

MAURÍCIO OKAMURA OKUYAMA  
RAFAEL ASSANO

**PROJETO DE GERADOR ELÉTRICO LINEAR PARA  
APROVEITAMENTO DA ENERGIA DE ONDAS MARÍTIMAS**

Trabalho realizado para obtenção do título de  
Graduado em Engenharia de Energia e  
Automação Elétricas na Escola Politécnica da  
USP.

São Paulo  
2013

MAURÍCIO OKAMURA OKUYAMA  
RAFAEL ASSANO

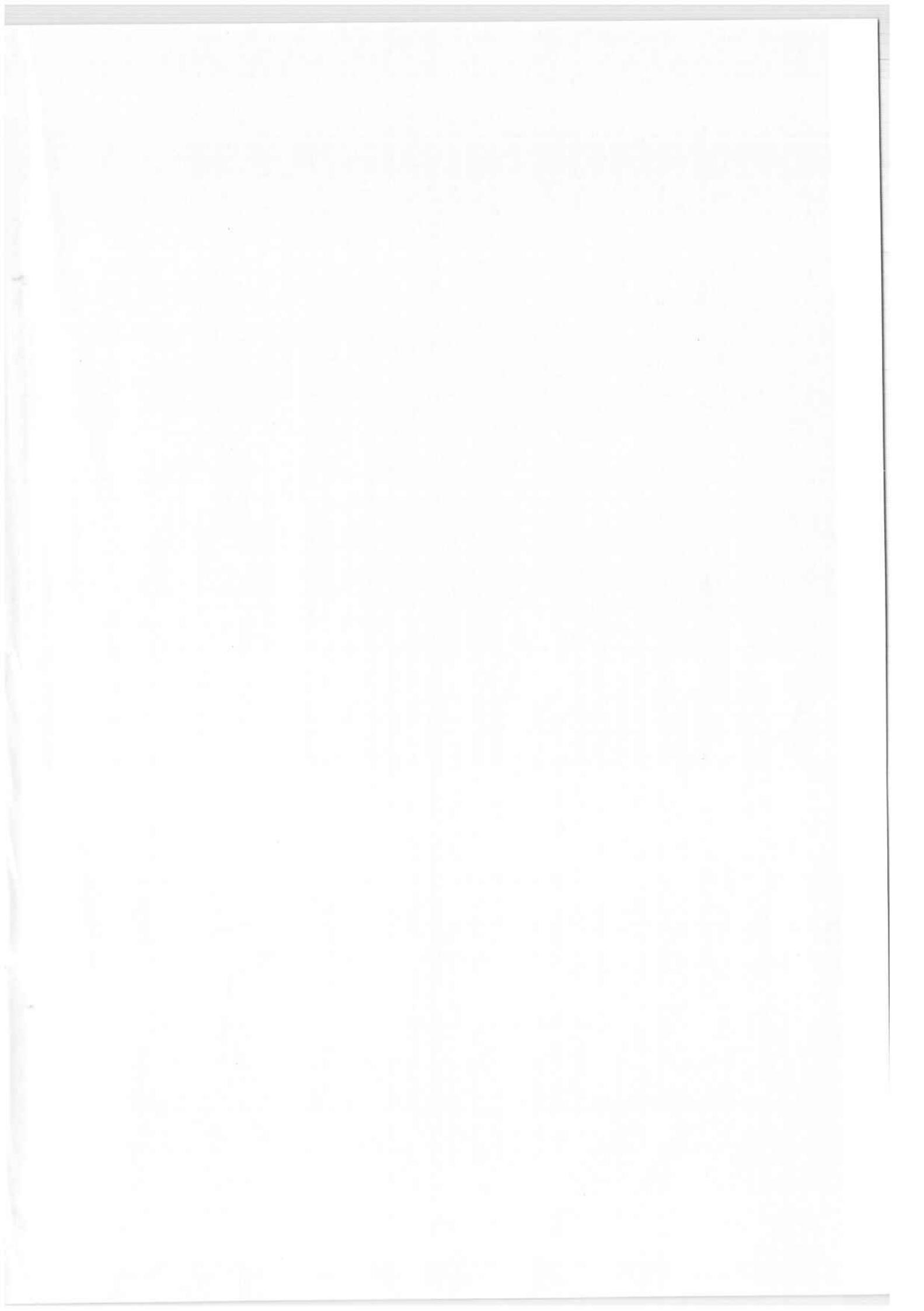
**PROJETO DE GERADOR ELÉTRICO LINEAR PARA  
APROVEITAMENTO DA ENERGIA DE ONDAS MARÍTIMAS**

Trabalho realizado para obtenção do título de  
Graduado em Engenharia de Energia e  
Automação Elétricas na Escola Politécnica da  
USP.

Orientador: Prof. Dr. Ivan Eduardo Chabu  
Coordenador: Prof. Dr. Lourenço Matakas Júnior

Área de Concentração: Máquinas Elétricas

São Paulo  
2013



## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à Escola Politécnica da USP e aos professores envolvidos em minha formação, por todo o conhecimento, a capacitação e a orientação concedidos a mim ao longo da minha graduação. Agradeço principalmente ao Prof. Dr. Ivan Chabu, orientador do projeto, pela paciência, comprometimento e dedicação, atributos que foram fundamentais para a concretização do trabalho.

Também agradeço à Equacional Elétrica e Mecânica Ltda. que, por meio das orientações do Prof. Chabu, forneceu as peças e os componentes necessários para a construção do protótipo projetado.

Agradeço ao meu amigo Rafael Assano, coautor do projeto, por ter aceitado esse desafio e por ter persistido até o fim para que o trabalho fosse bem sucedido.

Por fim, envio meus agradecimentos à minha família, principalmente aos meus pais, por todo o apoio incondicional e por toda a dedicação empregada para que eu tivesse uma educação de qualidade.

**Maurício Okuyama**

Agradeço aos professores que se envolveram direta ou indiretamente nesse trabalho, em especial ao nosso orientador Prof. Dr. Ivan Chabu, que em nenhum momento mostrou não ter as qualidades pelas quais já é amplamente conhecido nos corredores da Engenharia Elétrica, e também ao Prof. Dr. Lourenço Matakas Jr. e ao Prof. Dr. Walter Kaiser que também contribuíram para o sucesso desse projeto.

Agradeço à Equacional Elétrica e Mecânica Ltda., grande responsável por fazer com que nosso projeto saísse apenas do papel.

Agradeço aos meus pais e amigos pelo apoio incondicional.

Agradeço ao coautor Maurício Okuyama pela convivência nessa fase final de formação.

**Rafael Assano**

## RESUMO

O trabalho descrito neste documento consiste no projeto, na construção e em testes de um protótipo de gerador linear síncrono de ímãs permanentes, cuja estrutura pode ser utilizada para gerar energia elétrica aproveitando-se a energia mecânica de ondas marítimas.

A partir da análise de concepções de geradores lineares existentes e do estudo de modelos eletromagnéticos, desenvolveu-se uma máquina cuja estrutura interna possibilita a geração de formas de onda de tensão com baixo conteúdo harmônico e a minimização de forças parasitas, pois geradores lineares geralmente apresentam características indesejáveis em relação aos dois quesitos mencionados.

O protótipo projetado foi construído e testado, a fim de se validar o comportamento previsto por modelos físico-matemáticos. O objetivo do trabalho se resume em desenvolver um projeto que possa ser utilizado como base para atividades acadêmicas futuras, contribuindo para que a aplicação estudada se torne técnica e economicamente viável.

**Palavras-chave:** gerador linear, energia das ondas, máquina de ímãs permanentes, protótipo de máquina elétrica, geração de energia elétrica.

## **ABSTRACT**

*The project described in this document consists of the design, the assembly and tests of a permanent magnet linear synchronous generator prototype, whose structure can be used to generate electric power from the kinetic energy of sea waves.*

*Distinct concepts of existing linear generators and electromagnetic models were studied, thereby a machine, whose internal structure enables the formation of voltage waveforms with low harmonic content and the minimization of cogging forces, was developed. Linear generators usually show undesirable characteristics concerning their produced forces. This phenomenon was therefore carefully studied in the project.*

*The designed prototype was assembled and tested, in order to validate the behavior foreseen by physical and mathematical models. In sum, the aim of the proposed work was to develop a project which could be used as a basis for future academic activities, supporting a potential technical and economic feasibility of the application.*

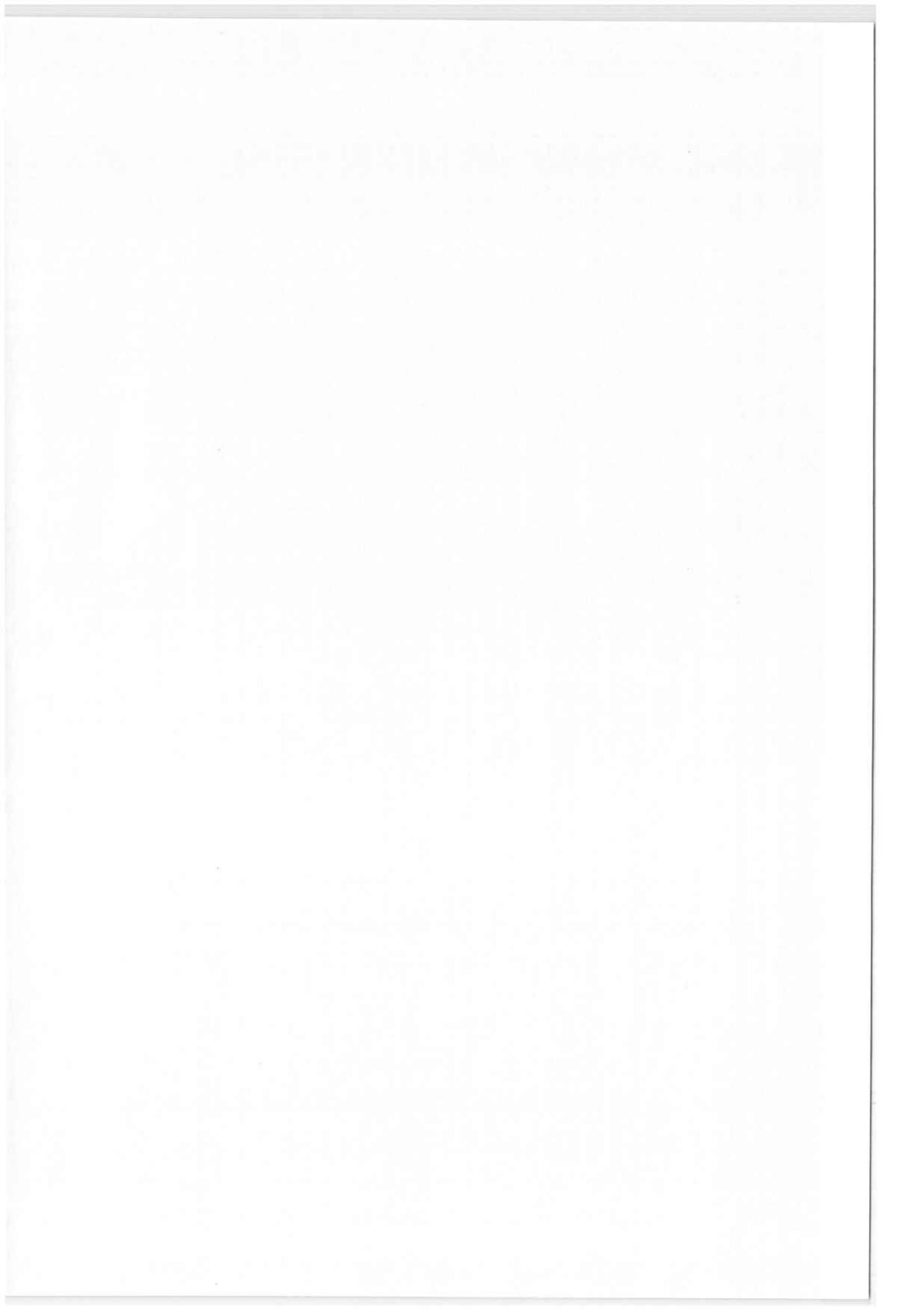
**Key words:** *linear generator, wave energy, permanent magnets machine, electrical machine prototype, electric power generation.*

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Distribuição mundial da densidade energética das ondas [3] .....	2
Figura 1.2 – Representação de um gerador elétrico linear de ímãs permanentes [4] .....	3
Figura 3.1 – Tipos de conversores de energia das ondas do mar [5].....	10
Figura 3.2 – Conversor AWS [5].....	10
Figura 3.3 – Gerador linear tubular [6].....	12
Figura 3.4 – Gerador linear plano [5].....	12
Figura 3.5 – Estrutura unilateral [7].....	13
Figura 3.6 – Estrutura bilateral [7].....	13
Figura 3.7 – Disposição dos ímãs no indutor (transladador) do gerador linear [8] .....	14
Figura 4.1 – Disposição dos ímãs no indutor (transladador) do gerador linear [9] .....	15
Figura 6.1 – Corte transversal do gerador linear idealizado e representação de suas medidas .....	20
Figura 6.2 – Representação das linhas de campo magnético do gerador .....	20
Figura 6.3 – Corte transversal do estator.....	23
Figura 6.4 – Ponto magnético de operação de um gerador de ímãs permanentes .....	26
Figura 7.1 – Circuito elétrico equivalente do gerador linear.....	29
Figura 8.1 – Corte transversal do gerador linear projetado e seus valores em mm .....	39
Figura 8.2 – Circuito equivalente do gerador com valores dos parâmetros (5,5 Hz, 20º C) .....	44
Figura 9.1 – Forma de onda da tensão induzida (tensão em vazio) modulada em uma fase .....	48
(Tensão em volts [V] e Tempo em segundos [s]).....	48
Figura 9.2 – Formas de onda da tensão trifásica induzida modulada .....	48
Figura 10.1 – Área de trabalho no FEMM .....	49
Figura 10.2 – Definição do problema .....	50
Figura 10.3 – Fronteiras do problema .....	51
Figura 10.4 – Definição das fronteiras .....	51
Figura 10.5 – Desenho dos componentes .....	52
Figura 10.6 – Definição dos materiais .....	52
Figura 10.7 – Resultado final da construção .....	53
Figura 10.8 – Mapa de distribuição do campo magnético .....	54
Figura 10.9 – Escala da distribuição do campo magnético.....	54
Figura 11.1 – CAD do ímã anelar de ferrite.....	58
Figura 11.2 – CAD da sapata polar do transladador.....	58
Figura 11.3 – CAD da lâmina do estator.....	59
Figura 11.4 – Vista frontal das lâminas dispostas formando o estator .....	59

