz	54,22	1,76	55,22	1,90	53,55	2,60	3,128
57 V / 57 Hz	57,35	1,83	58,00	1,93	57,31	2,64	3,287
60 V / 60 Hz	59,90	1,89	60,42	1,95	61,82	2,70	3,515

*Arms – valor eficaz da corrente elétrica; **Vrms – valor eficaz da tensão elétrica.

Tabela 9 – Força planar de propulsão média ao longo do eixo y para ambos os enrolamentos excitados com tensão trifásica elétrica.

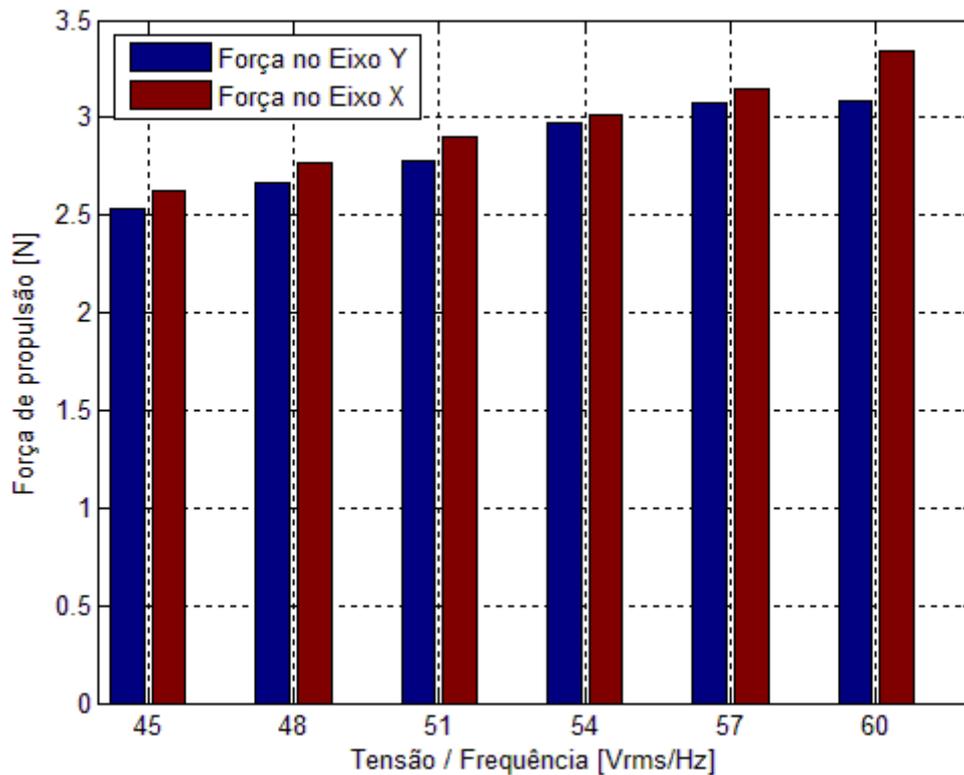
Tensão e Frequência de excitação	Ambos os enrolamentos excitados						Força planar de propulsão na direção y (N)
	Bobina A		Bobina B		Bobina C		
	Vrms* (V)	Arms** (A)	Vrms (V)	Arms (A)	Vrms (V)	Arms (A)	
45 V / 45 Hz	43,55	1,60	44,05	1,67	46,30	2,24	2,401
48 V / 48 Hz	46,81	1,66	47,37	1,73	49,35	2,36	2,577
51 V / 51 Hz	50,62	1,71	51,32	1,76	51,07	2,39	2,656
54 V / 54 Hz	54,22	1,77	55,22	1,79	53,55	2,44	2,803
57 V / 57 Hz	57,35	1,82	58,00	1,82	57,31	2,53	2,969
60 V / 60 Hz	59,90	1,88	60,42	1,86	61,82	2,58	3,195

*Arms – valor eficaz da corrente elétrica; **Vrms – valor eficaz da tensão elétrica.

Observando os valores de força planar da tabela 8 e tabela 9, nota-se que há maior intensidade se comparadas com as mesmas forças planares relacionadas na tabela 6 e tabela 7. O fator que pode estar influenciando nestas diferenças é uma possível deformação não desejada da célula de carga, pois topologicamente a instalação da célula de carga é feita de tal maneira para se tornar sensível às forças no sentido do eixo x e eixo y . Com ambos os enrolamentos energizados há o desenvolvimento de uma força resultante de diferente direção dos eixos y ou x .

Nos próximos gráficos estão apresentadas em formas de barras as respectivas forças lineares de propulsão de cada experimento realizado com diferentes situações de excitação do carro primário da nova topologia.

Figura 43 – Gráfico comparativo entre as forças planar no sentido do eixo x e y da nova topologia de carro primário.



Os dados levantados dos experimentos da nova topologia de carro primário para efetivamente realizar as comparações mínimas de operacionalidade de ambas as topologias foram, em parte, satisfatórios.

5.2 Ensaios de Força Planar de Propulsão (parte 2)

Nesta seção serão apresentados os dados experimentais com a intenção de extrapolar os valores até então medidos permitindo uma abordagem maior com relação aos mesmos efeitos verificados nos experimentos já realizados. Este é o caso 5.

Os experimentos desenvolvidos em um segundo momento foram realizados com a faixa de tensão elétrica eficaz, por fase e aplicada nos enrolamentos, de 45 V até 105 V espaçados de 10 V em 10 V. O mesmo se aplica à faixa de frequência de excitação, 45 Hz até 105 Hz, com um passo de 10 unidades entre as medidas e ensaio.

Optou-se por escolher estas faixas de excitação de tensão elétrica, pois se constatou demasiado aquecimento das bobinas do carro primário para tensão acima de 105 Vrms. Por

questões de segurança operacional e integridade dos enrolamentos este foi o limite de tensão elétrica aplicada nos enrolamentos da nova topologia de carro primário.

Para cada valor de tensão elétrica e frequência, foram feitas as médias de 10 medidas de força e amostradas relacionando tensão elétrica e sua respectiva frequência de excitação.

Tabela 10 – Resultados experimentais da força planar de propulsão média na direção x.

Tensão e Frequência de excitação	Enrolamento X excitado						Força na direção x (N)
	Bobina D		Bobina E		Bobina F		
	Arms* (A)	Vrms** (V)	Arms (A)	Vrms (V)	Arms (A)	Vrms (V)	
45 V / 45 Hz	1,57	45,6	1,59	45,6	2,20	45,8	2,619
55 V / 55 Hz	1,76	55,6	1,69	55,3	2,45	57,0	3,138
65 V / 65 Hz	1,93	66,4	1,80	66,1	2,63	68,1	3,603
75 V / 75 Hz	2,09	77,8	1,89	77,6	2,78	78,6	3,883
85 V / 85 Hz	2,23	89,5	2,00	89,3	2,93	89,3	4,165
95 V / 95 Hz	2,37	100,5	2,05	100,4	3,07	100,4	4,379
105 V / 105 Hz	2,48	111,0	2,13	111,0	3,14	113,0	4,473

*Arms – valor eficaz da corrente elétrica; **Vrms – valor eficaz da tensão elétrica.

Tabela 11 – Resultados experimentais da força planar de propulsão média na direção y.

Tensão e Frequência de excitação	Enrolamento Y excitado						Força na direção y (N)
	Bobina A		Bobina B		Bobina C		
	Arms* (A)	Vrms** (V)	Arms (A)	Vrms (V)	Arms (A)	Vrms (V)	
45 V / 45 Hz	1,58	45,9	1,59	45,8	2,19	46,5	2,535
55 V / 55 Hz	1,75	55,7	1,68	55,4	2,39	57,6	3,015
65 V / 65 Hz	1,93	66,6	1,80	66,2	2,56	69,0	3,222
75 V / 75 Hz	2,08	77,9	1,91	77,6	2,73	79,6	3,573
85 V / 85 Hz	2,22	89,7	2,02	89,4	2,89	90,3	3,834
95 V / 95 Hz	2,37	101,0	2,10	100,3	3,01	101,0	3,974
105 V / 105 Hz	2,52	111,0	2,20	111,0	3,13	113,0	4,011

*Arms – valor eficaz da corrente elétrica; **Vrms – valor eficaz da tensão elétrica.

Na figura 42 e figura 43 são apresentados os dados de força planar de propulsão para os casos das tabelas 12 e 13. Na figura 44 são apresentados todos os dados de força planar levantados experimentalmente.

Os dados destes experimentos levam às seguintes conclusões: com o aumento da frequência de excitação aplicado nos enrolamentos a impedância deste torna maior causando a diminuição da corrente elétrica percorrida nas bobinas. Isto causa a diminuição do campo magnético gerado pelo primário. Conseqüentemente a força planar de propulsão diminui.

Analogamente, com o aumento da tensão elétrica as correntes que percorrem os enrolamentos aumentam proporcionalmente aumentando a densidade de campo magnético, tão logo a força de propulsão aumenta.

