

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

**FELIPE TREVISO**

**SIMULAÇÃO E CONTROLE DE POSIÇÃO  
EM ATUADOR PLANAR DE INDUÇÃO**

Porto Alegre

2013

**FELIPE TREVISO**

**SIMULAÇÃO E CONTROLE DE POSIÇÃO  
EM 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

**FELIPE TREVISO**

**SIMULAÇÃO E CONTROLE DE POSIÇÃO  
EM 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

**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 pelo apoio prestado na busca dos meus objetivos, demonstrando sempre entusiasmo e felicidade com as realizações.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço aos meus pais Ilso Treviso e Noeli Miotto Treviso pelo apoio e paciência durante toda minha vida acadêmica, e ao meu irmão Alex pelo companheirismo.

Aos meus amigos e colegas de faculdade, pelos inúmeros momentos passados juntos na busca pela formação em engenharia elétrica, discutindo dúvidas e compartilhando conhecimentos já aprendidos, sem os quais a caminhada teria sido muito mais complicada.

Ao Laboratório de Máquinas Elétricas, Acionamentos e Energia, pela oportunidade da realização deste trabalho.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul, pela oportunidade e apoio durante o curso.

À todos os professores, pela contribuição na minha formação.

“One’s man “magic” is another man engineering. Supernatural is a null word”.

Robert A. Heinlein

## RESUMO

O presente trabalho estuda o comportamento de um atuador planar de indução através do método dos elementos finitos, aferindo a densidade de fluxo magnético, as correntes induzidas e a força desenvolvida pelo dispositivo para diferentes excitações aplicadas através de seus enrolamentos. O atuador planar estudado é um dispositivo eletromagnético formado por dois enrolamentos trifásicos ortogonais entre si, ambos montados sobre núcleo de material compósito magneticamente macio de grão isolado que se movimenta em um plano formado por uma superfície com boa capacidade de condução de corrente paralela a uma chapa de aço. Foi também desenvolvido e implementado um método para o controle da posição do dispositivo sobre os limites da chapa sobre a qual ele se movimenta, utilizando um microcontrolador como unidade de controle, dois inversores de frequência para o acionamento dos enrolamentos do atuador planar e potenciômetros para a realimentação da posição do atuador ao microcontrolador.

**Palavras chave:** Atuador planar de indução, método dos elementos finitos, campo magnético, corrente induzida, controle de posição.

## **ABSTRACT**

The current work studies the behavior of an induction planar actuator using the finite element method. The work assess the magnetic flux density, the induced currents and the forces generated by the device for different voltage applied across its windings. The planar actuator that is being studied is an electromagnetic device composed by two three phases windings that are orthogonal to each other, both assembled on a core made of grain insulated soft magnetic composite material, that moves over a plane made of a good current conductor surface parallel to a steel plate. A method for controlling the position of the device between the limits of the plate where it can move was also developed, using a microcontroller as the control unit, two frequency inverters for the actuation on the windings of the planar actuator and potentiometers for the position feedback to the microcontroller..

**Keywords: Induction planar actuator, finite element method, magnetic field, induced current, position control.**

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Desenho do corte de uma máquina rotativa e sua expansão para uma máquina linear. .....	20
Figura 2: FMM de um enrolamento linear concentrado de passo pleno. ....	21
Figura 3: Curva de conjugado versus velocidade para uma máquina rotativa do tipo gaiola de esquilo.....	24
Figura 4: Comportamento do campo magnético ao longo do entreferro de uma máquina linear em movimento em função do escorregamento. ....	25
Figura 5: Atuador planar CC. ....	26
Figura 6: Atuador planar de indução. ....	27
Figura 7: Desenho esquemático da estrutura de sustentação do primário. ....	28
Figura 8: Desenho esquemático de um dente do API. Vista inferior (a), vista lateral (b), vista superior (c) e desenho 3D (d). ....	29
Figura 9: Base de fixação dos dentes: dimensões (a) e desenho esquemático (b).....	29
Figura 10: Desenho esquemático da armadura do carro primário do atuador planar de indução, com bobinas.....	30
Figura 11: Desenho esquemático de uma bobina do atuador planar de indução.....	30
Figura 12: Desenho com nome e posição das bobinas da camada inferior. ....	31
Figura 13: Desenho com nome e posição das bobinas da camada superior. ....	32
Figura 14: Esquemático das ligações das bobinas para formação dos enrolamentos Y (a) e X (b). ....	33
Figura 15: Desenho esquemático do secundário do atuador planar de indução.....	34
Figura 16: Curva de magnetização do aço AISI 1020 recozido. ....	35
Figura 17: Curva de magnetização do compósito 1P Somaloy 500. ....	36
Figura 18: Curva de magnetização do compósito 1P Somaloy 500. ....	38
Figura 19: Malha inicial para o modelo do API. ....	39
Figura 20: Modelo 3D do atuador planar de indução em perspectiva. ....	41
Figura 21: Vista lateral do modelo do atuador planar de indução.....	41
Figura 22: Distribuição de densidade de fluxo magnético no modelo do API . ....	45
Figura 23: Densidade de fluxo magnético em corte paralelo à seção transversal dos dentes do API, a 8 mm do entreferro. ....	45

Figura 24: Sequência de figuras com a densidade de campo magnético no entreferro em um período completo de excitação nos dois enrolamentos. Defasagem de 0° (a), 60° (b), 120° (c), 180° (d), 240° (e) e 300° (f). .....	46
Figura 25: Curva da tensão trifásica usada na alimentação dos enrolamentos das figuras 22, 23, 24, 26, 27, 28 e 29. ....	46
Figura 26: : Densidade de fluxo magnético ao longo do eixo x do entreferro, com ambos os enrolamentos excitados a 60 V e 60 Hz. ....	47
Figura 27: Figura em perspectiva com o módulo da densidade de corrente elétrica induzida no API. ....	48
Figura 28: Módulo da densidade de corrente elétrica induzida no secundário do API. ....	49
Figura 29: Corte junto à base dos dentes mostrando a penetração da corrente elétrica induzida no secundário do API. ....	49
Figura 30: Curva com a força desenvolvida na direção X, com dados experimentais e numéricos, ambos enrolamentos excitados. ....	51
Figura 31: Curva com a força desenvolvida na direção Y, com dados experimentais e numéricos, ambos enrolamentos excitados. ....	51
Figura 32: Curva com a força desenvolvida na direção X, com dados experimentais e numéricos, enrolamento X excitado. ....	53
Figura 33: Curva com a força desenvolvida na direção Y, com dados experimentais e numéricos, enrolamento Y excitado. ....	53
Figura 34: Curva com a força desenvolvida na direção X, com dados experimentais e numéricos, enrolamento X excitado e tensão mais elevada. ....	55
Figura 35: Curva com a força desenvolvida na direção Y, com dados experimentais e numéricos, enrolamento Y excitado e tensão mais elevada. ....	55
Figura 36: Forças desenvolvidas pelo API com ambos os enrolamentos excitados. ....	56
Figura 37: Força normal desenvolvida pelo API com apenas um enrolamento excitado. ....	57
Figura 38: Topologia do sistema de controle de posição. ....	58
Figura 39: Gráfico de senóide construída a partir de modulação PWM. ....	60
Figura 40: Curvas mostrando o funcionamento do acionamento pelos inversores de frequência. ....	62
Figura 41: Desenho esquemático do microcontrolador utilizado, com indicação das ligações realizadas. ....	63
Figura 42: Desenho esquemático de circuitos de suporte à CPU. ....	63
Figura 43: Desenho esquemático dos sensores de posição do API. ....	64

Figura 44: Desenho esquemático das entradas para indicação da posição desejada do API. ..64	64
Figura 45: Desenho esquemático da interface para controle dos inversores de frequência. ....65	65
Figura 46: Diagrama esquemático do circuito de interface entre a CPU e os inversores. ....66	66
Figura 47: Desenho esquemático do circuito de alimentação do controle do API. ....66	66
Figura 48: Layout de placa de circuito impresso para o controle do API. ....67	67
Figura 49: Disposição dos componentes na placa criada. ....68	68
Figura 50: Trajetória desenvolvida pelo API deslocamentos no sentido positivo. ....69	69
Figura 51: Trajetória desenvolvida pelo API para deslocamentos no sentido negativo. ....69	69
Figura 52: Trajetória desenvolvida pelo API para deslocamentos em distâncias pequenas. ...70	70
Figura 53: Fluxograma com o funcionamento do software de controle de posição do API. ...71	71
Figura 54: Tabela verdade para o sinal "Run". ....73	73
Figura 55: Foto da topologia antiga do API. ....74	74

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Propriedade do aço maciço recozido AISI 1020. ....	35
Tabela 2: Propriedade do material 1P Somaloy 500. ....	36
Tabela 3: Lista de níveis da extrusão do modelo do API. ....	40
Tabela 4: Força de propulsão planar para o caso com ambos os enrolamentos excitados. ....	50
Tabela 5: Força de propulsão planar para o caso com apenas o enrolamento X excitado. ....	52
Tabela 6: Força de propulsão planar para o caso com apenas o enrolamento Y excitado. ....	52
Tabela 7: Força de propulsão planar para o caso com apenas o enrolamento X excitado, com tensões mais elevadas. ....	544
Tabela 8: Força de propulsão planar para o caso com apenas o enrolamento Y excitado, com tensões mais elevadas. ....	544
Tabela 9: Força normal para o caso com ambos os enrolamentos excitados. ....	56
Tabela 10: Força normal para o caso com apenas um dos enrolamentos excitado (X ou Y). ....	577
Tabela 11: Força normal para o caso com apenas um dos enrolamentos excitado (X ou Y), com tensões mais elevadas. ....	577
Tabela 12: Limites do inversor SEW Movitrac LTE-B. ....	59
Tabela 13: Procedimentos para o reconhecimento de parâmetros de operação do API. ....	72
Tabela 14: Comparação entre a força planar das duas topologias do API, apenas enrolamento X excitado. ....	75
Tabela 15: Comparação entre a força planar das duas topologias do API, apenas enrolamento Y excitado. ....	75
Tabela 16: Comparação entre a força planar das duas topologias do API, ambos enrolamentos excitados. ....	76
Tabela 17: Comparação entre força normal e força planar do API. ....	76

## LISTA DE ABREVIADTURAS E SIGLAS

3D	Tridimensional
A/D	Analógico-Digital
API	Atuador Planar de Indução
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CPU	Unidade Central de Processamento
FMM	Força Magneto-Motriz
IF	Inversor de Frequência
LMEAE	Laboratório de Máquinas Elétricas, Acionamentos e Energia
MEF	Método dos Elementos Finitos
MLI	Motor Linear de Indução
PWM	Modulação por Largura de Pulso
rpm	Rotações por minuto
SMC	Compósito Magneticamente Macio
SP	Sensor de Posicionamento
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
$\vec{B}$	Densidade de fluxo magnético
$\vec{E}$	Intensidade de campo elétrico
$\vec{F}$	Força
$\vec{H}$	Intensidade de campo magnético
$\vec{J}$	Densidade de corrente elétrica
$T$	Tensor de stress de Maxwell
$f$	Frequência
$g$	Espessura do entreferro
$i$	Corrente elétrica
$n$	Velocidade de rotação
$N$	Número de espiras de uma bobina
$P$	Número de polos
$s$	Escorregamento
$v$	Velocidade

$\beta$	Comprimento de onda
$\mathcal{F}$	Força magneto-motriz
$\rho$	Resistividade elétrica
$\sigma$	Condutividade elétrica
$\tau$	Passo polar linear
$\mu$	Permeabilidade magnética
$\mu_0$	Permeabilidade magnética do vácuo ( $4\pi \cdot 10^{-7} T \cdot m/A$ )
$\Psi$	Potencial escalar magnético
$\omega$	Velocidade angular

## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
<b>1.1</b>	<b>Objetivos .....</b>	<b>17</b>
<b>2.</b>	<b>O ATUADOR PLANAR DE INDUÇÃO .....</b>	<b>19</b>
<b>2.1</b>	<b>Máquinas de Indução Rotativas .....</b>	<b>19</b>
<b>2.2</b>	<b>Atuadores Eletromecânicos Lineares.....</b>	<b>20</b>
<b>2.3</b>	<b>Atuadores Lineares de Indução .....</b>	<b>22</b>
<b>2.4</b>	<b>Atuadores Elétricos Planares .....</b>	<b>26</b>
<b>2.5</b>	<b>O Atuador Planar de Indução.....</b>	<b>27</b>
<b>2.5.1</b>	<i>Estrutura de Sustentação do Primário.....</i>	<i>27</i>
<b>2.5.2</b>	<i>Estrutura do Primário.....</i>	<i>28</i>
<b>2.5.3</b>	<i>Estrutura do Secundário.....</i>	<i>33</i>
<b>2.5.4</b>	<i>Características dos Materiais Empregados.....</i>	<i>34</i>
<b>2.5.4.1</b>	Aço AISI 1020 .....	34
<b>2.5.4.2</b>	Compósito 1P Somaloy 500.....	35
<b>2.5.4.3</b>	Alumínio .....	36
<b>3.</b>	<b>SIMULAÇÕES NUMÉRICAS.....</b>	<b>37</b>
<b>3.1</b>	<b>O Método dos Elementos Finitos .....</b>	<b>37</b>
<b>3.2</b>	<b>O Pacote Computacional Effe .....</b>	<b>37</b>
<b>3.3</b>	<b>Pré-Processamento .....</b>	<b>37</b>
<b>3.4</b>	<b>Processamento .....</b>	<b>42</b>
<b>3.5</b>	<b>Pós-Processamento .....</b>	<b>43</b>
<b>3.6</b>	<b>Resultados .....</b>	<b>44</b>
<b>3.6.1</b>	<i>Densidade de Fluxo Magnético .....</i>	<i>44</i>
<b>3.6.2</b>	<i>Densidade de Corrente Elétrica .....</i>	<i>48</i>
<b>3.6.3</b>	<i>Força de Propulsão Planar .....</i>	<i>50</i>
<b>3.6.4</b>	<i>Força Normal .....</i>	<i>55</i>
<b>4.</b>	<b>O SISTEMA DE POSICIONAMENTO DO ATUADOR PLANAR DE INDUÇÃO .....</b>	<b>58</b>
<b>4.1</b>	<b>Topologia Proposta para o Sistema .....</b>	<b>58</b>
<b>4.2</b>	<b>Hardware .....</b>	<b>59</b>

4.2.1	<i>Blocos “Inversor X” e “Inversor Y”</i> .....	59
4.2.2	<i>CPU</i> .....	61
4.2.3	<i>Blocos “Leitura Posição X” e “Leitura Posição Y”</i> .....	63
4.2.4	<i>Blocos “Posição Desejada X” e “Posição Desejada Y”</i> .....	64
4.2.5	<i>Blocos “Controle Inversor X” e “Controle Inversor Y”</i> .....	65
4.2.6	<i>Alimentação do Circuito</i> .....	66
4.2.7	<i>Hardware do Sistema de Controle Completo</i> .....	67
4.3	<i>Software</i> .....	68
5.	<b>ANÁLISES DOS DADOS OBTIDOS E COMPARAÇÕES</b> .....	74
6.	<b>CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	77
 <b>APÊNDICE A – CÓDIGO EM C PARA CONTROLE DE POSIÇÃO DO ATUADOR PLANAR DE INDUÇÃO</b> .....		79
 <b>REFERÊNCIAS</b> .....		84

## 1. INTRODUÇÃO

Com a popularização da eletrônica de potência e o surgimento de inversores de frequência a um custo razoável, as máquinas de indução vêm se tornando o tipo de máquinas mais usado graças a sua eficiência, simplicidade e como podem ser controladas. Dentre essas máquinas, as mais populares sem dúvida são os motores de indução rotativos, que, por serem baratos e robustos, são amplamente utilizados na indústria, tanto para aplicações que requerem movimento rotativo quanto para aplicações que requerem deslocamento linear e planar, onde sua rotação é convertida em deslocamento linear através de polias, correias e engrenagens. Uma alternativa a esse arranjo é o uso de atuadores lineares, para deslocamentos lineares, e atuadores planares, também chamados de atuadores XY ou atuadores de superfície para o desenvolvimento de movimento sobre um plano.

Este projeto, portanto, trata da simulação através do método dos elementos finitos (MEF) de um atuador planar de indução (API) construído no Laboratório de Máquinas Elétricas, Acionamentos e Energia (LMEAE) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), e do projeto e desenvolvimento de um sistema de posicionamento para o dispositivo.

O trabalho desenvolvido consiste na modelagem do atuador em um *software* específico para simulações de modelos eletromagnéticos, na ligação de seus enrolamentos nesse programa e na aplicação de uma excitação externa nos enrolamentos. Os resultados poderão então ser comparados com os resultados obtidos experimentalmente por DIEDRICH (2013). A partir disso podem ser feitas análises e novas simulações para resultados sob outras condições não observadas experimentalmente, seja por dificuldades na montagem dos ensaios ou por qualquer outro motivo.

Logo após será projetado um sistema que adquira os dados dos sensores de posicionamento (SP) do API, e envie sinais de comando a dois inversores de frequência (IF), cada um deles comandando o movimento do API em um dos eixos da superfície, para que o carro primário do API seja posicionado em uma posição desejada que haverá sido informada anteriormente ao sistema, demonstrando a viabilidade do controle para aplicações práticas do dispositivo estudado.

Para uma melhor apresentação do trabalho realizado no desenvolvimento de análises, testes, resultados e conclusões, o presente trabalho está dividido em seis capítulos.

No primeiro capítulo são descritos brevemente a introdução e os objetivos do trabalho são especificados de uma maneira clara e objetiva.

No segundo capítulo é feita brevemente uma revisão bibliográfica sobre máquinas de indução e mais especificamente os estudos e aplicações de máquinas lineares de indução e atuadores planares, com foco no atuador planar de indução.

No terceiro capítulo é apresentado brevemente o método utilizado para as simulações numéricas realizadas, com a descrição do *software* utilizado, é feita a demonstração do modelo simulado e por fim são apresentados os resultados obtidos com as simulações.

No quarto capítulo é proposta uma topologia para o controle de posição do API, são desenvolvidos os cálculos necessários e o projeto propriamente dito para a confecção do protótipo de controle.

No quinto capítulo são analisados mais profundamente os dados obtidos nas simulações, e é feita uma comparação com os dados obtidos experimentalmente por DIEDRICH (2013) e por outras simulações semelhantes com outra configuração de carro primário mostradas por BAGGIO FILHO (2012). Além disso, é analisado o desempenho apresentado experimentalmente nos testes descritos no capítulo anterior.

No último capítulo, o sexto, são descritas as conclusões desse trabalho, bem como considerações finais que sejam convenientes.

## **1.1 Objetivos**

Os objetivos desse trabalho já foram apresentados de uma maneira geral na introdução do trabalho, porém agora serão definidos mais especificamente, tanto para as simulações numéricas quanto para o sistema de controle de posição do atuador.

A análise através de simulações numéricas do atuador planar de indução será feita para verificar fenômenos elétricos e magnéticos envolvidos na operação do dispositivo de forma computacional. O modelo do carro primário será baseado nos dados informados por DIEDRICH (2013) e por verificações feitas junto ao protótipo do atuador planar de indução. O secundário será construído com bordas suficientemente grandes para que não exerça influência significativa nas simulações. As simulações terão como objetivo a obtenção das distribuições de densidade de fluxo magnético, da força eletromotriz induzida, da corrente elétrica induzida nos materiais do secundário e das forças normal e de propulsão planar do dispositivo.

O presente trabalho também irá desenvolver um sistema de posicionamento para o atuador planar de indução. Os objetivos desse sistema é o posicionamento preciso do carro primário sobre o secundário de alumínio, através da leitura de sensores de posição para o conhecimento da posição atual do carro, da leitura de sinais elétricos que indiquem a posição desejada para o carro e da atuação nos enrolamentos do primário à partir da posição desejada e do comportamento observado pelos sensores. Para esta parte do trabalho, serão utilizados como atuadores dois inversores de frequência comerciais já instalados junto ao atuador planar de indução.

## **2. O ATUADOR PLANAR DE INDUÇÃO**

Conforme BAGGIO FILHO (2012, p.53), “atuadores planares são classificados como máquinas elétricas que desenvolvem movimentação sobre um plano, com dois graus de liberdade”. A produção do movimento sobre o plano pode ser obtida através de muitas configurações eletromecânicas, como a utilização de dois motores rotativos e um arranjo mecânico que converta o movimento rotativo em movimento planar, como também por atuadores planares de corrente contínua ou atuadores planares de indução, entre outros. Este trabalho é baseado em um atuador planar de indução, ou seja, um atuador planar em que as correntes do secundário são induzidas pelas correntes do primário, mesmo princípio visto nas máquinas de indução rotativas.

Além disso, o presente atuador planar foi construído de maneira que existam dois atuadores lineares de indução acionados de maneira independente no mesmo núcleo ferromagnético, que constitui o carro do API e o primário do atuador planar, que geram deslocamentos ortogonais entre si, criando o movimento planar característico dos atuadores planares.

### **2.1 Máquinas de Indução Rotativas**

A máquina elétrica mais frequentemente utilizada na prática, principalmente na indústria, é a máquina de indução, sobretudo quando operando em regime de motor. Esse emprego das máquinas de indução se deve principalmente pela sua robustez e pelo seu baixo custo, além de sua operação se dar com corrente alternada (CA), a mesma fornecida pela concessionária de energia.

O funcionamento das máquinas de indução rotativas é definido por FITZGERALD (2006, p. 184) no parágrafo abaixo:

“[...] o enrolamento do estator de uma máquina de indução é excitado com correntes alternadas. Contrastando com uma máquina síncrona, onde o enrolamento de campo do rotor é excitado com corrente contínua (CC), corrente alternadas fluem nos enrolamentos do rotor de uma máquina de indução. Nas máquinas de indução, as corrente alternadas são aplicadas diretamente aos enrolamentos do estator e, então, correntes no rotor são produzidas por indução, isto é, por ação de transformador.”

CHAPMAN (1991) explica detalhadamente os conceitos envolvidos na operação desse tipo de motor. Alguns desses conceitos estão mostrados nas equações (1) e (2), onde  $n_s$  é a velocidade síncrona do campo gerado pelos enrolamentos do estator em rotações por minuto (rpm),  $f$  é a frequência da tensão aplicada nesses enrolamentos em hertz (Hz),  $P$  é o número de polos da máquina,  $n$  é a velocidade mecânica do rotor e  $s$  é o escorregamento percentual, que representa a diferença entre a velocidade síncrona da máquina e a velocidade do rotor.

$$n_s = \frac{120f}{P} \quad (1)$$

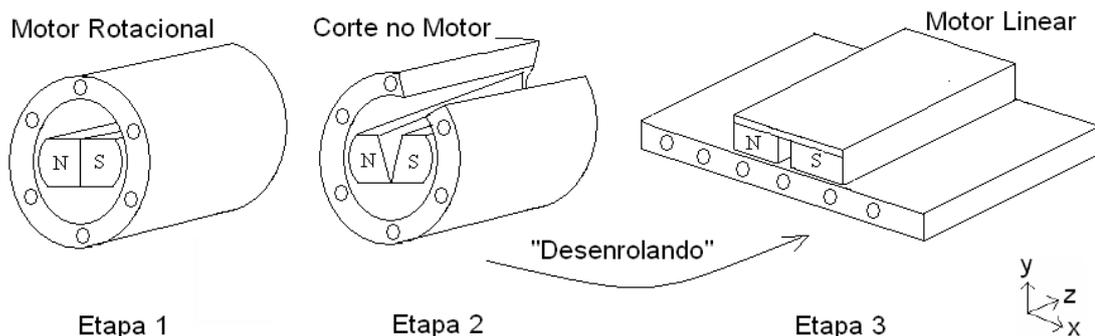
$$s = 100 \frac{n_s - n}{n_s} \quad (2)$$

Todos estes elementos são reencontrados de maneira semelhante ao tratar das máquinas de indução lineares.

## 2.2 Atuadores Eletromecânicos Lineares

Segundo FITZGERALD (2006, p. 223), cada tipo de máquina geralmente pode ser produzido em versões lineares, além das versões rotativas que normalmente são encontradas. Essas máquinas são usadas principalmente em aplicações relacionadas aos transportes. A figura 1 mostra um desenho que relaciona um motor rotativo com um motor linear.