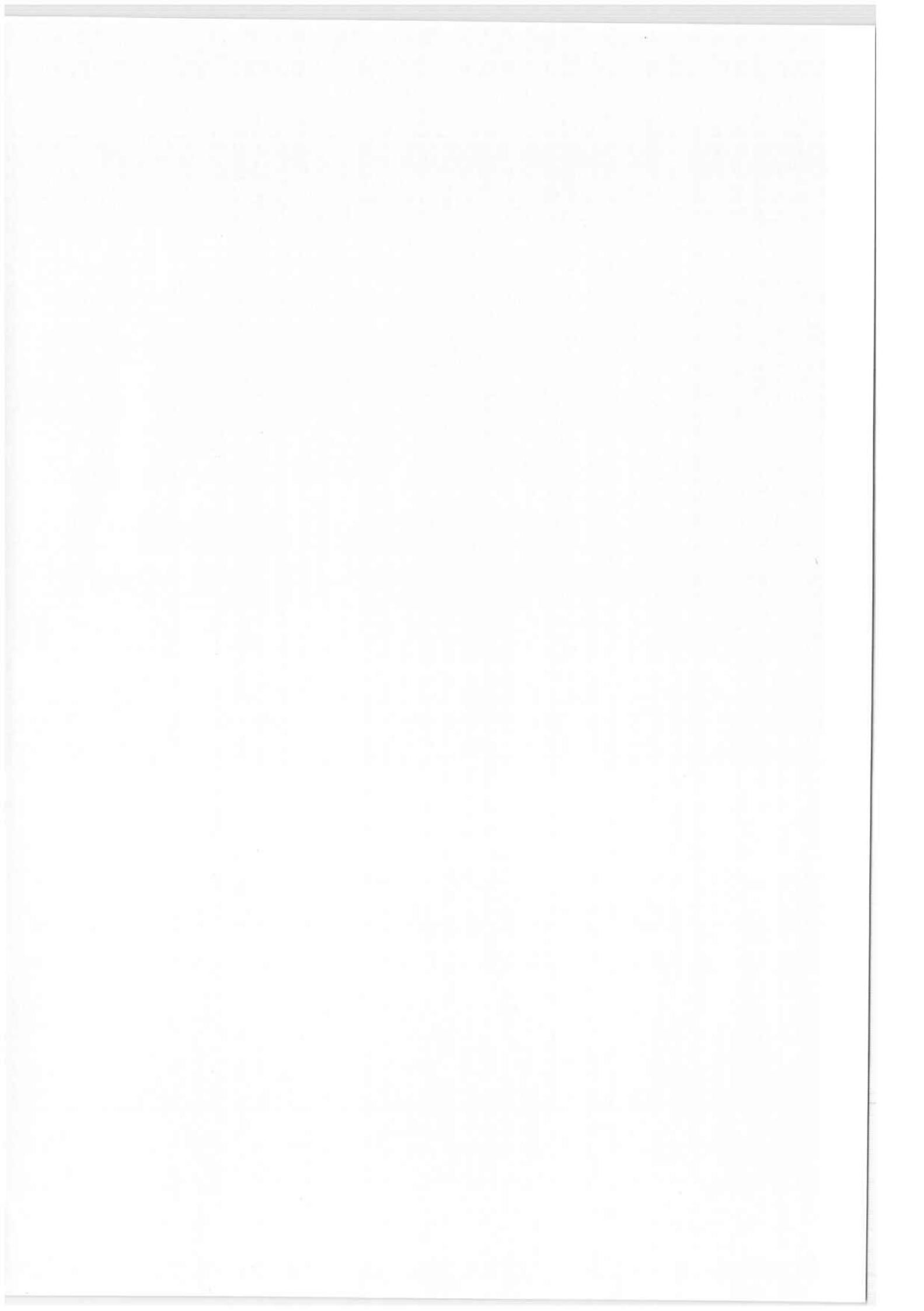
(à esquerda, a concepção implementada; à direita, uma alternativa) .....	59
Figura 11.5 – CAD da parte eletromagnética do gerador montada.....	59
Figura 11.6 – CAD da bobina estatórica (representação).....	60
Figura 11.7 – Representação da bobina montada na ranhura do estator .....	60
Figura 11.8 – Vista lateral da estrutura de suporte do protótipo (apenas em uma extremidade) .....	61
Figura 11.9 – Vista frontal dos flanges da estrutura de suporte .....	61
Figura 11.10 – CAD do mancal linear.....	62
Figura 11.11 – CAD do eixo do transladador.....	62
Figura 11.12 – Vista lateral do protótipo de gerador linear (na vertical) .....	63
Figura 11.13 – Esquema de inclinação das sapatas polares .....	64
Figura 11.14 – Aspecto atualizado da sapata polar.....	65
Figura 11.15 – Aspecto geral atualizado do protótipo .....	66
Figura 12.1 – Foto da bobina (vista frontal).....	67
Figura 12.2 – Foto da bobina (vista lateral) .....	67
Figura 12.3 – Foto das lâminas do estator .....	68
Figura 12.4 – Foto do eixo do transladador .....	68
Figura 12.5 – Foto das sapatas polares.....	68
Figura 12.6 – Foto do detalhe construtivo das sapatas polares .....	68
Figura 12.7 – Foto do ímã (vista frontal) .....	69
Figura 12.8 – Foto do ímã (vista lateral) .....	69
Figura 12.9 – Foto do mancal linear (vista frontal) .....	69
Figura 12.10 – Foto do mancal linear (vista lateral) .....	69
Figura 12.11 – Foto da estrutura de suporte .....	70
Figura 12.12 – Foto da estrutura de suporte (vista frontal) .....	70
Figura 12.13 – Foto do papel isolante .....	71
Figura 12.14 – Foto das tiras de material isolante.....	71
Figura 12.15 – Foto das bobinas encaixadas em alguns pentes do estator.....	71
Figura 12.16 – Esquema de ligação série das bobinas (ligação em estrela).....	72
Figura 12.17 – Processo de montagem das lâminas do estator .....	73
Figura 12.18 – Inserção das tiras entre as lâminas do estator .....	73
Figura 12.19 – Foto do estator (vista frontal).....	74
Figura 12.20 – Foto do estator (vista lateral) .....	74
Figura 12.21 – Foto do estator com bobinas da fase A conectadas .....	74
Figura 12.22 – Foto do estator completo .....	75
Figura 12.23 – Foto do transladador em processo de montagem .....	76
Figura 12.24 – Foto do transladador completo .....	76

Figura 12.25 – Processo de montagem do gerador na estrutura de suporte .....	77
Figura 12.26 – Foto do gerador linear montado.....	77
Figura 13.1 – Vista lateral do sistema de acionamento do gerador .....	80
Figura 13.2 – Vista frontal da estrutura de fixação do gerador.....	80
Figura 13.3 – Fotos do protótipo montado com a estrutura de acionamento .....	81
Figura 13.4 – Tensões de fase (trifásico) em vazio (5 V/div; 100 ms/div) .....	83
Figura 13.5 (A) – Tensão na fase A em vazio (100 ms/div) .....	83
Figura 13.5 (B) – Tensão na fase A em vazio (250 ms/div) .....	84
Figura 13.6 – Tensões de fase em carga (5 V/div; 100 ms/div) .....	85
Figura 13.7 (A) – Tensão na fase C em carga (100 ms/div) .....	85
Figura 13.7 (B) – Tensão na fase C em carga (250 ms/div) .....	86
Figura 13.8 – Potência na fase C em watts [W] (1 ciclo).....	87
Figura 13.9 – Tensão em vazio na fase C para <i>fonda</i> = 1,2 Hz (5 V/div; 250 ms/div) .....	87
Figura 13.10 – Tensão em vazio na fase C para <i>fonda</i> = 0,8 Hz (5 V/div; 250 ms/div) .....	88
Figura 13.11 – Ilustração das ondulações causadas pelas vibrações do sistema mecânico.....	89
Figura 13.12 – Ilustração da diferença entre os níveis de tensão dos semiciclos .....	89
Figura 13.13 – Ilustração dos espaços por onde saem os terminais dos enrolamentos .....	91
Figura 13.14 – Representação das linhas de campo de dispersão entre sapatas polares.....	92



## LISTA DE TABELAS

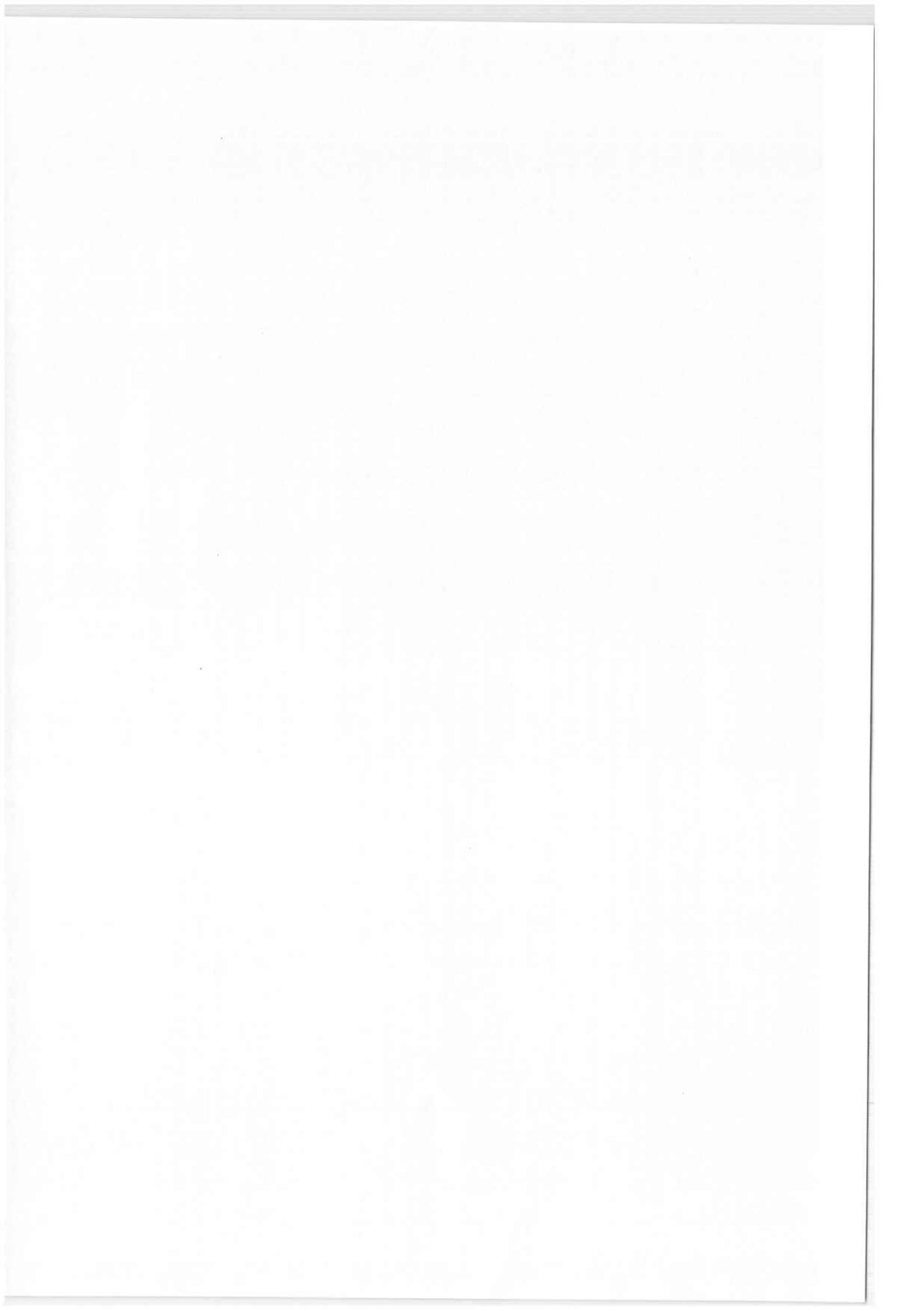
Tabela 5.1 – Lista de ímãs cotados no mercado (Abril/2013) .....	18
Tabela 8.1 – Grandezas arbitradas no projeto eletromagnético do protótipo .....	37
Tabela 8.2 – Dimensões do ímã de ferrite escolhido.....	38
Tabela 8.3 – Dimensões do protótipo calculadas.....	38
Tabela 8.4 – Grandezas magnéticas calculadas.....	40
Tabela 8.5 – Grandezas definidas para o cálculo do número de espiras por bobina .....	41
Tabela 8.6 – Grandezas definidas para a determinação do fio das bobinas .....	42
Tabela 8.7 – Grandezas definidas para o cálculo da resistência de armadura.....	42
Tabela 8.8 – Grandezas definidas para o cálculo da reatância de armadura.....	42
Tabela 8.9 – Potências de saída estimadas.....	43
Tabela 9.1 – Valores utilizados para validação da forma de onda da tensão induzida modulada .....	47
Tabela 10.1 – Dados para comparação entre Excel e FEMM.....	55
Tabela 12.1 – Materiais dos componentes do gerador .....	67
Tabela 13.1 – Valores aplicados ao acionamento nos ensaios principais do protótipo .....	82
Tabela 13.2 – Valores máximos das tensões de fase em vazio .....	84
Tabela 13.3 – Valores máximos das tensões de fase em carga de $10 \Omega$ .....	86