Estes efeitos além de intensificar as forças de propulsão, medidas nos experimentos estáticos, aumentam as velocidades finais atingidas pela nova topologia de carro, experimentalmente obtidas nos ensaios dinâmicos descritos mais adiante neste trabalho.

Figura 44 – Dados de força planar de propulsão no sentido do eixo x.

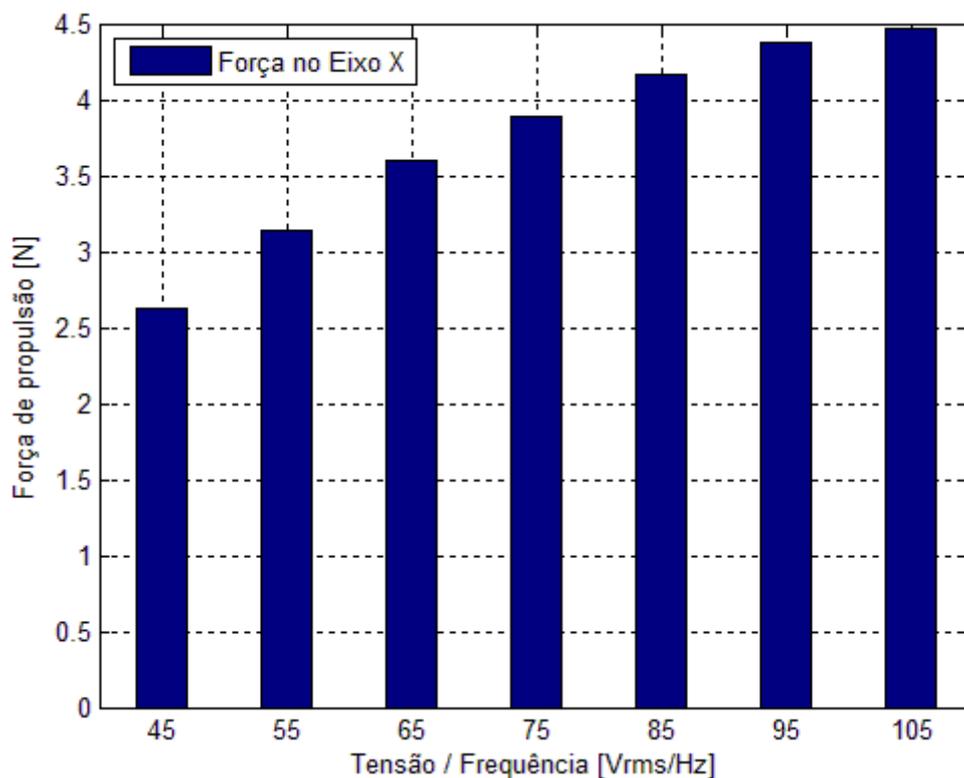


Figura 45 – Dados de força planar de propulsão no sentido do eixo y.

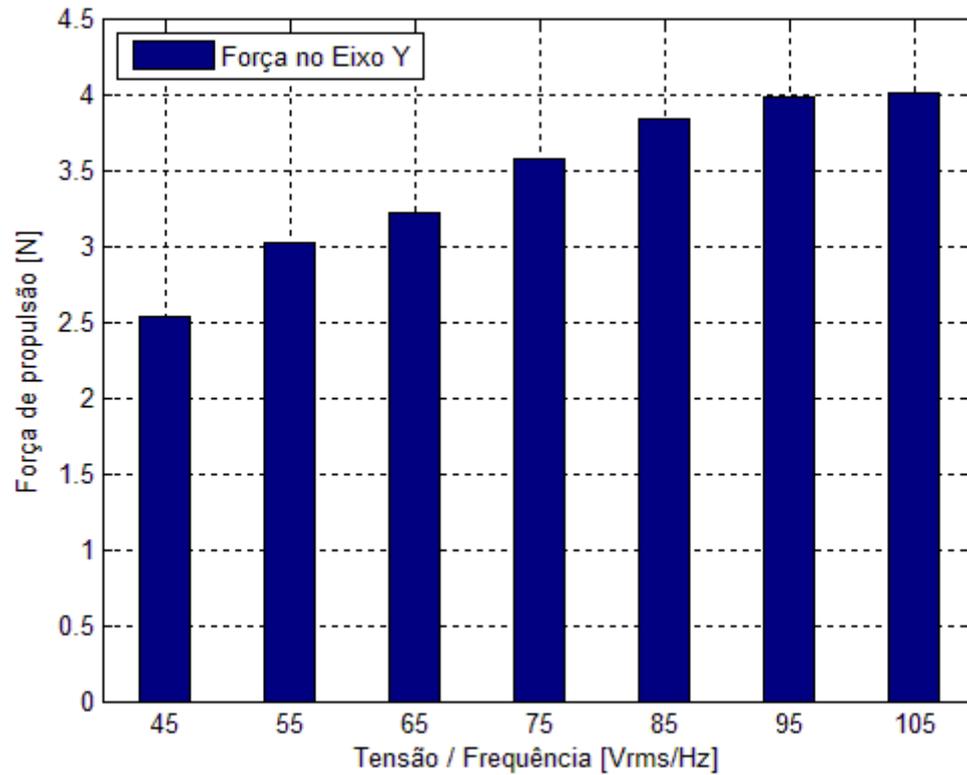
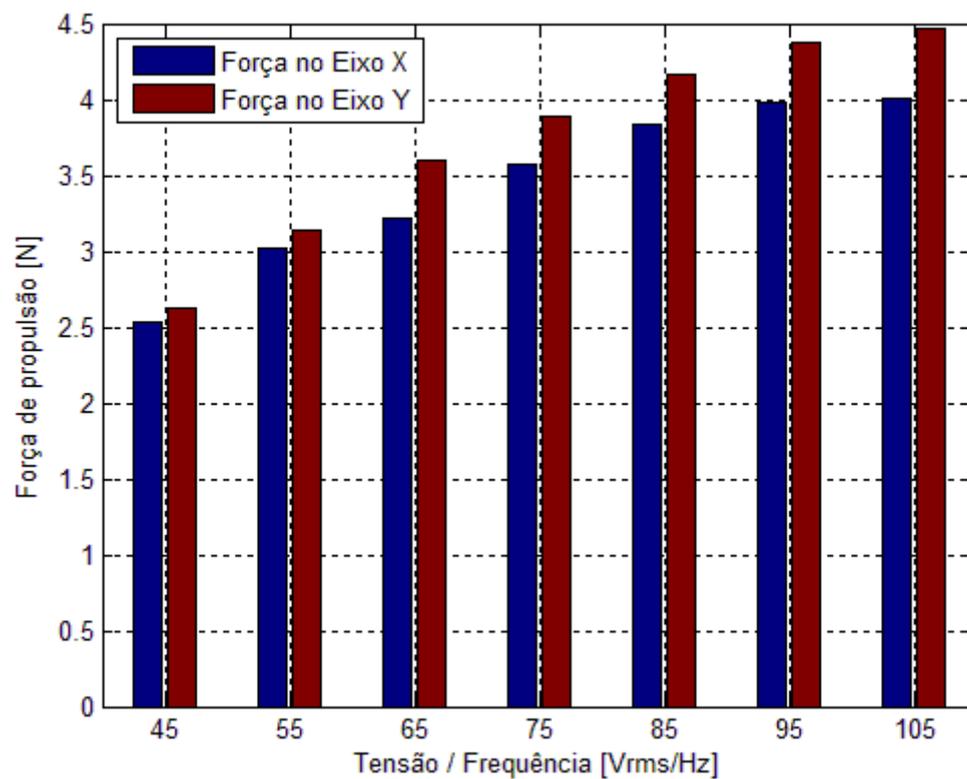


Figura 46 – Gráfico comparativo entre as forças de propulsão em ambos os eixos adquiridas em ensaios realizados separadamente.



5.3 Velocidade de Deslocamento

Outros experimentos realizados sobre a nova topologia de carro primário são referentes ao desenvolvimento de velocidade adquirida pela nova topologia de carro primário.

Implementou-se na bancada de experimentos um sistema de aquisição de sinais de tensão de dois potenciômetros instalados de tal forma que a variação de suas resistências é proporcional aos deslocamentos realizados pelo carro, tanto movimentações no sentido do eixo x como no sentido do eixo y .

Utilizou-se de uma placa de aquisição de dados da marca National Instruments, modelo USB-6009, para monitorar os sinais dos potenciômetros. Estes sinais foram exportados para o notebook utilizado para se comunicar com a placa de aquisição de dados.

Elaborou-se uma programação no software Labview para configurar as entradas analógicas da placa de aquisição com os parâmetros suficientemente mínimos para análises efetivas dos dados de deslocamento associados ao carro primário do API.

Além disso, estipulou-se uma faixa de tensão elétrica de operação dos enrolamentos X e Y e uma faixa de frequência desta tensão elétrica de excitação.