**Figura 1: Desenho do corte de uma máquina rotativa e sua expansão para uma máquina linear.**

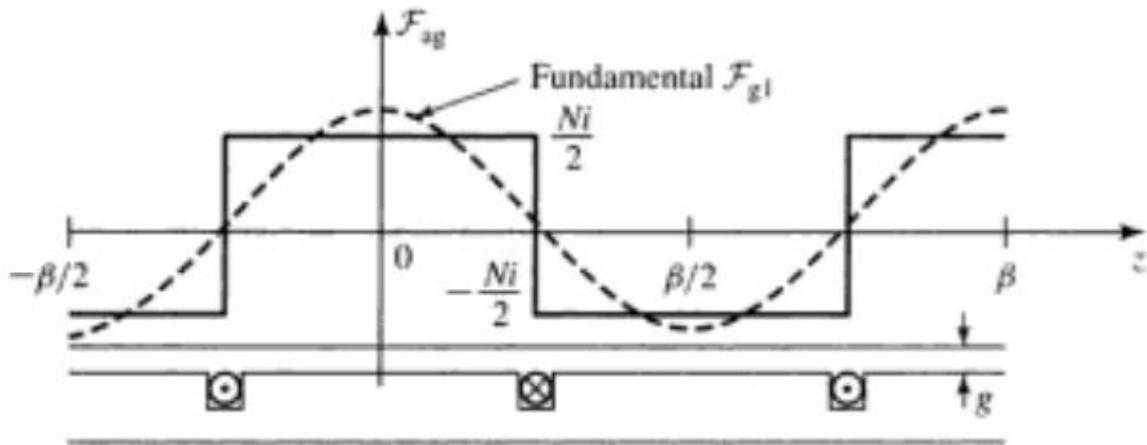


Fonte: NASAR, 1987.

Na análise das máquinas lineares, dimensões e distâncias lineares substituem os valores angulares de máquinas rotativas, e forças substituem os conjugados. Porém a geração de força magneto-motriz (FMM) obedece ao mesmo princípio. Na figura 2, pode-se observar a FMM gerada por um enrolamento linear concentrado de passo pleno. O comprimento de

onda  $\tau$  mostrado é a distância entre o início de cada bobina e representa o comprimento da onda da FMM gerado no núcleo da máquina.  $N$  é o número de espiras no enrolamento,  $i$  é a corrente que circula no enrolamento e  $g$  é o entreferro entre o primário e o secundário da máquina.

**Figura 2: FMM de um enrolamento linear concentrado de passo pleno.**



Fonte: FITZGERALD, 2006.

Nesse caso, a FMM no entreferro é uma onda quadrada de amplitude  $N \cdot i/2$ , e a intensidade de campo magnético aproximada no entreferro pode ser obtida pela equação (3). Através do cálculo da série de Fourier desse sinal, pode-se determinar a componente fundamental da FMM, mostrada na equação (4).

$$H = \frac{\mathcal{F}}{g} = \frac{Ni}{2g} \quad (3)$$

$$\mathcal{F}_1 = \frac{4}{\pi} \left( \frac{Ni}{2} \right) \cos\left(\frac{2\pi z}{\tau}\right) \quad (4)$$

Um enrolamento trifásico pode ser construído a partir de três enrolamentos, cada fase deslocada uma distância  $\beta/3$  e excitadas por correntes trifásicas equilibradas de frequência  $\omega_e$ . Esse enrolamento irá produzir uma FMM que se desloca na direção  $z$  dada pela equação (5), com  $\mathcal{F}_{max}$  indicado na equação (6), onde  $I_m$  é a corrente de pico que passa pelos enrolamentos,  $N_{fase}$  é o número de espiras por fase do enrolamento,  $k_{enr}$  é o fator de enrolamento, e  $p$  é o número de períodos de comprimento  $\beta$  ao longo de  $z$ , que representa o número de pares de polos. A velocidade da onda é obtida da equação (5) e é mostrada na equação (7). Essa velocidade será um fator essencial ao determinar a velocidade de

movimentação da máquina, e depende apenas da frequência da corrente aplicada aos enrolamentos e de uma característica de construção da máquina.

$$\mathcal{F}(z, t) = \frac{3}{2} \mathcal{F}_{max} \cos\left(\frac{2\pi z}{\beta} - \omega_e t\right) \quad (5)$$

$$\mathcal{F}_{max} = \frac{4}{\pi} \left( \frac{k_{enr} N_{fase}}{2p} \right) I_m \quad (6)$$

$$v = \frac{\omega_e \beta}{2\pi} = f_e \beta \quad (7)$$

De acordo com BAGGIO FILHO (2012, p. 38), os motores lineares de indução (MLI) possuem um efeito de início e fim de curso que influencia negativamente seu desempenho, sendo essa a diferença mais importante entre os motores lineares e as máquinas rotativas.

### 2.3 Atuadores Lineares de Indução

Máquinas lineares de indução, ou como também são chamadas, atuadores lineares de indução, possuem seu funcionamento baseado no mesmo princípio dos motores de indução rotativos. Sua estrutura mais comum constitui-se de uma parte estacionária de material ferromagnético, onde são inseridas bobinas eletricamente isoladas e que constitui o primário do atuador, e uma parte móvel de material com boa condutividade elétrica onde são induzidas as correntes, chamada de secundário, que é geralmente uma placa metálica plana. O primário é separado do secundário por um entreferro  $g$ .

As bobinas do primário são arranjadas de modo a formar enrolamentos (geralmente trifásicos), que quando excitados por tensões trifásicas alternadas geram um campo magnético viajante ao longo de sua estrutura. De acordo com a lei de Faraday, mostrada na equação (8), um campo elétrico é produzido no secundário, e por ser constituído de um material condutor, correntes elétricas são geradas de uma forma diretamente proporcional à variação do fluxo magnético.

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (8)$$

$$\vec{F}_F = \int_{V_F} \vec{J}_F \times \vec{B}_{g_F} dV_F \quad (9)$$

A equação (9) é a expressão da força de Laplace, força planar que produz o deslocamento do atuador no mesmo sentido de deslocamento do campo magnético transladante. Nessa equação,  $V_F$  corresponde ao volume de condutor no secundário imerso no campo magnético,  $B_{g_F}$  é a densidade de campo magnético gerada instantaneamente no entreferro,  $J_F$  é a densidade de corrente induzida no condutor do secundário e  $F_F$  é a força gerada sobre esse condutor.

O secundário das máquinas lineares de indução geralmente é mais largo do que o primário, resultando numa melhor distribuição da corrente elétrica induzida. Além do material condutor, o secundário pode também apresentar material ferromagnético, de modo a estabelecer um circuito magnético de menor relutância para o fluxo magnético. No entanto, segundo BAGGIO FILHO (2012, p. 45), a força normal produzida pelo atuador aumenta consideravelmente com a adição do material ferromagnético.

Convertendo-se os valores de frequência angular síncrona  $\omega_s$  e passo polar angular  $\tau_\theta$  em grandezas lineares  $v_s$  e  $\tau$  através de um raio arbitrário  $r$ , como mostrado nas equações (1), (10), (11) e (12), obtém-se a expressão da velocidade síncrona linear, mostrada na equação (13). Cabe notar que diferentemente do que ocorre nas máquinas rotativas, a velocidade de uma máquina linear não depende do número de polos, mas apenas da distância entre os polos e da frequência da excitação.

$$\omega = 2\pi f \quad (10)$$

$$\omega_s = \left(\frac{2\pi}{60}\right) n_s = 2\pi \cdot \frac{2f}{P} = \frac{v_s}{r} \quad (11)$$

$$\tau = \tau_\theta r = \frac{2\pi}{P} r \quad (12)$$

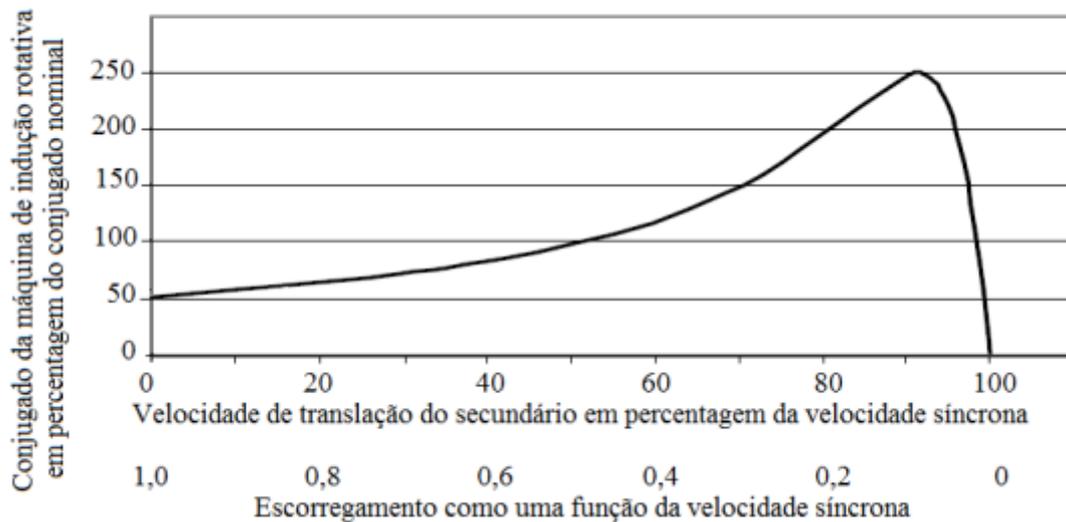
$$v_s = 2\tau f \quad (13)$$

O escorregamento percentual da máquina, que representa a diferença entre a velocidade de translação do campo magnético e a velocidade de translação da máquina, é calculado pela equação (14), análoga à equação (2) para as máquinas rotativas.

$$s = 100 \frac{v_s - v}{v_s} \quad (14)$$

A força desenvolvida pela máquina sofre grandes variações com mudanças no escorregamento. A figura 3 mostra a relação entre conjugado e escorregamento para máquinas rotativas do tipo gaiola de esquilo.

**Figura 3: Curva de conjugado versus velocidade para uma máquina rotativa do tipo gaiola de esquilo.**



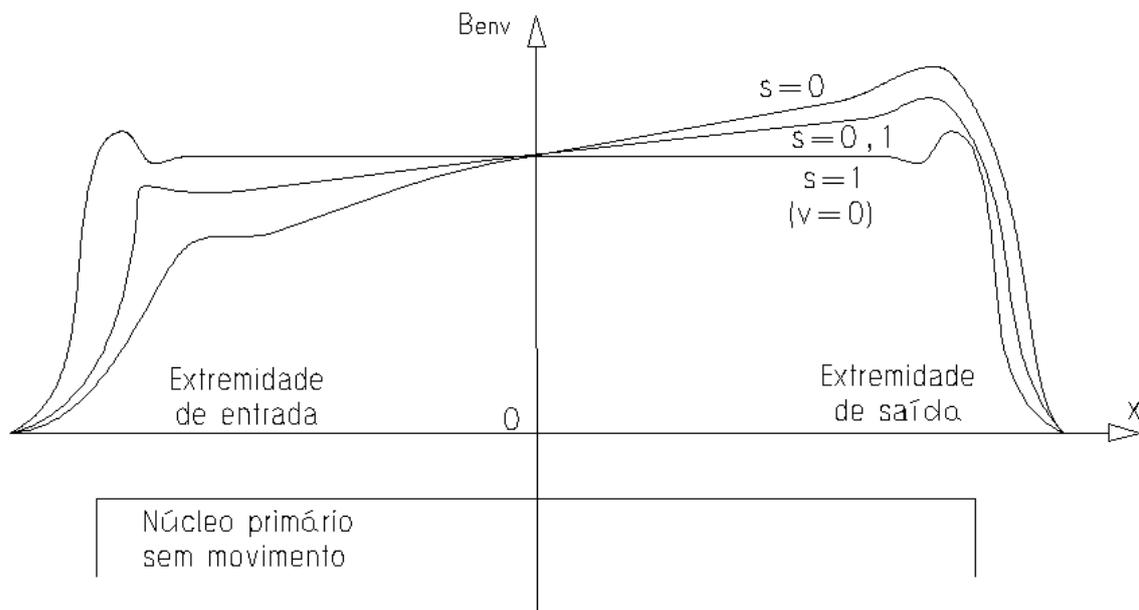
Fonte: FITZGERALD, 2006.

Os efeitos de extremidade nos atuadores lineares de indução, já comentado como sendo as principais diferenças entre as máquinas lineares de indução e seus correspondentes rotativos, podem ser divididos em efeitos estáticos e dinâmicos. BAGGIO FILHO (2012, p. 48) explica estes efeitos:

“O efeito estático de fim de curso ocorre devido à característica de circuito magnético aberto das máquinas lineares de indução, isto é, a uma inevitável assimetria de posicionamento das fases com o respectivo núcleo ferromagnético. Consequentemente, a indutância mútua e a autoindutância das fases primárias não são simétricas. Entretanto, nesse caso as diferenças são irrelevantes quando o circuito apresenta um número grande de polos. O efeito de fim de curso dinâmico é causado pela relativa movimentação que o secundário causa em relação ao primário, (...) provocando uma distorção no fluxo magnético, o que resulta, nesses termos, em uma assimetria no comportamento deste.”

O efeito longitudinal de extremidade no envelope do campo magnético está mostrado na figura 4. Na curva onde  $s = 1$ , ou seja, com o motor parado, pode ser vista a distorção existente no campo magnético nas extremidades dos atuadores causada pelos efeitos estáticos. E com atuadores em movimento na direção  $x$ , onde  $s \neq 1$ , pode ser vista uma diferença significativa entre a densidade de fluxo entre as extremidades da máquina.

**Figura 4: Comportamento do campo magnético ao longo do entreferro de uma máquina linear em movimento em função do escorregamento.**



Fonte: Adaptado de GIERAS, 1994.

De acordo com GIERAS (1994, p. 64), as principais consequências do efeito longitudinal de extremidades são três: densidade de fluxo magnético no entreferro e distribuição de corrente no secundário não-uniformes; correntes de fase não-balanceadas; e a existência de forças de frenagem parasitas.

Entretanto, os efeitos de extremidade não afetam a performance de MLIs de baixa velocidade. A classificação de um MLI entre baixa e alta velocidade é feita pela obtenção do coeficiente  $K_{velocidade}$  através da equação (15), segundo YAMAMURA (1972), onde  $\mu_0$  é a permeabilidade magnética do vácuo,  $v$  é a velocidade da parte móvel,  $\omega$  é a frequência da excitação dos enrolamentos,  $\rho_s$  é a resistividade do secundário e  $g$  é a espessura do entreferro. Caso o coeficiente seja menor do que 1, o motor é dito de baixa velocidade, e caso o valor seja muito maior do que 1 o motor é dito de alta velocidade.

$$K_{\text{velocidade}} = \frac{\mu_0 v^2}{4\omega\rho_s g} \quad (15)$$

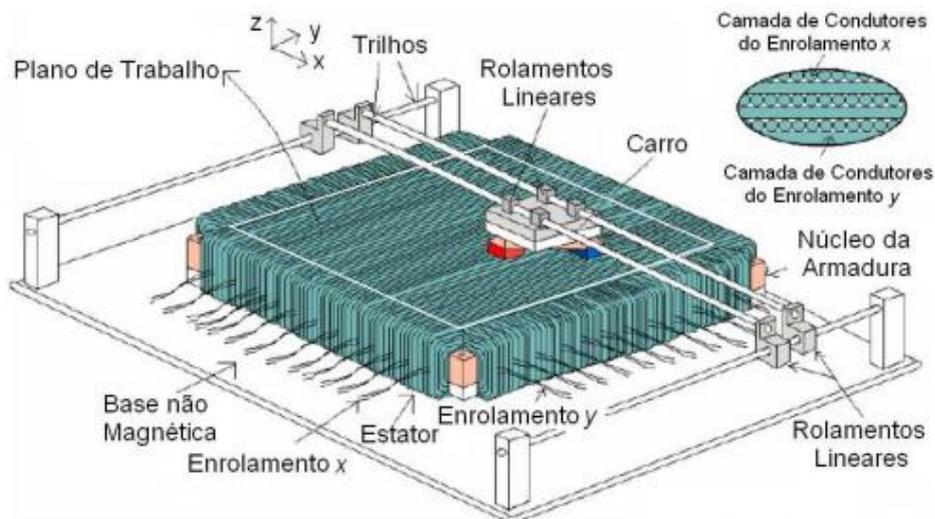
## 2.4 Atuadores Elétricos Planares

Atuadores elétricos planares são dispositivos que desenvolvem movimento sobre um plano a partir da aplicação de uma corrente ou tensão elétrica. Podem ser construídos a partir da combinação de atuadores elétricos lineares. Possuem grande utilidade em sistemas de posicionamento sobre estruturas planas, por serem dispositivos que podem apresentar grande velocidade e precisão, e por serem mais eficientes do que arranjos de motores rotativos com essa finalidade, que apresentam maiores perdas mecânicas.

A parte mecânica de atuadores elétricos planares geralmente é composta por dois eixos paralelos fixos em uma base, onde movimentam-se outros dois eixos paralelos entre si, e ortogonais aos dois primeiros eixos citados. Nesses dois últimos eixos se desloca a parte móvel do dispositivo através de rolamentos lineares.

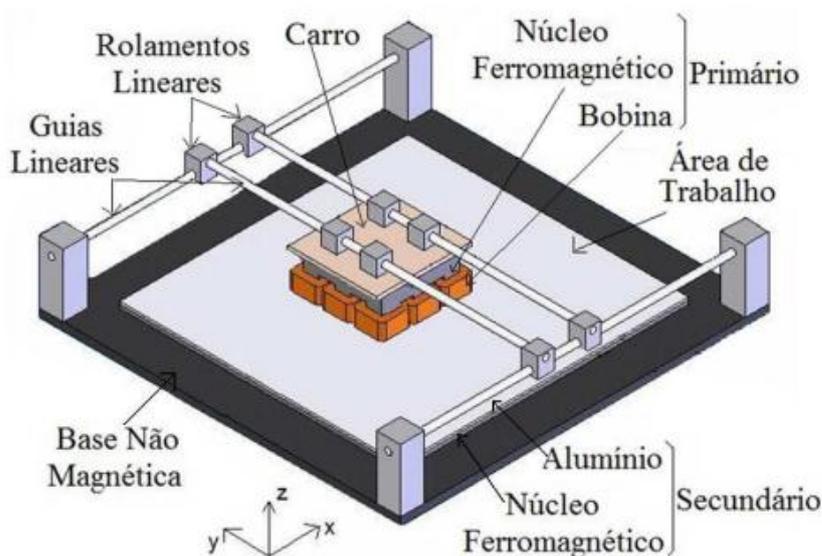
Os atuadores planares podem utilizar vários arranjos para a produção de movimento. Na figura 5 está mostrado um atuador planar de corrente contínua com enrolamentos na parte fixa, e ímãs permanentes no carro. Na figura 6 está mostrado um atuador planar de indução, com os enrolamentos situados na parte móvel, e a parte fixa composta por uma base de alumínio.

**Figura 5: Atuador planar CC.**



Fonte: SILVEIRA, 2003.

**Figura 6: Atuador planar de indução.**



Fonte: BAGGIO FILHO, 2012.

No caso do atuador planar de indução, existe a vantagem de que caso o plano onde o movimento é desenvolvido seja uma superfície metálica, essa superfície funciona como o próprio secundário do atuador. Isso o torna um dispositivo com grandes possibilidades de uso em aplicações como, por exemplo, a inspeção de chapas metálicas.

## 2.5 O Atuador Planar de Indução

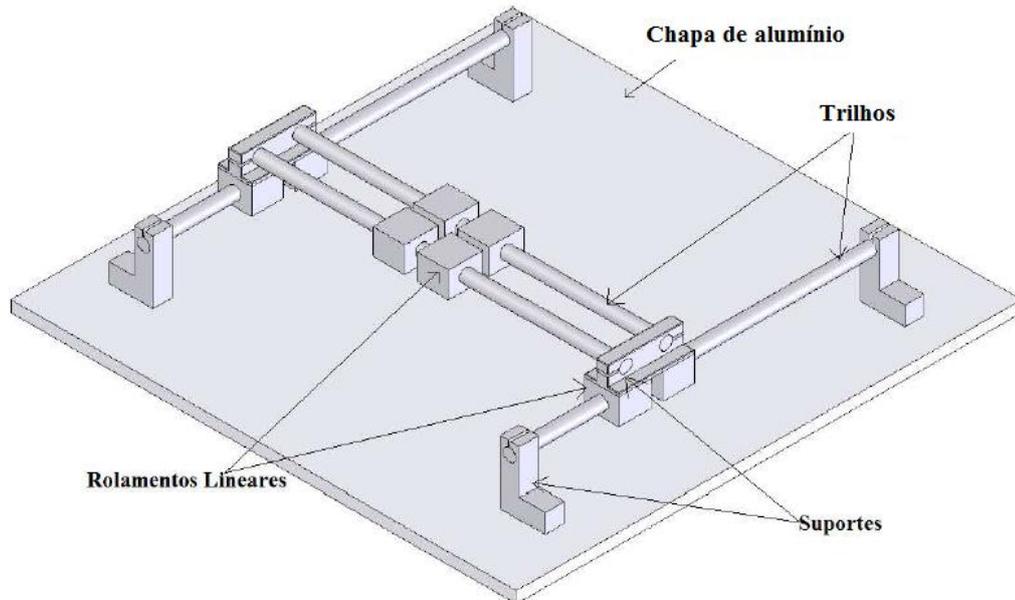
O atuador planar proposto por DIEDRICH (2013) é o objeto de estudo deste trabalho. Esse atuador apresenta os enrolamentos do primário em sua parte móvel, e se desloca sobre uma superfície de alumínio, com um núcleo ferromagnético sob essa superfície. O primário possui 36 dentes arranjados simetricamente, e cada dente possui duas bobinas eletricamente independentes. A seguir encontra-se detalhada cada parte que compõe este atuador.

### 2.5.1 Estrutura de Sustentação do Primário

A estrutura de sustentação do primário é composta por oito rolamentos lineares que se deslocam através de quatro trilhos cilíndricos. O primário é fixado em quatro dos oito rolamentos, que se deslocam em dois trilhos. Cada um destes dois trilhos possui um

rolamento que se desliza em um dos outros dois trilhos em cada extremidade, como mostra a figura 7. Esta estrutura é fixada em uma base e erguida até a altura necessária para a inserção do primário do atuador com o uso de quatro suportes.

**Figura 7: Desenho esquemático da estrutura de sustentação do primário.**

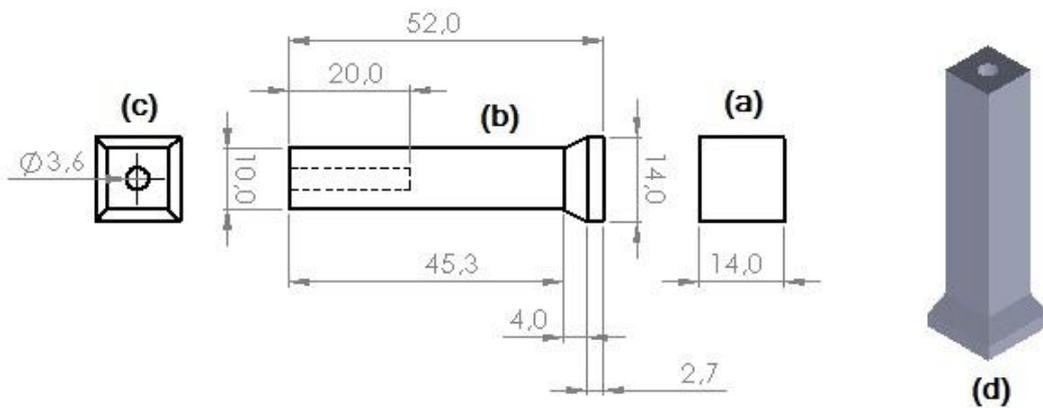


Fonte: BAGGIO FILHO, 2012.

### **2.5.2 Estrutura do Primário**

O primário do atuador planar de indução é formado por 36 dentes de material ferromagnético, compósito magneticamente macio (SMC), do material 1P Somaloy 500. O formato e dimensão de cada dente estão mostrados na figura 8. Nota-se a existência de um orifício na parte superior do dente que será utilizado para fixação do mesmo, e também um alargamento na extremidade inferior do dente no formato de uma sapata. Este formato orienta as linhas de fluxo magnético na região entre o primário e o secundário, e permite amenizar o fluxo disperso no entreferro.