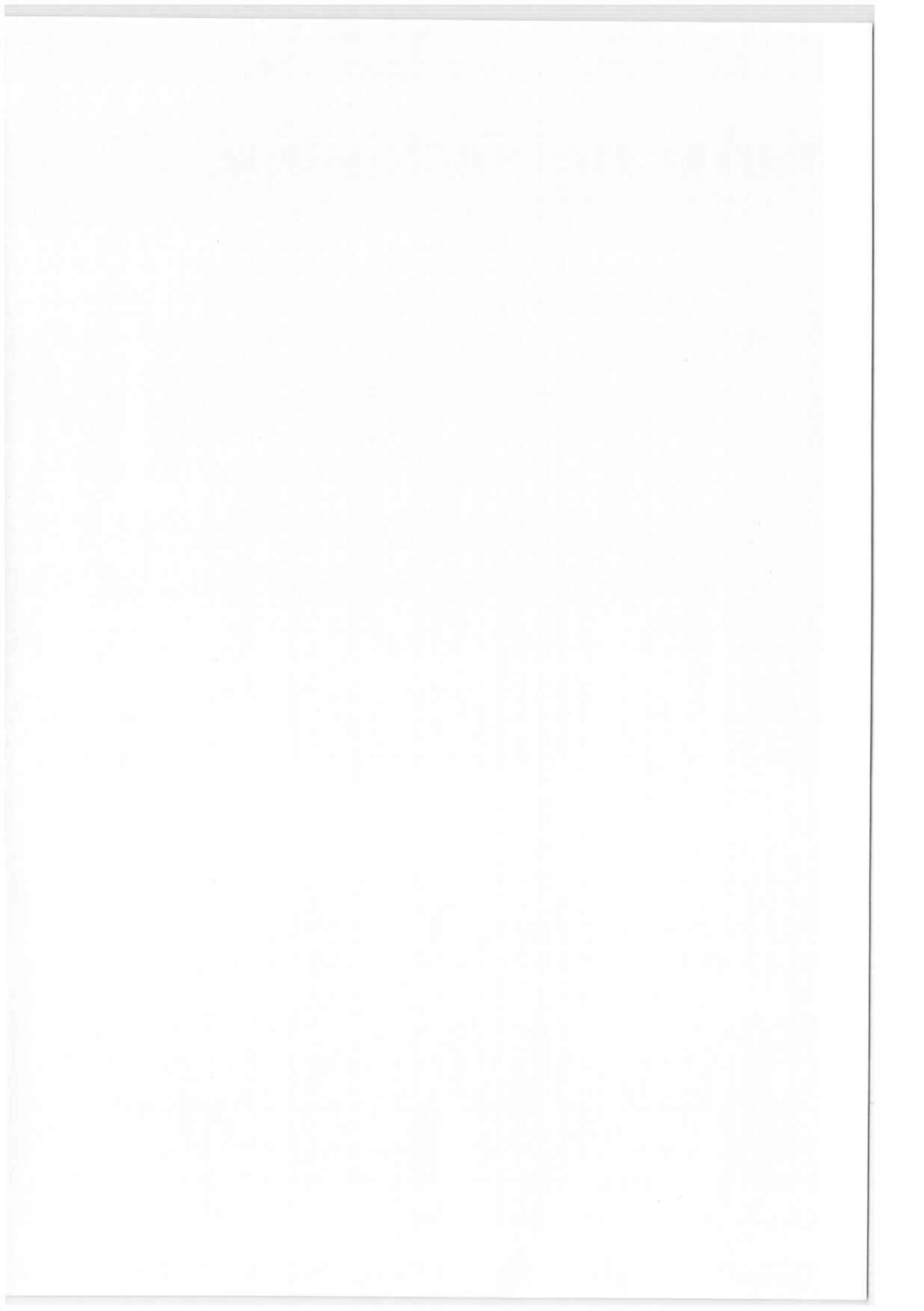


# SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 A MOTIVAÇÃO PARA O PROJETO.....	2
1.2 RESUMO DO PROJETO.....	3
<b>2 ESTRUTURA E ORGANIZAÇÃO DO PROJETO .....</b>	<b>5</b>
2.1 ESTRUTURA E MÉTODOS DE TRABALHO.....	5
2.2 PLANO DE ATIVIDADES DO PROJETO .....	6
2.2.1 Pacotes de trabalho do primeiro semestre.....	7
2.2.2 Pacotes de trabalho do segundo semestre.....	8
2.3 CRONOGRAMA .....	8
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>9</b>
3.1 CONVERSÃO DE ENERGIA DAS ONDAS MARÍTIMAS.....	9
3.2 GERADOR LINEAR SÍNCRONO.....	11
3.3 CONCEPÇÕES DE GERADOR LINEAR.....	11
3.2.1 Estrutura plana ou tubular.....	11
3.2.2 Estrutura plana unilateral ou bilateral.....	13
3.2.3 Ímãs com polos alinhados axialmente ou radialmente (transversalmente).....	14
3.2.4 Métodos de excitação de geradores lineares.....	14
<b>4 IDEALIZAÇÃO E CONCEPÇÃO DO MODELO DE GERADOR LINEAR .....</b>	<b>15</b>
<b>5 COTAÇÃO E ESCOLHA DE ÍMÃS PERMANENTES .....</b>	<b>17</b>
<b>6 ESTUDO MAGNÉTICO DO GERADOR LINEAR.....</b>	<b>19</b>
6.1 DETERMINAÇÃO DAS DIMENSÕES FÍSICAS (MECÂNICAS) DO GERADOR ...	19
6.1.1 Seção transversal do ímã ( <i>Símã</i> ) .....	21
6.1.2 Fluxo magnético por polo ( $\phi_p$ ).....	21
6.1.3 Largura da base da sapata polar ( <i>bcp</i> ) .....	21
6.1.4 Passo polar ( $\tau_p$ ).....	22
6.1.5 Campo magnético no entreferro ( $B_{g,p}$ ) .....	22
6.1.6 Campo magnético no dente do estator ( $B_{ds}$ ).....	23
6.1.7 Campo magnético na coroa do estator ( $B_{cs}$ ) .....	24
6.2 DETERMINAÇÃO DAS GRANDEZAS MAGNÉTICAS DE OPERAÇÃO .....	24
<b>7 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS ELÉTRICOS DO GERADOR LINEAR .....</b>	<b>29</b>
7.1 NÚMERO DE ESPIRAS POR BOBINA ( $N_b$ ) .....	30
7.2 DETERMINAÇÃO DO CONDUTOR ( $S_c$ ) E DA CORRENTE NOMINAL ( $I_N$ ).....	32
7.3 RESISTÊNCIA DE ARMADURA POR FASE ( $r_f$ ).....	34

7.4	REATÂNCIA SÍNCRONA DE ARMADURA POR FASE ( $x_s$ ).....	34
<b>8</b>	<b>PROJETO ELETROMAGNÉTICO E DIMENSIONAMENTO DO PROTÓTIPO .....</b>	<b>37</b>
8.1	DIMENSÕES FÍSICAS E GRANDEZAS MAGNÉTICAS DE OPERAÇÃO .....	37
8.2	PARÂMETROS ELÉTRICOS E CARACTERÍSTICA EXTERNA DO GERADOR ...	40
8.2.1	Número de espiras por bobina ( $N_b$ ).....	40
8.2.2	Seção do condutor ( $S_c$ ) e corrente nominal ( $I_N$ ) .....	41
8.2.3	Resistência de armadura por fase ( $r_f$ ) .....	42
8.2.4	Reatância de armadura por fase ( $x_s$ ).....	42
8.2.5	Potência de saída nominal.....	43
<b>9</b>	<b>ANÁLISE DA MODULAÇÃO DE TENSÃO GERADA PELAS ONDAS DO MAR .....</b>	<b>45</b>
<b>10</b>	<b>SIMULAÇÃO DO CIRCUITO MAGNÉTICO EM SOFTWARE.....</b>	<b>49</b>
<b>11</b>	<b>PROJETO MECÂNICO DO PROTÓTIPO .....</b>	<b>57</b>
11.1	CONCEPÇÃO DA ESTRUTURA MECÂNICA EXTERNA DO GERADOR.....	57
11.2	DESENHO DOS COMPONENTES DO PROTÓTIPO (CAD).....	57
11.3	REVISÃO E ATUALIZAÇÃO DOS DESENHOS DAS PEÇAS DO PROTÓTIPO ...	64
<b>12</b>	<b>CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO DE GERADOR LINEAR .....</b>	<b>67</b>
12.1	FABRICAÇÃO DOS COMPONENTES .....	67
12.2	MONTAGEM DO PROTÓTIPO .....	71
<b>13</b>	<b>TESTES E ENSAIOS DO PROTÓTIPO DE GERADOR LINEAR .....</b>	<b>79</b>
13.1	ESTRUTURA PARA ACIONAMENTO DO GERADOR.....	79
13.2	ENSAIOS DO PROTÓTIPO.....	82
13.2.1	Ensaio em vazio .....	82
13.2.2	Ensaio em carga ( $10 \Omega$ ) .....	85
13.2.3	Formas de onda para diferentes frequências.....	87
13.3	ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS.....	88
13.3.1	Forma de onda .....	88
13.3.2	Tensão na fase A.....	90
13.3.3	Níveis de tensão gerados .....	90
13.3.3.1	Volume de ar entre as lâminas do estator.....	91
13.3.3.2	Fluxo magnético de dispersão entre sapatas polares .....	92
13.3.3.3	Tensão induzida teórica corrigida .....	93
13.3.4	Reatância síncrona corrigida .....	94
<b>14</b>	<b>CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>95</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>		<b>97</b>
<b>REFERÊNCIAS COMPLEMENTARES .....</b>		<b>99</b>





## 1 INTRODUÇÃO

A busca por novas fontes de energia para suprir não somente a crescente demanda, mas também como alternativa às fontes altamente poluidoras e não renováveis de energia, leva a se pensar em toda e qualquer forma de se extrair energia da natureza. Segundo estimativas do Plano Decenal de Expansão de Energia, o consumo total de eletricidade no Brasil passará de 500 TWh em 2012 para 774 TWh em 2021, o que significa um crescimento médio de 4,9% ao ano no período de 2011 a 2021 [1]. As formas mais comuns de exploração de energia consideradas de baixo impacto ambiental são a eólica, a hidráulica e a solar. No entanto, há uma fonte que se enquadra nesse quesito e ainda é pouco explorada, a energia proveniente do mar.

As formas de energia encontradas no mar estão armazenadas nas seguintes formas [2]:

- Marés: A interação dos campos gravitacionais da lua e do sol com a Terra origina as marés. As diferenças na altura d'água entre a maré alta e a maré baixa criam altura de queda suficiente para que turbinas sejam ativadas.
- Correntes Marítimas: Gradientes de temperatura e salinidade e a ação das próprias marés criam correntes marítimas, cuja energia cinética pode ser aproveitada para gerar energia.
- Ondas: A formação de ondas ocorre pela ação do vento que incide na superfície dos oceanos.

A exploração da energia proveniente das ondas, foco do trabalho, pode ocorrer de três formas:

- *Onshore*: Equipamentos de geração são fixos em terra.
- *Nearshore*: Geração próxima à costa, em águas cuja profundidade varia de 20m a 40m.
- *Offshore*: Instalação é feita longe da costa, em locais com profundidade acima de 40m.

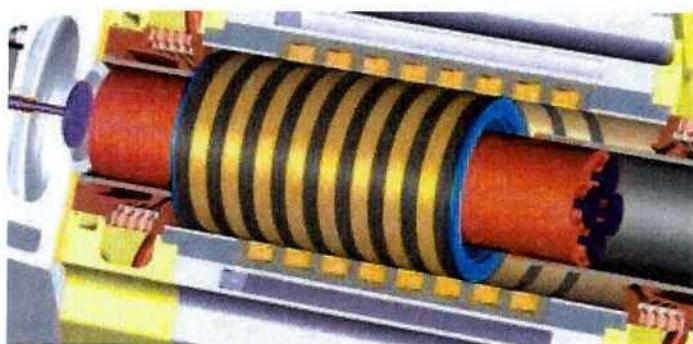
apresenta algumas vantagens sobre os equipamentos convencionais de geração de energia elétrica:

- Por não ser rotativo, o gerador linear não necessita de um sistema mecânico de transmissão que converte o movimento de translação das ondas marítimas em movimento rotativo. Assim, a energia cinética das ondas é diretamente aproveitada e evita-se perdas mecânicas de transmissão;
- O gerador linear pode ser excitado por ímãs permanentes, não havendo necessidade de fonte externa de excitação.

## 1.2 RESUMO DO PROJETO

O escopo do trabalho é o projeto, a construção e o teste de um gerador síncrono linear de ímãs permanentes. O trabalho se limita ao sistema eletromagnético do gerador, ou seja, ao componente que converte energia mecânica em elétrica. O sistema mecânico que amorteceria e transmitiria o movimento das ondas marítimas para o conversor eletromecânico e o sistema de retificação e inversão que trataria a tensão de saída do gerador não estão inclusos no escopo do projeto.

O diferencial do projeto, considerando-se diversos trabalhos que já foram realizados sobre o assunto proposto, é a concepção de um gerador cuja estrutura interna diminui o conteúdo harmônico das grandezas eletromagnéticas geradas, melhorando as formas de onda das tensões de saída e reduzindo as forças parasitas (solicitações mecânicas) internas. Isto pode ser realizado através de otimizações em aspectos construtivos dos componentes da máquina.



**Figura 1.2 – Representação de um gerador elétrico linear de ímãs permanentes [4]**

## 2 ESTRUTURA E ORGANIZAÇÃO DO PROJETO

### 2.1 ESTRUTURA E MÉTODOS DE TRABALHO

Para o desenvolvimento do projeto, primeiramente foi feita uma pesquisa bibliográfica visando reunir informações sobre geradores lineares para ondas marítimas que foram estudados e construídos até o ano de 2012. Com esses dados, iniciou-se uma fase de leitura e estudo para aquisição de conhecimento sobre topologias de geradores existentes e, ao mesmo tempo, foram listados de forma descritiva os modelos pesquisados. A lista elaborada serviu de base para que uma solução fosse discutida com o orientador do projeto e, assim, uma concepção adequada a um trabalho acadêmico fosse escolhida. A solução definida levou em conta a possibilidade de implantação de melhorias de desempenho do gerador em relação a projetos existentes.

A partir da topologia pré-definida, realizou-se uma análise magnética, elétrica e mecânica do modelo com o objetivo de se estabelecer as dimensões iniciais do gerador e suas características elétricas externas (tensão de saída, potência de saída, rendimento etc). Esta atividade encerrou a primeira parte do Projeto de Formatura (primeiro semestre de 2013).

A segunda parte do trabalho consistiu, primeiramente, na elaboração do projeto de construção do protótipo do gerador linear. Nessa etapa, foram feitos os desenhos dos componentes da máquina em software de CAD. Em seguida, as peças foram fabricadas em empresas especializadas e, posteriormente, foi realizada a montagem da máquina.

Finalmente, realizou-se testes do gerador e os resultados foram comparados aos valores que foram calculados. Caso ocorra alguma divergência considerável, a equipe buscará possíveis razões e esclarecimentos para justificá-la.

Considerando-se o que foi descrito neste tópico, pode-se resumir a estrutura do projeto nos seguintes itens:

### 2.2.1 Pacotes de trabalho do primeiro semestre

- a) **Pesquisa bibliográfica:** pesquisa por documentos que abordem geradores lineares, geração de energia a partir de ondas do mar, estudos eletromagnéticos de máquinas elétricas etc.
- b) **Leitura, estudo e esclarecimento dos documentos pesquisados:** os textos foram estudados e seus pontos relevantes levantados.
- c) **Listagem de concepções de geradores existentes:** foi realizado um levantamento de tipos de geradores lineares existentes.
- d) **Filtragem das concepções de geradores existentes:** as concepções mais adequadas para um trabalho acadêmico de graduação foram selecionadas para um estudo aprofundado.
- e) **Idealização do modelo de gerador a ser projetado:** a partir do resultado da atividade anterior (d), a equipe concebeu um modelo de gerador em conjunto com o orientador do projeto, sendo que a principal questão levantada dizia respeito a como ocorreria a conversão eletromecânica de energia no protótipo.
- f) **Estudo eletromagnético do gerador linear:** definição do comportamento eletromagnético da máquina a partir do estudo de modelos de circuito magnético e elétrico do gerador linear. As grandezas eletromagnéticas definitivas do protótipo foram determinadas nessa etapa.
- g) **Análise mecânica dos componentes a serem utilizados no protótipo:** foram definidos genericamente os tipos de componentes que poderiam ser utilizados no protótipo, com o objetivo de tornar o modelo idealizado viável para a construção do protótipo no segundo semestre.
- h) **Definição das dimensões e dos parâmetros elétricos iniciais do gerador:** o resultado final do primeiro semestre de trabalho foi o modelo do gerador linear com suas grandezas iniciais definidas (tamanho do protótipo, velocidade de movimento do indutor, tensão e potência de saída etc).