Os resultados gráficos apresentados nos próximos subcapítulos foram realizados com o valor de tensão elétrica fixa no valor de 70 Vrms e a frequência da excitação variou-se entre 45 Hz até 95 Hz. O valor limite de 95 Hz foi limitado obrigatoriamente, pois com valores acima deste o carro primário não desenvolvia deslocamentos lineares. A força de propulsão gerada não ultrapassava o valor de atrito estático imposto pela estrutura dos eixos combinado aos rolamentos lineares.

5.3.1 Velocidades experimentais do enrolamento X

Conforme já descrito nos capítulos anteriores, o enrolamento Y é responsável pelo surgimento da força planar de propulsão cujo eixo y é o sentido desta força. Da mesma forma, o enrolamento X quando excitado por uma fonte trifásica proporciona o surgimento da força translacional nos sentido do eixo x .

Os ensaios de velocidade para ambos os eixos foram realizados com valores de tensão elétrica eficaz fixa em 70 Vrms e variou-se a frequência de excitação entre os valores de 45 Hz até 95 Hz, com passos de 5 Hz.

Figura 48 – Curvas de velocidade no sentido do eixo x do carro primário. Tensão elétrica 70 Vrms e frequência variável.

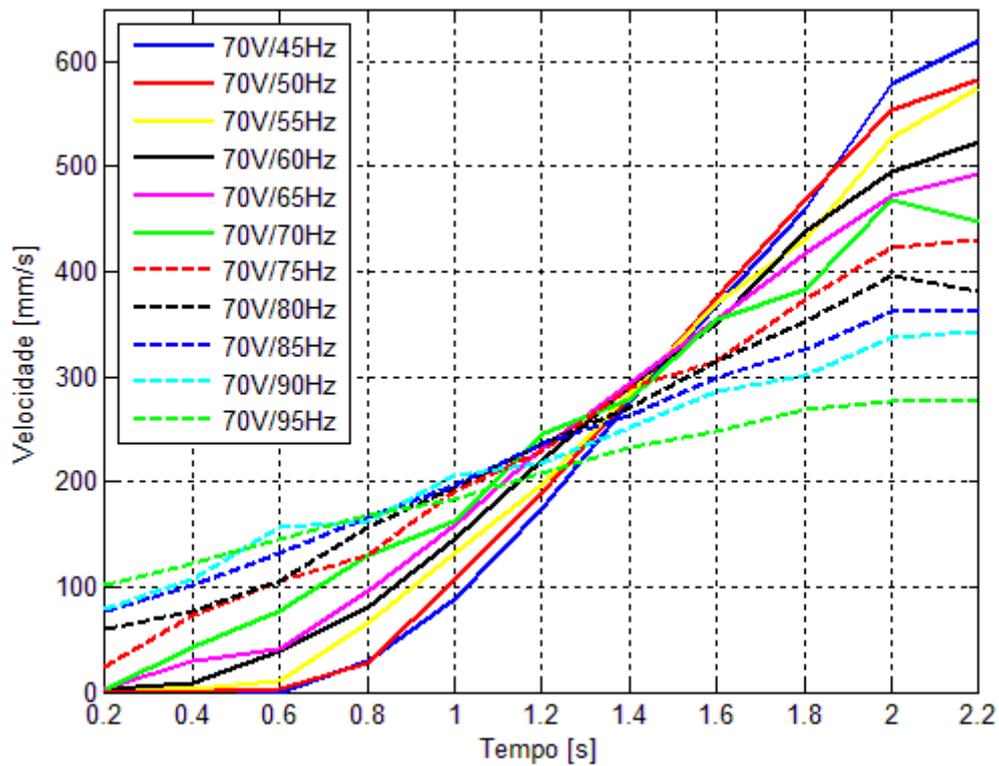


Figura 49 – Gráfico de deslocamento no eixo x do carro primário. Frequência de excitação variável e tensão elétrica fixa em 100 Vrms.

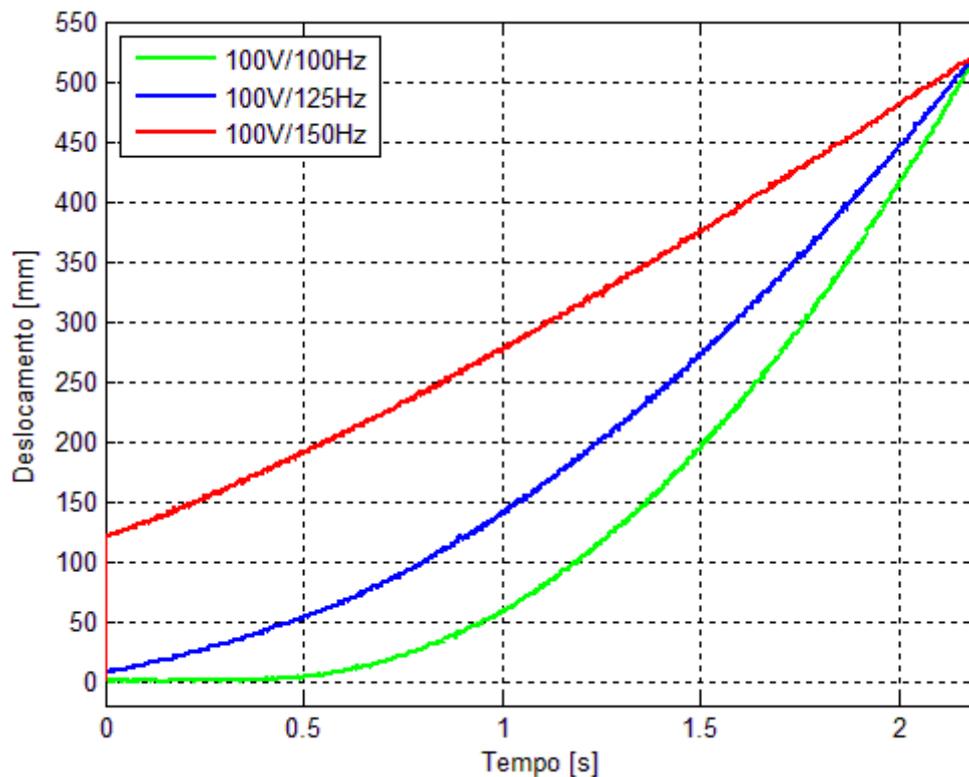
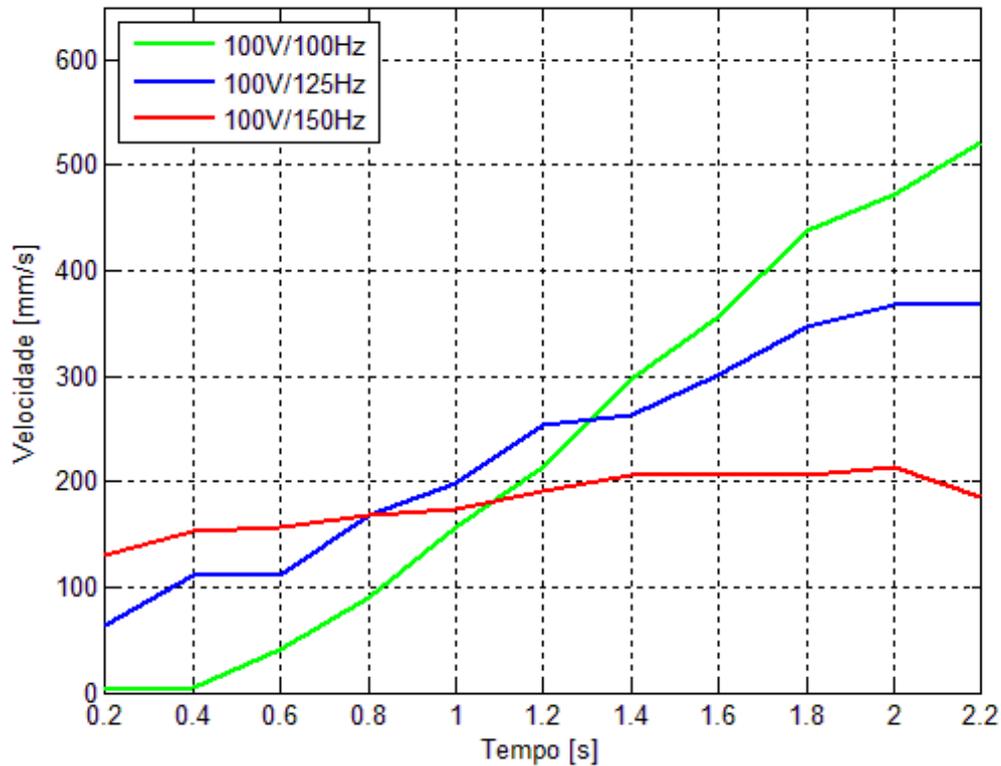


Figura 50 – Gráfico de velocidade no eixo x do carro primário. Frequência de excitação variável e tensão elétrica fixa em 100 Vrms.



Foram levantados os dados de deslocamento no eixo x , nas próximas figuras serão apresentados os gráficos referentes ao deslocamento do novo carro primário no sentido do eixo y .