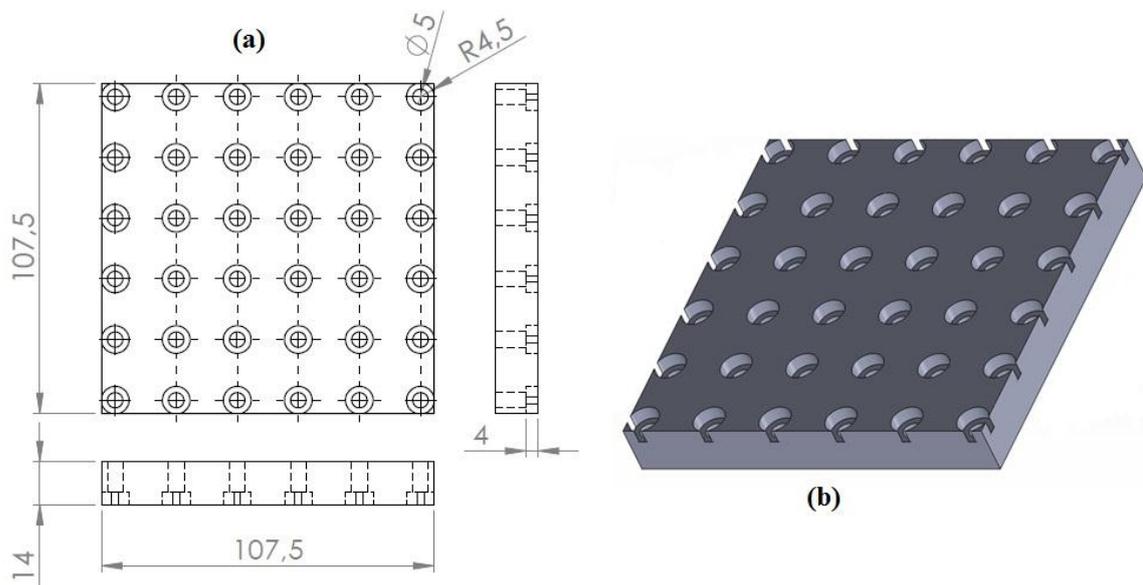
**Figura 8: Desenho esquemático de um dente do API. Vista inferior (a), vista lateral (b), vista superior (c) e desenho 3D (d).**



Fonte: DIEDRICH, 2013.

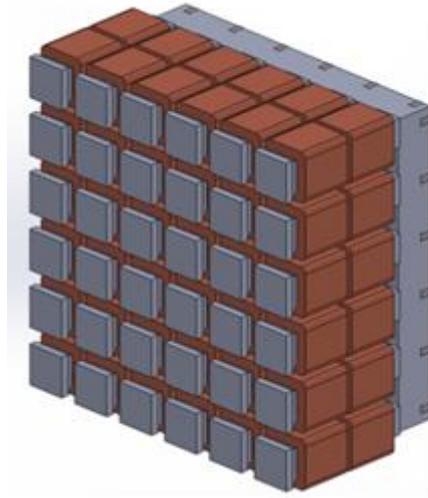
Todos os 36 dentes são presos em uma base de fixação. O formato e dimensão da base está mostrado na figura 9. O arranjo formado pela base de fixação e pelos 36 dentes, mostrado na figura 10, forma a armadura do carro primário do atuador planar estudado.

**Figura 9: Base de fixação dos dentes: dimensões (a) e desenho esquemático (b).**



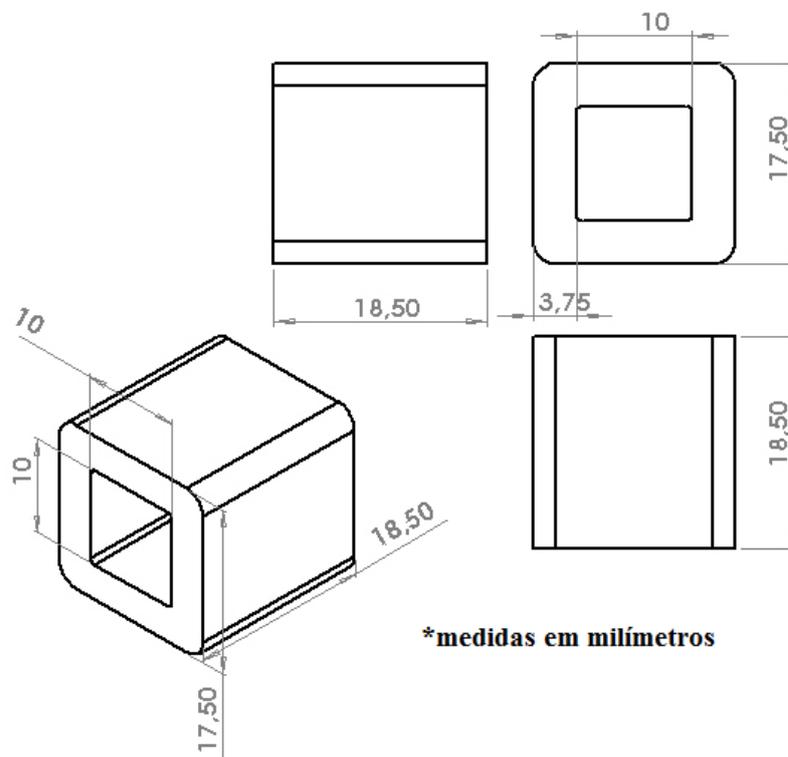
Fonte: DIEDRICH, 2013.

**Figura 10: Desenho esquemático da armadura do carro primário do atuador planar de indução, com bobinas.**



As 72 bobinas são feitas com fio de cobre esmaltado 24 AWG. Cada bobina possui 180 espiras aglomeradas em seis camadas, com resistência média de  $0,56 \Omega$ . As dimensões e um desenho com o formato final de uma das bobinas podem ser vistos na figura 11.

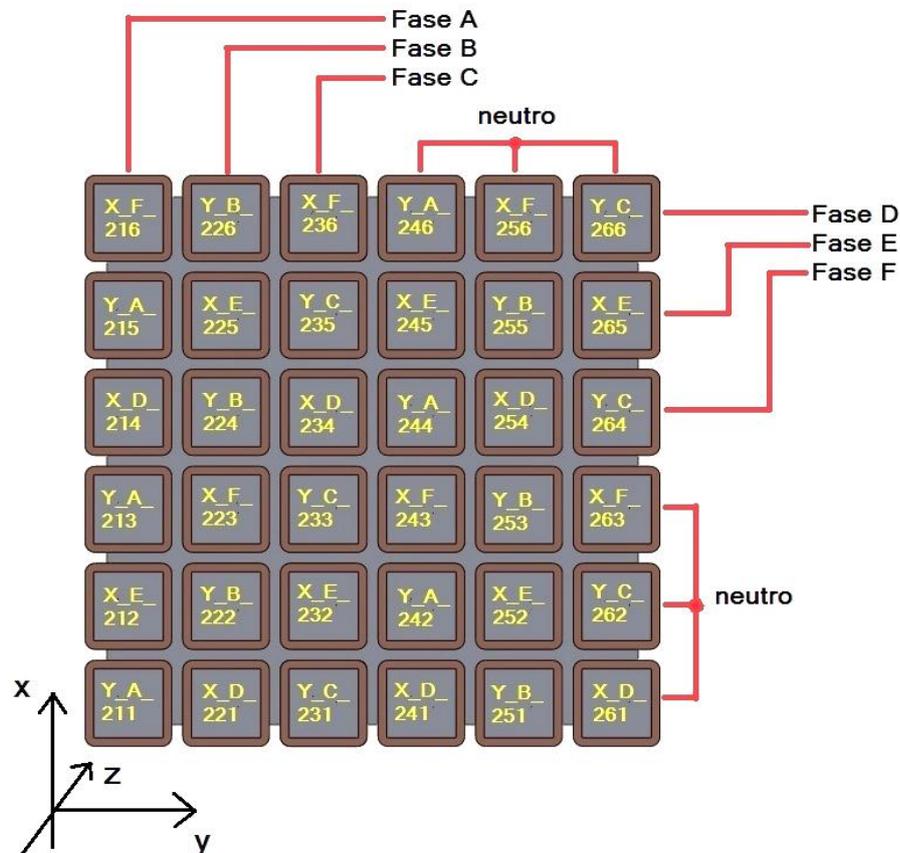
**Figura 11: Desenho esquemático de uma bobina do atuador planar de indução.**



Fonte: DIEDRICH, 2013.

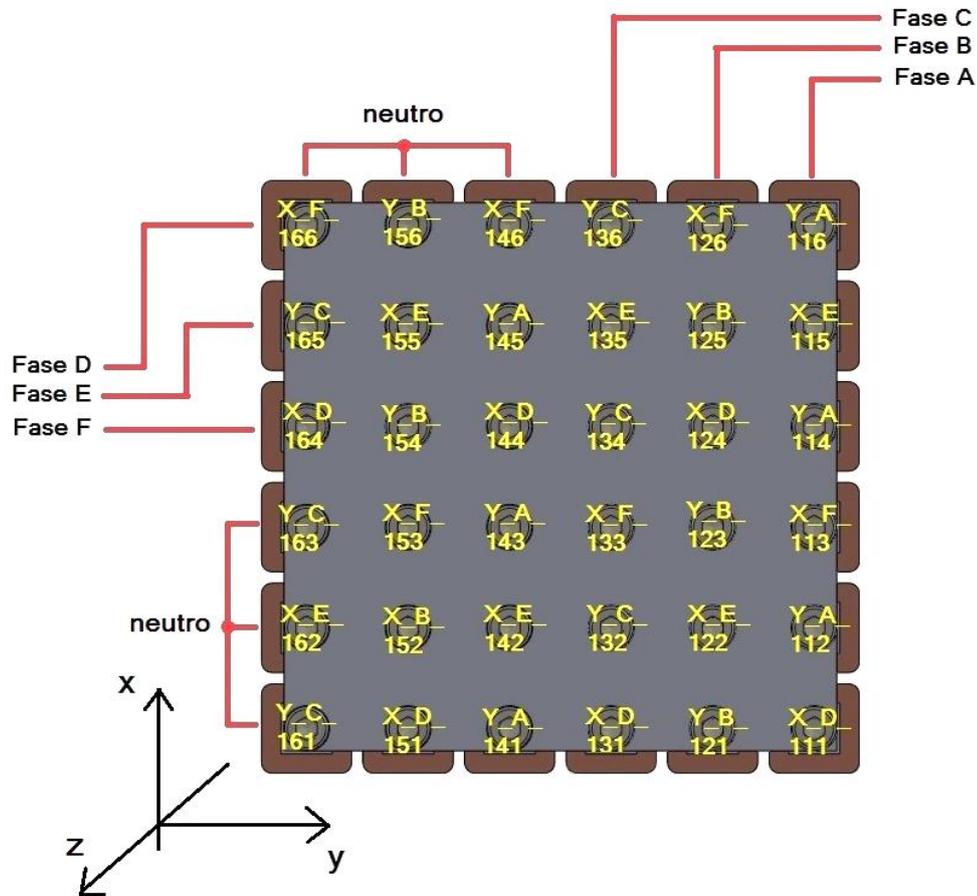
A partir das bobinas, são ligados dois enrolamentos trifásicos, um deles responsável pela movimentação do atuador na direção  $x$ , chamado a partir de agora de “enrolamento X”, e outro responsável pela movimentação na direção  $y$ , chamado enrolamento Y. Cada enrolamento possui 36 bobinas divididas em 3 fases, ou seja, 12 bobinas por fase. As fases são ligadas em estrela. As figuras 12 e 13 mostram um “mapa” com o nome e a posição de cada bobina na estrutura do carro primário. A figura 12 representa a camada inferior de bobinas, próximas à sapata dos dentes, e a figura 13 representa a camada superior de bobinas, próximas à base de fixação. O nome de cada bobina é composto por duas letras e três números: a primeira letra representa o enrolamento ao qual a bobina pertence (X ou Y), a segunda letra representa a fase na qual a bobina está conectada (A, B e C para o enrolamento Y; D, E e F para o enrolamento X), o primeiro número representa a camada na qual a bobina está (1 para a camada superior, 2 para a camada inferior), o segundo número representa a posição do dente na qual a bobina está inserida no eixo  $y$  (1 para o primeiro dente, 6 para o último (sexto) dente) e o último número representa a posição no eixo  $x$ .

Figura 12: Desenho com nome e posição das bobinas da camada inferior.



Fonte: DIEDRICH, 2013.

Figura 13: Desenho com nome e posição das bobinas da camada superior.

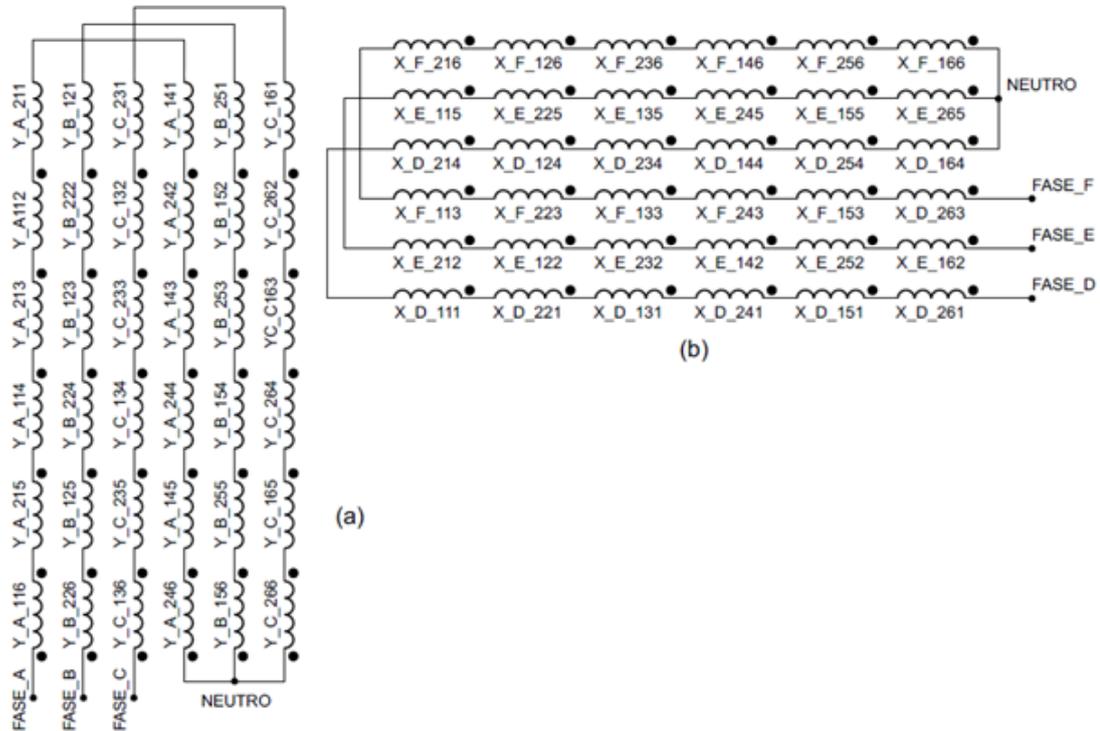


Fonte: DIEDRICH, 2013.

A figura 14 mostra as conexões entre as bobinas na construção dos enrolamentos, com a polaridade de cada uma indicada. Há uma alternância entre as camadas nas ligações, isto é, uma bobina da camada inferior será sempre ligada em bobinas da camada superior e uma bobina da camada superior será sempre ligada em bobinas da camada inferior, fazendo com que cada fase possua sempre metade das bobinas pertencendo à camada inferior e outra metade pertencendo à camada superior, de modo que não haja grandes desequilíbrios entre as fases causados pela posição vertical das bobinas.

As bobinas que compõem uma fase qualquer dos enrolamentos encontram-se alinhadas em duas fileiras de dentes. Na primeira fileira de cada fase, as bobinas são conectadas com a polaridade invertida em relação à segunda fileira. Essa disposição de polaridades causa o surgimento dos polos no entreferro no momento em que o atuador está em funcionamento. Estas duas fileiras são separadas por outras duas fileiras que correspondem às outras duas fases do dispositivo.

Figura 14: Desenho esquemático das ligações das bobinas para formação dos enrolamentos Y (a) e X (b).

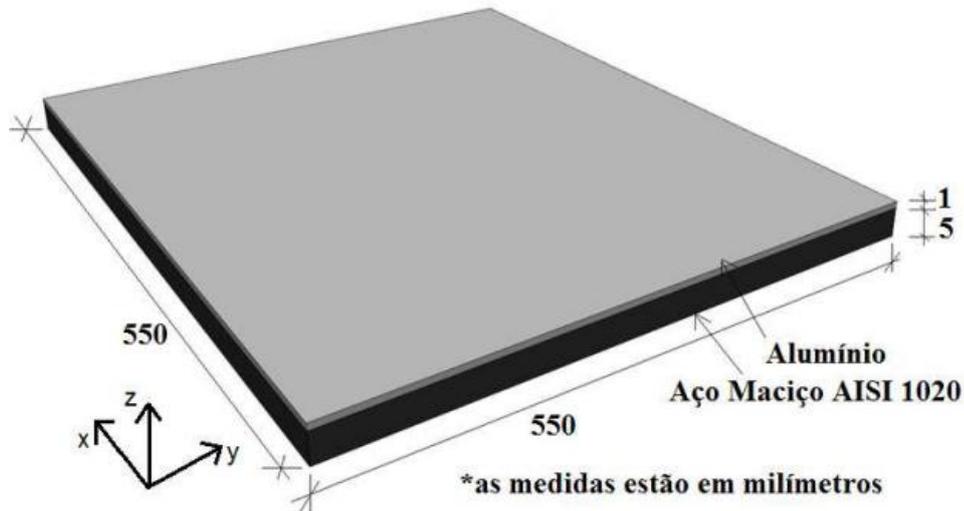


Fonte: DIEDRICH, 2013 (figura corrigida).

### 2.5.3 Estrutura do Secundário

O secundário do atuador planar de indução encontra-se permanentemente estático e é composto por dois matérias: na parte superior existe uma chapa de alumínio com 1 mm de espessura, um material excelente condutor, onde são induzidas as correntes que produzem a força necessária para o funcionamento do dispositivo. O alumínio está fixado à uma chapa de aço maciço AISI 1020 com 5 mm de espessura, e recozido para o melhoramento de sua permeabilidade magnética. Essa chapa por sua vez, encontra-se fixada à base de fixação do atuador. A figura 15 mostra um desenho esquemático do secundário, com as dimensões dos materiais em uso.

**Figura 15: Desenho esquemático do secundário do atuador planar de indução.**



Fonte: BAGGIO FILHO, 2012.

Entre a chapa de alumínio e a parte inferior dos dentes do carro primário existe uma região de ar que é o entreferro da máquina. Essa região apresenta espessura irregular, com valores variados em diferentes pontos que vão de 1,25 mm a 2,55 mm. Essa irregularidade se dá devido a imperfeições nos dentes do carro primário, mas principalmente devido à falhas na superfície do secundário, que se aproxima do carro primário à medida que o mesmo se desloca para o seu centro. Para fins práticos, na sequência do trabalho será adotada uma espessura média de 1,8 mm para o entreferro.

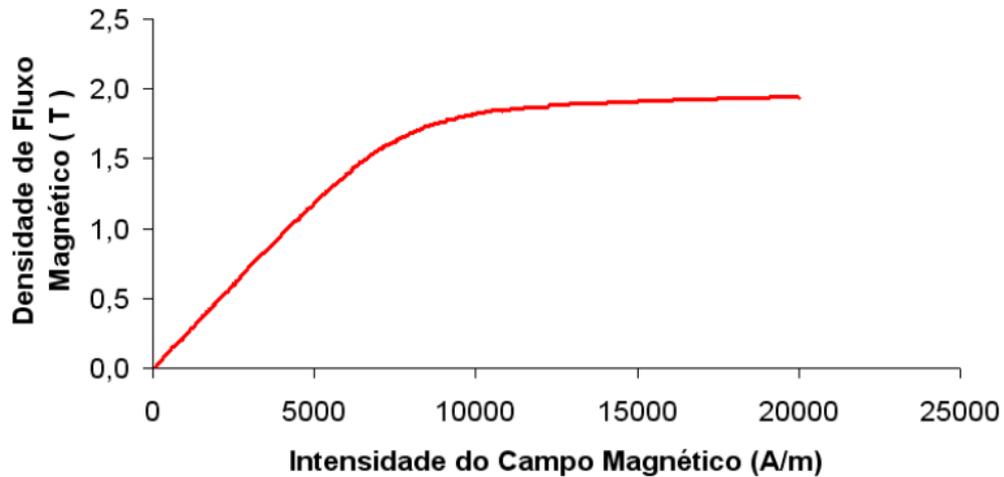
#### ***2.5.4 Características dos Materiais Empregados***

##### **2.5.4.1 AÇO AISI 1020**

O núcleo do secundário do API é feito com aço AISI 1020 maciço e recozido, processo que aumenta sua permeabilidade magnética. Esse aço é um material com características praticamente isotrópicas, isto é, suas propriedades não dependem da direção em que são analisadas. A figura 16 apresenta a curva de magnetização deste material, e a tabela 2 mostra algumas de suas propriedades importantes.

A base de sustentação para os dentes também é feita com este material.

Figura 16: Curva de magnetização do aço AISI 1020 recozido.



Fonte: BAGGIO FILHO, 2012.

Tabela 1: Propriedade do aço maciço recozido AISI 1020.

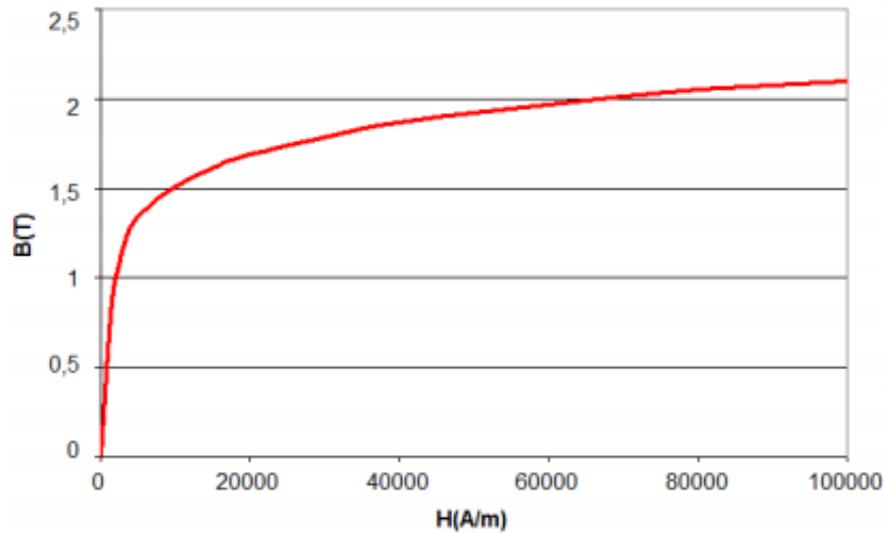
<b>Peso Específico</b>	<b>7,85 g/cm<sup>3</sup></b>
<b>Máxima Permeabilidade Magnética Relativa</b>	3.800
<b>Resistividade Elétrica Nominal Comercial</b>	0,2 μΩ.m
<b>Condutividade Elétrica Nominal</b>	5 x 10 <sup>6</sup> S/m
<b>Densidade de Fluxo Magnético de Saturação</b>	1,95 T

Fonte: LALL, 1992.

#### 2.5.4.2 COMPÓSITO 1P SOMALOY 500

O compósito 1P Somaloy 500 é o material utilizado na composição dos dentes do primário do API, que constituem a maior parte do núcleo do primário do dispositivo. O material é obtido a partir da metalurgia do pó. A base do material é o pó de ferro, juntamente com um revestimento de material orgânico ou inorgânico, que produz isolamento elétrico. A figura 17 apresenta a curva de magnetização deste material, e a tabela 3 mostra algumas de suas propriedades eletromagnéticas.

Figura 17: Curva de magnetização do compósito 1P Somaloy 500.



Fonte: BAGGIO FILHO, 2012.

Tabela 2: Propriedade do material 1P Somaloy 500.

<b>Máxima Permeabilidade Magnética Relativa</b>	500
<b>Resistividade Elétrica Nominal Comercial</b>	70 $\mu\Omega\cdot m$
<b>Condutividade Elétrica Nominal</b>	1,43 x 10 <sup>4</sup> S/m
<b>Densidade de Fluxo Magnético Máximo</b>	B <sub>max</sub> @ 4000 A/m – 1,23 T B <sub>max</sub> @ 10.000 A/m – 1,51 T

Fonte: JANSSON, 1998.

#### 2.5.4.3 ALUMÍNIO

O alumínio é o material condutor utilizado para a indução de corrente no secundário. Possui baixa resistividade elétrica, de  $2,82 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$  à 20 °C, e condutividade elétrica de  $3,55 \cdot 10^7 S/m$ , calculada pela equação 16, onde  $\sigma$  é a condutividade e  $\rho$  é a resistividade do material. Sua permeabilidade magnética possui valor próximo à permeabilidade do vácuo.