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 CONVERSÃO DE ENERGIA DAS ONDAS MARÍTIMAS

Conforme Figura 3.1, há uma categorização de métodos de aproveitamento da energia das ondas que já foram estudados ou que estão em estudo. Para a conversão de energia a partir de um gerador elétrico linear, existem as concepções de corpos oscilantes com aproveitamento do movimento de translação (vide figura).

Um dos conversores mais estudados e mais relevantes no panorama mundial é o sistema *Archimedes Wave String* (AWS) (Figura 3.2), que se encontra na categoria de corpos oscilantes – estrutura submersa. Ele é composto por uma base fixada no fundo do mar onde o gerador linear é acoplado. Acima dela, há um flutuador que se movimenta verticalmente de acordo com o movimento das ondas. Este pode estar totalmente submerso ou boiando na superfície das águas. Tal concepção é bastante vantajosa por não exigir que o movimento linear seja convertido em rotacional para que um gerador elétrico seja acionado, uma vez que a energia mecânica do movimento vertical é diretamente convertida em energia elétrica pelo gerador linear.

Todo o material lido e estudado (sobre conversão da energia das ondas) utilizou um sistema AWS como objeto de estudo. Portanto, dado o grande volume de trabalho que já foi desenvolvido sobre esse tipo de conversor, para o Projeto de Formatura em questão, foi utilizada essa concepção como ponto de partida.

### 3.2 GERADOR LINEAR SÍNCRONO

Geradores síncronos lineares possuem os mesmos princípios de funcionamento de geradores síncronos rotativos. Assim, o modelamento eletromagnético dessas máquinas elétricas é análogo.

Um gerador linear (de ímãs permanentes) é fundamentalmente composto por um eixo no qual são acoplados ímãs permanentes (indutor) e por bobinas alojadas num núcleo ferromagnético que envolve o conjunto de ímãs, formando um acoplamento magnético (induzido).

“A geração de energia se dá quando o conjunto de ímãs permanentes se move no interior de uma bobina de enrolamento. Este movimento alternativo modifica o fluxo magnético que passa pelo indutor e esta alteração nas condições do campo magnético induz um fluxo de corrente elétrica nos fios do enrolamento da bobina [...]” [4].

### 3.3 CONCEPÇÕES DE GERADOR LINEAR

#### 3.2.1 Estrutura plana ou tubular

Na configuração tubular (Figura 3.3), há uma estrutura interna cilíndrica dentro da qual é instalado o transladador (indutor). Essa estrutura é envolvida por outra, geralmente uma boia dentro da qual são instalados os ímãs permanentes.

Na estrutura plana (Figura 3.4), estator (induzido) e transladador são conjuntos planos dispostos paralelamente, sendo que há configurações em que o estator se situa na parte externa do gerador e outras em que o transladador é externo.

### 3.2.2 Estrutura plana unilateral ou bilateral

Na estrutura plana unilateral (Figura 3.5), os elementos de excitação e as bobinas ocupam apenas um lado da máquina. Dessa forma, há a presença de solicitações mecânicas consideráveis perpendicularmente ao eixo de translação do gerador, provenientes das forças magnéticas produzidas pelo campo magnético que atravessa o entreferro.

Na estrutura plana bilateral (Figura 3.6), a presença de bobinas, alojadas em material ferromagnético, nos dois lados da máquina faz com que as forças magnéticas perpendiculares ao eixo de translação se anulem (idealmente).

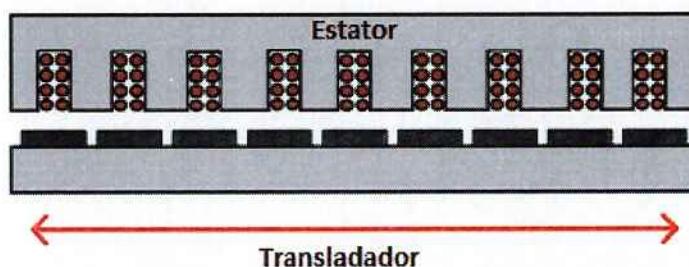


Figura 3.5 – Estrutura unilateral [7]

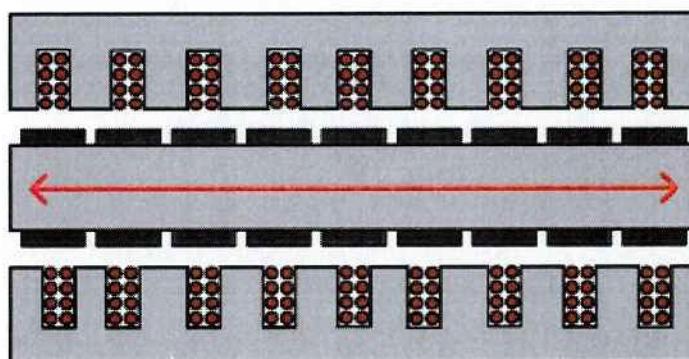


Figura 3.6 – Estrutura bilateral [7]

#### 4 IDEALIZAÇÃO E CONCEPÇÃO DO MODELO DE GERADOR LINEAR

Em reunião com o professor-orientador do projeto, foi definido o aspecto geral do gerador linear de ímãs permanentes a partir de características comuns de máquinas elétricas e de concepções existentes (Figura 4.1). É importante ressaltar que o escopo do trabalho de formatura em questão constitui apenas o projeto e a construção do sistema eletromagnético do gerador (componente que gera energia elétrica), ou seja, o sistema mecânico responsável por transmitir o movimento das ondas ao gerador elétrico e o sistema de tratamento da tensão de saída (conjunto de retificador e inversor) não fazem parte do escopo do projeto.

O gerador concebido possui geometria tubular, em que os ímãs permanentes ficam acoplados ao eixo central móvel (indutor ou transladador) e as bobinas que fornecem a tensão trifásica de saída ficam alojadas no estator (induzido). Dessa forma, os ímãs têm geometria anelar e polaridade axial e são constituídos de ferrite (poderiam ser de neodímio-ferro-boro (NdFeB), conforme descrito na seção 5). O estator possui o formato de uma casca cilíndrica com dentes e ranhuras internas, onde são alojadas as bobinas. O transladador (indutor) possui sapatas polares, iguais às de um gerador rotativo convencional, que direcionam o fluxo de campo magnético e separam ímãs vizinhos. O material das sapatas polares do indutor pode ser o aço-carbono e do estator, o aço-silício<sup>1</sup> (materiais típicos em aplicações de máquinas elétricas). A figura a seguir ilustra a concepção do gerador determinada.

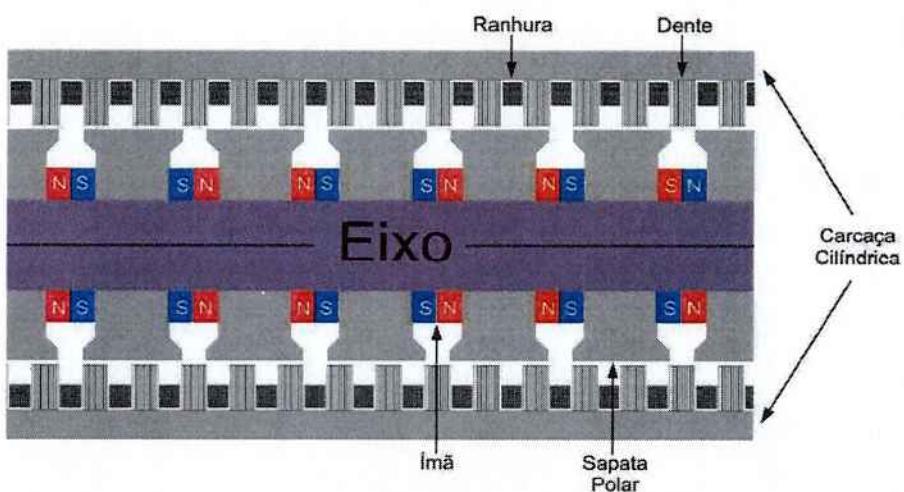


Figura 4.1 – Disposição dos ímãs no indutor (transladador) do gerador linear [9]

<sup>1</sup> No protótipo construído, utilizou-se o aço-carbono tanto para as sapatas quanto para o estator.

## 5 COTAÇÃO E ESCOLHA DE ÍMÃS PERMANENTES

Tendo o modelo básico do gerador definido, observou-se que, para se determinar as dimensões iniciais da máquina, seria mais conveniente estabelecer primeiramente as grandezas dos ímãs permanentes de acordo com o que existisse no mercado, ou seja, de acordo com um tipo de ímã que pudesse ser facilmente comprado no futuro (e que tivesse um preço acessível). A partir da escolha do magneto, os cálculos para dimensionamento das grandezas eletromagnéticas do gerador poderiam ser efetuados.

Normalmente, ao contrário do que foi descrito no parágrafo anterior, o dimensionamento de máquinas elétricas é feito a partir de uma potência de saída pré-definida. Assim, através desta grandeza e de cálculos de modelos eletromagnéticos, as propriedades dos ímãs poderiam ser estabelecidas. Se a equipe optasse por trabalhar dessa maneira, as dimensões finais calculadas para os magnetos poderiam ser totalmente diferentes dos padrões existentes no mercado e, por isso, o projeto teria um custo muito alto. Justifica-se, portanto, a escolha do primeiro método exposto, como ponto de partida, para o estudo e o dimensionamento das grandezas do gerador linear.

Para realizar a cotação de ímãs, procurou-se por peças em formato de anel de NdFeB (neodímio-ferro-boro) ou ferrite, com as seguintes dimensões aproximadas:

- Diâmetro externo: 55 mm;
- Diâmetro interno: 30 mm;
- Espessura: de 5 a 10 mm.

A quantidade foi estimada em conjunto com o orientador do projeto. A tabela a seguir mostra os itens cotados:

## 6 ESTUDO MAGNÉTICO DO GERADOR LINEAR

O estudo eletromagnético do modelo de gerador linear tem como objetivo analisar como diferentes tipos de ímãs e configurações mecânicas alteram o comportamento dos campos magnéticos que circulam pelo gerador e, consequentemente, da força magnética total. Por haver o interesse de minimizar o tempo gasto no cálculo dos parâmetros dos circuitos magnético e elétrico da máquina, foi desenvolvida uma planilha de automatização do processo no software Microsoft Excel, na qual os dados de entrada da análise são alterados e os valores finais das diferentes configurações são comparados a fim de se obter as dimensões finais do gerador.

O equacionamento do circuito magnético é dividido em duas partes. Inicialmente, são determinadas as dimensões físicas dos componentes do gerador, considerando-se algumas grandezas mecânicas e magnéticas arbitradas, e, posteriormente, as grandezas magnéticas de operação são calculadas através de um método iterativo<sup>2</sup>.

### 6.1 DETERMINAÇÃO DAS DIMENSÕES FÍSICAS (MECÂNICAS) DO GERADOR

A Figura 6.1 ilustra diversas medidas do gerador. Algumas delas são calculadas, enquanto outras são arbitradas (o orientador foi consultado para que as grandezas fossem arbitradas convenientemente).

Parâmetros a serem calculados:

- Largura da base da sapata polar:  $b_{cp}$
- Comprimento total da sapata polar:  $l_p$
- Passo polar:  $\tau_p$

Parâmetros com valores arbitrados:

- Comprimento do entreferro:  $l_g$
- Comprimento da cabeça da sapata polar:  $l_{cabeça}$
- Espessura do dente do estator:  $b_{ds}$
- Comprimento do dente do estator:  $l_{ds}$
- Espessura da coroa do estator:  $b_{cs}$

---

<sup>2</sup> O modelamento eletromagnético do gerador linear (seções 6 e 7) foi realizado com base no conhecimento do orientador do projeto. Algumas equações e valores foram consultados em [10].

### 6.1.1 Seção transversal do ímã ( $S_{imã}$ )

Considerando-se que os ímãs utilizados têm a forma de anel e sendo  $D_{ext}$  o diâmetro externo e  $D_{int}$  o diâmetro interno do imã, a área do ímã por onde o fluxo passará é calculada da seguinte forma:

$$S_{imã} = \frac{\pi \cdot (D_{ext}^2 - D_{int}^2)}{4} \quad (6.1)$$

### 6.1.2 Fluxo magnético por polo ( $\phi_p$ )

O fluxo por polo é calculado através do valor da seção do imã obtida através da equação (6.1) e do campo magnético de operação  $B_{op}$ . Este valor é inicialmente considerado um pouco menor do que o campo magnético remanente  $B_r$  do material do imã a ser utilizado. Seu valor é multiplicado por dois, pois há dois anéis encostados em cada sapata polar. A Figura 6.2 ilustra as linhas de campo magnético que formam o fluxo no entreferro.

$$\phi_p = 2 \cdot B_{op} \cdot S_{imã} \quad (6.2)$$

### 6.1.3 Largura da base da sapata polar ( $b_{cp}$ )

Primeiramente, para se determinar o comprimento da sapata polar, são utilizadas as fórmulas do campo magnético por polo e da área equivalente por polo  $S_{eq,p}$  descritas a seguir:

$$B_p = \frac{\phi_p}{S_{eq,p}} \quad (6.3)$$

$$S_{eq,p} = \pi \cdot D_{eq} \cdot b_{cp} \quad (6.4)$$

O valor do diâmetro equivalente  $D_{eq}$  é admitido como aproximadamente a soma do diâmetro interno do imã mais uma parcela do valor do comprimento  $l_p$  da sapata polar. Nos cálculos realizados, tal parcela é considerada dois terços, que é um valor comum para o tipo de aplicação em questão.

O diâmetro médio do entreferro depende dos valores do diâmetro externo  $D_{ext}$ , do entreferro  $l_g$  e do valor do comprimento da cabeça da sapata polar  $l_{cabeça}$ .

$$D_g = D_{ext} + l_g + l_{cabeça} \quad (6.10)$$

Finalmente, o valor do campo magnético no entreferro por polo pode ser determinado pela equação:

$$B_{g,p} = \frac{\phi_p}{S_g \cdot K_F} \quad (6.11)$$

### 6.1.6 Campo magnético no dente do estator ( $B_{ds}$ )

Com o valor do diâmetro interno do estator,  $D_{int,est}$ , o perímetro da parte interna do componente é obtido da seguinte forma:

$$D_{int,est} = D_{ext} + l_{cabeça} + 2 \cdot l_g \quad (6.12)$$

$$L_{méd} = \pi \cdot D_{int,est} \quad (6.13)$$

A Figura 6.3 ilustra as dimensões consideradas do estator.