5.3.2 Velocidades experimentais do enrolamento Y

Na figura 49 são apresentadas as curvas de deslocamento referentes aos ensaios para movimentos no sentido do eixo y e na figura 50 são apresentadas as curvas de velocidade para estes mesmos ensaios.

Os ensaios de velocidade para ambos os eixos foram realizados com valores de tensão elétrica eficaz fixa em 70 Vrms e variou-se a frequência de excitação entre os valores de 45 Hz até 95 Hz, com passos de 5 Hz.

Figura 51 – Curvas de deslocamento no sentido do eixo y do carro primário. Tensão elétrica 70 Vrms e frequência variável.

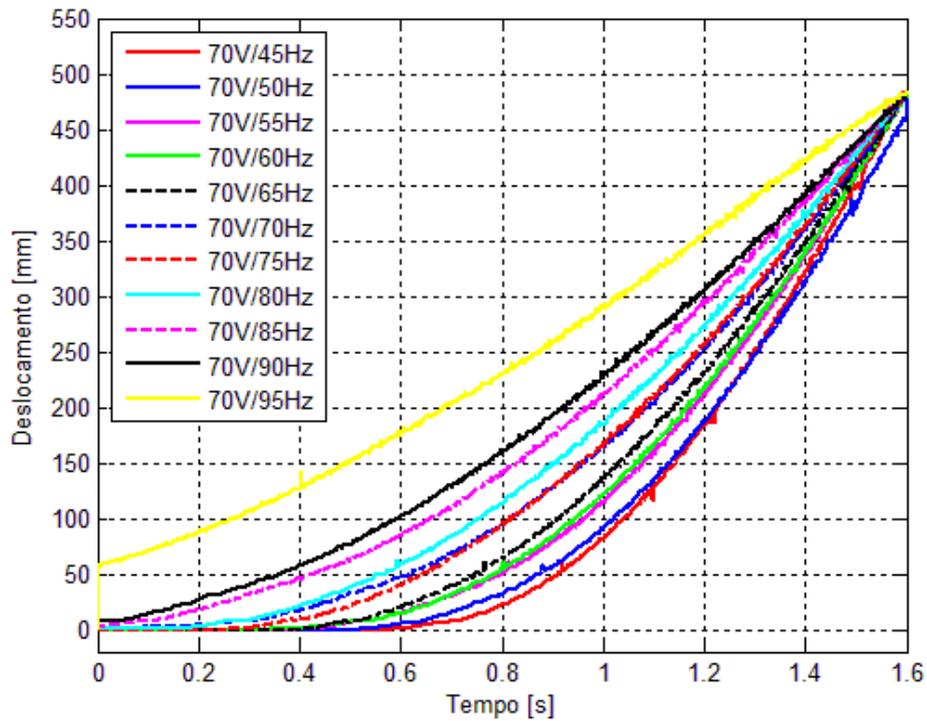
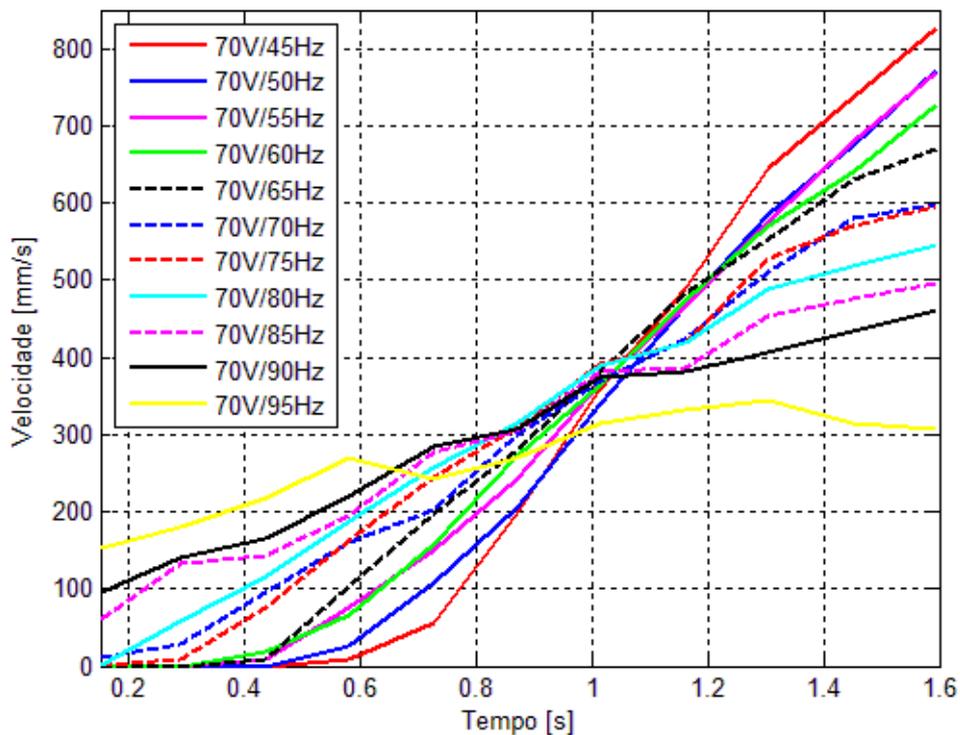


Figura 52 – Curvas de velocidade no sentido do eixo y do carro primário. Tensão elétrica 70 Vrms e frequência variável.



6 Análises Experimentais e Comparações

O tratamento dos resultados obtidos experimentalmente será abordado neste capítulo.

Serão comparados os dados entre as topologias de carro primário envolvidas neste Atuador Planar de Indução frente às diferentes excitações aplicadas. A exposição dos resultados se dará na forma de tabelas comparativas, gráficos e figuras.

As grandezas comparadas serão: tensão elétrica eficaz, corrente elétrica eficaz e força planar de propulsão.

6.1 Comparações dos Parâmetros de Força Planar de Propulsão nos eixos x e y na nova topologia de carro primário

A comparação dos valores médios experimentais das forças de propulsão planar desenvolvidos nos sentidos de ambos os eixos x e y , estão na tabela 12. Estes valores são referentes aos experimentos com os enrolamentos excitados individualmente. Ainda, estes dados são referentes aos casos 1 e 2, onde a faixa de valores de tensão elétrica e frequência são de 45 Vrms até 60 Vrms e de 45 Hz até 60 Hz.

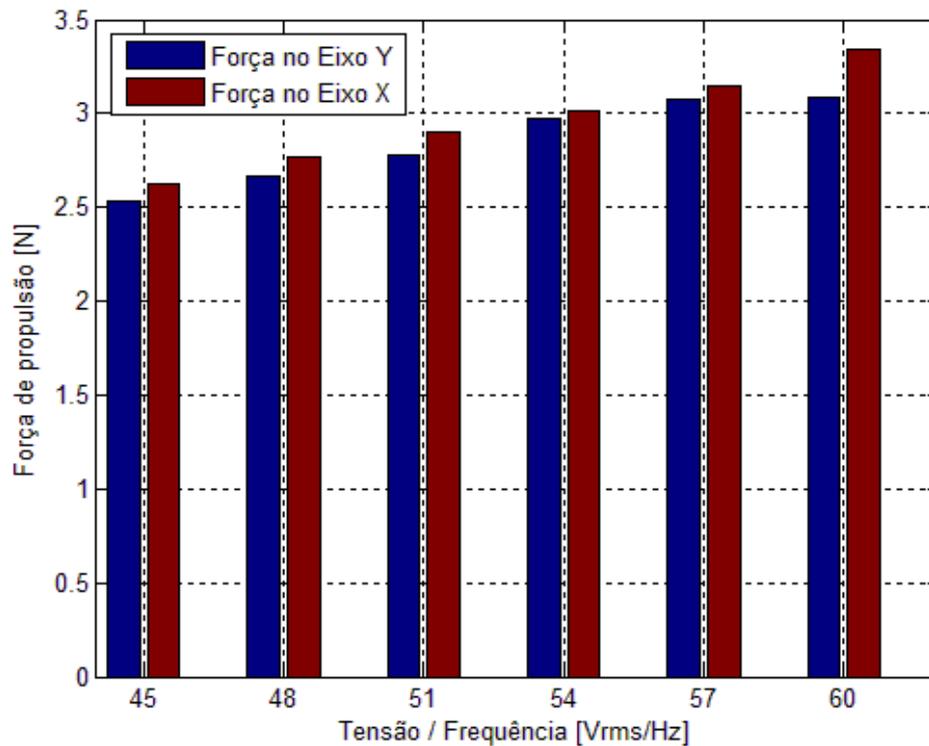
Tabela 12 – Comparação entre as forças planares de propulsão nos diferentes eixos para a nova topologia de carro primário.

Tensão elétrica e Frequência de excitação	Força na direção x (N)	Força na direção y (N)	Diferença (%)
45 V / 45 Hz	2,585	2,512	2,82
48 V / 48 Hz	2,767	2,671	3,47
51 V / 51 Hz	2,905	2,782	4,23
54 V / 54 Hz	3,008	2,974	1,13
57 V / 57 Hz	3,148	3,082	2,09
60 V / 60 Hz	3,340	3,094	7,36

Na figura 53 é mostrado em forma gráfica de barras as forças planares de propulsão dos experimentos realizados com a aplicação da tensão elétrica trifásica individualmente em cada caso: caso 1 e caso 2.