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (16)$$

### 3. SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

#### 3.1 O Método dos Elementos Finitos

Um método que tem se popularizado para a simulação numérica de dispositivos eletromagnéticos é o método dos elementos finitos. Com o uso deste método, topologias complexas de dispositivos podem ser melhor estudadas. O método consiste na divisão do volume do dispositivo em um número finito de volumes menores, formando uma malha, e na solução do modelo para a obtenção do potencial escalar magnético  $\Psi$  em todos os elementos do modelo, a partir de condições de contorno especificadas. A partir da obtenção de  $\Psi$ , outras grandezas de interesse podem ser calculadas. Vários pacotes computacionais estão disponíveis para a realização de simulações deste tipo.

#### 3.2 O Pacote Computacional Effe

O programa utilizado na análise numérica eletromagnética do atuador planar estudado é o pacote computacional Effe, em sua versão 2.0, desenvolvido pelo *Applied Electromagnetic Research Centre*, da Universidade de Bath, na Inglaterra. Este pacote consiste em dois programas: o *effeview*, responsável pelas etapas de pré-processamento e pós-processamento do modelo, através de um ambiente interativo; e o *effesolve* que executa as operações necessárias para a obtenção da solução do problema através do MEF e gera um arquivo de resposta, que depois deverá ser novamente lido pelo *effeview*.

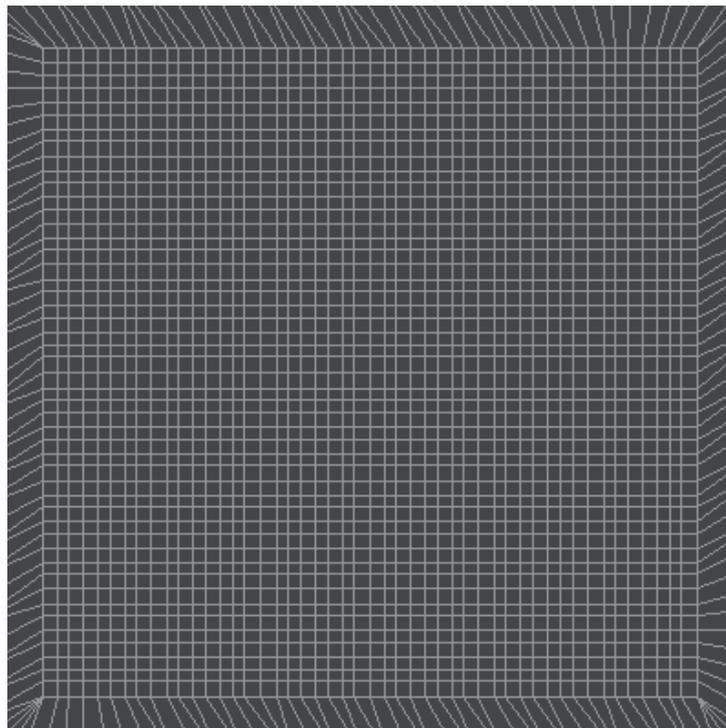
#### 3.3 Pré-Processamento

O procedimento para a simulação do atuador planar de indução no Effe inicia com a criação de uma malha bidimensional, sobre a qual o atuador será criado. A malha criada está mostrada na figura 1. A parte central da malha é onde está posicionado o API, e nesse setor cada segmento da malha possui 2 mm de largura. As bordas além deste setor formarão uma extensão do secundário do API além da parte que fica imediatamente abaixo do primário. Cada uma dessas bordas possui a dimensão aproximada de meio carro primário. A redução no tamanho do secundário é realizada por limitações numéricas, que impõe uma diminuição no

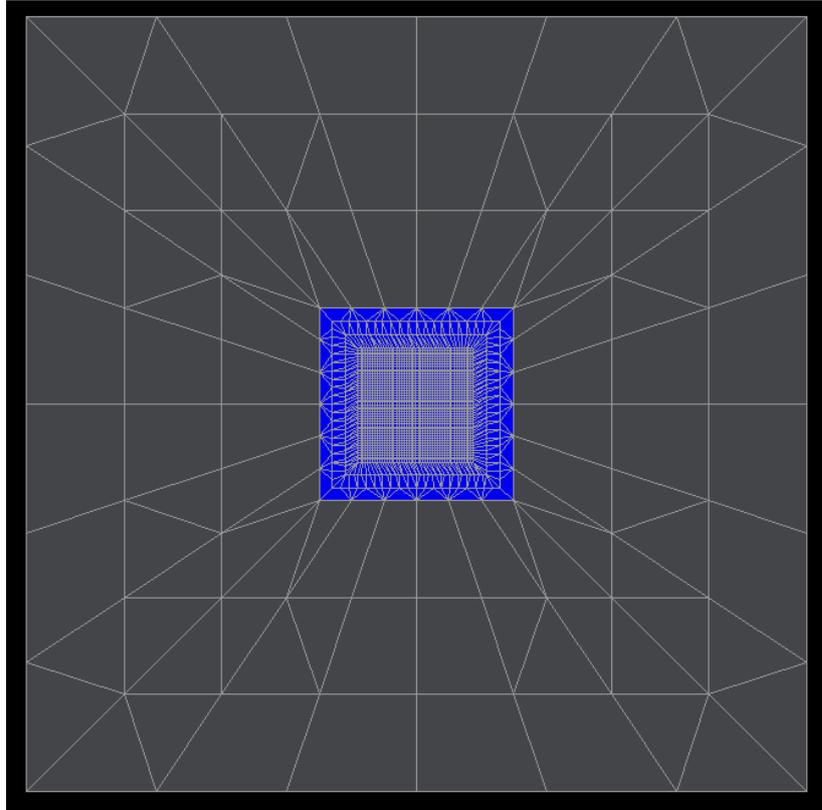
número de pontos nos eixos X e Y para que o dispositivo possa ser melhor modelado na sua dimensão Z.

Cada dente do primário do API é representado por uma malha formada por 16 elementos de 2,5 mm x 2,5 mm, em sua parte mais estreita, e 36 elementos na parte junto ao entreferro, mais larga (os 16 elementos anteriores com uma camada adicional de 20 elementos de dimensão 2 x 2 mm externamente). Esta parte da malha está mostrada em detalhe na figura 18. Após os dentes é construída uma malha menos densa com dimensão total de 200 x 200 mm onde será construída uma extensão do secundário do API além dos elementos que se encontram sob o primário. E externamente a isto é inserida uma camada de ar, com dimensão total de 800 x 800 mm, e menos densa do que as anteriores. Esta malha descrita está mostrada na figura 19.

**Figura 18: Detalhe da parte central da malha do modelo do API.**



**Figura 19: Malha inicial para o modelo do API.**



Em seguida é feito a extrusão da malha para a criação do modelo tridimensional (3D) do API. A tabela 3 lista os níveis da extrusão e a interface que cada nível representa. O tipo de material de cada região do modelo 3D deve então ser ajustado, inserindo suas características de condutividade elétrica e permeabilidade magnética, conforme descritas no capítulo 2.5.4, e as condições de contorno da simulação são inseridas. As condições de contorno utilizadas impõe que o potencial escalar magnético seja nulo nos nós das extremidades do modelo, isto é, na base, na camada de topo e nas quatro laterais.

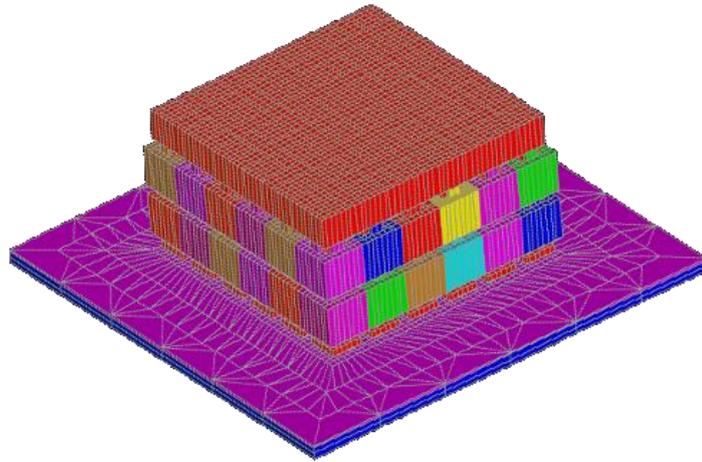
Tabela 3: Lista de níveis da extrusão do modelo do API.

Nível em z (mm)	Interface representada
0	Base do secundário
2,5	Ponto intermediário no núcleo do secundário
5	Interface entre o núcleo e a camada condutora do secundário
6	Interface entre a camada condutora e o entreferro
6,9	Ponto intermediário do entreferro
7,8	Interface entre o entreferro e a sapata dos dentes do primário
10,8	Estreitamento dos dentes do primário
14,8	Início da primeira camada de bobinas
33,3	Final da primeira camada de bobinas
37,3	Início da segunda camada de bobinas
55,8	Final da segunda camada de bobinas
59,8	Final dos dentes e início do suporte dos dentes do primário
73,8	Final do suporte e início de uma camada de ar externa
200	Final do modelo

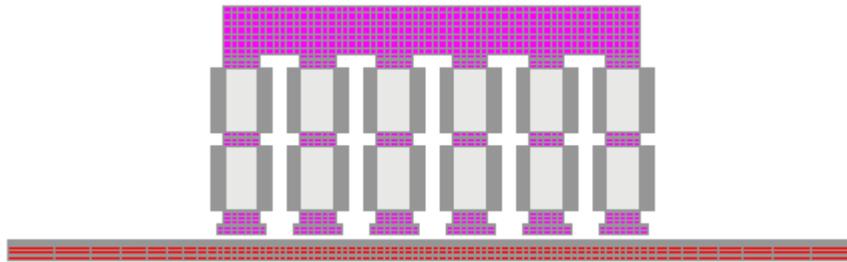
As bobinas do API são criadas à parte da malha inicial. São inseridas as suas dimensões, o número de espiras e a sua posição no modelo, e seus terminais são conectados em suas devidas ligações, como já descrito no capítulo 2.5.2. Após esses passos, o problema é simulado pelo *effesolve*.

O modelo 3D virtual do API em estudo está mostrado nas figuras 20, em perspectiva, e 21, em sua vista frontal. Ele possui pequenas diferenças em relação ao dispositivo real por limitações de discretização, como a inexistência de planos inclinados, porém ainda conserva semelhança suficiente para simular o objeto de estudo. No modelo podem ser vistas as bobinas e os dentes do atuador posicionados sobre a chapa de alumínio do secundário.

**Figura 20: Modelo 3D do atuador planar de indução em perspectiva.**



**Figura 21: Vista lateral do modelo do atuador planar de indução.**



O modelo simulado possui 40.695 nós e 37.063 elementos, resultando em 97.384 equações para a sua solução. De um volume total de  $0,191 \text{ m}^3$ ,  $0,806 \times 10^{-5} \text{ m}^3$  foram resolvidos pelo método do potencial escalar reduzido.

### 3.4 Processamento

Basicamente, o MEF soluciona a equação (17), obtendo como solução o potencial escalar magnético  $\Psi$ , conhecida como equação de Laplace, segundo FLORES FILHO (2011). Desenvolvendo-se essa equação para um modelo tridimensional, a equação resolvida pelo simulador é a equação (18), e deve produzir uma solução única em um número finito de iterações.

$$\nabla \cdot \mu \nabla \Psi = 0 \quad (17)$$

$$\mu \nabla \Psi = \mu \frac{\partial \Psi}{\partial x} \vec{i} + \mu \frac{\partial \Psi}{\partial y} \vec{j} + \mu \frac{\partial \Psi}{\partial z} \vec{k}$$

$$\nabla \cdot \mu \nabla \Psi = \frac{\partial}{\partial x} \mu \frac{\partial \Psi}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \mu \frac{\partial \Psi}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \mu \frac{\partial \Psi}{\partial z} \quad (18)$$

Porém para problemas envolvendo correntes elétricas a solução não ocorre diretamente. A equação (19) define  $\vec{H}$  a partir do potencial magnético  $\Psi$ . A equação (20) é a versão simplificada da lei de Ampère-Maxwell. Aplicando-se o operador rotacional nos dois lados da equação (19) e combinando-a com a equação (20), obtém-se os resultados mostrados na equação (21), implicando  $\vec{j} = 0$  onde o potencial escalar magnético é definido.

$$\vec{H} = -\nabla \Psi \quad (19)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{j} \quad (20)$$

$$\nabla \times \vec{H} = -\nabla \times \nabla \Psi = \vec{j} = 0 \quad (21)$$

Para contornar esta limitação, deve ser usado então o conceito de potencial escalar reduzido, como explica FLORES FILHO (2011). Um problema auxiliar no qual o campo magnético pode ser rotacional é criado como indicado na equação (22) e o material ferromagnético desconsiderado. A diferença entre o campo original e o campo auxiliar deve ser então um campo irrotacional, que satisfaz a equação (21), como mostra a equação (22). A equação (23) define então o potencial escalar reduzido  $\Psi_r$ .

$$\nabla \times (\vec{H} - \vec{H}_{aux}) = 0 \quad (22)$$

$$\vec{H} - \vec{H}_{aux} = -\nabla \Psi_r \quad (23)$$

Multiplicando a equação (23) pela permeabilidade magnética, aplicando o operador divergente nos dois lados da equação e sabendo que a equação (24) define a densidade de campo magnético  $\vec{B}$ , chega-se ao resultado indicado em (25). A equação (26) é a lei de Gauss para o magnetismo, e indica que um termo de (25) é nulo, resultando na equação final mostrada na equação (27), que pode ser resolvida pelo MEF.

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (24)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} - \nabla \cdot \mu \vec{H}_{aux} = -\nabla \cdot \mu \nabla \Psi_r \quad (25)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (26)$$

$$\nabla \cdot \mu \nabla \Psi_r = \nabla \cdot \mu \vec{H}_{aux} \quad (27)$$

### 3.5 Pós-Processamento

Após a solução do problema, deve ser realizada a análise das grandezas pertinentes. A ferramenta para o pós-processamento facilita a obtenção de grandezas como  $\vec{B}, \vec{H}, \vec{j}$  e  $\Psi$ , que podem ser visualizados na forma de gráficos ao longo de uma linha, ou sobre alguma superfície, que pode ser um corte do modelo para a visualização das grandezas internamente.

A força eletromagnética atuante sobre o modelo pode ser obtida através do método do tensor de stress de Maxwell, definido pelas equações (28) e (29).

$$\vec{F} = \frac{1}{\mu} \oint_S T \cdot d\vec{S} \quad (28)$$

$$T = \begin{bmatrix} B_x^2 - |B|^2/2 & B_x B_y & B_x B_z \\ B_x B_y & B_y^2 - |B|^2/2 & B_y B_z \\ B_x B_z & B_y B_z & B_z^2 - |B|^2/2 \end{bmatrix} \quad (29)$$

Segundo NOGUEIRA (1993), o contorno de integração deve ser colocado inteiramente no ar, ou seja, ele não deve interseccionar com partes magnetizadas ou elementos

com corrente. Adicionalmente, o contorno deve envolver a parte sobre a qual a força é exercida, mas o seu formato pode ser escolhido arbitrariamente.

### 3.6 Resultados

A solução numérica para o modelo simulado foi obtida com, em média, 24 iterações. Após os testes, foram analisadas as principais grandezas envolvidas na operação do dispositivo: densidade de fluxo magnético, correntes elétricas induzidas, força planar de propulsão e força normal. Os resultados estão expostos a seguir.

Foram realizados ensaios utilizando três casos distintos de excitação aos enrolamentos do primário. No primeiro caso, ambos os enrolamentos foram excitados de forma idêntica, com mesma tensão, frequência e defasagem. No segundo caso, apenas o enrolamento *X* foi excitado para a simulação, e no terceiro caso apenas o enrolamento *Y* foi excitado. As simulações foram realizadas para uma série de valores de tensão, iniciando em 45 V até 60 V com passos de 3 V, e em seguida as simulações foram extrapoladas para valores maiores de tensão, em passos de 10 V. A razão tensão/frequência foi mantida constante para todas as simulações.

#### 3.6.1 Densidade de Fluxo Magnético

A figura 22 mostra densidade de fluxo magnético na direção 'Z', normal ao plano de movimento do API, distribuída sobre o modelo do API, em escala de cores, para excitação em ambos os enrolamentos com 60 V a 60 Hz e ângulo de fase de 0°, mostrada na figura 25. Como se pode observar na figura, a densidade de fluxo magnético (*B*) desenvolvida ao longo do modelo do API excursiona entre 1,23 T positivo e 1,31 T negativo. A figura 23 mostra a vista superior de um corte na região mais estreita dos dentes do API, que é o ponto onde *B* atinge seus extremos, para a mesma excitação da figura 22. Faz-se importante notar que nessa região de *B*, o compósito 1P Somaloy 500 encontra-se na região de boa linearidade de sua curva, que satura acentuadamente após 1,5 T, restando ainda um intervalo de segurança para variação de *B* antes da saturação do núcleo.

Figura 22: Distribuição de densidade de fluxo magnético no modelo do API.

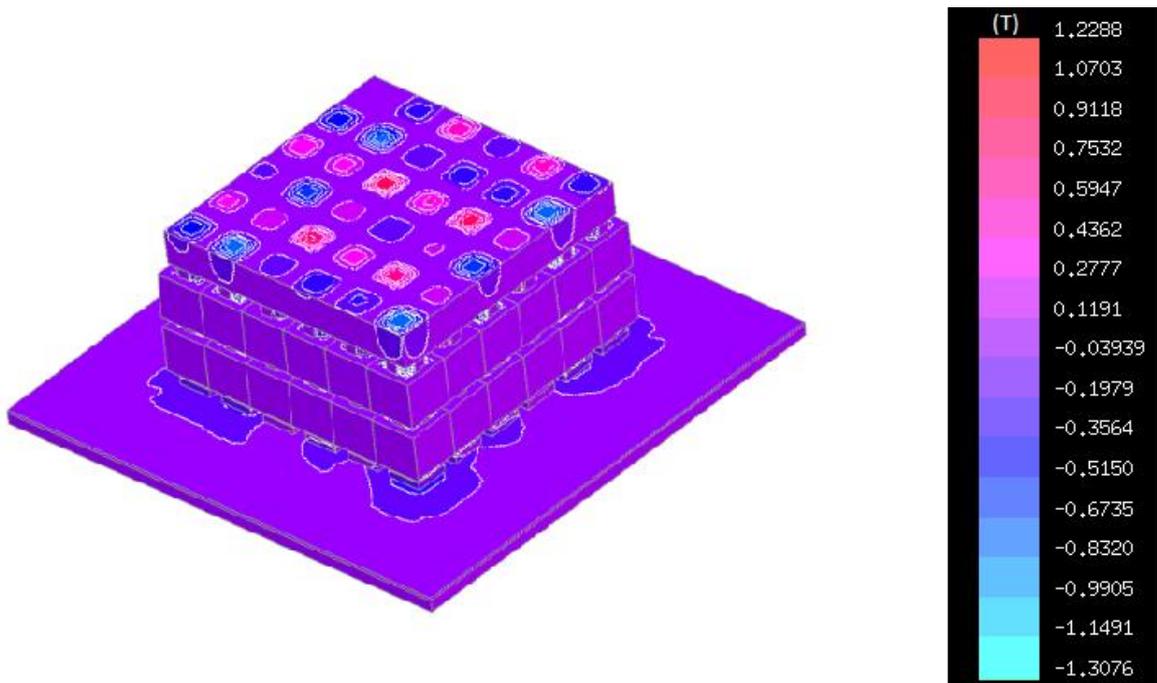
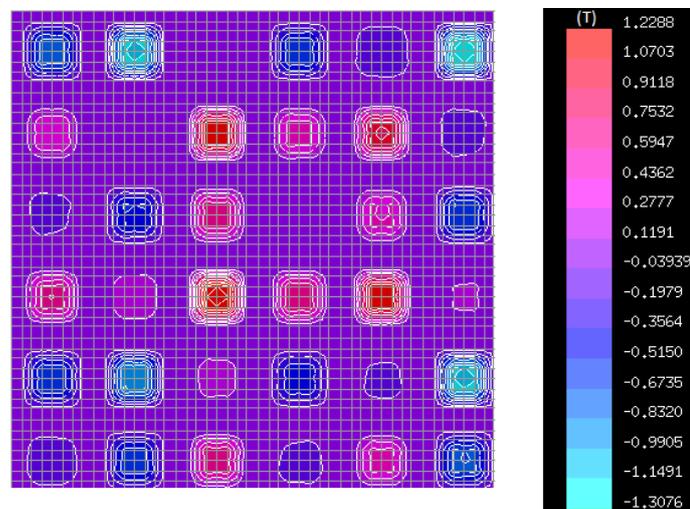
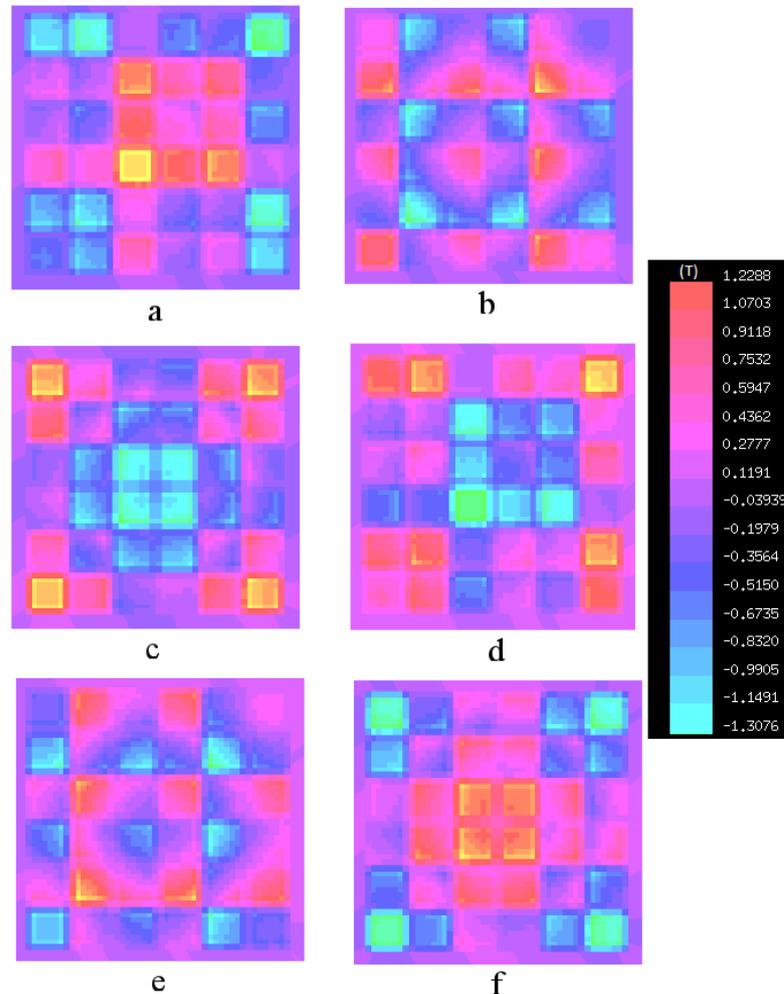


Figura 23: Densidade de fluxo magnético em corte paralelo à seção transversal dos dentes do API, a 8 mm do entreferro.

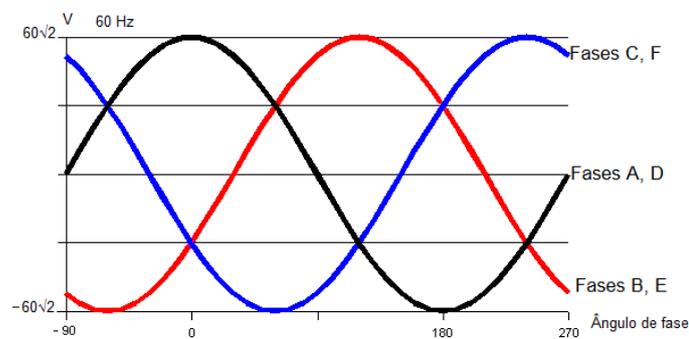


A figura 24 mostra a densidade de fluxo magnético no entreferro do API, em intervalos defasados por  $60^\circ$ , com excitação em ambos os enrolamentos de 60 V e 60 Hz. Esta figura procura demonstrar a formação do campo magnético transladante no entreferro do dispositivo, que pode ser vista observando atentamente o movimento desenvolvido pelo grupo de elementos azuis na diagonal entre o canto inferior esquerdo e o canto superior direito. Neste caso, o campo criado movimentava-se em diagonal, gerando o movimento em ambas as direções (X e Y).

**Figura 24:** Sequência de figuras com a densidade de campo magnético no entreferro em um período completo de excitação nos dois enrolamentos. Defasagem de  $0^\circ$  (a),  $60^\circ$  (b),  $120^\circ$  (c),  $180^\circ$  (d),  $240^\circ$  (e) e  $300^\circ$  (f).