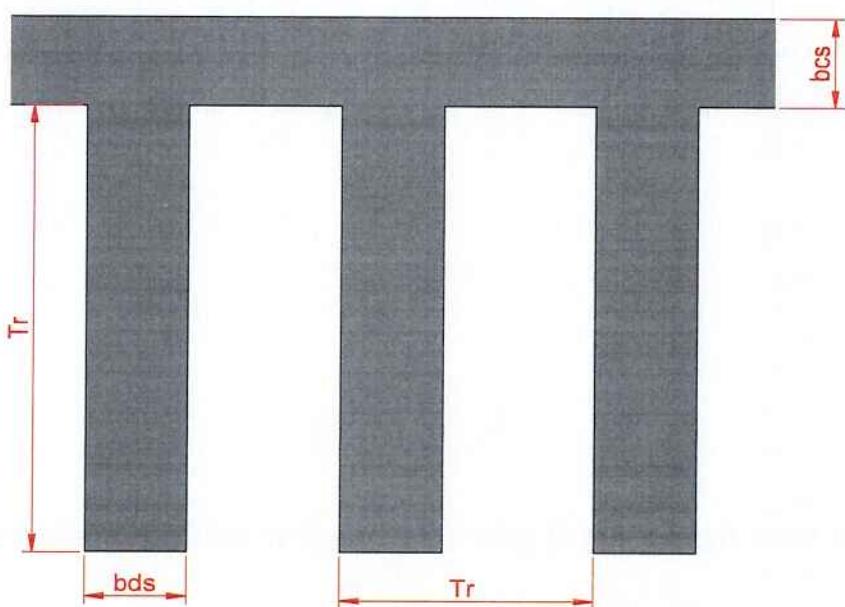


Figura 6.3 – Corte transversal do estator

- b) Calcula-se o fluxo por polo ( $\phi_p$ ):

$$\phi_p = B_g \cdot K_p \cdot \pi \cdot D_g \cdot \tau_p \quad (6.19)$$

- c) Calcula-se a força magnetomotriz no dente do estator,  $F_{ds}$ , a partir de  $B_{ds}$ :

$$B_{ds} = \frac{\phi_p}{b_{ds} \cdot L_{m\acute{e}d} \cdot F_{emp} \cdot N_{d,p} \cdot K_F} \quad (6.20)$$

Com o valor de  $B_{ds}$ , é possível obter o valor de  $H_{ds}$  através da curva de saturação do aço-silício (material do estator). Assim, o valor de  $F_{ds}$  é calculado pela equação (6.21):

$$F_{ds} = H_{ds} \cdot l_{ds} \quad (6.21)$$

- d) Calcula-se  $F_{cs}$  (força magnetomotriz na coroa do estator) de maneira análoga a  $F_{ds}$ .

$$B_{cs} = \frac{\phi_p / 2}{b_{cs} \cdot L_{m\acute{e}d} \cdot F_{emp}} \quad (6.22)$$

$$F_{cs} = H_{cs} \cdot l_{cs} \quad (6.23)$$

- e) Novamente de maneira análoga, calcula-se a força magnetomotriz na sapata polar,  $F_p$ :

$$S_p = \pi \cdot D_{eq} \cdot b_{cp} \quad (6.24)$$

$$B_p = \frac{\phi_p}{S_p} \quad (6.25)$$

Com o valor de  $B_p$ , é possível obter o valor de  $H_p$  através da curva de saturação do aço-carbono (material da sapata polar). Assim, o valor de  $F_p$  é calculado pela equação (6.25):

$$F_p = H_p \cdot l_p \quad (6.26)$$

- h) Calcula-se o fator de correção do campo magnético no entreferro (relação entre o campo magnético de operação e o campo magnético calculado para o ímã a partir dos valores arbitrados no procedimento) e, através deste valor, é possível calcular os valores do campo magnético e do fluxo magnético no entreferro corrigidos.

$$f_{corr} = \frac{B_{op}}{B_{im\ddot{a}}} \quad (6.30)$$

$$B_{g,corrigido} = f_{corr} \cdot B_{g,arb} \quad (6.31)$$

$$\phi_{p,corrigido} = \left( \frac{B_{op}}{B_{im\ddot{a}}} \right) \cdot \phi_p \quad (6.32)$$

Os valores corrigidos realimentam o sistema de equações do circuito magnético, configurando um método iterativo de cálculo. A partir deste procedimento, ocorre a convergência dos valores de  $B_{op}$  (obtido pela intersecção das curvas da Figura 6.4) e de  $B_{im\ddot{a}}$ , sendo que as iterações são interrompidas quando as duas grandezas passam a possuir valores satisfatoriamente próximos. Tal condição indica que os parâmetros magnéticos (descritos neste capítulo) calculados apresentam magnitudes próximas às da situação real de operação do gerador.

## 7 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS ELÉTRICOS DO GERADOR LINEAR

O equacionamento elétrico do gerador tem como objetivo determinar os parâmetros de resistência e reatância do gerador. Assim como no equacionamento magnético, foi montada uma planilha em Excel para automatizar o processo de cálculo, em função das variáveis de entrada.

O cálculo está dividido em quatro grandes blocos:

- a) Determinação do número de espiras das bobinas do induzido;
- b) Cálculo da seção dos condutores (fios de cobre) das bobinas;
- c) Obtenção da resistência de armadura por fase do gerador;
- d) Obtenção da reatância (síncrona) de armadura por fase.

A Figura 7.1 apresenta o circuito equivalente do gerador linear síncrono, análogo ao modelo de um gerador rotativo. O método para cálculo dos parâmetros do circuito é apresentado nos subitens seguintes<sup>3</sup>.

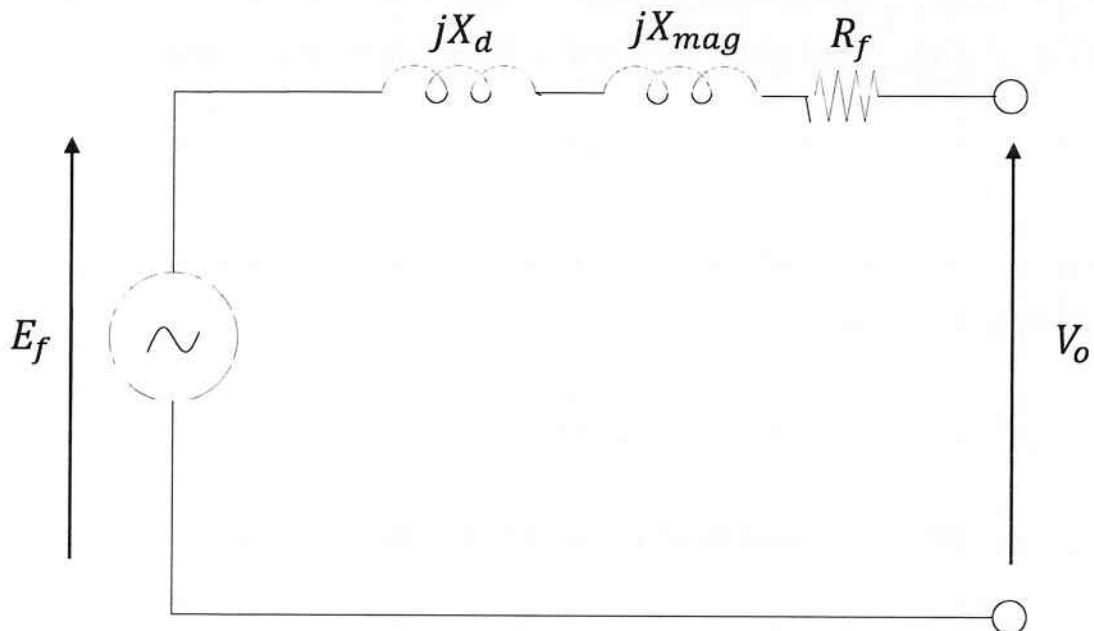


Figura 7.1 – Circuito elétrico equivalente do gerador linear

<sup>3</sup> O modelamento eletromagnético do gerador linear (seções 6 e 7) foi realizado com base no conhecimento do orientador do projeto. Algumas equações e valores foram consultados em [10].

$$f(t) = \frac{v(t)}{2 \cdot \tau_p} \quad (7.5)$$

O fator de enrolamento é um parâmetro que depende do passo de ranhura  $\Delta$  e do ângulo de encurtamento  $\delta$  do estator. Tais parâmetros são definidos numa máquina síncrona linear da mesma forma que em uma máquina rotativa. Porém, é necessário corrigir esses fatores. O passo de ranhura depende do número de ranhuras por polo e por fase (variável chamada de  $q$ ). Caso  $q$  seja um número fracionário, é possível decompô-lo em uma fração onde  $\alpha$  é o numerador e  $\beta$  o denominador. Dessa forma, é encontrado o número de ranhuras por polo e por fase corrigido  $q'$ , conforme demonstrado em [10]:

$$q = \frac{\alpha}{\beta} \Rightarrow q' = \alpha \quad (7.6)$$

Portanto, um número fracionário  $q$  corresponde a um número inteiro  $q' > q$ . Esse aspecto construtivo resulta em um passo de ranhura virtualmente reduzido e, portanto, otimizado. Tal medida melhora o fator de distribuição das bobinas e propicia redução do conteúdo harmônico da tensão gerada.

O passo de ranhura corrigido  $\Delta'$  é então calculado. O parâmetro  $m$  é o número de fases:

$$\Delta' = \frac{180}{m \cdot q'} \quad (7.7)$$

Para o cálculo do ângulo de encurtamento corrigido ( $\delta'$ ), é feita a média entre as distâncias de encurtamento.

São calculados, então, os fatores de distribuição das bobinas  $k_d$  e de ângulo de encurtamento (corda)  $k_c$  (para esta aplicação específica,  $k_c$  é unitário):

$$k_d = \frac{\sin \frac{q' \cdot \Delta'}{2}}{q' \sin \frac{\Delta'}{2}} \quad (7.8)$$

$$k_c = \cos \frac{\delta'}{2} (= 1) \quad (7.9)$$

$$K_{ench} = \frac{S_{total}}{S_r} \quad (7.16)$$

Substituindo-se (7.15) em (7.16):

$$K_{ench} = \frac{N_b \cdot d_{fio}^2}{S_r} \quad (7.17)$$

Isolando-se o diâmetro do fio:

$$d_{fio} = \sqrt{\frac{K_{ench} \cdot S_r}{N_b}} \quad (7.18)$$

Subtraindo-se a espessura da capa isolante do fio  $esp_{capa}$  do diâmetro do fio  $d_{fio}$ , o valor do diâmetro do condutor é encontrado:

$$d_{condutor} = d_{fio} - esp_{capa} \quad (7.19)$$

A seção do condutor resulta diretamente da fórmula:

$$S_c = \frac{\pi \cdot d_{condutor}^2}{4} \quad (7.20)$$

Com o auxílio da tabela de cabos padronizada AWG – ANEXO I (tipicamente utilizada em projetos de máquinas elétricas), é procurada a seção mais próxima que existe na tabela em relação ao valor obtido em (7.20). Encontra-se, assim, o tipo de fio que será utilizado na montagem das bobinas do gerador, com sua respectiva seção  $S_{AWG}$ .

A máxima densidade de corrente admissível  $j$  será um valor arbitrado de forma a se obter um valor que seja razoável. A corrente nominal  $I_N$  é calculada a seguir:

$$I_N = j \cdot S_{AWG} \quad (7.21)$$

A reatância de dispersão ( $x_d$ ) é obtida pela equação (7.27) (conforme [10]), onde a frequência é representada pelo termo  $f$ , o número de espiras por fase por  $N_f$  e  $p$  é o número de pares de polos. Os outros termos representam a permeânciia magnética de dispersão da ranhura ( $\Lambda_{ranhura}$ ), a permeânciia magnética devido ao conteúdo harmônico da distribuição de campo ( $\Lambda_{harmônicas}$ ) e a permeânciia magnética devido à "cabeça" de bobina ( $\Lambda_{cabeça}$ ).

$$x_d = 1,58 \cdot f \cdot \frac{N_f^2}{p} \cdot (\Lambda_{ranhura} + \Lambda_{harmônicas} + \Lambda_{cabeça}) \cdot 10^{-7} [\Omega/f] \quad (7.27)$$

Para o cálculo da permeânciia magnética de dispersão da ranhura, é preciso determinar  $\lambda_{ranhura}$ , que depende do comprimento da ranhura do estator  $l_{rs}$  e da espessura da ranhura do estator  $b_{rs}$ . O comprimento médio do ímã  $l_{med}$  foi calculado por (7.23) e  $q$  é o número de ranhuras por fase e por polo:

$$\lambda_{ranhura} = \frac{l_{rs}}{3 \cdot b_{rs}} \quad (7.28)$$

$$\Lambda_{ranhura} = \frac{l_{med}}{q} \cdot \lambda_{ranhura} \quad (7.29)$$

A permeânciia magnética devida ao conteúdo harmônico da distribuição de campo é calculada pelo equacionamento abaixo. O passo polar  $\tau_p$  é calculado por (6.7), o diâmetro interno do estator  $D_{int,est}$  por (6.12), o fator de Carter  $k_g$  por (6.17) e o comprimento do entreferro  $l_g$  pode ser arbitrado:

$$\Lambda_{harmônicas} = \frac{3}{\pi^2} \cdot \tau_p \cdot \pi \cdot D_{int,est} \cdot \frac{1}{k_g \cdot k_{sat} \cdot l_g} \cdot \sum \left( \frac{\zeta_v}{v} \right)^2 \quad (7.30)$$

O fator de saturação  $k_{sat}$  relaciona a força magnetomotriz total (6.27) com a força magnetomotriz no entreferro (6.18):

$$k_{sat} = \frac{F_{TOT}}{F_g} \quad (7.31)$$

O termo  $\sum \left( \frac{\zeta_v}{v} \right)^2$  corresponde ao conteúdo harmônico da distribuição do campo no entreferro. Este valor encontra-se tabelado em função do número de ranhuras por polo e por fase  $q$ . Valores para  $q = 1$  e  $q = 1,5$  encontram-se a seguir [10]:

## 8 PROJETO ELETROMAGNÉTICO E DIMENSIONAMENTO DO PROTÓTIPO

A partir dos métodos de cálculo de grandezas e parâmetros descritos nas seções 6 e 7 deste documento, foram obtidos os resultados expostos nas subseções a seguir. Os valores foram calculados através da planilha em Excel desenvolvida durante o projeto.