A diferença entre as forças planares para os casos ensaiados foi relativamente baixo para o carro primário da nova topologia experimentada.

Figura 53 – Comparação entre as forças planares de propulsão desenvolvida em ambos os eixos de movimentação do carro primário da nova topologia.



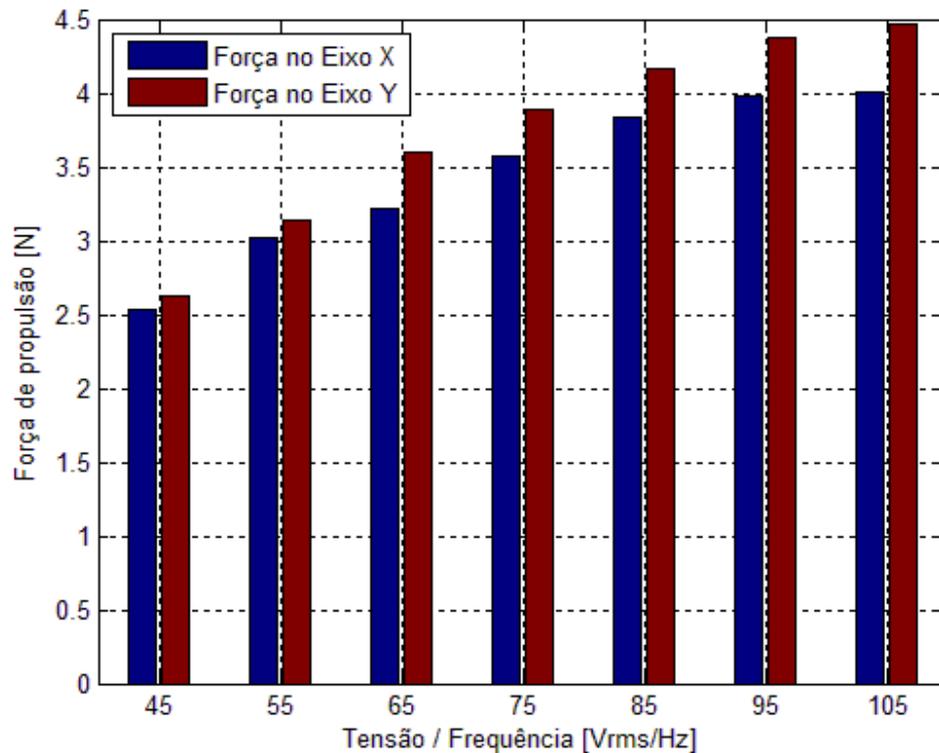
A comparação dos valores médios experimentais das forças de propulsão planar desenvolvidos nos sentidos de ambos os eixos x e y , para as faixas de operação do caso 5 estão na tabela 13. Estes valores são referentes aos experimentos com os enrolamentos excitados individualmente onde a faixa de valores de tensão elétrica e frequência são de 45 Vrms até 105 Vrms e de 45 Hz até 60 Hz, respectivamente.

Na figura 54 são apresentados de forma gráfica os dados da tabela 13.

Tabela 13 – Comparação entre as forças planares de propulsão nos diferentes eixos para a nova topologia de carro primário.

Tensão elétrica e Frequência de excitação	Força na direção x (N)	Força na direção y (N)	Diferença (%)
45 V / 45 Hz	2,619	2,535	3,31
55 V / 55 Hz	3,138	3,015	4,08
65 V / 65 Hz	3,603	3,222	11,82
75 V / 75 Hz	3,883	3,573	8,67
85 V / 85 Hz	4,165	3,834	8,63
95 V / 95 Hz	4,379	3,974	10,19
105 V / 105 Hz	4,473	4,011	11,51

Figura 54 – Comparação entre as forças planares de propulsão desenvolvida em ambos os eixos de movimentação do carro primário da nova topologia.



6.2 Comparação dos Parâmetros de Força Planar de Propulsão entre as Topologias de Carro Primário analisadas

Neste subcapítulo serão apresentadas as comparações entre as duas topologias de carro primário: a nova topologia descrita neste trabalho e a topologia de carro primário proposta por BAGGIO FILHO (2012).

A nova topologia de carro primário será chamada de *NOVA TOPOLOGIA* enquanto que a topologia proposta por BAGGIO FILHO (2012) será neste trabalho chamada de *ANTIGA TOPOLOGIA*, para fins de simplificação nas tabelas comparativas desta seção do trabalho.

Os dados de força planar de propulsão serão comparados de forma gráfica e em tabelas. Os valores adquiridos de tensão elétrica, corrente elétrica e frequência da excitação trifásica aplicada nos enrolamentos em ambos os trabalhos também serão comparados.

Nas próximas tabelas, tabela 14 e tabela 15 estão os dados de tensão elétrica, corrente e valores de força planar de propulsão para ambas as topologias de carro primário.

Na figura 56 são mostrados de forma gráfica os valores de força no sentido do eixo x adquiridos para a *NOTA TOPOLOGIA* e os valores da *ANTIGA TOPOLOGIA*. Na figura 74 são comparados os valores de força no sentido do eixo y de ambas as topologias.

Conforme analisado experimentalmente, os valores médios de força planar de propulsão para o enrolamento Y e para o enrolamento X não tem diferenças percentuais consideráveis. No entanto, os mesmos dados para a topologia de carro primário proposta por BAGGIO FILHO (2012) tem diferenças que chegam ao pior caso próximo a 280%.

A forma construtiva da topologia de carro primário proposta por BAGGIO FILHO (2012) apresenta uma grande diferença entre as distâncias dos respectivos enrolamentos e o entreferro. Os enrolamentos, X e Y, estão em camadas diferentes na armadura do primário desta topologia, precisamente, o enrolamento Y está sobre o enrolamento X.

Na figura 55 apresenta um desenho esquemático do carro primário instalado no Atuador Planar de Indução e proposto BAGGIO FILHO (2012).

A nova topologia de carro primário busca manter a distância média do enrolamento Y e enrolamento X até o secundário o mais uniforme possível, configurando uma sobreposição dos enrolamentos. Esta configuração foi apresentada na figura 34.

Experimentalmente analisando os valores de diferença apresentados na tabela 15 é possível constatar .

Figura 55 – Desenho esquemático do carro primário proposto por BAGGIO FILHO (2012).

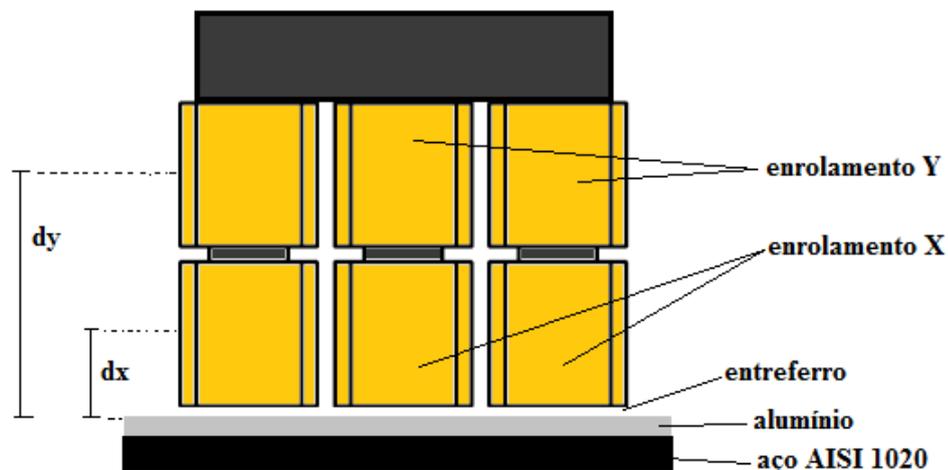


Tabela 14 – Dados comparativos de força planar de propulsão no sentido do eixo *x* entre a *NOVA TOPOLOGIA* e a *ANTIGA TOPOLOGIA*.

Tensão e Frequência de excitação	Enrolamento X excitado (eixo <i>x</i>)												Força na direção do eixo <i>x</i> (N)		
	<i>NOVA TOPOLOGIA</i>						<i>ANTIGA TOPOLOGIA</i> eixo <i>x</i>								
	Fase D		Fase E		Fase F		Fase Bobina 1		Fase Bobina 2		Fase Bobina 3		<i>NOVA</i>	<i>ANTIGA</i>	Diferenças (%)
Arms* (A)	Vrms** (V)	Arms (A)	Vrms (V)	Arms (A)	Vrms (V)	Arms (A)	Vrms (V)	Arms (A)	Vrms (V)	Arms (A)	Vrms (V)				
45 V / 45 Hz	1,52	45,75	1,54	45,85	2,14	33,6	1,79	43,2	1,99	43,8	1,45	44,0	2,585	9,88	282,21
48 V / 48 Hz	1,55	48,95	1,57	48,27	2,22	34,4	1,87	46,1	2,06	46,9	1,53	46,7	2,767	10,35	274,05
51 V / 51 Hz	1,62	51,75	1,59	51,82	2,27	34,8	1,91	49,1	2,11	49,7	1,57	50,1	2,905	10,59	264,54
54 V / 54 Hz	1,67	54,62	1,62	54,62	2,33	36,0	1,97	52,2	2,20	52,6	1,60	53,2	3,008	11,30	275,66
57 V / 57 Hz	1,72	57,95	1,64	57,60	2,39	37,9	2,01	54,5	2,48	55,9	1,66	57,6	3,148	11,65	270,08
60 V / 60 Hz	1,77	61,25	1,69	62,02	2,46	40,5	2,02	57,5	2,53	58,7	1,69	60,6	3,340	11,71	250,60

*Arms – valor eficaz da corrente elétrica; **Vrms – valor eficaz da tensão elétrica.