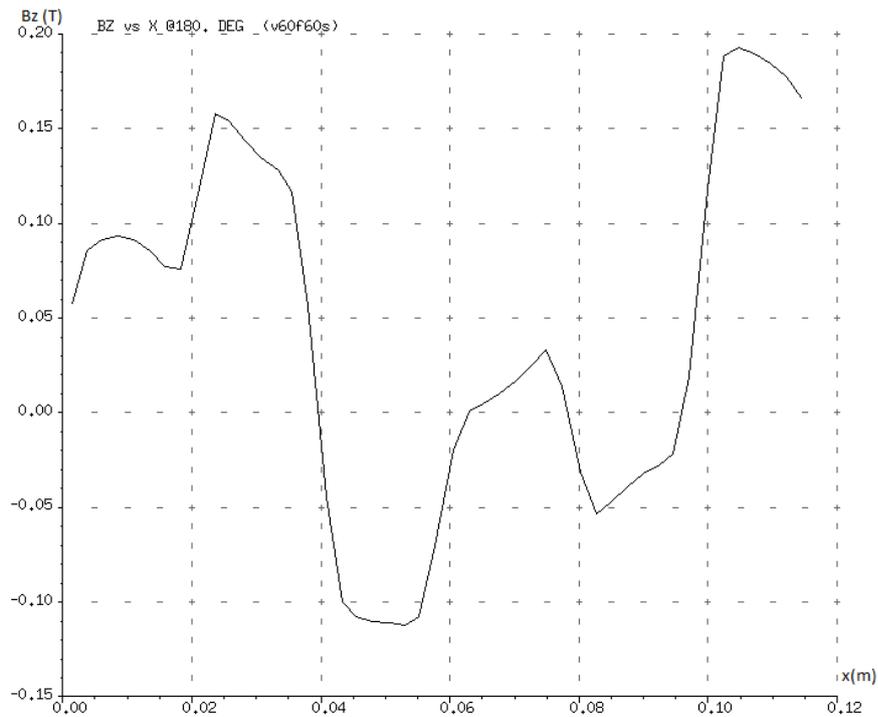
**Figura 25:** Curva da tensão trifásica usada na alimentação dos enrolamentos das figuras 22, 23, 24, 26, 27, 28 e 29.



A figura 26 mostra uma curva com a densidade de fluxo magnético ao longo do eixo  $x$  do entreferro com ambos os enrolamentos excitados a 60 V e 60 Hz. A curva inicia no ponto

$x = 0$ , situado 9,85 mm à esquerda do dente inferior esquerdo, e acaba 9,85 mm à direita do dente inferior direito do API, quando as curvas da figura 25 possuem defasagem de  $180^\circ$ .

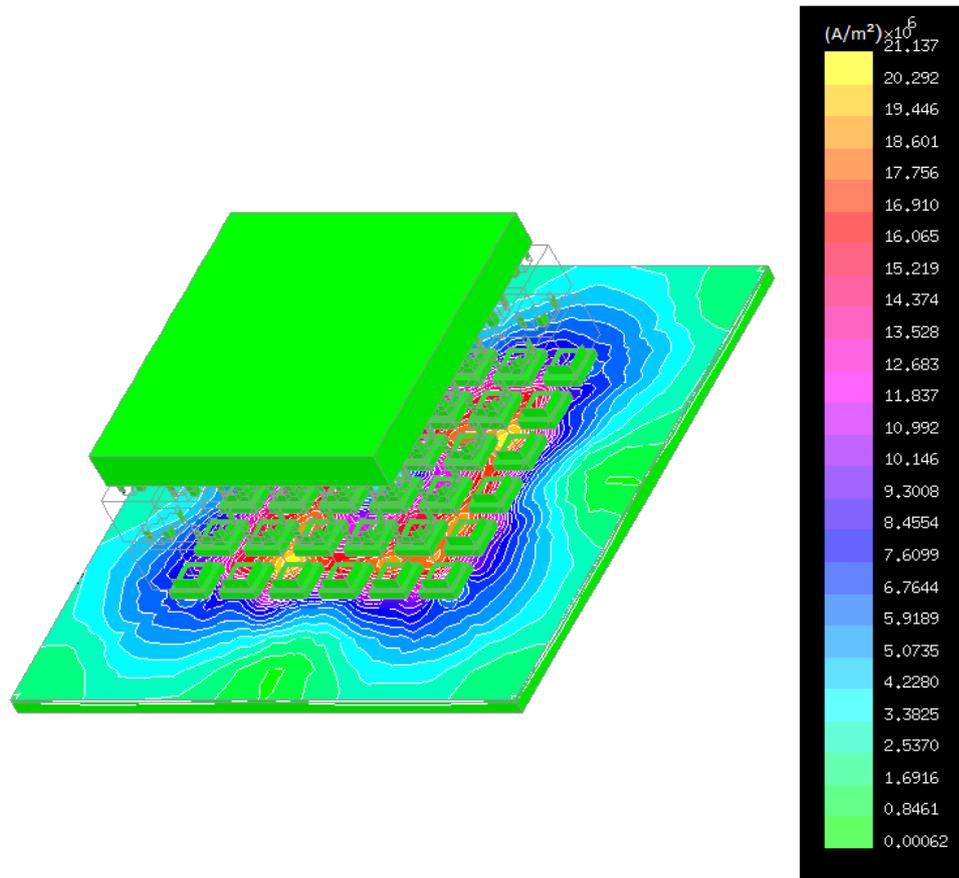
**Figura 26: Densidade de fluxo magnético ao longo do eixo x do entreferro, com ambos os enrolamentos excitados a 60 V e 60 Hz.**



### 3.6.2 Densidade de Corrente Elétrica

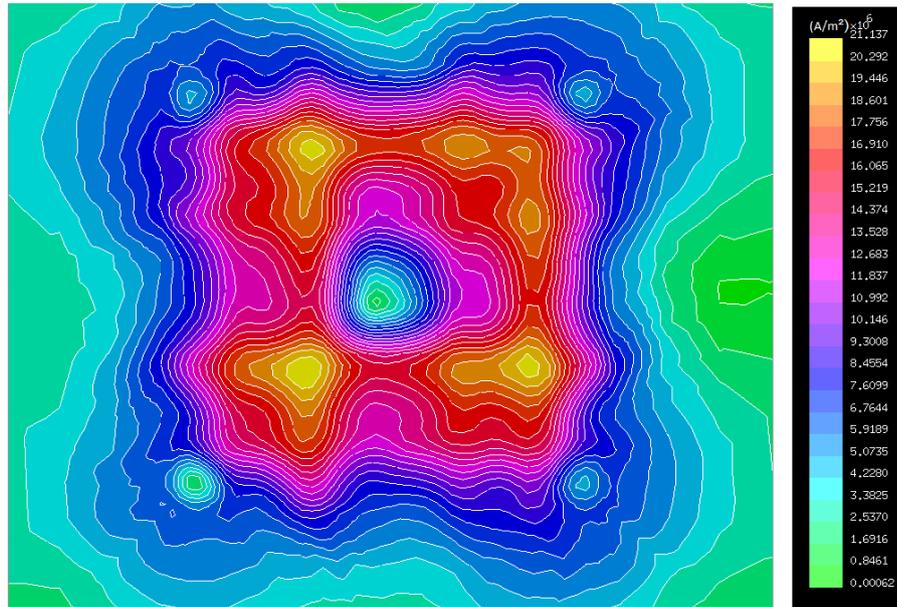
A figura 27 a distribuição do módulo da densidade de corrente elétrica sobre o modelo do API, alimentado com a tensão da figura 25 com ângulo de fase de  $0^\circ$ . Pode-se observar a formação de correntes muito elevadas no secundário do API, da ordem de  $10^7$  A/m<sup>2</sup>. A figura 28 exibe com mais detalhe as correntes formadas, mostrando a vista superior do secundário criado para o modelo. Os pontos onde as correntes induzidas possuem maior magnitude ocorrem em uma posição do secundário situada entre os cantos e o centro do primário. Um fato interessante é que próximo ao centro do dispositivo a corrente apresenta uma região com intensidade baixíssima.

**Figura 27: Figura em perspectiva com o módulo da densidade de corrente elétrica induzida no API.**

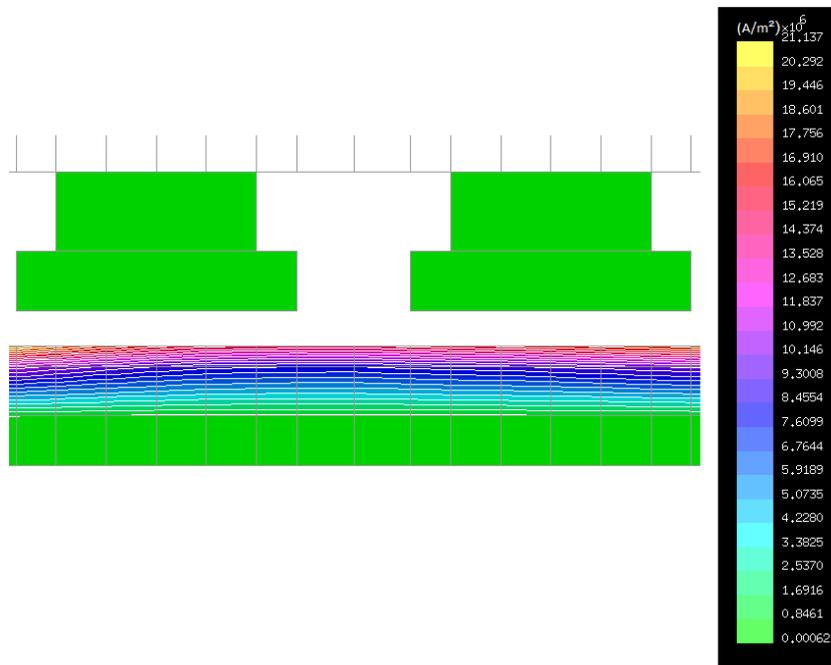


Outro fator que pode ser observado nas figuras 27 e 28 é a indução de correntes nas regiões não situadas sob o primário. O presente modelo do secundário foi feito com aproximadamente 50 mm excedentes, e correntes são induzidas por sua maior parte, seja em maior ou menor escala. Os pontos onde a maior densidade de corrente é produzida, e também onde a corrente se estende por maior distância, é próximo aos cantos do primário. Nestes pontos, a densidade de corrente próxima às bordas chega a atingir valores próximos a 20% do valor máximo apresentado ao longo do dispositivo, o que é uma quantia considerável e que pode influenciar o seu desempenho.

**Figura 28: Módulo da densidade de corrente elétrica induzida no secundário do API.**



**Figura 29: Corte junto à base dos dentes mostrando a penetração da corrente elétrica induzida no secundário do API.**



A figura 29 mostra dois dentes do primário vistos em perfil para a mesma excitação da figura anterior, posicionados sobre o secundário, com o objetivo de analisar a profundidade de penetração da indução das correntes no secundário do dispositivo. Como pode ser observado na imagem, e como esperado, a maior densidade de corrente encontra-se na camada de alumínio. Quantias significativas de corrente ainda são induzidas na chapa de aço,

ainda que em intensidade menor do que no alumínio, porém praticamente se extinguem antes de atingirem a metade da profundidade do aço, ou seja, 2,5 mm.

### 3.6.3 Força de Propulsão Planar

Na sequência serão analisados os valores da força de propulsão planar desenvolvidos pelo API. Foram realizadas séries de simulações utilizando como parâmetros a tensão e frequência da excitação nos mesmos valores do que durante os testes experimentais desenvolvidos e detalhados em DIEDRICH (2013). Os resultados obtidos estão organizados em tabelas que apresentam a comparação entre os valores obtidos nas presentes simulações e os valores práticos apresentados em DIEDRICH (2013).

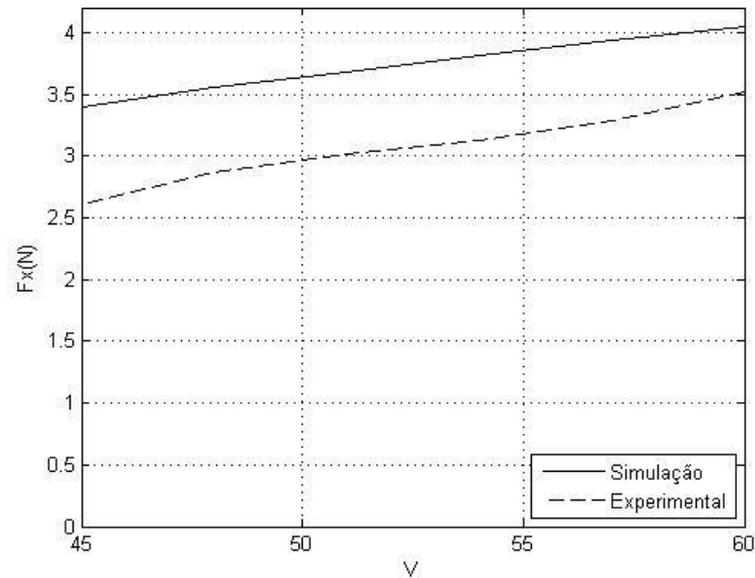
A tabela 4 apresenta os valores de força de propulsão planar obtidos com a excitação de ambos os enrolamentos, para direção X e para direção Y. Houve uma pequena discrepância entre os valores, com os dados numéricos apresentando valores mais elevados do que os dados experimentais. Uma das possíveis causas para esta diferença é o atrito estático presente nos trilhos por onde corre o potenciômetro que obtém a posição do API. Nos dados obtidos a diferença entre valores práticos e numéricos é maior na força desenvolvida ao longo do eixo Y, e este fato é condizente com o observado no API, que apresenta resistência relativamente elevada ao movimento principalmente em seu eixo Y.

**Tabela 4: Força de propulsão planar para o caso com ambos os enrolamentos excitados.**

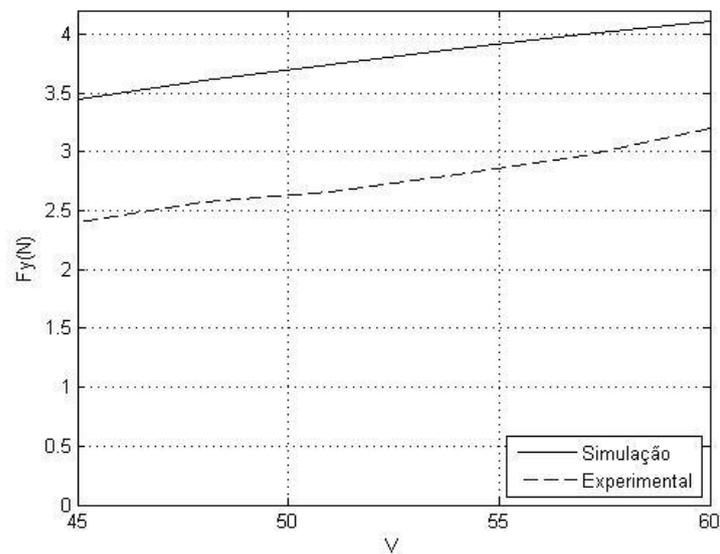
Força de propulsão (N)					
V (V)	f (Hz)	X		Y	
		Effe	Prático	Effe	Prático
45	45	3,40	2,61	3,45	2,40
48	48	3,55	2,87	3,60	2,58
51	51	3,68	3,02	3,74	2,66
54	54	3,81	3,13	3,87	2,80
57	57	3,94	3,29	4,00	2,97
60	60	4,05	3,52	4,11	3,20

Fonte: DIEDRICH (2013).

**Figura 30: Curva com a força desenvolvida na direção X, com dados experimentais e numéricos, ambos enrolamentos excitados.**



**Figura 31: Curva com a força desenvolvida na direção Y, com dados experimentais e numéricos, ambos enrolamentos excitados.**



As figuras 30 e 31 apresentam a curva com a força desenvolvida pelo API com ambos os enrolamentos excitados, na direção X e Y, respectivamente. As curvas representando a simulação numérica apresentou comportamento menos oscilante, mantendo certo padrão. Nas análises no eixo X, as duas análises apresentaram resultados mais próximos, o que pode ser observado também através das curvas.

As tabelas 5 e 6 apresentam a força planar desenvolvida pelo API quando apenas um de seus enrolamentos é excitado (enrolamento X e Y, respectivamente), apresentando os dados das simulações numéricas e igualmente dos testes experimentais apresentados por DIEDRICH (2013). Novamente os valores das simulações numéricas foram mais elevados do que os valores obtidos experimentalmente, e novamente a maior diferença ocorreu no enrolamento Y. As figuras 32 e 33 mostram graficamente esta diferença.

Os dados obtidos nas simulações numéricas não apresentaram diferenças entre a força gerada na direção X e a força gerada na direção Y. Este é um resultado coerente já que não existem diferenças entre as direções do modelo simulado, fato que não pode ser garantido ao protótipo utilizado nos testes experimentais, sujeito a imprecisões na sua construção.

**Tabela 5: Força de propulsão planar para o caso com apenas o enrolamento X excitado.**

<b>Força de propulsão (N)</b>			
<b>V</b> (V)	<b>f</b> (Hz)	<b>X</b>	
		EFFE	Prático
<b>45</b>	45	3,57	2,585
<b>48</b>	48	3,72	2,767
<b>51</b>	51	3,87	2,905
<b>54</b>	54	4,00	3,008
<b>57</b>	57	4,13	3,148
<b>60</b>	60	4,25	3,340

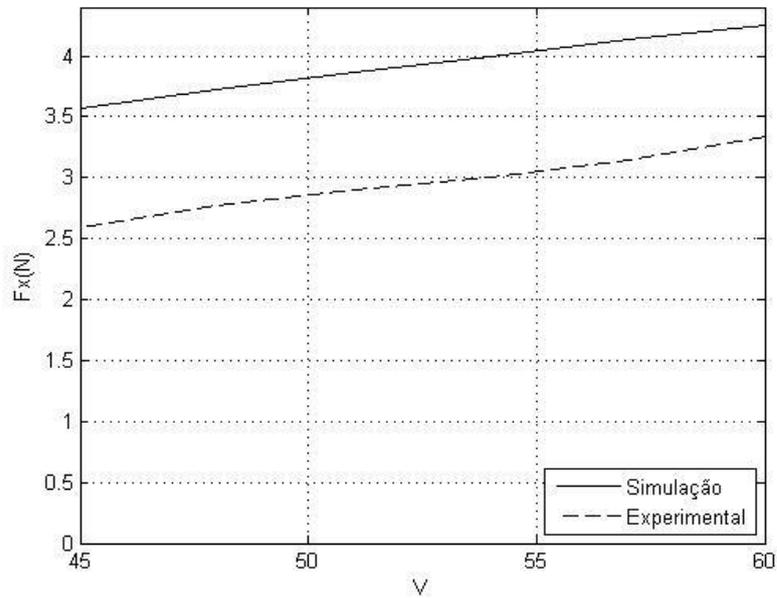
Fonte: DIEDRICH, 2013.

**Tabela 6: Força de propulsão planar para o caso com apenas o enrolamento Y excitado.**

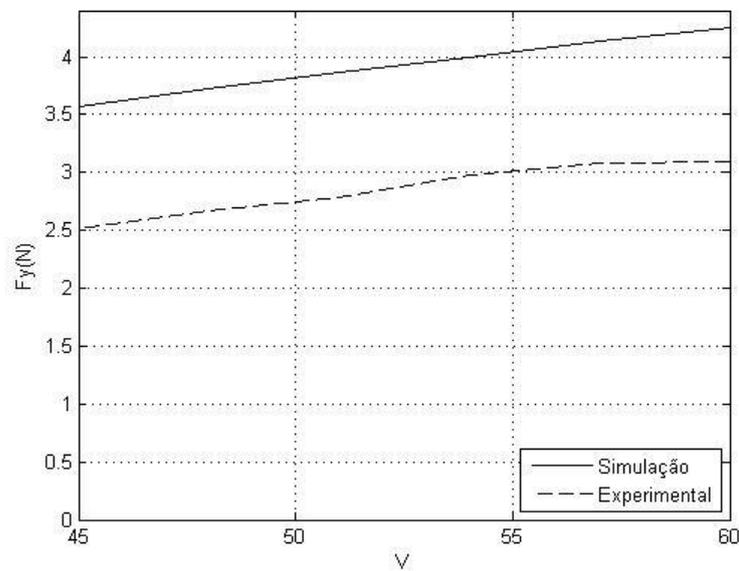
<b>Força de propulsão (N)</b>			
<b>V</b> (V)	<b>f</b> (Hz)	<b>Y</b>	
		EFFE	Prático
<b>45</b>	45	3,57	2,512
<b>48</b>	48	3,72	2,671
<b>51</b>	51	3,87	2,782
<b>54</b>	54	4,00	2,974
<b>57</b>	57	4,13	3,082
<b>60</b>	60	4,25	3,094

Fonte: DIEDRICH, 2013.

**Figura 32: Curva com a força desenvolvida na direção X, com dados experimentais e numéricos, enrolamento X excitado.**



**Figura 33: Curva com a força desenvolvida na direção Y, com dados experimentais e numéricos, enrolamento Y excitado.**



As tabelas 7 e 8 apresentam uma extrapolação dos valores analisados nas tabelas 5 e 6 para valores mais elevados de tensão de alimentação, e as figuras 34 e 35 apresentam graficamente os resultados obtidos. O mesmo padrão observado nos outros testes foi observado aqui, com dados numéricos com valores mais elevados que os dados experimentais

apresentados por DIEDRICH (2013), e essa diferença sendo maior nos dados do enrolamento Y.

**Tabela 7: Força de propulsão planar para o caso com apenas o enrolamento X excitado, com tensões mais elevadas.**

<b>Força de propulsão planar (N)</b>			
<b>V (V)</b>	<b>f (Hz)</b>	<b>X</b>	
		<b>EFFE</b>	<b>Prático</b>
<b>45</b>	45	3,57	2,619
<b>55</b>	55	4,05	3,138
<b>65</b>	65	4,43	3,603
<b>75</b>	75	4,72	3,883
<b>85</b>	85	4,94	4,165
<b>95</b>	95	5,08	4,379
<b>105</b>	105	5,17	4,473

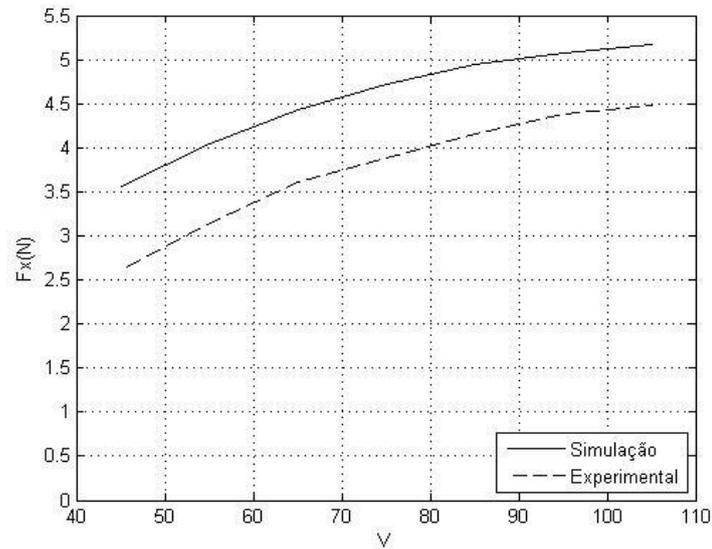
Fonte: DIEDRICH, 2013.

**Tabela 8: Força de propulsão planar para o caso com apenas o enrolamento Y excitado, com tensões mais elevadas.**

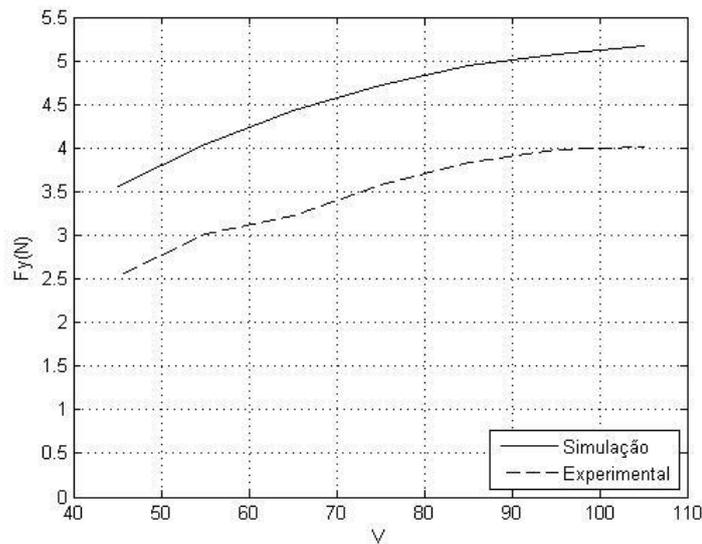
<b>Força de propulsão planar (N)</b>			
<b>V (V)</b>	<b>f (Hz)</b>	<b>Y</b>	
		<b>EFFE</b>	<b>Prático</b>
<b>45</b>	45	3,57	1. 2,535
<b>55</b>	55	4,04	3,015
<b>65</b>	65	4,43	3,222
<b>75</b>	75	4,72	3,573
<b>85</b>	85	4,94	3,834
<b>95</b>	95	5,08	3,974
<b>105</b>	105	5,17	4,011

Fonte: DIEDRICH, 2013.