### 8.1 DIMENSÕES FÍSICAS E GRANDEZAS MAGNÉTICAS DE OPERAÇÃO

Os valores arbitrados inicialmente, conforme explicado no item 6.1 e seguindo-se as indicações do orientador do projeto, são descritos na tabela a seguir:

**Tabela 8.1 – Grandezas arbitradas no projeto eletromagnético do protótipo**

Grandeza	Símbolo	Valor
Espessura do dente do estator	$b_{ds}$	<b>2,67 mm</b>
Comprimento do dente do estator	$l_{ds}$	<b>20 mm</b>
Espessura da coroa do estator	$b_{cs}$	<b>6 mm</b>
Espessura do entreferro	$l_g$	<b>1,5 mm</b>
Comprimento da cabeça da sapata polar	$l_{cabeça}$	<b>4 mm</b>

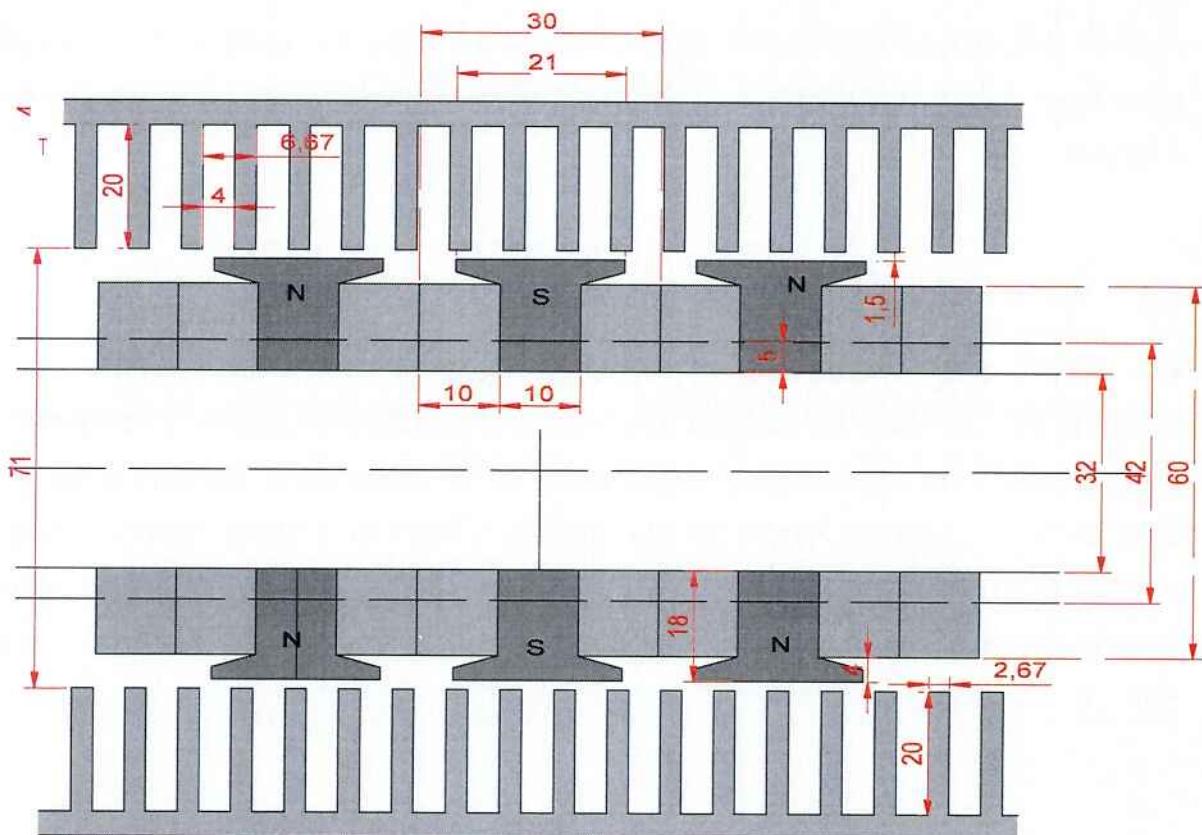
O princípio para arbitrá-los foi o tamanho do ímã escolhido no capítulo 5 – ímã de ferrite com as dimensões:

O comprimento total do estator é definido considerando-se que ele estará sempre envolvendo 6 polos do transladador. Assim:

$$L_{est} = N \cdot \tau_p = 6 \cdot 30 \text{ mm} = \mathbf{180 \text{ mm}} \quad (8.2)$$

O comprimento total do transladador depende do tamanho da excursão total (máximo deslocamento possível do eixo) que se deseja obter, pois não é conveniente que o eixo se desloque até o ponto em que o estator deixe de envolver completamente um conjunto de sapatas polares e ímãs. No caso de um gerador real, a ser instalado no mar, a excursão é o valor da amplitude máxima das ondas no local. Para o protótipo projetado, estipulou-se que seriam montados 24 ímãs (2 por polo) no eixo e que nas duas pontas da parte ativa do transladador haveria sapatas polares, ou seja, seriam utilizadas 13 sapatas. Portanto:

$$\begin{aligned} L_{trans} &= N_{\text{ímãs}} \cdot l_{\text{ímã}} + N_{\text{sapatas}} \cdot b_{cp} \\ &= 24 \cdot 10 \text{ mm} + 13 \cdot 10 \text{ mm} = \mathbf{370 \text{ mm}} \end{aligned} \quad (8.3)$$



**Figura 8.1 – Corte transversal do gerador linear projetado e seus valores em mm**

**Tabela 8.5 – Grandezas definidas para o cálculo do número de espiras por bobina**

Grandezza	Símbolo	Valor
Tensão de saída média do retificador trifásico	$V_{med}$ (DC)	<b>19,2 V</b>
Velocidade média de translação do eixo	$v_{med}$	<b>0,66 m/s</b>
Força eletromotriz induzida por fase	$E_f$	<b>8,2 V</b>
Frequência da tensão gerada	$f$	<b>5,5 Hz</b>
Fator de enrolamento	$k_e$	<b>0,960</b>
Número de espiras por fase	$N_f$	<b>540</b>
Número de espiras por bobina	$N_b$	<b>60</b>

As grandezas foram calculadas para um caso hipotético em que o transladador se move com uma velocidade constante de 0,66 m/s e frequência elétrica também constante. Entretanto, o movimento das ondas tem comportamento senoidal, ou seja, a velocidade delas não é constante. Neste caso, utilizou-se a premissa de velocidade constante apenas para se projetar o protótipo. Na seção 9 é feito um estudo do comportamento real da velocidade das ondas e da consequente forma de onda da tensão induzida.

### 8.2.2 Seção do condutor ( $S_c$ ) e corrente nominal ( $I_N$ )

A partir dos valores tabelados de cabos e das equações definidas anteriormente, determinou-se o valor nominal da corrente elétrica de saída do protótipo. Tal grandeza foi ajustada de modo que o protótipo fosse capaz de fornecer um alto fator de potência:

Grandeza	Símbolo	Valor
Reatância síncrona por fase	$x_s$	<b>5,914 Ω</b>
Tensão de saída a 20°C (carga com $f_p = 0,95$ )	$V_o$ (20°C)	<b>9,92 V</b>
Tensão de saída a 75°C (carga com $f_p = 0,95$ )	$V_o$ (75°C)	<b>9,59 V</b>

### 8.2.5 Potência de saída nominal

Para uma máquina elétrica trifásica, a potência aparente pode ser calculada da seguinte maneira ( $V_o$  é tensão de fase):

$$S_N = 3V_o I_N \quad (8.4)$$

Assim, admitindo-se um sistema com uma carga cujo **fator de potência é 0,95** (valor típico para um sistema com carga alimentada por um retificador), obteve-se os seguintes valores para a potência aparente fornecida pelo protótipo:

**Tabela 8.9 – Potências de saída estimadas**

Grandeza	Símbolo	Valor
Potência de saída a 20 °C	$S_N$ (20°C)	<b>55 VA</b>
Potência de saída a 75 °C	$S_N$ (75°C)	<b>53 VA</b>

Considerando-se os valores determinados, estima-se que a potência máxima a ser fornecida pelo protótipo de gerador linear, para a velocidade média das ondas marítimas e a corrente estipulada (0,66 m/s e 1,8 A, respectivamente), está em torno de **54 VA (51,3 W)**.

## 9 ANÁLISE DA MODULAÇÃO DE TENSÃO GERADA PELAS ONDAS DO MAR

Conforme descrito na subseção 8.2.1, a fim de se dimensionar o protótipo do gerador linear durante a fase de projeto, adotou-se a premissa de que o transladador se moveria com uma velocidade constante em apenas um sentido. Dessa forma, tanto a tensão quanto a corrente de saída do protótipo seriam senoides perfeitas (sem modulação). Porém, sabe-se que o movimento das ondas tem comportamento senoidal e, portanto, a velocidade delas não é constante. O comportamento ondulatório das águas marítimas, transmitido para o eixo do gerador, ocasiona uma modulação em amplitude e frequência da tensão induzida nas bobinas do estator (tensão de saída em vazio) e, consequentemente, da tensão de saída da máquina (senoides moduladas). Este fato é mais bem detalhado a seguir [9][11].

Primeiramente, obtém-se a velocidade das águas em um determinado ponto da onda:

**Posição da onda no eixo vertical (altura):**  $y_{onda}(t) = \frac{H_{onda}}{2} \cdot \cos(2\pi f_{onda} \cdot t)$  (9.1)

**Velocidade linear vertical da onda:**  $v(t) = \frac{dy_{onda}(t)}{dt} = (-)\pi f_{onda} H_{onda} \cdot \sin(2\pi f_{onda} \cdot t)$  (9.2)

Nas equações (9.1) e (9.2),  $\frac{H_{onda}}{2}$  é a amplitude e  $f_{onda}$  é a frequência da onda marítima. Substituindo-se (9.2) em (7.5) e o resultado em (7.1), encontra-se:

**Tensão eficaz induzida por fase:**  $E_f(t) = \frac{\sqrt{2} \pi^2 f_{onda} N_f \phi_p H_{onda} k_e}{4 \tau_p} \cdot \sin(2\pi f_{onda} \cdot t)$  (9.3)

A equação (9.3) demonstra que o valor eficaz da tensão induzida, para o caso estudado, não é constante e varia conforme uma senoide. Portanto, o valor de pico da tensão também varia senoidalmente, uma vez que  $E_{fpico} = \sqrt{2}E_f$ . Assim, prova-se que o movimento das ondas do mar causa a modulação em amplitude citada no começo do capítulo.

**Tabela 9.1 – Valores utilizados para validação da forma de onda da tensão induzida modulada**

Grandeza	Valor
$v_{med}$	0,66 m/s (conforme cap. 8)
$f_{onda}$	1,0 Hz (arbitrado)
$H_{onda}$	164 mm (excursão do eixo do protótipo aplicada)
$N_f$	540 esp (conforme cap. 8)
$\phi_p$	1,30 mWb (conforme cap. 8)
$\tau_p$	30 mm (conforme cap. 8)
$k_e$	0,960 (conforme cap. 8)
$E_{fpico}$	18,2 V (equação (9.7))
$f_{max}$	8,6 Hz (equação (9.8))

A velocidade de pico adotada para as ondas marítimas, neste caso, corresponde a  $\frac{\pi}{2}v_{med} = 1,0 \text{ m/s}$ , que é um valor conveniente para o tamanho do protótipo e que representa uma situação em que o mar não está agitado. As formas de onda obtidas são mostradas a seguir. A tensão nas fases B e C (Figura 9.2) foi obtida através da aplicação de uma defasagem de  $-120^\circ$  e  $+120^\circ$ , respectivamente, sobre a tensão da fase A (equação (9.6)):

$$e_{fB}(t) = E_{fpico} \cdot \sin(2\pi f_{onda} \cdot t) \cdot \sin(f_{max} \cdot \cos(2\pi f_{onda} \cdot t) - 120^\circ) \quad (9.9)$$

$$e_{fc}(t) = E_{fpico} \cdot \sin(2\pi f_{onda} \cdot t) \cdot \sin(f_{max} \cdot \cos(2\pi f_{onda} \cdot t) + 120^\circ) \quad (9.10)$$

Nota-se que, conforme a velocidade (e frequência) da onda aumenta, a amplitude e a frequência da tensão também aumentam e vice-versa. No caso simulado, a máxima amplitude atingida pela onda é de **18,2 V** e a máxima frequência é de **8,6 Hz**. Na etapa de testes do protótipo, utilizou-se as mesmas grandezas da Tabela 9.1

## 10 SIMULAÇÃO DO CIRCUITO MAGNÉTICO EM SOFTWARE

Foi realizada uma simulação do circuito magnético em software com o objetivo de validar o equacionamento realizado. O programa utilizado foi o Finite Element Method Magnetics (FEMM), disponível em versão gratuita (<http://www.femm.info>). Os resultados obtidos no FEMM foram confrontados com os resultados do equacionamento realizado no Excel e uma análise crítica foi realizada. O processo da análise via FEMM é detalhado em seguida.

O ambiente de trabalho do FEMM é semelhante a um software de CAD, possuindo uma região onde os componentes podem ser desenhados. A figura 10.1 mostra a visão inicial para solução de um problema do tipo magnético.

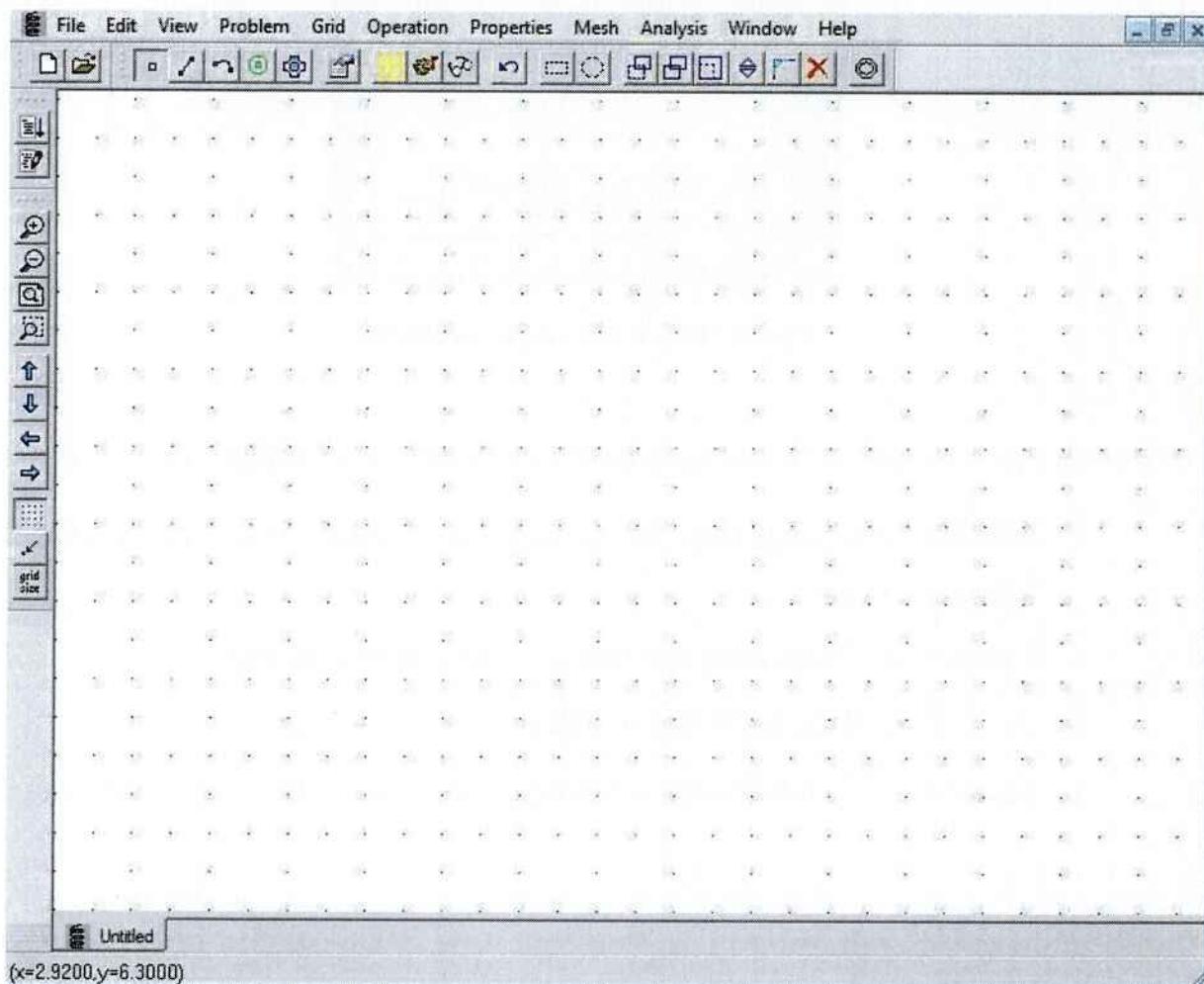
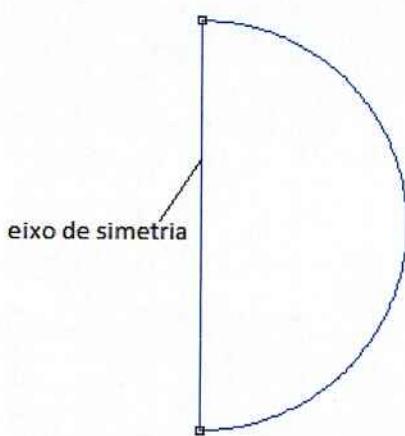
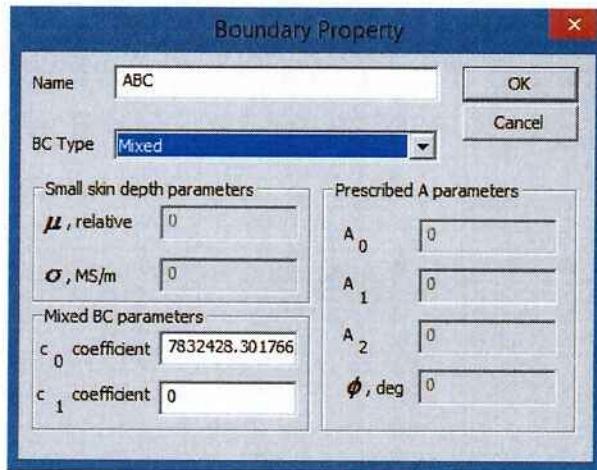