Tabela 15 – Dados comparativos de força planar de propulsão no sentido do eixo y entre a *NOVA TOPOLOGIA* e a *ANTIGA TOPOLOGIA*.

Tensão e Frequência de excitação	Enrolamento Y excitado (eixo y)												Força na direção do eixo y (N)		
	<i>NOVA TOPOLOGIA</i>						<i>ANTIGA TOPOLOGIA</i> eixo y								
	Fase A		Fase B		Fase C		Fase Bobina 1		Fase Bobina 2		Fase Bobina 3		<i>NOVA</i>	<i>ANTIGA</i>	Diferenças (%)
Arms* (A)	Vrms** (V)	Arms (A)	Vrms (V)	Arms (A)	Vrms (V)	Arms (A)	Vrms (V)	Arms (A)	Vrms (V)	Arms (A)	Vrms (V)				
45 V / 45 Hz	1,57	45,90	1,56	45,80	2,15	46,45	0,98	44,8	1,59	43,8	1,32	45,2	2,512	6,18	146,02
48 V / 48 Hz	1,62	49,10	1,62	48,25	2,24	50,65	0,99	47,7	1,63	46,8	1,37	48,3	2,671	6,36	138,11
51 V / 51 Hz	1,69	51,70	1,65	51,77	2,31	52,40	1,00	50,8	1,67	49,9	1,40	51,1	2,782	6,71	141,19
54 V / 54 Hz	1,73	54,70	1,68	54,50	2,36	55,97	1,02	53,9	1,71	53,1	1,45	54,1	2,974	6,89	131,67
57 V / 57 Hz	1,78	57,85	1,69	57,60	2,43	60,20	1,03	56,8	1,75	56,0	1,49	56,9	3,082	7,00	127,13
60 V / 60 Hz	1,84	61,62	1,72	61,85	2,47	62,10	1,05	59,9	1,78	59,0	1,53	60,0	3,094	7,06	128,18

*Arms – valor eficaz da corrente elétrica; **Vrms – valor eficaz da tensão elétrica.

Figura 56 – Gráfico em barras comparativo entre as forças planares no eixo x para as topologias analisadas: *NOVA TOPOLOGIA* e *ANTIGA TOPOLOGIA*.

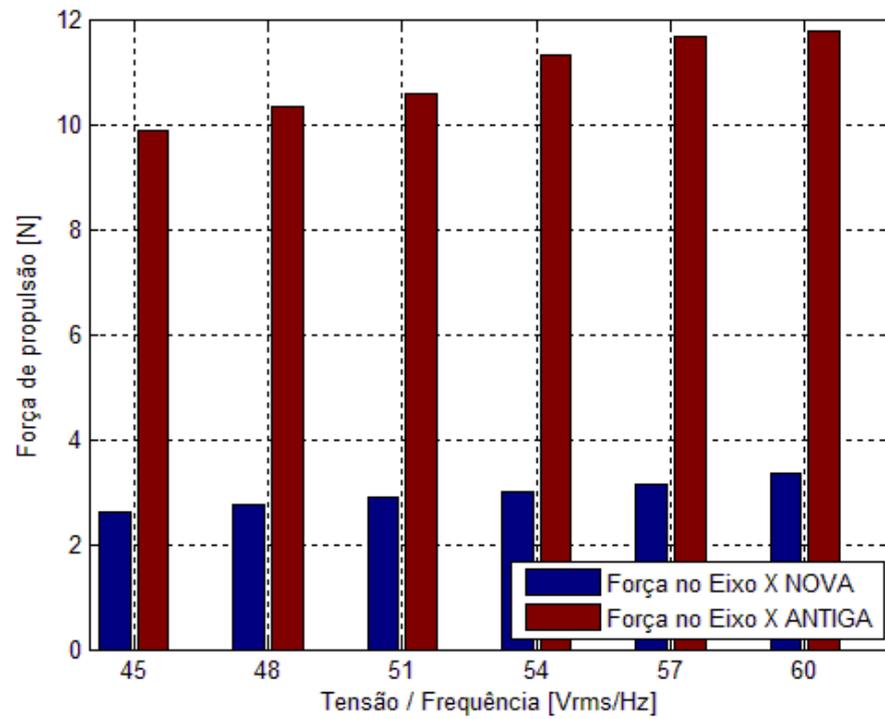
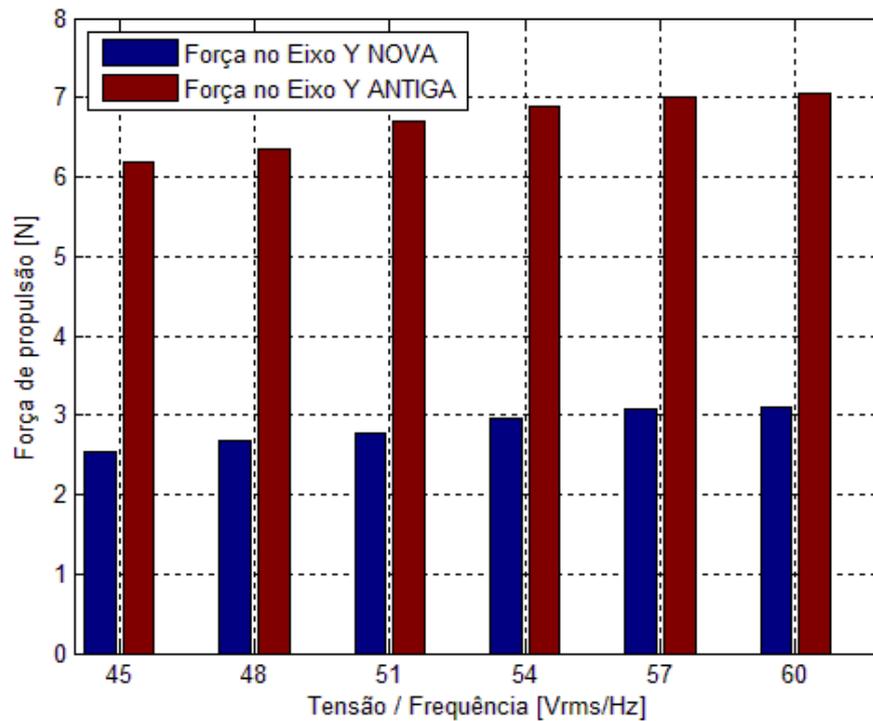


Figura 57 – Gráfico em barras comparativo entre as forças planares no eixo y para as topologias analisadas: *NOVA TOPOLOGIA* e *ANTIGA TOPOLOGIA*.



Na tabela 16 e tabela 17 são apresentados os dados da força planar de propulsão nos sentidos dos eixos x e y , respectivamente, com ambos os enrolamentos excitados pela mesma fonte trifásica.

6.3 Comparação dos dados de Corrente Elétrica para outros os valores de excitação trifásica

Na figura 58 e figura 59 são apresentadas de forma gráfica as correntes elétricas para cada experimento: enrolamento X e enrolamento Y. Estes gráficos correspondem aos ensaios cujos valores de tensão elétrica estão fixas em 70 Vrms e frequência varia na faixa de 45 Hz até 105 Hz. Na figura 60 é apresentado o gráfico completo comparativo entre as correntes de cada fase de seus respectivos enrolamentos.

Figura 58 – Gráfico em forma de barras referentes às correntes do enrolamento X.