**Figura 34: Curva com a força desenvolvida na direção X, com dados experimentais e numéricos, enrolamento X excitado e tensão mais elevada.**



**Figura 35: Curva com a força desenvolvida na direção Y, com dados experimentais e numéricos, enrolamento Y excitado e tensão mais elevada.**



### 3.6.4 Força Normal

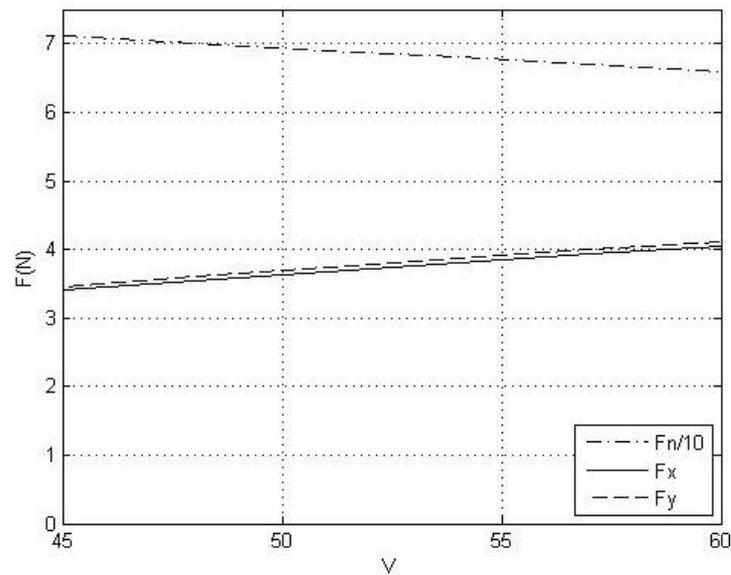
Foram também coletados dados referentes a força normal de atração entre o primário e o secundário do API, nas mesmas condições dos testes mostrados anteriormente. A tabela 9 mostra o valor da força gerada com a excitação dos dois enrolamentos simultaneamente. A figura 36 coloca em um mesmo gráfico as forças na direção X, direção Y e a força normal (reduzida por um fator de 10 vezes para melhor observação junto às outras), para efeito de

comparação. Como pode ser visto, a força normal apresenta valores muito mais elevados do que a força transversal e, ao contrário do que ocorre com a força transversal, seu valor diminui com o aumento da tensão elétrica aplicada aos enrolamentos.

**Tabela 9: Força normal para o caso com ambos os enrolamentos excitados.**

Força Normal (N)		
V (V)	f (Hz)	F (N)
45	45	71,09
48	48	70,06
51	51	69,03
54	54	68,00
57	57	66,98
60	60	65,97

**Figura 36: Forças desenvolvidas pelo API com ambos os enrolamentos excitados.**

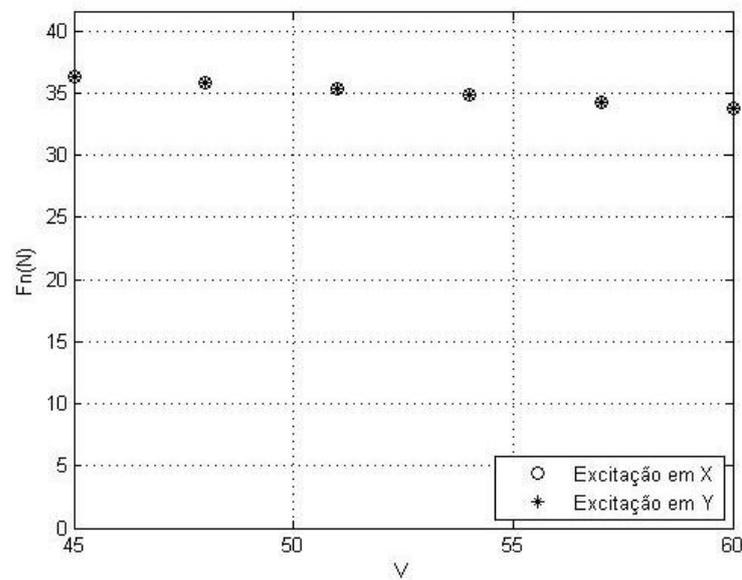


A tabela 10 apresenta a força normal gerada pelo API quando apenas um de seus enrolamentos é excitado. Os valores são menores do que os valores para o caso com dois enrolamentos excitados, levemente superiores à metade dos últimos valores citados. Porém, é importante ressaltar que não existem diferenças entre o enrolamento que é excitado: a mesma força normal é gerada, seja a força transversal na direção X ou na direção Y. A figura 37 mostra este fato.

Tabela 10: Força normal para o caso com apenas um dos enrolamentos excitado (X ou Y).

Força Normal (N)			
V (V)	f (Hz)	X	Y
45	45	36,38	36,37
48	48	35,88	35,87
51	51	35,36	35,36
54	54	34,85	34,84
57	57	34,33	34,32
60	60	33,81	33,8

Figura 37: Força normal desenvolvida pelo API com apenas um enrolamento excitado.



A tabela 11 extrapola o teste anterior para maiores valores de tensão e frequência. Uma redução significativa, de em torno de 27%, ocorre variando-se a frequência entre 45 Hz e 105 Hz.

Tabela 11: Força normal para o caso com apenas um dos enrolamentos excitado (X ou Y), com tensões mais elevadas.

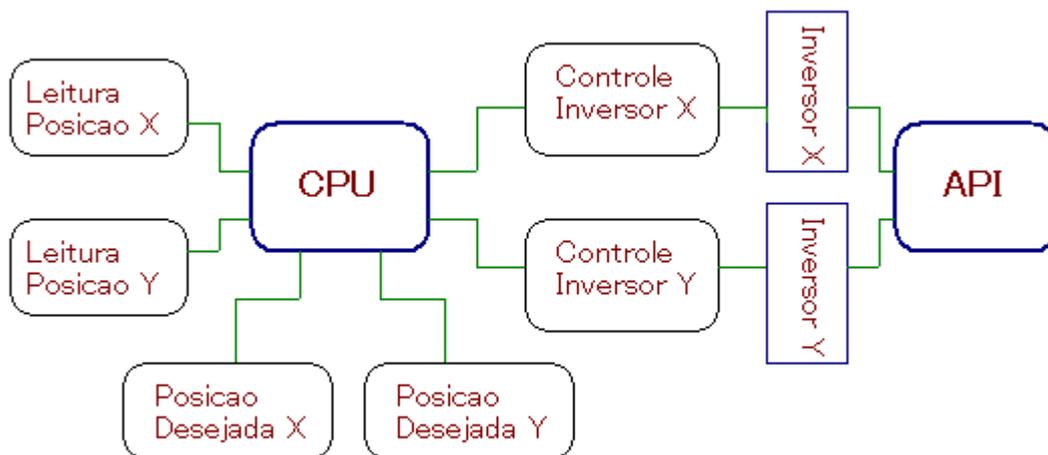
Força Normal (N)			
V (V)	f (Hz)	X	Y
45	45	36,38	36,37
55	55	34,67	34,66
65	65	32,94	32,94
75	75	31,23	31,23
85	85	29,57	29,56
95	95	27,98	27,97
105	105	26,47	26,46

## 4. O SISTEMA DE POSICIONAMENTO DO ATUADOR PLANAR DE INDUÇÃO

### 4.1 Topologia Proposta para o Sistema

A topologia proposta para o controle de posição do atuador planar de indução está mostrada na figura 38. Ela consiste no tratamento de cada eixo do API independentemente, e na atuação sob os enrolamentos do primário através de dois inversores de frequência, tudo isso gerenciado por uma unidade de processamento central (CPU).

Figura 38: Topologia do sistema de controle de posição.



Os blocos “Leitura de Posição X” e “Leitura de Posição Y” como o próprio nome já diz são responsáveis por obter a posição do API, ou seja, fazem a realimentação do sistema que o torna um sistema malha fechada, convertem os sinais dos sensores de posição resistivos instalados junto ao API em sinais de tensão elétrica, para que possam ser convertidos em valores digitais pela CPU.

Os blocos “Posição Desejada X” e “Posição Desejada Y” adquirem sinais externos analógicos que informam a posição que deve se encontrar o API e os enviam à CPU. A CPU por sua vez, processa as informações e à partir de condições conhecidas como a distância entre os pontos atual e desejado e a distância percorrida para a parada do API após o recebimento do sinal de parada, atua sobre os blocos “Controle Inversor X” e “Controle

Inversor Y”, que atuam sobre os respectivos inversores de frequência e por consequência sobre o atuador planar de indução.

## 4.2 Hardware

### 4.2.1 Blocos “Inversor X” e “Inversor Y”

O acionamento dos enrolamentos do API será feito com dois inversores de frequência produzidos pela empresa SEW-Eurodrive. O modelo disponível para este fim no LMEAE é o MOVITRAC LTE-B. Este dispositivo é alimentado a partir de 220 V AC monofásicos, a 50 ou 60 Hz, e fornece tensões trifásicas na saída com a tensão e frequência programadas em seus parâmetros, respeitando seus limites que estão mostrados na tabela 12. Suas entradas digitais trabalham com tensão CC de 24 V.

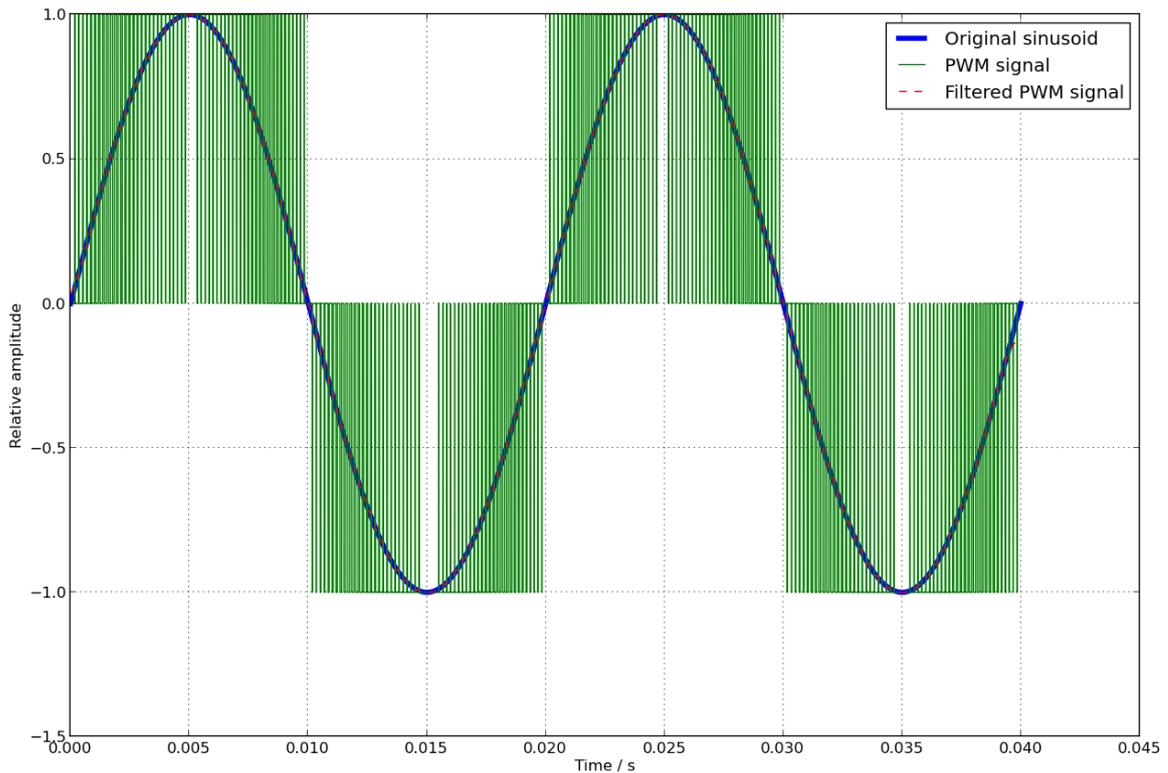
**Tabela 12: Limites do inversor SEW Movitrac LTE-B.**

<b>MOVITRAC LTE-B</b>	
<b>Corrente máxima de saída</b>	7,0 A
<b>Limites de tensão de saída</b>	0 - 250 V
<b>Potência máxima</b>	1,5 kW
<b>Limites de frequência</b>	25 – 500 Hz

Fonte: SEW-EURODRIVE, 2008.

O acionamento através dos inversores de frequência fornece algumas possibilidades interessantes. A tensão de saída é gerada através da modulação por largura de pulsos de uma tensão CC, como mostra a figura 39. A tensão e frequência da saída são ajustadas para o valor desejado facilmente, bastando a mudança de um parâmetro na configuração do dispositivo ou a entrada de um sinal analógico para realizar o ajuste. A mudança física então ocorre através da mudança do ciclo de trabalho do PWM.

**Figura 39: Gráfico de senóide construída a partir de modulação PWM.**

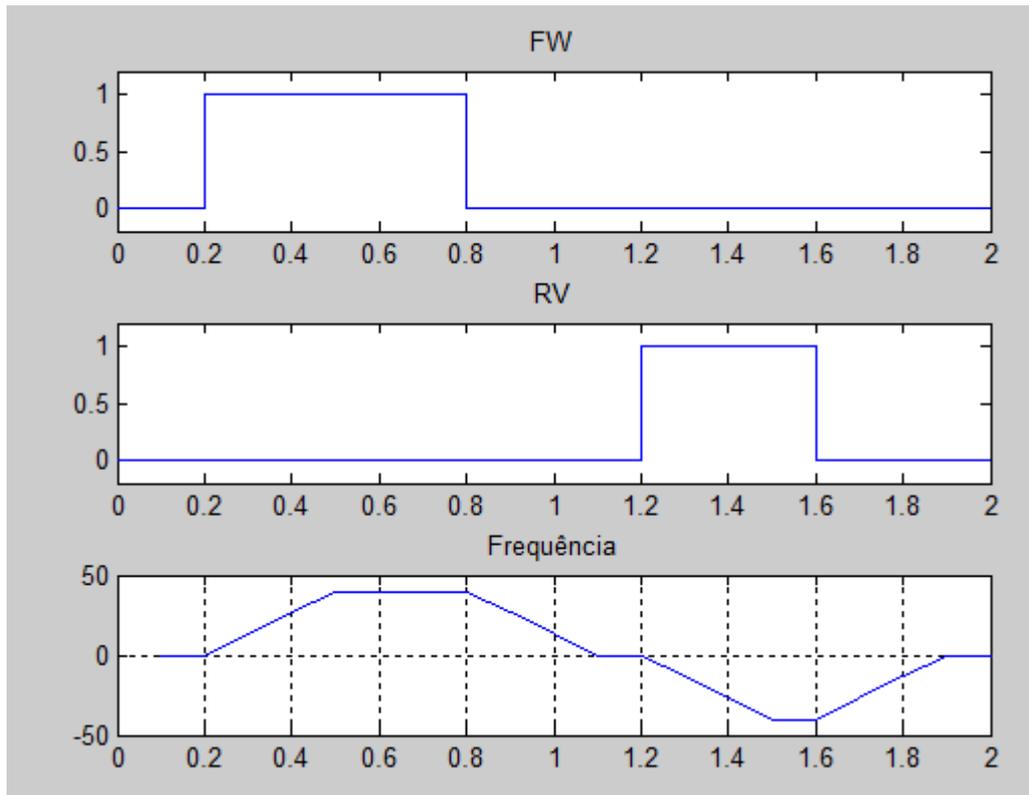


Fonte: <http://siilo.dyndns.org/wiki/index.php/File:Pwm-sample.png>, 14/11/2013.

Outra possibilidade fornecida pelo inversor é a partida através de uma rampa de aceleração, diminuindo a corrente de partida da máquina além de proporcionar a partida de uma forma mais suave. A parada do atuador também pode ser feita através de uma rampa programada, possibilitando o controle do modo de parada do inversor, característica que será muito importante no controle de posição.

A direção do movimento do API é controlada através de duas entradas digitais no inversor de frequência. Acionando a primeira entrada o atuador acelera com a rampa programada até atingir a frequência desejada, e permanece nessa frequência enquanto esse sinal se mantém ativo. Assim que o sinal é removido, o inversor diminui a frequência em sua saída seguindo a rampa programada, e permanece desativado até que alguma das entradas seja acionada novamente. Caso a entrada acionada seja a segunda, o mesmo processo acontece, porém com a sequência de fases inversa, o que faz com que o API se mova na direção contrária. No caso onde as duas entradas são acionadas simultaneamente, que será evitado neste projeto, o movimento ocorre avante. A figura 40 mostra o comportamento descrito do inversor.

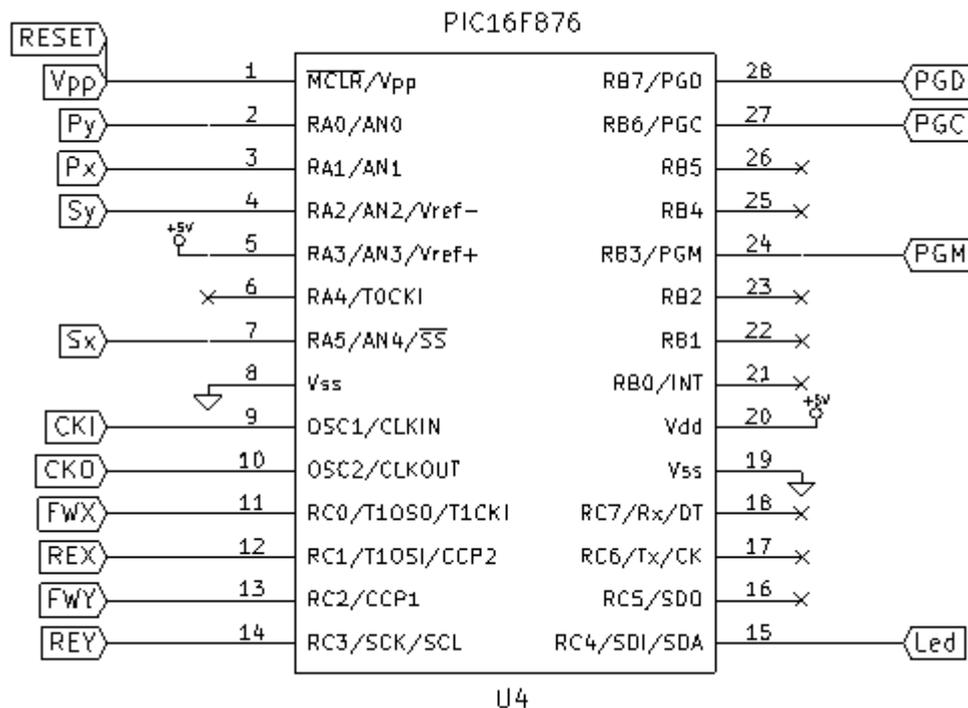
**Figura 40: Curvas mostrando o funcionamento do acionamento pelos inversores de frequência.**



#### 4.2.2 CPU

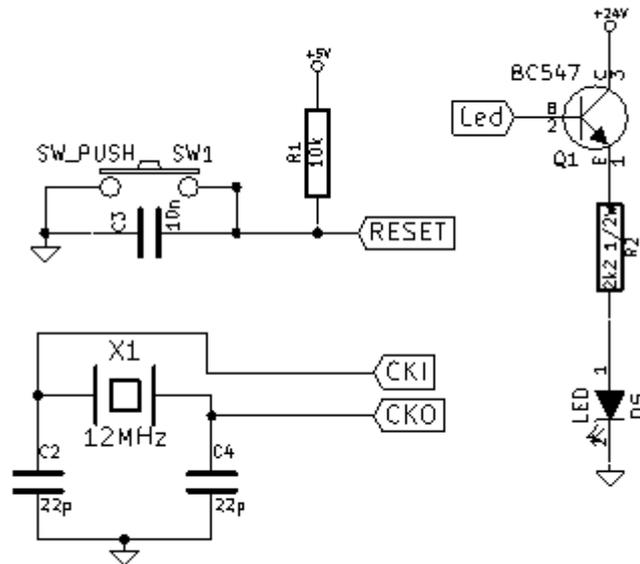
Como CPU do sistema, responsável por receber os dados externos, processar e informar as ações a serem tomadas pelo atuador, será usado um microcontrolador fabricado pela Microchip, modelo PIC 16F876A. Este microcontrolador possui cinco entradas analógicas com resolução de 10 bits na sua porta A que serão necessárias para a aquisição dos dados dos sensores de posição do atuador. Possui outras duas portas com oito bits cada, que podem ser usadas como entradas ou saídas, além de outras funções como programação do microcontrolador alguns protocolos de comunicação que não serão utilizados no presente trabalho.

Figura 41: Desenho esquemático do microcontrolador utilizado, com indicação das ligações realizadas.



A figura 41 mostra um desenho esquemático do microcontrolador, com a descrição da função de cada pino e indicações das ligações de cada um no circuito da aplicação. Os sensores de posição estão conectados aos ramos "Sx" e "Sy". "Px" e "Py" indicam a posição desejada para o atuador. "FWX", "REX", "FWY" e "REY" comandam os movimentos para frente e para trás de cada um dos eixos do API. "Vpp", "PGD", "PGC" e "PGM" são pinos utilizados para a programação do dispositivos. As outras ligações estão representadas na figura 42. O pino "Led" aciona um indicador visual do correto funcionamento do sistema. Junto ao pino "RESET" está conectado um circuito que permite a reinicialização do *software* quando necessário pressionando um botão. Nos pinos "CKI" e "CKO" está conectado o oscilador do circuito, no valor de 12 MHz, juntamente com dois capacitores cerâmicos no valor de 22 pF cada, como requerido pelo dispositivo conforme MICROCHIP(2003). O processador executa uma instrução a cada 4 ciclos do *clock*.

Figura 42: Desenho esquemático de circuitos de suporte à CPU.



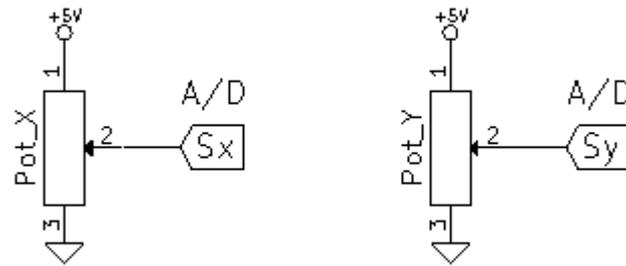
#### 4.2.3 Blocos “Leitura Posição X” e “Leitura Posição Y”

A leitura da posição do API sobre a sua mesa é feita através dos blocos mostrados na figura 43. “Pot\_X” e “Pot\_Y” são potenciômetros multivoltas de 10 kΩ conectados à uma fonte de 5 V. Seu eixo é fixado à uma engrenagem e se movimenta sobre um trilho que converte o movimento linear do API em movimento rotacional no potenciômetro, fornecendo em seu terminal central, que está conectado à uma entrada analógica da CPU, uma tensão proporcional à posição do atuador. A equação 30 mostra o equacionamento da tensão no pino central do potenciômetro. Nessa equação,  $V_{cc}$  é a tensão aplicada (5 V),  $R_0$  é a resistência total do potenciômetro (10 kΩ),  $x_{pot}$  é a distância linear que seria percorrida entre o início e o final de curso do potenciômetro e  $x$  é a posição atual do API. Essa posição é dada pela equação 31, onde  $x_0$  é uma constante que representa a posição equivalente para o potenciômetro quando o API se encontra na sua posição inicial, e  $\Delta x$  é o deslocamento a partir desta posição.

$$V_o = V_{cc} \cdot R_0 \left( \frac{x}{x_{pot}} \right) \quad (30)$$

$$x = x_0 + \Delta x \quad (31)$$

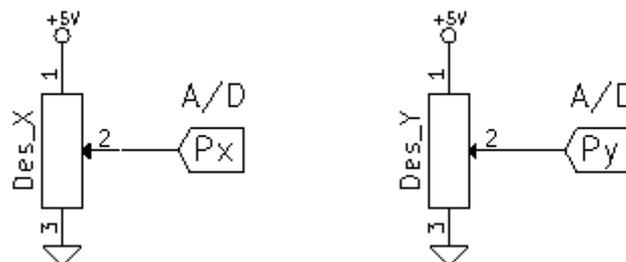
**Figura 43: Desenho esquemático dos sensores de posição do API.**



#### 4.2.4 Blocos “Posição Desejada X” e “Posição Desejada Y”

A leitura da posição desejada para o posicionamento do atuador se dá de forma semelhante. Uma diferença de potencial de 5 V é aplicada entre as extremidades de um potenciômetro, e sua parte central irá fornecer um valor entre 0 V e 5 V, proporcional à posição desejada para o API. Quando 0 V são aplicados, o API deve se posicionar em sua posição inicial ( $x = 0$ ). Quando 5 V são aplicados, o API deve se posicionar em sua posição final. Valores intermediários representam posições intermediárias. Esse valor é então inserido como entrada em um conversor A/D da CPU. A figura 44 mostra o diagrama esquemático que representam estes blocos.