Figura 10.1 – Área de trabalho no FEMM



**Figura 10.3 – Fronteiras do problema**

Seguindo o manual disponibilizado pelos desenvolvedores do software, foi definida a fronteira do problema como assintótica, que aproxima a impedância da fronteira à impedância de um espaço livre e aberto, permitindo a modelagem do campo produzido em um espaço aberto e livre em um região finita.



**Figura 10.4 – Definição das fronteiras**

Com a região do problema definida, as peças foram construídas aproveitando-se o desenho já realizado em AutoCAD (seção 11.2) através da ferramenta de importação do FEMM. Há quatro componentes de interesse: eixo, ímã, sapata polar e estator. A Figura 10.5 mostra uma parte ampliada de como ficou o desenho, na qual se observa os componentes citados:

Na Figura 10.6, observa-se ainda a orientação do campo gerado pelo ímã, indicado pelas setas verdes. O resultado da aplicação de materiais se encontra na Figura 10.7:

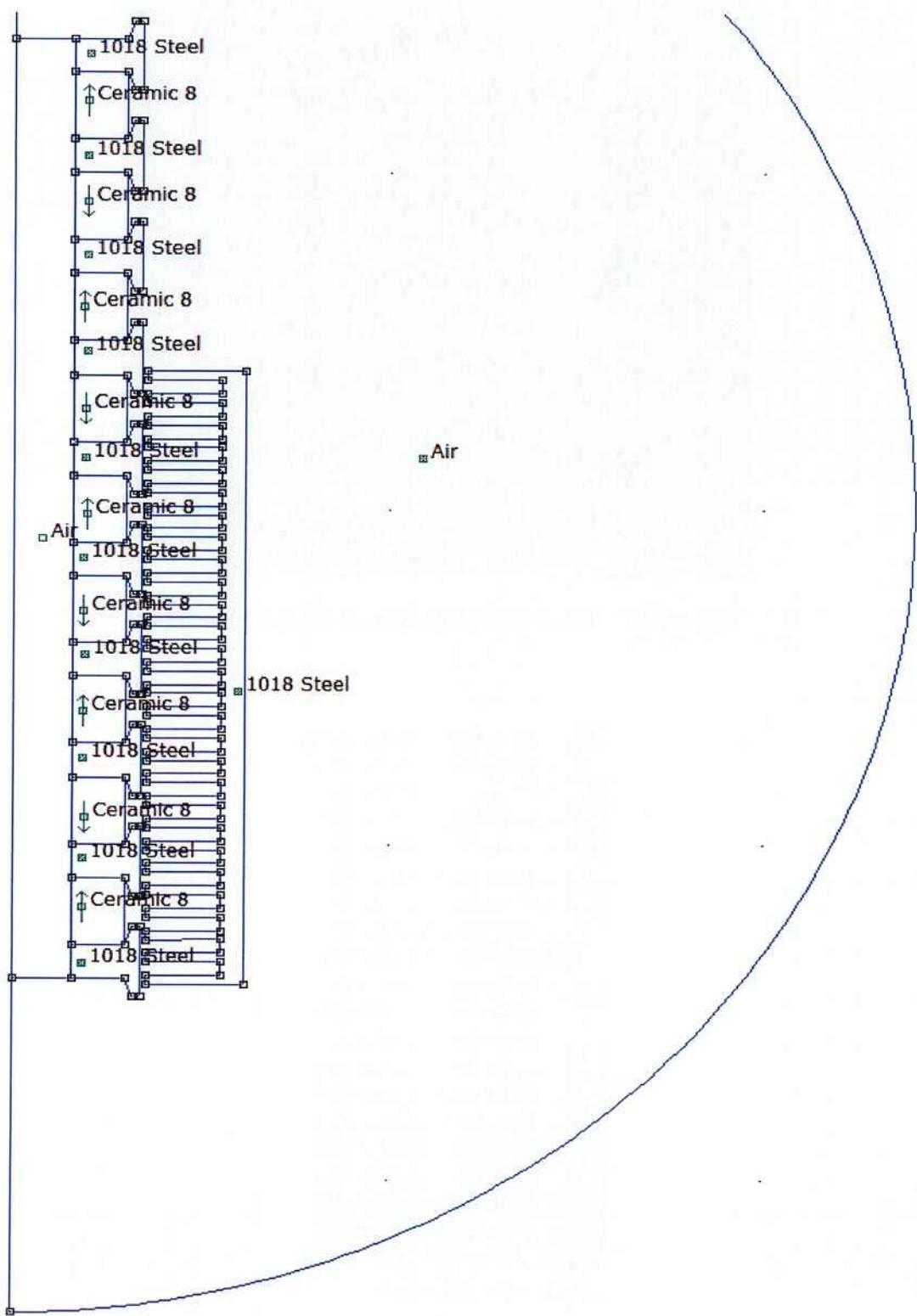


Figura 10.7 – Resultado final da construção

Observando-se o mapa, é possível verificar imediatamente que há fluxos de dispersão, sendo o principal deles o fluxo entre sapatas polares. Tal dispersão (perda magnética) não foi considerada no equacionamento da seção 6 e será analisada posteriormente (seção 13), pois tem impactos significativos no resultado.

A partir dos dados da simulação, é interessante verificar se eles estão de acordo com os resultados obtidos pela planilha em Excel elaborada no projeto. Os principais campos magnéticos são os que circulam no entreferro, no dente do estator, na coroa do estator, na sapata polar e o campo de operação do ímã. A Tabela 10.1 apresenta uma compilação dos resultados:

**Tabela 10.1 – Dados para comparação entre Excel e FEMM**

Grandeza	Símbolo	Excel	FEMM
Campo magnético de operação	$B_{op}$	0,322 T	0,355 T
Campo magnético no entreferro	$B_{g,p}$	0,276 T	0,281 T
Campo magnético no dente do estator	$B_{ds}$	0,712 T	0,702 T
Campo magnético na coroa do estator	$B_{cs}$	0,311 T	0,331 T
Campo magnético na sapata polar	$B_p$	0,987 T	0,732 T

O principal motivo das divergências se deve ao fato de não haver, na biblioteca de materiais do FEMM, um ímã com especificações exatamente iguais ao utilizado no protótipo. O ímã presente na biblioteca possui um campo magnético remanente (e, consequentemente, de operação) ligeiramente maior do que o utilizado no gerador (0,42 T e 0,38 T, respectivamente). Além disso, nota-se que a passagem de campo magnético entre sapatas e dentes estatóricos possui um valor mais elevado nos cálculos em Excel, uma vez que a dispersão entre sapatas não foi considerada na planilha. Mesmo com essas diferenças, os resultados ficaram satisfatoriamente próximos, reforçando a validade dos métodos utilizados para modelamento do circuito magnético da máquina.

## 11 PROJETO MECÂNICO DO PROTÓTIPO

Após a definição e a validação do projeto eletromagnético do protótipo, iniciou-se a etapa de detalhamento do projeto mecânico do gerador. Posteriormente, elaborou-se os desenhos das peças da máquina em software CAD. O objetivo desta atividade, além de complementar a documentação técnica do projeto, foi constituir desenhos detalhados para que os componentes do protótipo pudessem ser produzidos em fábrica. As peças foram desenhadas em computador tendo como base diversos rascunhos feitos à mão durante reuniões entre os autores e o orientador.

### 11.1 CONCEPÇÃO DA ESTRUTURA MECÂNICA EXTERNA DO GERADOR

Nessa etapa do projeto, foi definida a estrutura externa de suporte do gerador linear, bem como os tipos de material a serem utilizados. O estudo dos componentes mecânicos foi realizado a partir das dimensões da parte elétrica ativa da máquina, determinadas e apresentadas no capítulo 8. A estrutura externa do protótipo é descrita em conjunto com os desenhos em CAD na subseção a seguir.

### 11.2 DESENHO DOS COMPONENTES DO PROTÓTIPO (CAD)

Inicialmente, foram elaborados os desenhos dos componentes elétricos (“parte quente”) do gerador, pois eles já possuíam dimensões pré-definidas a partir dos cálculos demonstrados nas seções 6 e 7 (dimensões em milímetros). Todos os desenhos foram feitos em AutoCAD.

As sapatas polares (Figura 11.2) são componentes de aço-carbono (SAE 1020) em formato de anel. Elas são encaixadas em torno do eixo da mesma forma que os ímãs permanentes (Figura 11.5). O estator é constituído por um conjunto de lâminas de aço-carbono (poderia ser de aço-silício, mas, por uma questão de custo, optou-se pelo mesmo material das sapatas) que serão dispostas em torno da estrutura móvel do gerador, conforme representado nas figuras 11.3 e 11.4. Os espaçamentos maiores observados na vista lateral (Figura 11.4) são aberturas deixadas para as saídas das bobinas (três fases).



Lâmina do estator

- Material: aço-carbono SAE 1020
- Espessura: 1 mm
- Número de dentes: 28
- Quantidade de lâminas: 225

Figura 11.3 – CAD da lâmina do estator

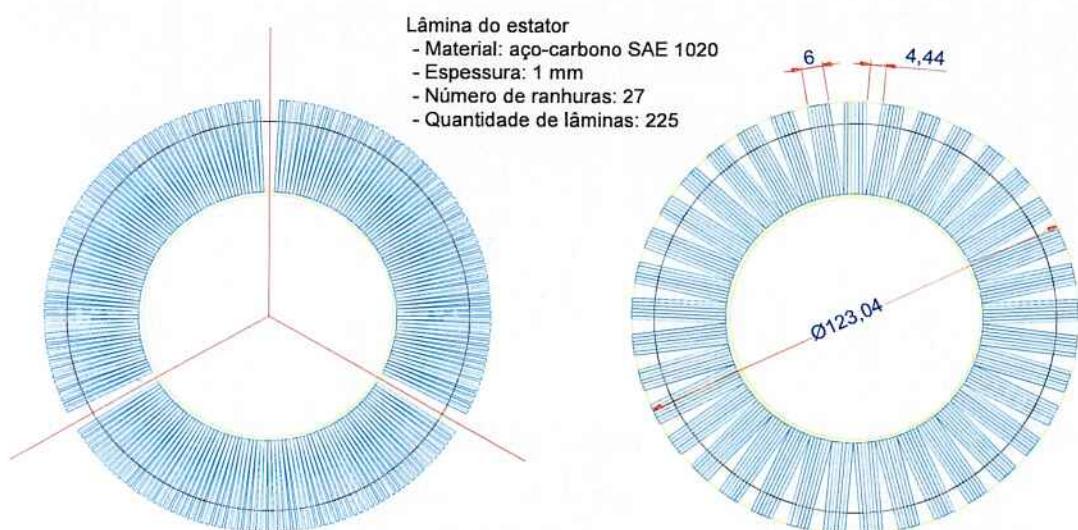
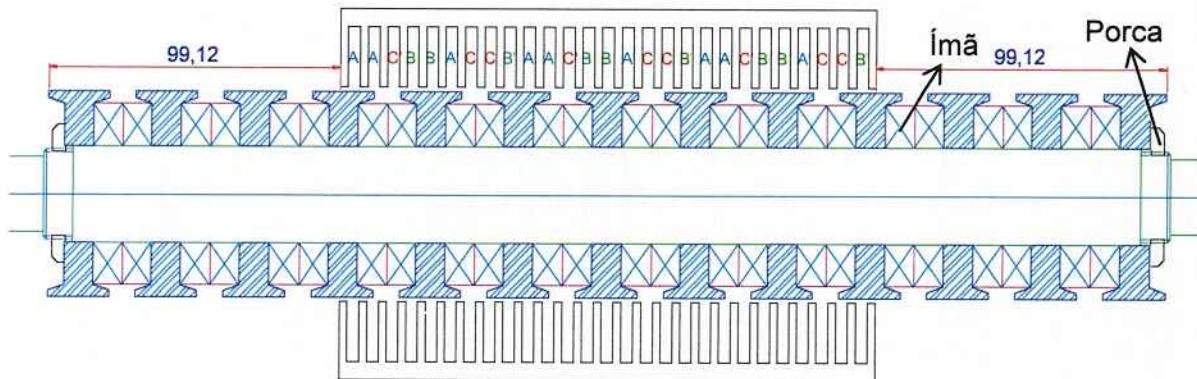
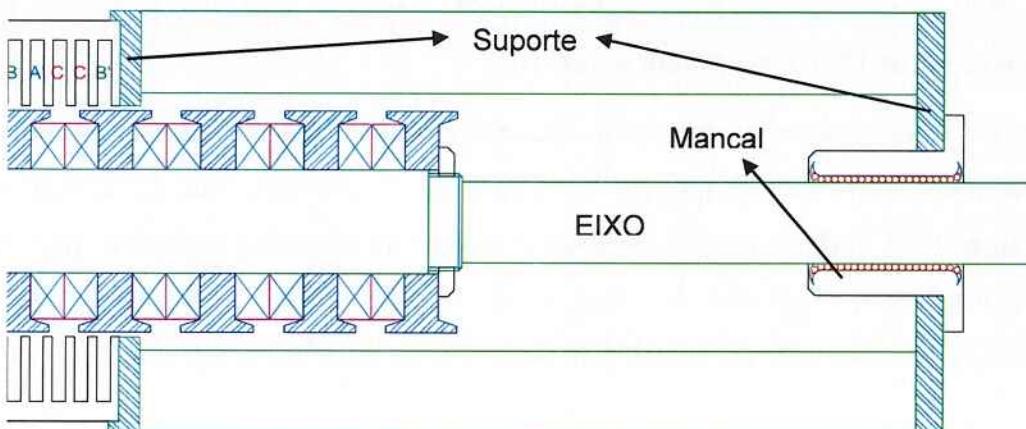
Figura 11.4 – Vista frontal das lâminas dispostas formando o estator  
 (à esquerda, a concepção implementada; à direita, uma alternativa)