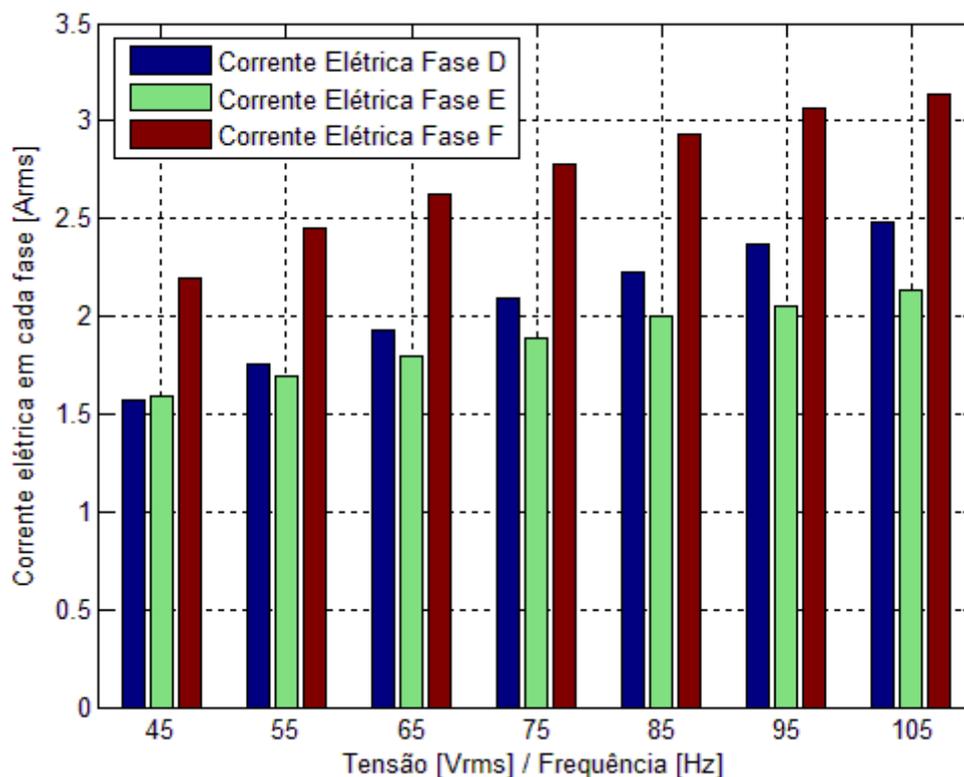


Figura 59 – Gráfico em forma de barras referentes às correntes do enrolamento Y.

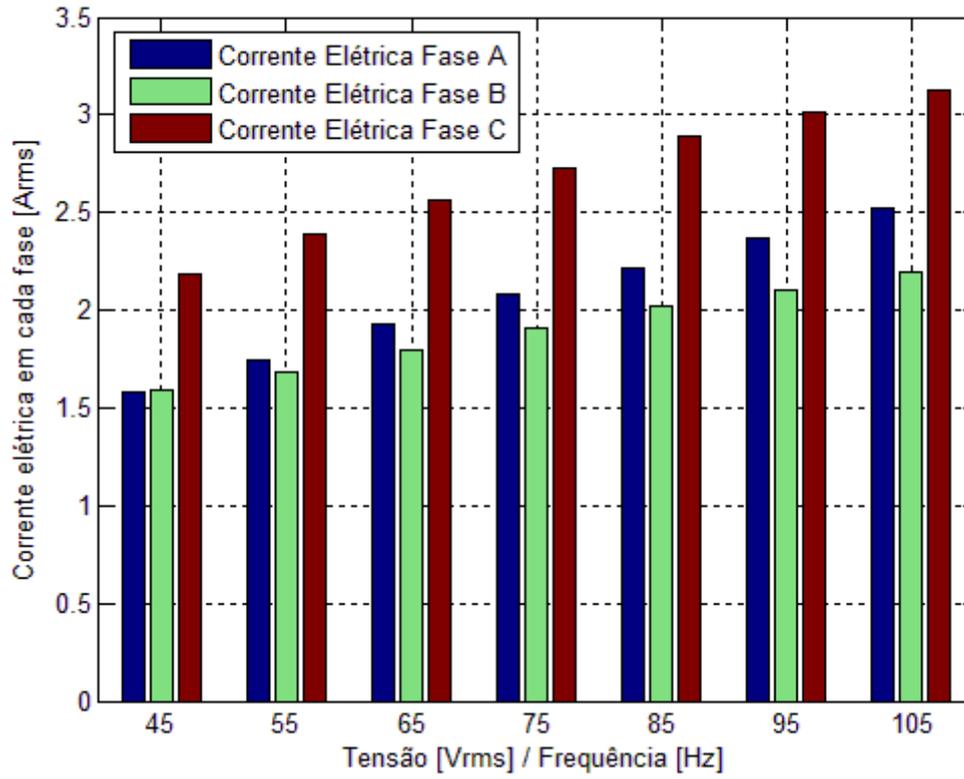


Figura 60 – Gráfico em forma de barras referentes às comparações das correntes do enrolamento Y e enrolamento X.

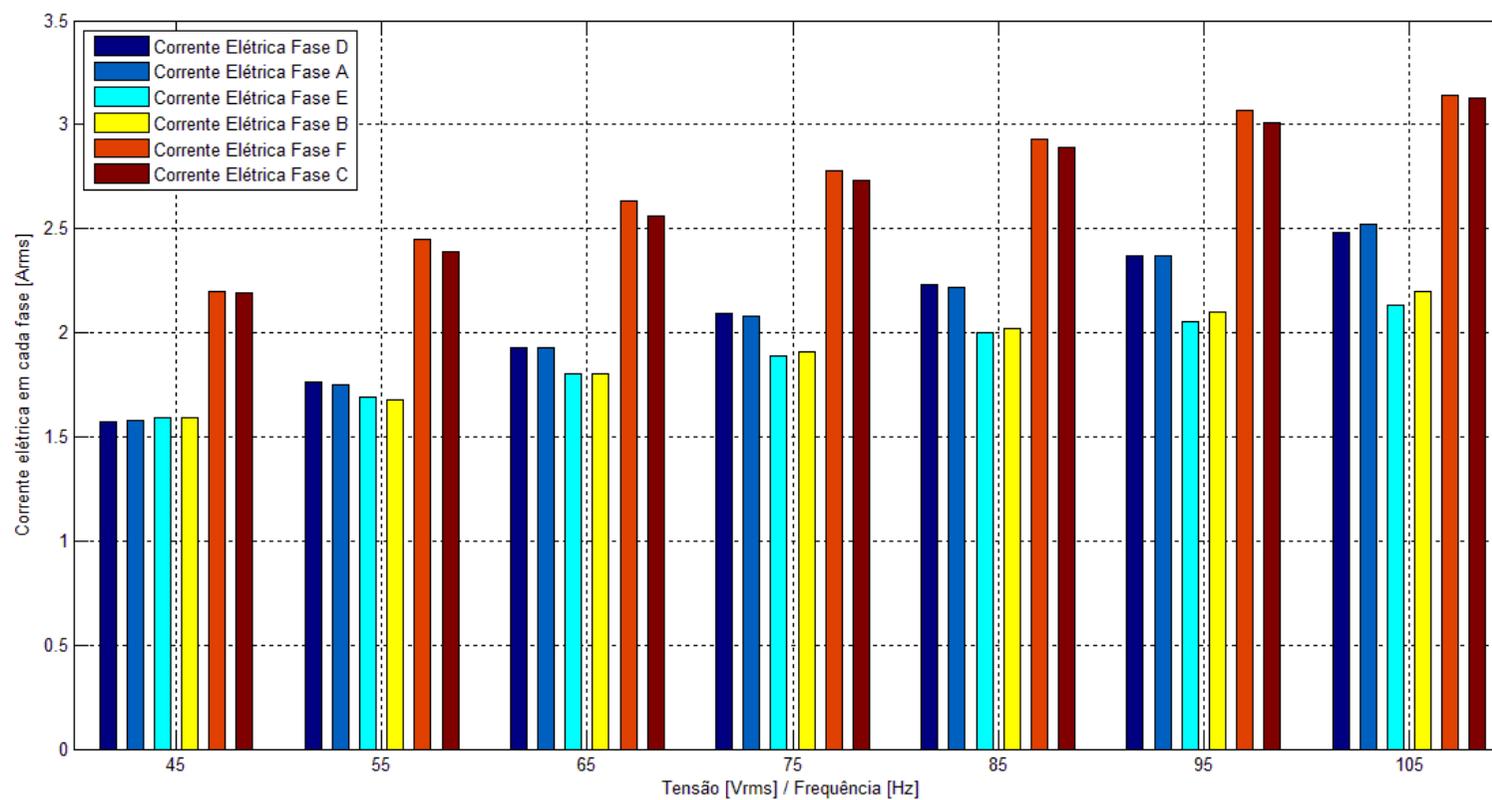


Tabela 16 – Comparativo entre as forças planares de propulsão no sentido do eixo x com ambos os enrolamentos excitados.

Tensão e Frequência de excitação	Enrolamento Y e X excitados						Força na direção x (N)		
	NOVA TOPOLOGIA			ANTIGA TOPOLOGIA					
	Fase D	Fase E	Fase F	Fase Bobina 1	Fase Bobina 2	Fase Bobina 3	NOVA	ANTIGA	Diferenças (%)
	Arms (A)	Arms (A)	Arms (A)	Arms (A)	Arms (A)	Arms (A)			
45 V / 45 Hz	1,59	1,82	2,46	2,09	2,40	1,73	2,614	8,53	226,32
48 V / 48 Hz	1,65	1,84	2,51	2,13	2,44	1,77	2,871	8,77	205,47
51 V / 51 Hz	1,73	1,87	2,55	2,17	2,49	1,80	3,020	9,01	198,34
54 V / 54 Hz	1,76	1,90	2,60	2,21	2,52	1,84	3,128	9,30	197,31
57 V / 57 Hz	1,83	1,93	2,64	2,26	2,58	1,87	3,287	9,54	190,23
60 V / 60 Hz	1,89	1,95	2,70	2,29	2,61	1,91	3,515	9,83	179,66

Tabela 17 – Comparativo entre as forças planares de propulsão no sentido do eixo y com ambos os enrolamentos excitados.