**Figura 44: Desenho esquemático das entradas para indicação da posição desejada do API.**



#### 4.2.5 Blocos “Controle Inversor X” e “Controle Inversor Y”

Estes blocos são os responsáveis pela interface entre a CPU, que opera com tensão de 5 V, e os inversores de frequência, que operam com tensão de 24 V. A interface é feita através de um circuito transistorizado, utilizando 1 transistor NPN e 2 resistores para limitação da corrente para cada sinal envolvido. O diagrama esquemático do circuito, para os 4 sinais envolvidos, está mostrado na figura 45.

A figura 46 mostra em detalhe o circuito descrito. Quando a CPU envia 0 V para a saída, o transistor está na região de corte, ou seja, não existe corrente entre seu coletor e seu emissor. Como não existe corrente, não há queda de tensão sobre o resistor  $R1$ , e os 24 V são transferidos para a saída  $V_o$ , acionando a respectiva entrada no inversor. Quando 5 V são aplicados pela CPU, o transistor entra na região de saturação, onde a tensão entre seu coletor e seu emissor é praticamente nula, e esta tensão é enviada à saída do circuito. O resistor  $R1$  limita a corrente que passa pelo coletor do transistor, e  $R2$  limita a corrente na base. A potência dissipada em  $R1$ , neste último caso, é calculada pela equação (32), e deve ser observada no dimensionamento do resistor.

$$P = \frac{V^2}{R} \quad (32)$$

Figura 45: Desenho esquemático da interface para controle dos inversores de frequência.

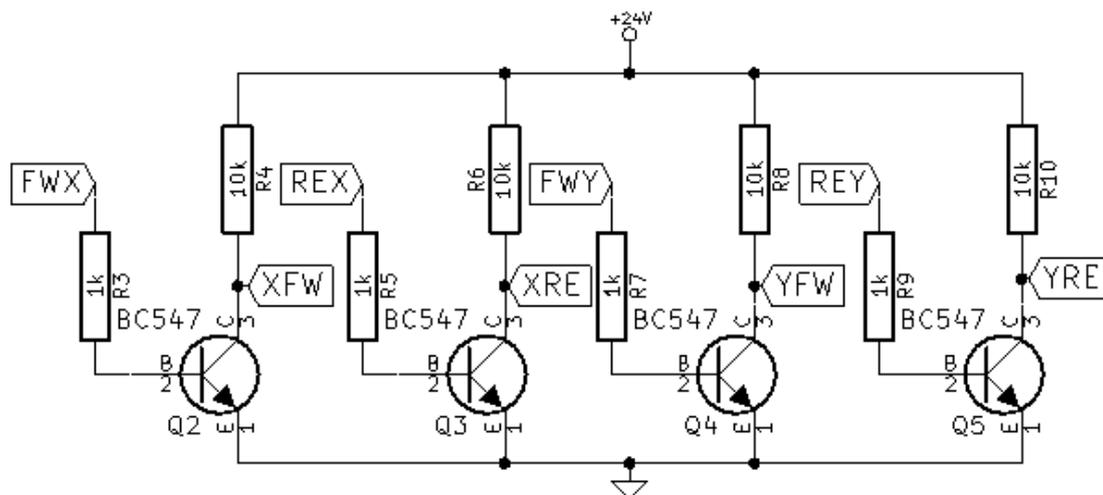
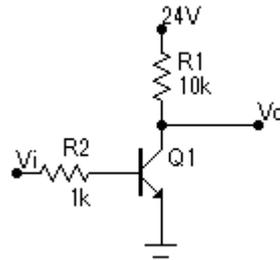


Figura 46: Diagrama esquemático do circuito de interface entre a CPU e os inversores.

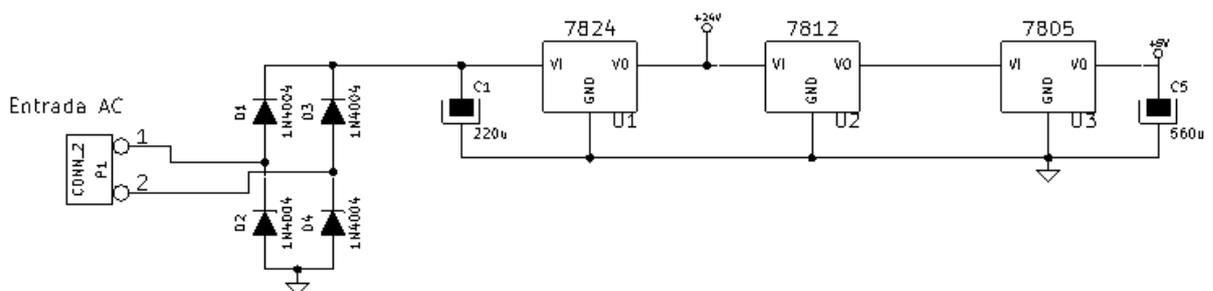


#### 4.2.6 Alimentação do Circuito

O circuito descrito acima é alimentado pela rede de 220 V CA. Um transformador é utilizado para rebaixar a tensão para 25 V CA. Esta tensão deve ser convertida para os 5 V CC necessários para a operação da CPU e os 24 V CC necessários para o acionamento dos inversores de frequência. Isto é feito com o circuito mostrado da figura 47. Primeiramente a tensão é retificada por um retificador de onda completa, resultando em uma tensão retificada média de aproximadamente 35 V CC, conforme a equação (33), que corresponde ao valor de pico da senóide retificada. Logo após, esta tensão é rebaixada para 24 V, 12 V e para 5 V através de reguladores de tensão.

$$V_p = \sqrt{2} \cdot V_{rms} \quad (33)$$

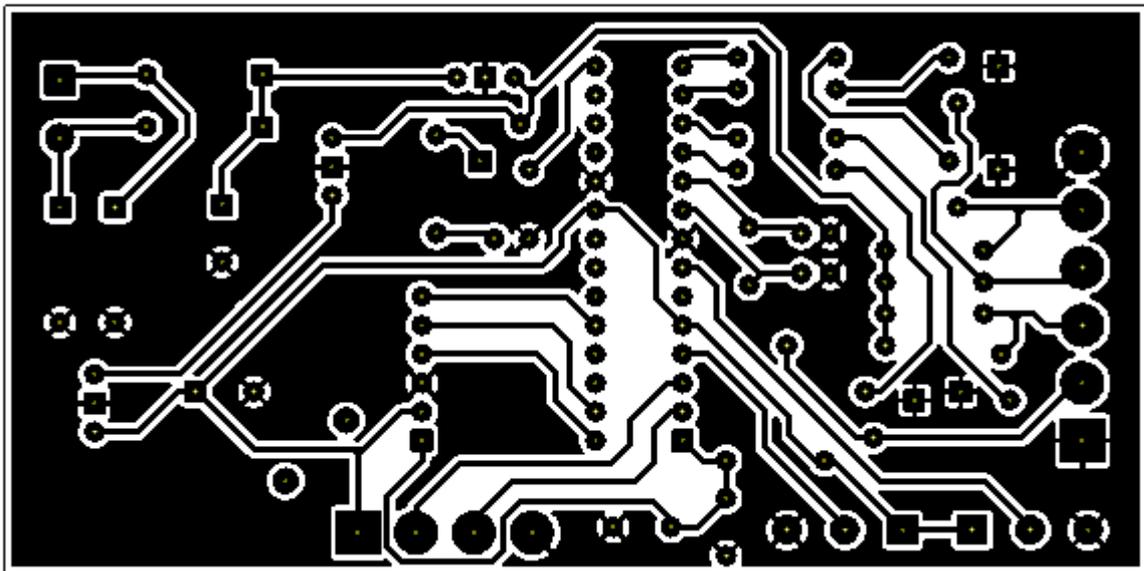
Figura 47: Desenho esquemático do circuito de alimentação do controle do API.



#### 4.2.7 Hardware do Sistema de Controle Completo

O circuito descrito nos subcapítulos anteriores é montado em uma placa de circuito impresso de dimensões 100 mm x 50 mm. O *layout*, desenvolvido no programa KiCad, *software* gratuito e de código aberto desenvolvido por um grupo independente, está mostrado na figura 48, e é replicado em uma placa de fenolite para a soldagem dos componentes.

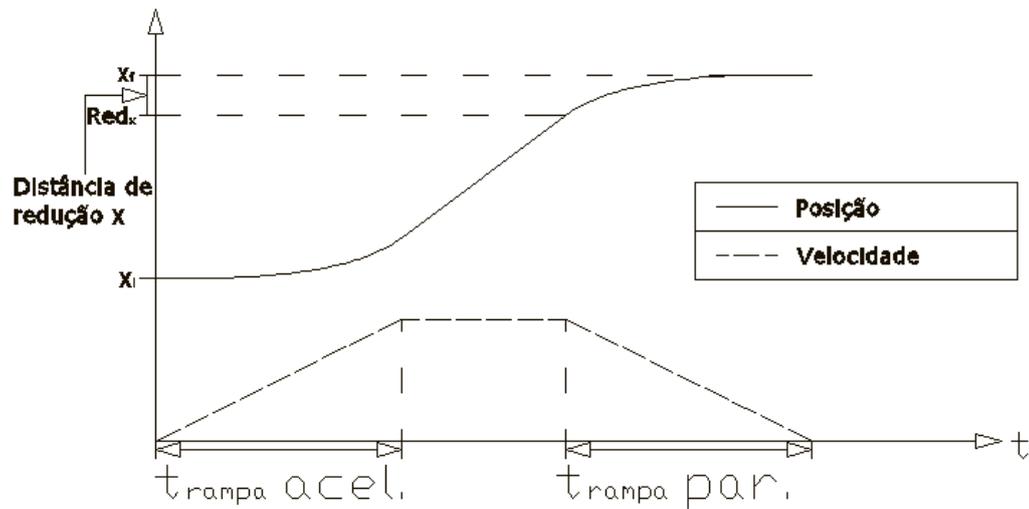
Figura 48: Layout de placa de circuito impresso para o controle do API.



O posicionamento dos componentes sobre a placa está mostrado na figura 49. A conexão aos circuitos externos é realizada através dos quatro conectores mostrados na figura. O conector CONN\_1 recebe o sinal CA que vem do transformador. CONN\_2 recebe os sinais da posição desejada para o atuador, vindos dos dois potenciômetros instalados externamente. Os conectores CONN\_3 e CONN\_4 recebem os sinais com a realimentação da posição do API, vindos dos sensores potenciométricos. CONN\_3 recebe o sinal que representa o eixo X e CONN\_4, o eixo Y. CONN\_5 realiza a interface com os inversores de frequência.

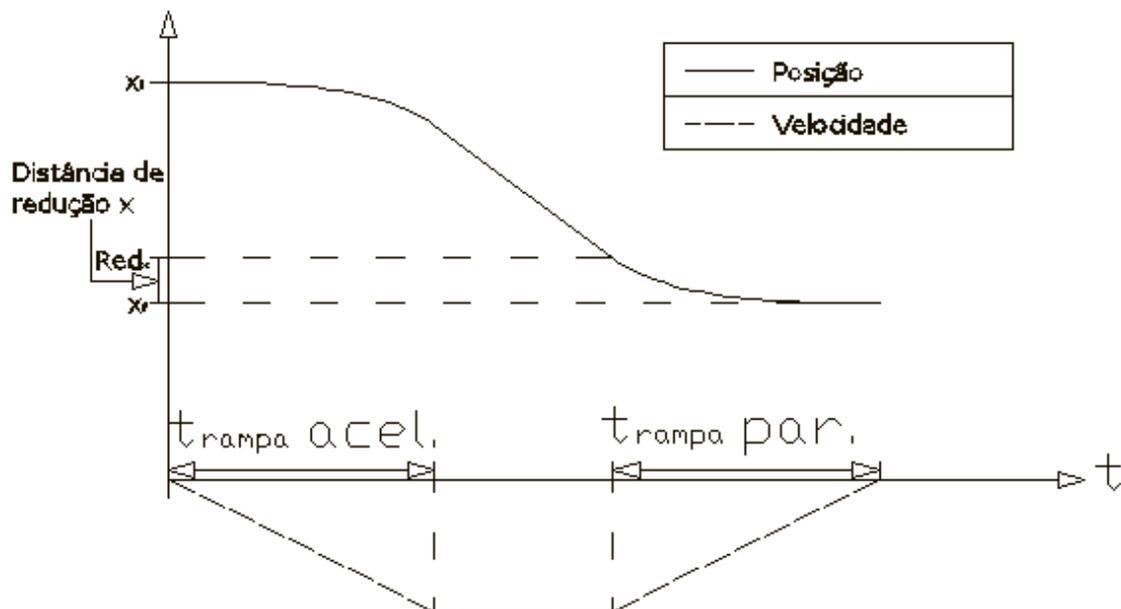


Figura 50: Trajetória desenvolvida pelo API deslocamentos no sentido positivo.



A figura 51 reflete a mesma situação para trajetórias no sentido negativo do eixo  $x$ . O comportamento é semelhante, porém com velocidade e deslocamento negativo. Para trajetórias no eixo  $Y$ , o mesmo comportamento mostrado nas duas figuras é observado.

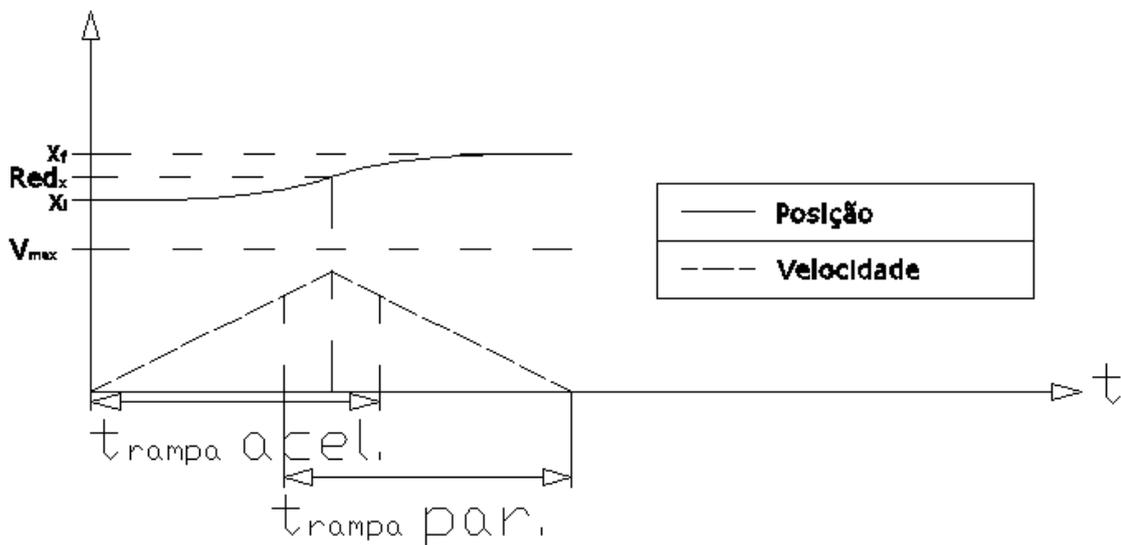
Figura 51: Trajetória desenvolvida pelo API para deslocamentos no sentido negativo.



A figura 52 mostra a trajetória desenvolvida pelo API quando o tempo que o sinal de acionamento do inversor de frequência é menor do que o tempo da rampa de aceleração configurado, ou seja, o API não atinge sua velocidade máxima. Nesse caso, a distância que o

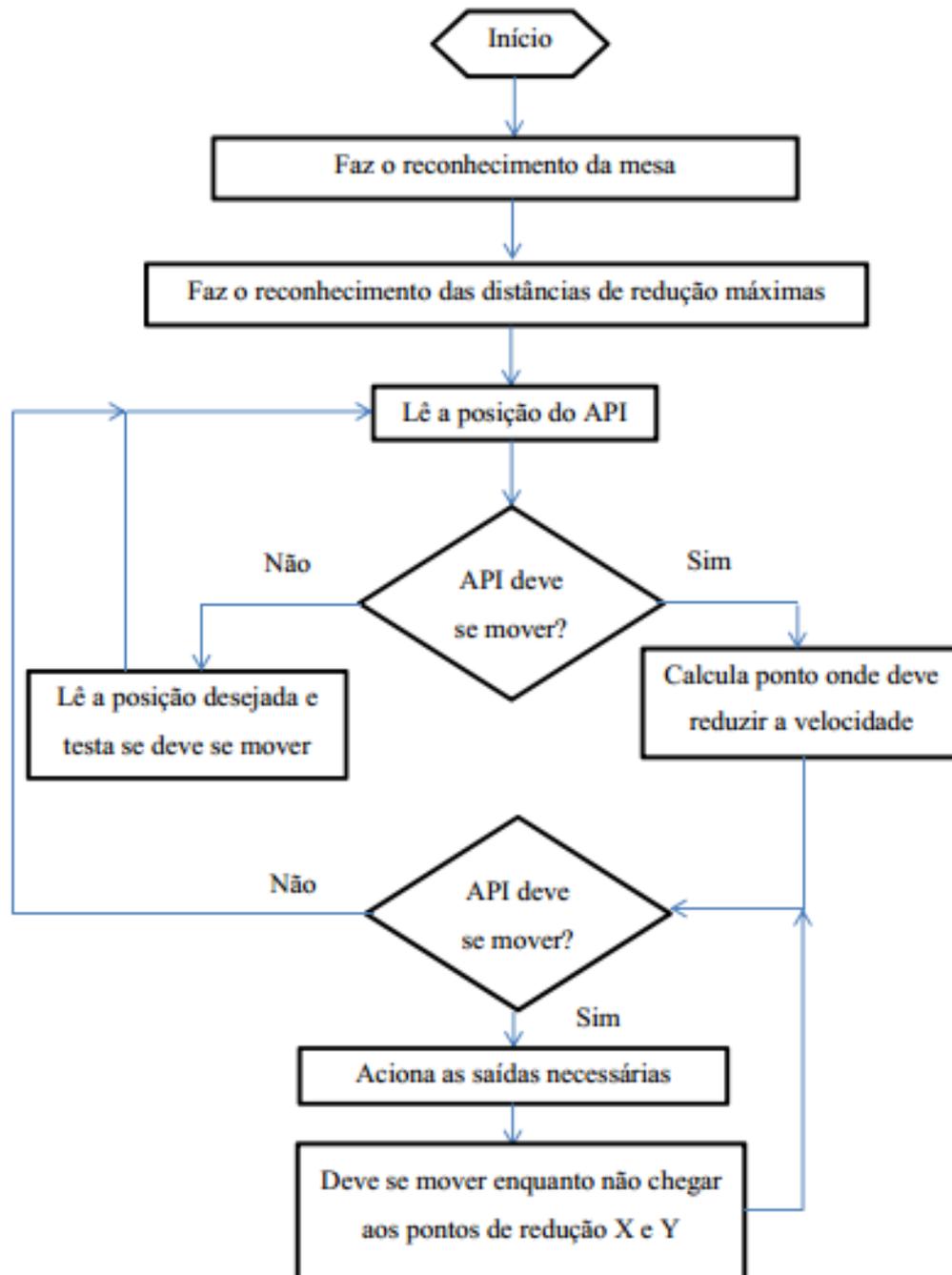
dispositivo percorre após a remoção do sinal é menor do que a distância observada anteriormente, e isto deve ser observado pelo software de controle. Para maior facilidade no desenvolvimento do controle, será assumido que os tempos das rampas de aceleração e de parada são iguais, o que irá garantir que a distância percorrida durante a aceleração é semelhante (idealmente a distância é idêntica) à distância percorrida durante a redução de velocidade até a parada do dispositivo, o que colocará o ponto de redução na posição média entre o ponto inicial e o ponto final.

**Figura 52: Trajetória desenvolvida pelo API para deslocamentos em distâncias pequenas.**



A figura 53 mostra o fluxograma geral do funcionamento do software de controle. Inicialmente, o *software* realiza um reconhecimento da superfície disponível para os deslocamentos. Em seguida, é feito o reconhecimento das distâncias necessárias para a redução de velocidade do API desde a velocidade máxima até o repouso. Isso é feito com a sequência de comandos indicada na tabela 13. Depois de obtidos, estes valores são salvos na memória do processador para utilização durante os deslocamentos posteriores.

Figura 53: Fluxograma com o funcionamento do software de controle de posição do API.



**Tabela 1: Procedimentos para o reconhecimento de parâmetros de operação do API.**

<b>Reconhecimento de limites do API.</b>	
<b>1</b>	Aciona ambos enrolamentos na direção negativa, até que o API pare de se mover. Obtém a posição mínima para $x$ e para $y$ .
<b>2</b>	Aciona o enrolamento $x$ na direção positiva, até que o API pare de se mover. Obtém a posição máxima para $x$ .
<b>3</b>	Aciona o enrolamento $y$ na direção positiva, até que o API pare de se mover. Obtém a posição máxima para $y$ .
<b>4</b>	Retorna com o API para a posição mínima nos dois eixos.
<b>5</b>	Aciona o enrolamento $x$ na direção positiva por um tempo maior do que a rampa configurada, porém não muito grande. A diferença entre a posição do API quando a ordem de parada é enviada e a posição final do API é a distância necessária para a redução de velocidade na direção $x$ .
<b>6</b>	Aciona o enrolamento $y$ na direção positiva por um tempo maior do que a rampa configurada, porém não muito grande. A diferença entre a posição do API quando a ordem de parada é enviada e a posição final do API é a distância necessária para a redução de velocidade na direção $y$ .

Após isso se inicia o ciclo do programa propriamente dito. Esse ciclo se dá basicamente, pela leitura da posição desejada, da posição atual do atuador e a comparação destes dois valores. Se a diferença entre os dois for maior do que uma determinada tolerância, isto significa que o atuador deve se mover, caso contrário o atuador não deve se mover e nenhum sinal é enviado aos inversores.

Caso seja necessário o movimento do atuador, o programa estabelece uma variável que informa isto, uma variável informando a direção do movimento, e procede ao cálculo do ponto onde o sinal de acionamento do inversor deve ser removido, ou ponto de redução ( $Red_x$ ) para que o API pare no ponto desejado. Neste ponto, existem duas possibilidades: a distância entre o ponto inicial e final é maior do que o dobro da distância necessária para a redução da velocidade do API de sua velocidade máxima até o repouso. Neste caso, o ponto de redução é calculado através da equação (34), utilizando o sinal negativo para deslocamentos na direção positiva, e o sinal positivo para deslocamentos na direção negativa. Caso a distância entre o ponto final e inicial seja menor do que o dobro da distância necessária para a redução da velocidade do API de sua velocidade máxima até o repouso, o ponto de redução é obtido através da equação (35).

$$Red_x = x_f \mp d_{red_x} \quad (34)$$

$$Red_x = x_i + \frac{x_i - x_f}{2} \quad (35)$$

Em seguida o *software* verifica a variável que indica a necessidade de movimento, a variável que indica a direção do movimento, e envia os sinais necessários para que o movimento ocorra aos inversores. Os inversores atuam nos enrolamentos do API e o movimento se inicia. Durante o movimento, é feita uma sequência de ciclos onde a posição atualizada do API é obtida, a variável que indica a necessidade de movimento é atualizada, e as saídas da interface com os inversores de frequência são novamente determinadas.

A figura 54 mostra a tabela verdade utilizada durante a atualização da variável que indica a necessidade de movimento, chamada “*Run*”, em função da posição atualizada do API, do ponto de redução da velocidade e da direção do movimento (“0” representa movimento na direção positiva do eixo, “1” representa movimento na direção negativa). O movimento é necessário quando, para deslocamentos na direção positiva, a posição é menor do que o ponto de redução, e para movimentos na direção negativa, a posição é maior do que o ponto de redução. Isto gera a lógica expressa na equação (36).

**Figura 54: Tabela verdade para o sinal "Run".**

Run		Direção	
		0	1
Pos > Red	0	1	0
	1	0	1

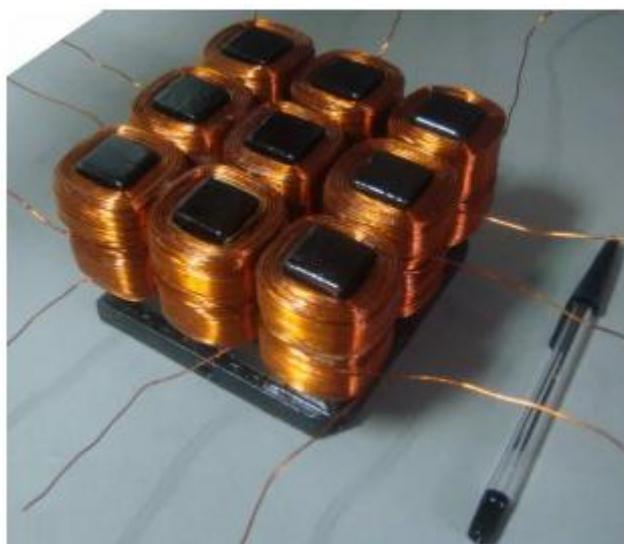
$$Run = Direção \oplus (Posição > Redução) \quad (36)$$

Após a necessidade de movimento cessar, o programa volta ao seu início, onde são feitas leituras para a posição atual, para a posição desejada e sua comparação, e o processo se repete indefinidamente. Todo o programa é executado repetindo sempre cada procedimento em uma variável de controle do eixo *x* para uma variável que corresponde à mesma função no eixo *y*.

## 5. ANÁLISES DOS DADOS OBTIDOS E COMPARAÇÕES

Os dados obtidos e apresentados no capítulo 3 nos permitem agora realizar uma comparação entre as duas topologias já propostas para o API: a topologia estudada por BAGGIO FILHO (2012), a ser referida como “antiga”, e mostrada com alguns detalhes na figura 55, e a topologia tratada por este trabalho, a ser referida como “nova”. Ambas as topologias foram construídas utilizando o mesmo material compósito, porém a topologia antiga apresentada 18 bobinas distribuídas em 9 dentes, com a camada superior contendo apenas bobinas responsáveis pelo movimento na direção X e a camada inferior contendo apenas bobinas responsáveis pelo movimento na direção Y.

**Figura 55: Foto da topologia antiga do API.**



Fonte: BAGGIO FILHO, 2012.

Com relação aos testes da densidade de fluxo magnético no primário do API, a nova topologia mostrou um incremento nos valores observados, já que os valores expostos em BAGGIO FILHO (2012) estavam todos abaixo de 1,0 T, com alguma folga, e os valores atuais chegaram a picos próximos de 1,3 T. Uma possível causa para este comportamento é a diminuição da área da seção transversal dos dentes do API, que obriga o fluxo a concentrar-se em uma região menor.

A densidade de corrente elétrica induzida observada nos testes com a nova topologia é em torno de 3 vezes menor do que a corrente induzida na topologia antiga, utilizando a

mesma configuração de secundário. Por sua vez, a profundidade de penetração da corrente no secundário apresenta comportamento semelhante.

As tabelas a seguir mostram a comparação entre a força de propulsão planar desenvolvida pelo API com o enrolamento X excitado (tabela 14), o enrolamento Y excitado (tabela 15) e ambos os enrolamentos excitados (tabela 16) da topologia nova e da antiga analisada por BAGGIO FILHO (2012). A força resultante foi calculada através da equação (37). Pode-se notar analisando as tabelas que ocorreu uma grande diminuição da força gerada, principalmente a força gerada na direção X, que caiu para menos da metade. Outro fator que pode ser observado é a diferença na força produzida entre a excitação com 45 V e a excitação com 60 V. O aumento de 33% na tensão de alimentação provocou o aumento de 19% na força gerada pela topologia nova, em ambas as direções, enquanto que a topologia antiga aumentou sua força gerada em 20% na direção X e 16% na direção Y.

$$F_r = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \quad (37)$$

**Tabela 2: Comparação entre a força planar das duas topologias do API, apenas enrolamento X excitado.**

V (V)	f (Hz)	F <sub>x</sub> (N)		
		Nova	Antiga	Difer.
45	45	3,57	10,15	-64,8%
48	48	3,72	10,70	-65,2%
51	51	3,87	11,11	-65,2%
54	54	4,00	11,82	-66,2%
57	57	4,13	12,06	-65,8%
60	60	4,25	12,19	-65,1%
<b>Variação entre 45 V e 60 V</b>				
33%	33%	19%	20%	

Fonte: BAGGIO FILHO (2012).

**Tabela 3: Comparação entre a força planar das duas topologias do API, apenas enrolamento Y excitado.**

V (V)	f (Hz)	F <sub>y</sub> (N)		
		Nova	Antiga	Difer.
45	45	3,57	6,32	-43,5%
48	48	3,72	6,72	-44,6%
51	51	3,87	7,06	-45,2%
54	54	4,00	7,09	-43,6%
57	57	4,13	7,14	-42,2%
60	60	4,25	7,31	-41,9%
<b>Variação entre 45 V e 60 V</b>				
33%	33%	19%	16%	

Fonte: BAGGIO FILHO (2012).

**Tabela 4: Comparação entre a força planar das duas topologias do API, ambos enrolamentos excitados.**

<b>V</b>	<b>f</b>	<b>Nova</b>			<b>Antiga</b>			<b>Difer.</b>
		<b>F<sub>x</sub> (N)</b>	<b>F<sub>y</sub> (N)</b>	<b>Fr (N)</b>	<b>F<sub>x</sub> (N)</b>	<b>F<sub>y</sub> (N)</b>	<b>Fr (N)</b>	
<b>45</b>	45	3,40	3,45	4,84	8,53	5,06	9,92	-51,2%
<b>48</b>	48	3,55	3,60	5,06	8,77	5,24	10,22	-50,5%
<b>51</b>	51	3,68	3,74	5,25	9,01	5,36	10,48	-50,0%
<b>54</b>	54	3,81	3,87	5,43	9,30	5,53	10,82	-49,8%
<b>57</b>	57	3,94	4,00	5,61	9,54	5,65	11,09	-49,4%
<b>60</b>	60	4,05	4,11	5,77	9,83	5,77	11,40	-49,4%

Fonte: BAGGIO FILHO (2012).

Pode ser ressaltado também o comportamento oposto entre a força de propulsão planar e a força normal produzidas pelo API. A tabela 17 mostra este contraste para o caso onde ambos os enrolamentos encontram-se excitados. Enquanto a força de propulsão aumenta 19,12 % quando a tensão vai de 45 V a 60 V, a força normal diminui 7,20%.

**Tabela 5: Comparação entre força normal e força planar do API.**

<b>V</b>	<b>f</b>	<b>Comparação</b>	
		<b>Fr (N)</b>	<b>Fn (N)</b>
<b>45</b>	45	4,84	71,09
<b>48</b>	48	5,06	70,06
<b>51</b>	51	5,25	69,03
<b>54</b>	54	5,43	68
<b>57</b>	57	5,61	66,98
<b>60</b>	60	5,77	65,97
<b>Var entre 45 e 60 V:</b>		19,12%	-7,20%

Um ponto que merece destaque é que tanto a análise numérica como a experimental apresentaram assimetria entre as forças na direção X e direção Y quando ambos os enrolamentos encontram-se excitados, mesmo no modelo numérico que reproduz dimensões idênticas com absoluta exatidão. Embora a assimetria seja diferente (nas simulações numéricas a força foi maior na direção Y, enquanto que nos ensaios práticos foi maior na direção X), pode-se dizer que o API apresenta assimetria nas forças mesmo com os enrolamentos igualmente distribuídos nos dentes e camadas do API. Uma razão para esta assimetria pode ter relação com efeitos de extremidade apresentados por este tipo de dispositivo.

## 6. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Iniciando pela revisão bibliográfica foram introduzidos os principais conceitos sobre atuadores lineares, a construção de atuadores planares e os métodos para simulação por elementos finitos. Foi dado foco especial à topologia desenvolvida por DIEDRICH (2013).

A construção do modelo numérico do atuador planar de indução possibilitou a obtenção de uma série de dados para a avaliação do desempenho do atuador planar, importantes para o desenvolvimento de soluções que envolvam o seu uso em aplicações industriais.

Foi verificada a adequação dos dados numéricos e dos dados experimentais obtidos por DIEDRICH (2013), verificando o desempenho do atuador planar para duas faixas de tensão elétrica aplicada nos enrolamentos. A força de propulsão planar e a força normal verificadas nos testes onde apenas um dos enrolamentos é excitado concluem que ambos os enrolamentos estão construtivamente iguais, em oposição ao observado em topologia antiga do atuador.

Os experimentos com excitação de ambos os enrolamentos e por consequência, com a produção de um campo magnético transladante inclinado sob o primário do atuador planar mostrou um pequeno desequilíbrio na produção de força entre a direção X e a direção Y. Os efeitos de extremidades presente neste tipo de dispositivo explicam este fenômeno, e é importante ressaltar que o desequilíbrio entre as forças é muito menor do que o apresentado pela topologia antiga do dispositivo.

Foi também confirmado que a nova topologia do atuador planar de indução desenvolve forças de intensidade menor do que a antiga topologia, proposta por BAGGIO FILHO (2012) e extensamente analisada em sua tese de doutorado. A intensidade da força foi em média perto de 50% menor.

O sistema de controle de posição desenvolvido demonstra uma maneira simples para a utilização do atuador planar de indução em aplicações industriais de posicionamento, como inspeção de chapas de aço ou acesso de uma posição específica.

Uma importante melhoria para o atuador planar seria o desenvolvimento de um sistema para a obtenção da posição do atuador sobre a sua mesa através de uma combinação diferente do sistema de potenciômetros + trilhos. Este sistema apresenta boa resposta em termos de precisão e dinamismo, porém gera resistência mecânica considerável se comparada à intensidade da força produzida pelo atuador planar de indução, além de anular a principal

vantagem do uso de atuadores planares no lugar de arranjos de máquinas rotativas, que é a eliminação da necessidade de uso de engrenagens e polias. Sistemas ópticos, como contagem de pulsos, ou por ultrassom podem ser utilizados.

Os dados numéricos apresentados neste trabalho agregam conhecimento aos estudos existentes envolvendo atuadores planares de indução, e complementam os trabalhos experimentais apresentados por DIEDRICH (2013). Do mesmo modo, o sistema para controle de posição demonstra a viabilidade da aplicação do dispositivo.

## APÊNDICE A – CÓDIGO EM C PARA CONTROLE DE POSIÇÃO DO ATUADOR PLANAR DE INDUÇÃO

```

#IGNORE_WARNINGS 203
#include<16F876A.h>
#device ADC=10//conversao de 10 bits
#use delay(clock=12000000, restart_wdt)

#fuses HS
#fuses NOLVP
#fuses WDT
#fuses NOPROTECT
#fuses NOBROWNOUT
#fuses NOCPD
#fuses NOPUT

/*****
*****      Parâmetros      *****/
*****/

#define T_RAMPA 1000 //tempo da rampa
aceleração, em ms
#define NX 2500 //fator de multiplicação para
que o atuador atinja velocidade maxima
#define NY 2200
#define TADC 80 //tempo de espera pela leitura
analógica
#define ON 0 // Valores para acionar ou nao os
inversores NÃO MEXER, não é esse o problema.
#define OFF 1
#define TIMER 181 //50us por interrup.
#define TOL 8 //tolerancia na posição do carro
#define TSTABLE 2000 //Tempo em ms com para
que comece a andar

#define SX 4 //Pinos onde estão os respectivos
sinais
#define SY 2
#define PY 0
#define PX 1

#define FWX PIN_C0 //Pinos onde estão os
outros respectivos sinais
#define REX PIN_C1
#define FWY PIN_C2
#define REY PIN_C3

#define LED PIN_C4

/*
#rom int8 0x0600 = {0} //Flag de mesa mapeada
#rom int8 0x0601 = {0x0000, 0x0000, 0x0000,
0x0000} //Limites da mesa
#rom int8 0x0605 = {0x0000, 0x0000}
//Distâncias Redução
*/
//write_program_eeprom (address, data)
//value = read_program_eeprom (address)

/*****
***** Decalção de funções *****/
*****/

void map_table();
boolean test_move(boolean Dir);
void reset_var();
void map_reduction(boolean Dire);
void read_pos();
boolean test_mov();
void calc_red();
void pisca();

/*****
***** Decalção de variáveis *****/
*****/

long Count = 0;
int L = 0;
int Tim = TIMER;

unsigned int Sxx;
unsigned int Syy;
unsigned int Pxx;
unsigned int Pyy;
unsigned int Px_old;
unsigned int Py_old;
unsigned int Redx;
unsigned int Redy;
unsigned int D_redx;
unsigned int D_redy;
unsigned int X_min;
unsigned int X_max;
unsigned int Y_min;
unsigned int Y_max;
boolean Runx = 0;
boolean Runy = 0;
boolean Parado;
boolean Readyx;
boolean Readyy;
boolean Firstx;
boolean Firsty;
boolean Run = 0;
boolean Calc;
unsigned int Posy = 0;
unsigned int Posy_ant = 100;
unsigned int Posx = 0;
unsigned int Posx_ant = 100;
signed long Dx = 0;
signed long Dy = 0;
boolean Dirx;
boolean Diry;

```

```

/*****
***** Subfunções *****/
*****/

void map_table() //Faz um quadrado na mesa
para obter as coordenadas dos extremos da mesa
{
boolean Paradox = 0, Paradoy = 0;
reset_var();

//Retorna com o carro até (0,0) e para:
output_bit(REX,ON);
output_bit(REY,ON);
delay_ms(1000);
while (~Paradox||~Paradoy)
{
if (~Paradox)
Paradox = test_move(0);
if (~Paradoy)
Paradoy = test_move(1);
}
Paradox = 0;
Paradoy = 0;
output_bit(REX,OFF);
output_bit(REY,OFF);
X_min = Posx;
Y_min = Posy;
reset_var();
delay_ms(1000);
//Anda até o fim em x
output_bit(FWX,ON);
delay_ms(1000);
while (~Paradox)
{
Paradox = test_move(0);
}
Paradox = 0;
output_bit(FWX,OFF);
X_max = Posx;
reset_var();
delay_ms(1000);
//Anda até o fim em y
output_bit(FWY,ON);
delay_ms(1000);
while (~Paradoy)
{
Paradoy = test_move(1);
}
Paradoy = 0;
output_bit(FWY,OFF);
Y_max = Posy;
reset_var();
delay_ms(1000);
//Completa o quadrado:
output_bit(REX,ON);
delay_ms(1000);
while (~Paradox)
{
Paradox = test_move(0);
}

Paradox = 0;
reset_var();
output_bit(REX,OFF);
delay_ms(1000);
output_bit(REY,ON);
delay_ms(1000);
while (~Paradoy)
{
Paradoy = test_move(1);
}
Paradoy = 0;
reset_var();
output_bit(REY,OFF);
delay_ms(1000);
}

boolean test_move(boolean Dir) //Dir=0 ->x;
Dir=1 ->y
{
unsigned int Diff;

switch(Dir)
{
case 0:
{
Posx_ant = Posx;
set_adc_channel(SX);
delay_us(TADC);
Posx = read_adc();
Diff = abs( (signed long)Posx - (signed long)
Posx_ant);
if (Diff <= TOL)
{
Readyx = Runx;
}
else
{
if (Firstx == 1)
{
Runx = 1;
delay_ms(1024);
}
}
Firstx = 1;
return(Runx&Readyx);
break;
}
case 1:
{
Posy_ant = Posy;
set_adc_channel(SY);
delay_us(TADC);
Posy = read_adc();
Diff = abs( (signed long)Posy - (signed
long)Posy_ant);
if (Diff <= TOL)
{
Readyy = Runy;
}
else

```

```

{
if (Firsty == 1)
{
Runy = 1;
delay_ms(1024);
}
}
Firsty = 1;
return(Runy&Readyy);
break;
}
}
}

void reset_var()
{
Runx = 0;
Runy = 0;
Readyx = 0;
Readyy = 0;
Firstx = 0;
Firsty = 0;
Posx = 0;
Posx_ant = 100;
Posy = 0;
Posy_ant = 100;
}

void map_reduction(int Dire)
{
//Andar o tempo da rampa * N e parar, medir
distância
unsigned int Lock, Stop;
reset_var();

switch(Dire) //0=x; 1=y
{
case 0:
{
output_bit(FWX,ON);
delay_ms(NX);
set_adc_channel(SX);
delay_us(TADC);
Lock = read_adc();

output_bit(FWX,OFF);
do
Parado = test_move(0);
while (~Parado);
delay_ms(2000);
set_adc_channel(SX);
delay_us(TADC);
Stop = read_adc();

D_redx = abs( (signed long)Stop - (signed
long)Lock);
break;
}
case 1:
{
output_bit(FWY,ON);
delay_ms(NY);
set_adc_channel(SY);
delay_us(TADC);
Lock = read_adc();

output_bit(FWY,OFF);
do
Parado = test_move(1);
while (~Parado);
delay_ms(2000);
set_adc_channel(SY);
delay_us(TADC);
Stop = read_adc();

D_redy = abs( (signed long)Stop - (signed
long)Lock);
break;
}
}
}

void read_pos()
{
set_adc_channel(PX);
delay_us(TADC);
Pxx = read_adc();
delay_us(TADC);
set_adc_channel(PY);
delay_us(TADC);
Pyy = read_adc();
delay_us(TADC);
set_adc_channel(SY);
delay_us(TADC);
Syy = read_adc();
delay_us(TADC);
set_adc_channel(SX);
delay_us(TADC);
Sxx = read_adc();
delay_us(TADC);
if (Pxx < X_min+TOL)
Pxx = X_min+TOL;

if (Pxx > X_max-TOL)
Pxx = X_max-TOL;

if (Pyy < Y_min+TOL)
Pyy = Y_min+TOL;

if (Pyy > Y_max-TOL)
Pyy = Y_max-TOL;

Dx = (signed long)Pxx - (signed long)Sxx;
Dy = (signed long)Pyy - (signed long)Syy;
}

boolean test_mov()
{
boolean Mov = 0;

```

```

if ((abs(Dx)>TOL) || (abs(Dy)>TOL))
{
Mov = 1;
}
else
{
Mov = 0;
}
delay_ms(TSTABLE/2);
delay_ms(TSTABLE/2);

read_pos();
if (abs(Px_old-Pxx)<TOL&&abs(Py_old-
Pyy)<TOL)
{
Mov = 0;
}

if (Mov)
{
if ((abs(Dx)>TOL) || (abs(Dy)>TOL))
{
Mov = 1;
Calc = 0;
Runx = (abs(Dx)>TOL);
Runy = (abs(Dy)>TOL);
Px_old = Pxx;
Py_old = Pyy;
}
else
{
Mov = 0;
}
}
return(Mov);
}

void calc_red()
{
//Aqui calcula o ponto de redução
Calc = 1;

if ((Dx > 0)&&(abs(Dx) > (long)2*D_redx))
{
Redx = Pxx - D_redx;
Dirx = 1;
}
else if ((Dx > 0)&&(abs(Dx) <= (long)2*D_redx))
{
Redx = Pxx - Dx/2;
Dirx = 1;
}
else if ((Dx < 0)&&(abs(Dx) > (long)2*D_redx))
{
Redx = Pxx + D_redx;
Dirx = 0;
}
else if ((Dx < 0)&&(abs(Dx) <= (long)2*D_redx))
{
Redx = Pxx - Dx/2;
Dirx = 0;
}
}

//E para y
if ((Dy > 0)&&(abs(Dy) > (long)2*D_redy))
{
Redy = Pyy - D_redy;
Diry = 1;
}
else if ((Dy > 0)&&(abs(Dy) <= (long)2*D_redy))
{
Redy = Pyy - Dy/2;
Diry = 1;
}
else if ((Dy < 0)&&(abs(Dy) > (long)2*D_redy))
{
Redy = Pyy + D_redy;
Diry = 0;
}
else if ((Dy < 0)&&(abs(Dy) <= (long)2*D_redy))
{
Redy = Pyy - Dy/2;
Diry = 0;
}

#INT_TIMER0
void pisca()
{
set_timer0(Tim);
Count++;
restart_wdt();
if (Count == 10000)
{
output_bit(Led,L);
L = ~L;
Count = 0;
}
clear_interrupt(INT_TIMER0);
}

/*****
***** Código *****/
void main()
{
set_tris_a(0xFF);
set_tris_b(0xFF);
set_tris_c(0xE0);

output_bit(REX,OFF);
output_bit(REY,OFF);
output_bit(FWX,OFF);
output_bit(FWY,OFF);

output_bit(LED,OFF); //Led ligado, possui lógica
inversa às saídas

```

```

setup_adc_ports(AN0_AN1_AN2_AN4_VSS_VR
EF); // A0 A1 A2 A4 VRefh=A3
setup_adc(ADC_CLOCK_DIV_2);

setup_timer_0(RTCC_DIV_2);
set_timer0(Tim);

enable_interrupts(GLOBAL);

clear_interrupt(INT_TIMER0);

map_table();
Tim = 250;
output_bit(LED,ON);
delay_ms(1000);
map_reduction(0);
output_bit(LED,OFF);
map_reduction(1);

enable_interrupts(INT_TIMER0);

reset_var();
Tim = TIMER;
read_pos();
Px_old = Pxx;
Py_old = Pyy;

/*****
*****      Loop      *****/
*****/

while(1)
{
read_pos();
Dirx = (boolean)(Dx >= 0);

```

```

Diry = (boolean)(Dy >= 0);

if (!Run)
{
Run = test_mov();
}
else
{
//Em processo de andar, aqui fica o core do codigo
if (Calc==0)
{
calc_red();
}
Runx = (boolean)((abs(Dx))>TOL);
Runy = (boolean)((abs(Dy))>TOL);
while (Run)
{
read_pos();

Runx = ((Dirx ^ (Sxx >= Redx))&&Runx;
Runy = ((Diry ^ (Syy >= Redy))&&Runy;

output_bit(FWX, !(Dirx&&Runx));
output_bit(FWY, !(Diry&&Runy));
output_bit(REX, (Dirx||!Runx));
output_bit(REY, (Diry||!Runy));

Run = (Runx||Runy);
}
}
Calc = 0;
}
}
disable_interrupts(INT_TIMER0);
}

```

## REFERÊNCIAS

- BAGGIO FILHO, N. F. **Estudo de um Atuador Planar de Indução**. 249 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.
- BATHWICK ELECTRICAL DESIGN LTD. **EFFE V2.0 User Manual**. Bath, UK, October 5<sup>th</sup> 2010.
- CHAPMAN, S. J. **Electric Machinery Fundamentals**. Second Edition. New York: Mcgraw-Hill College, 1991.
- DIEDRICH, V. H. **Desenvolvimento de uma Nova Topologia de Carro Primário de Atuador Planar de Indução**. (Projeto de Diplomação) – Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2013.
- FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY Jr, C.; UMANS, S. D. **Máquinas Elétricas: com introdução à eletrônica de potência**. 6<sup>a</sup> ed. Porto Alegre: Editora Boolman, 2006.
- FLORES FILHO, A. F. **Aplicação do Método dos Elementos Finitos à Análise de Dispositivos Eletromagnéticos**. LMEAE/ PPGEE/ EE/ UFRGS, 2011.
- GIERAS, J. F. **Linear Induction Drivers**. New York: Oxford University Press, 1994.
- JANSSON, P. **Advances in Soft Magnetic Composites Based in Iron Powder**. Sweden, Höganäs AB. In: SOFT MAGNETIC MATERIAL CONFERENCE, 1998, Barcelona.
- 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, 122f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, UNICAMP, Campinas, 2003.
- MICROCHIP. **PIC16F87XA Data Sheet 28/40/44-Pin Enhanced Flash Microcontroller**. 2003, Microchip Technology Incorporated, U.S.A., 2003.
- NASAR, S. A.; BOLDEA, I. **Linear Electric Motor: Theory, Design and Applications**. New Jersey, Englewood Cliffs, Prentice Hall, 1987.
- NOGUEIRA, A. F. L. **Computation of Cogging Torques in Permanent-Magnet Machines Using the Finite Element Method**, Ph.D thesis, University of Wales, 1992.
- SEW-EURODRIVE. **Movitrac LT E (Versão B). Instruções de Operação**. Edição 01/2008.
- SILVEIRA, M. A. **Estudo de um Atuador Planar**. Tese (Doutorado), Programa de Pós Graduação em Engenharia Minas, Metalúrgica e Materiais, Porto Alegre, UFRGS, 2003.
- YAMAMURA, S. **Theory of Linear Induction Motors**. New York: John Wiley and Sons, 1972.