Tensão e Frequência de excitação	Enrolamento Y e X excitados						Força na direção y (N)		
	NOVA TOPOLOGIA			ANTIGA TOPOLOGIA					
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase Bobina 1	Fase Bobina 2	Fase Bobina 3	NOVA	ANTIGA	Diferenças (%)
	Arms (A)	Arms (A)	Arms (A)	Arms (A)	Arms (A)	Arms (A)			
45 V / 45 Hz	1,60	1,67	2,24	1,03	1,82	1,61	2,401	5,06	110,75
48 V / 48 Hz	1,66	1,73	2,36	1,06	1,86	1,64	2,577	5,24	103,34
51 V / 51 Hz	1,71	1,76	2,39	1,08	1,90	1,69	2,656	5,36	101,81
54 V / 54 Hz	1,77	1,79	2,44	1,11	1,94	1,72	2,803	5,53	97,29
57 V / 57 Hz	1,82	1,82	2,53	1,16	1,99	1,77	2,969	5,65	90,30
60 V / 60 Hz	1,88	1,86	2,58	1,19	2,02	1,81	3,195	5,77	80,59

7 Conclusões e Considerações Finais

A partir da revisão bibliográfica, foram introduzidos os principais conceitos sobre motores lineares e atuadores lineares planares. Nesta revisão foram destacadas as características construtivas, princípios de operação, a aplicação e outras particularidades.

Com as análises experimentais a respeito do princípio físico do carro primário dos atuadores planares de indução, pode-se oferecer soluções para aplicações industriais que exijam movimentações planares levando em consideração a resposta elétrica-mecânica e o grau de precisão de posicionamento.

A força de propulsão planar verificada nos quatro casos experimentados pode concluir que os enrolamentos, X e Y, estão construtivamente iguais. Tais dados apresentar boa qualidade e fornecem informações para comprovar que as forças em ambos os sentidos, eixo x e y , são semelhantes em intensidade.

As forças translacionais desenvolvidas pela nova topologia de carro primário em comparação com as forças desenvolvidas pela topologia de carro primário proposta por BAGGIO FILHO (2012), discriminadas em sua tese de doutorado e nas mesmas direções, são de intensidades menores, pois a densidade de campo magnético desenvolvido pelos enrolamentos da nova topologia é menor. A forma construtiva das bobinas, número de espiras e a quantidade destas em cada fase dos enrolamentos X e Y levando em consideração explicam o fato da intensidade do campo magnético ser menor na nova topologia de carro primário.

Os dados de velocidade da nova topologia de carro primário também fornecem dados relevantes do projeto. Estes dados foram confrontados com as intensidades dos valores de força planar de propulsão para cada caso experimentado. Ainda, são reconhecidos nestas curvas de velocidade que forças de maior módulo incrementam as velocidades atingidas da nova topologia de carro primário.

A excursão máxima que o carro primário do atuador planar pode atingir, ou seja, o máximo deslocamento que tanto os eixos lineares como o próprio tamanho ou dimensões de área do secundário permitem que o primário de locomova, não causam erros de medida de deslocamento. Observando-se as velocidades ao final do deslocamento esta se torna ligeiramente menor, para a maioria dos experimentos realizados, em relação às posições anteriores. Isto se dá em virtude dos efeitos de final de curso. Tão logo, para dados de

velocidade de qualidade superior a região do secundário deve ser maior permitindo maior deslocamento do carro primário.

A caracterização experimental desta nova topologia de carro primário agrega e complementa estudos que envolvam os atuadores planares de indução, apresentando uma nova topologia para as mesmas aplicações referenciadas em outros dispositivos de igual classificação.

Considerações gerais referentes à nomeação deste trabalho apontam para uma possível troca da palavra “planar” com seu respectivo significado pela palavra “translacional” mencionando o surgimento de uma força ou movimento resultante de forças lineares.

**ANEXO A – TABELA COMPARATIVA DOS EFEITOS FRENTE ALTERAÇÕES
EM DETERMINADOS PARÂMETROS**

Tabela 18 – Efeitos das variações dos parâmetros em máquinas lineares de indução.

Parâmetro	Aumento	Diminuição
Entreferro	Aumento da corrente de magnetização; Aumento nas perdas por efeito de final de curso.	Aumento da eficiência.
Passo Polar	Aumento no Fator de Qualidade; Diminuição da espessura do núcleo ferromagnético.	Aumento do número de polos
Número de Polos	Diminuição do efeito de final de curso	Aumento da reatância do secundário
Espessura do Secundário	Aumento na corrente de partida	Aumento da reatância do secundário
Resistência do Secundário	Diminuição do efeito de final de curso	Diminuição das perdas no secundário
Largura da Ranhura	Diminuição da reatância	Aumento da força Aumento da eficiência

Fonte: Nasar, 1987.

REFERÊNCIAS

- ASSUMPCÃO BASTOS, J. P. **Eletromagnetismo para Engenharia: estática e quase estática**. Florianópolis: Editora da UFSC, 2004.
- BAGGIO FILHO, N. F. **Estudo de um Atuador Planar de Indução**. 2012. 249 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.
- BASAK, A. **Permanent-Magnet DC Linear Motor**. Oxford: Oxford Science Publications, 1996.
- DANIELSSON, O. **Design of a Linear Generator for Wave Energy Plant**. Master's Degree Project. Uppsala University School of Engineering. Engineering Physics Programmer, Uppsala, 2003.
- FAIZ, J.; JAFARI, H. Accurate Modeling of Single-Sided Linear Induction Motor, In: INTERNATIONAL MAGNETIC CONFERENCE, 1999, Kyonju. **Proceeding...** Kyonju: IEEE International, 1999. p. AS19 - AS19, May.
- FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY Jr, C.; UMANS, S. D. **Máquinas Elétricas: com introdução à eletrônica de potência**. 6ª ed. Porto Alegre: Editora Boolman, 2006.
- FLORES FILHO, A. F.; BASAK, A. Improvement of the Force Produced by a Homopolar Brushless DC Linear Motor. In: IEEE INTERNATIONAL ELECTRIC MACHINES AND DRIVES CONFERENCE, 1997, Milwaukee. **Proceedings...** Milwaukee: IEEE/PES, IEEEIES, 1997. p. MC1-12.1-MC1-12.3.
- GIERAS, J. F. **Linear Induction Driver**. New York: Oxford University Press, 1994.
- GIERAS, J. F.; PIECH, Z. J. **Linear Synchronous Motor: transportation and automation systems**. Londres: CRC Press, 2000.
- JANSSON, P. **Advances in Soft Magnetic Composites Based in Iron Powder**. Sweden, Höganäs AB. In: SOFT MAGNETIC MATERIAL CONFERENCE, 1998, Barcelona. **Proceeding...** Barcelona: Gorham/Intertech Consulting, 1998.
- JULIANI, Aline Durrer Patelli. **Projeto e Construção de um Motor Elétrico Linear aplicado a Bioengenharia**. 2011. 147 f. Tese (Doutorado em Ciências) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Escola Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.
- LAITHWAITE, E. R.; BARWELL, F. T. **Application of Linear Induction Motors to High-speed Transport System**. London: Imperial College of Science and Technology, 1969.
- LAITHWAITE, E. R.; EASTHAM, J. F. **Linear-motor Topology**. London, UK, 1973.
- LALL, Chaman. **Soft Magnetism: fundamentals for powder metallurgy and metal injection molding**. Princeton: Metal Power Industries Federation, 1992.

LEITE, L. C. **Identificação do Conjugado de uma Máquina de Indução Setorial via Redes Neurais Artificiais**. 2003, 122 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

McLEAN, G. W. Review of Recent Progress in Linear Motors. **IEE Proceedings... on Electric Power Applications**, v. 135, n° 6, p. 380-416.

NASAR, S. A.; BOLDEA, I. **Linear Electric Motor: theory, design and applications**. New Jersey: Englewood Cliffs, Prentice-Hall, 1987.

NASAR, S. A.; BOLDEA, I. **Linear Electric Motor: theory, design and applications**. New Jersey: Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1987.

RODRIGUES, A. Leão. **Design of Low Speed Linear induction Motor**. London: 1973, Master's Degree Project, London University, 1973.

SILVEIRA, M. A. **Estudo de um Atuador Planar**. 2003. 225 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

YAMAMURA, S. **Theory of Linear Induction Motors**. New York: John Wiley and Sons, 1972.

ZELENAY, R. **Travelling Wave Applied to Electric Railways**. French patent 318 634. Feb. 12, 1902.