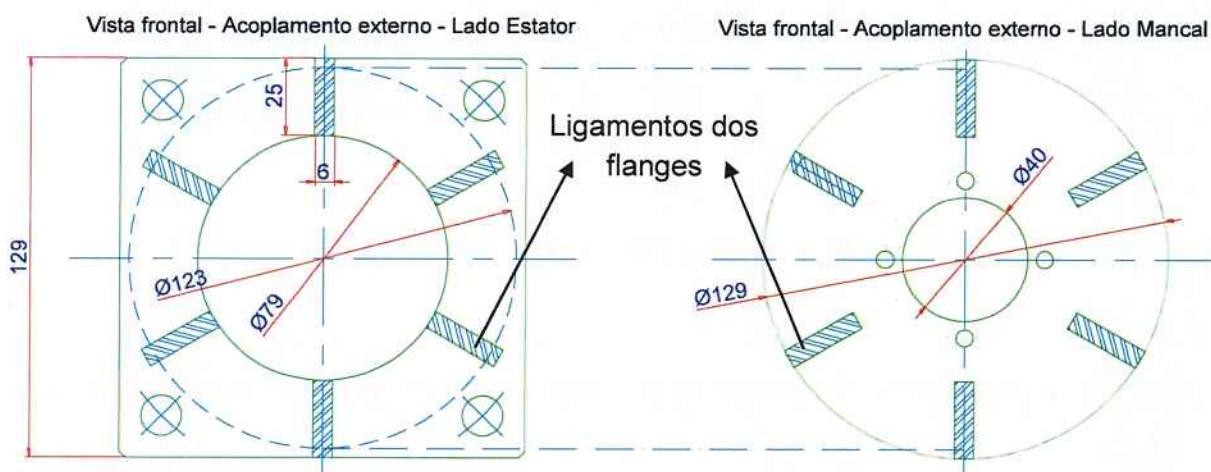
Figura 11.5 – CAD da parte eletromagnética do gerador montada

O estator deve ficar suspenso de modo que o entreferro seja preservado quando o eixo se mover. Por isso foi montada uma estrutura externa de suporte para o estator. Ela é constituída de duas peças (dois flanges) que envolvem o induzido lateralmente e que são fixadas através de quatro parafusos, conforme pode ser observado nas figuras 11.8 e 11.9. A estrutura de suporte é então fixada na base (mesa de testes). O material utilizado nos suportes é o alumínio (material não magnético). Assim, o circuito magnético não se fecha pela estrutura externa, evitando fugas de campo magnético.

Para garantir que o eixo do indutor permaneça alinhado horizontalmente e não prejudique o entreferro, foram instalados dois mancais à estrutura de suporte (nas duas extremidades), através de dois flanges, conforme observado na Figura 11.8.



**Figura 11.8 – Vista lateral da estrutura de suporte do protótipo (apenas em uma extremidade)**



**Figura 11.9 – Vista frontal dos flanges da estrutura de suporte**

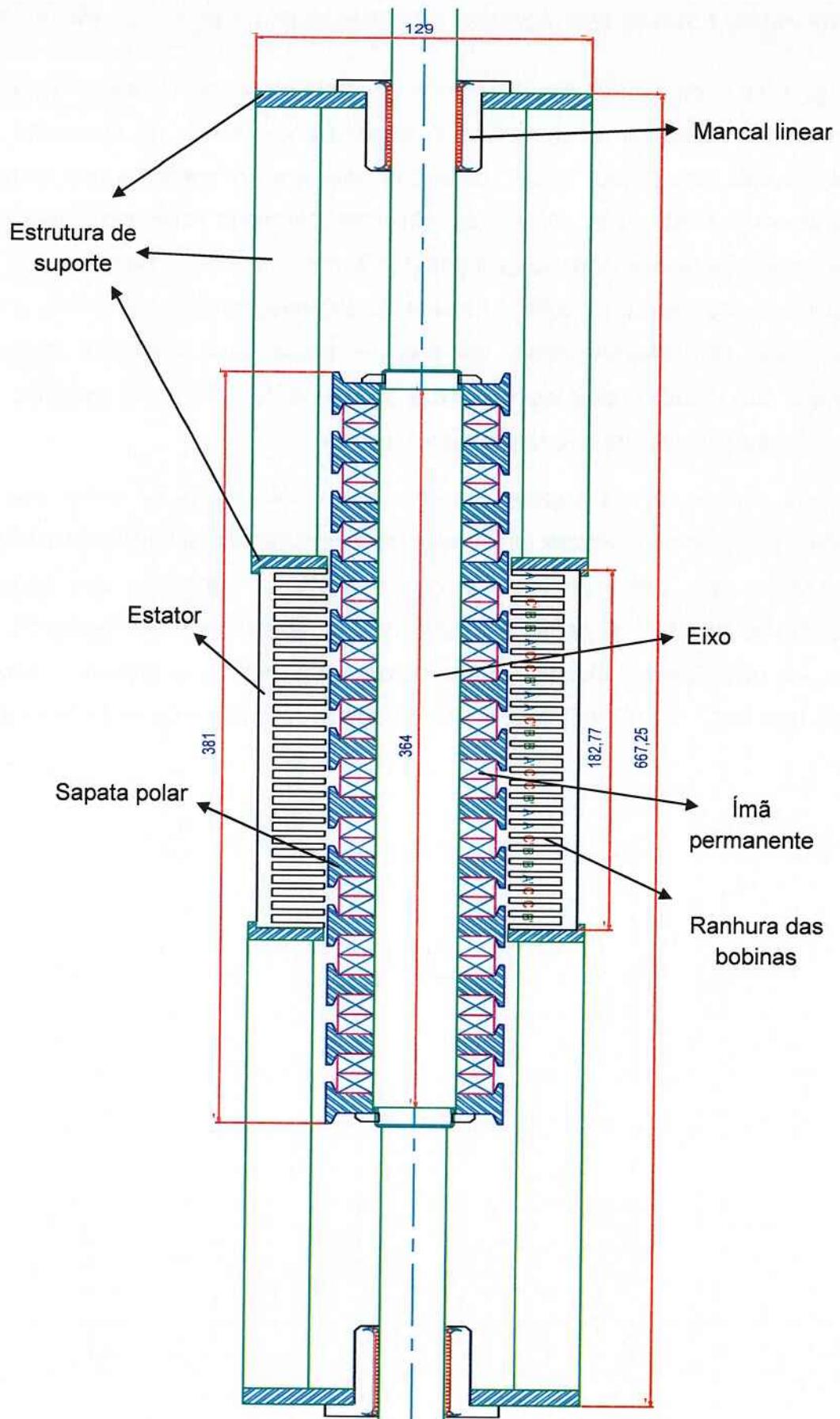
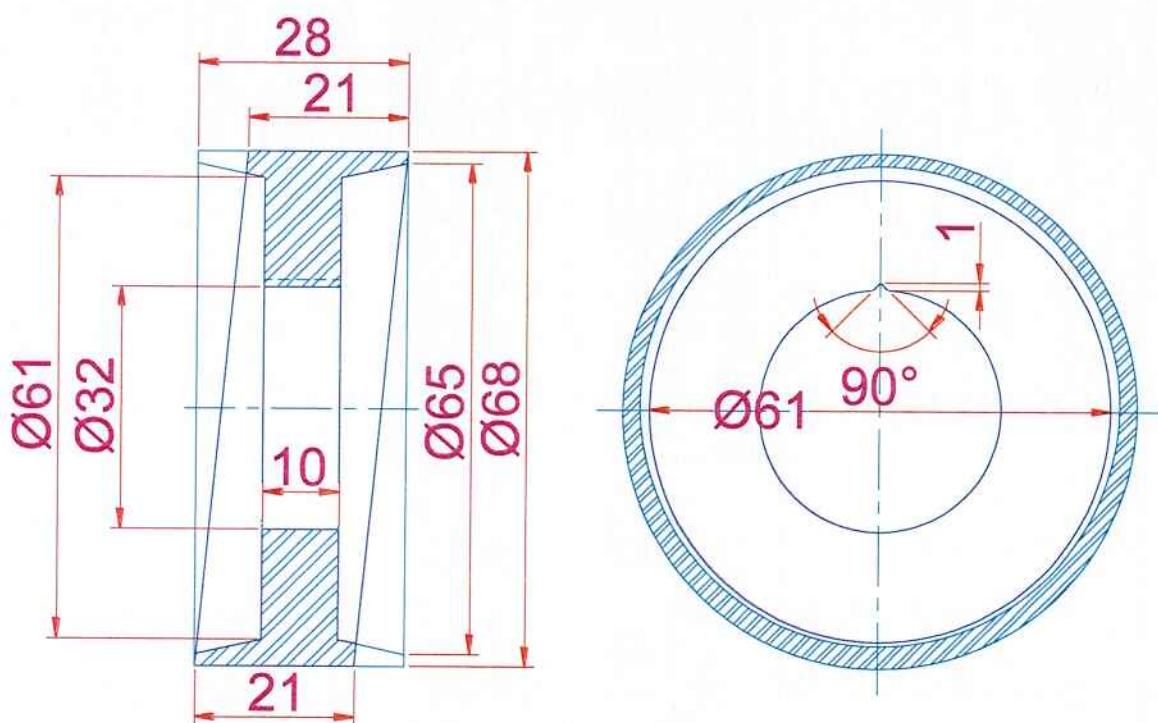


Figura 11.12 – Vista lateral do protótipo de gerador linear (na vertical)

Pelo corte transversal da Figura 11.13, nota-se que o procedimento descrito faz com que a parte de cima da sapata polar tenha interface com um determinado grupo de ranhuras e a parte de baixo (superfície oposta) com um grupo distinto, perfazendo um deslocamento de exatamente um passo de ranhura. Tal detalhe construtivo propicia uma diminuição das forças eletromagnéticas parasitas que atuam sobre a estrutura do gerador e evitam que o transladador fique travado (“acomodado”) numa posição de equilíbrio de forças (redução das pulsações de campo quando a máquina sai do repouso).

A seguir, o novo desenho da sapata polar e o aspecto geral atualizado do protótipo são apresentados com mais detalhes:



**Figura 11.14 – Aspecto atualizado da sapata polar**

## 12 CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO DE GERADOR LINEAR

### 12.1 FABRICAÇÃO DOS COMPONENTES

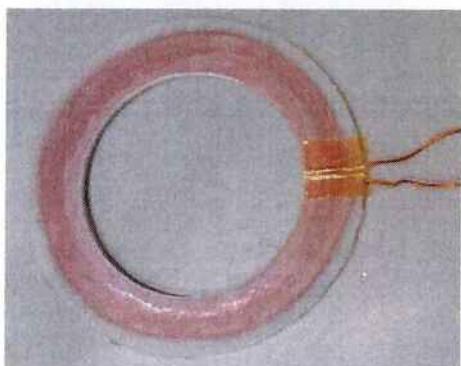
Com exceção dos ímãs permanentes, dos mancais e de miscelâneas (porcas, parafusos, arruelas etc), todos os componentes do protótipo foram fabricados com base nos desenhos CAD (capítulo 11) em manufaturas especializadas, de acordo com indicações do orientador do projeto.

A tabela a seguir apresenta os materiais das peças produzidas:

**Tabela 12.1 – Materiais dos componentes do gerador**

Componente	Material
Ímã	Ferrite
Sapata polar	Aço SAE 1020
Lâmina do estator	Aço SAE 1020
Eixo	Aço AISI 304
Estrutura de suporte	Alumínio

As figuras 12.1 e 12.2 mostram uma única bobina composta por 60 espiras:

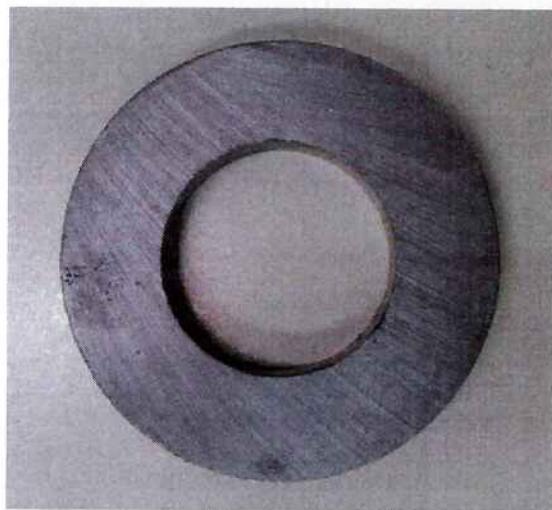


**Figura 12.1 – Foto da bobina (vista frontal)**



**Figura 12.2 – Foto da bobina (vista lateral)**

As figuras 12.7 e 12.8 são fotos do ímã de ferrite utilizado:



**Figura 12.7 – Foto do ímã (vista frontal)**



**Figura 12.8 – Foto do ímã (vista lateral)**

O mancal linear adquirido para manter o eixo do protótipo suspenso e permitir seu movimento de translação é mostrado nas figuras 12.9 e 12.10:



**Figura 12.9 – Foto do mancal linear (vista frontal)**



**Figura 12.10 – Foto do mancal linear (vista lateral)**

Na Figura 12.13, é apresentada uma foto do papel isolante utilizado em torno das bobinas e, na Figura 12.14, são mostradas as tiras isolantes que foram utilizadas entre as lâminas do estator na montagem:

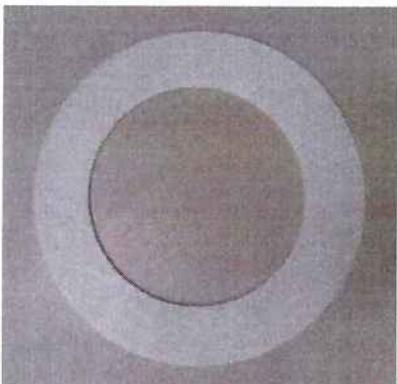


Figura 12.13 – Foto do papel isolante



Figura 12.14 – Foto das tiras de material isolante

## 12.2 MONTAGEM DO PROTÓTIPO

A montagem se iniciou com a inserção das bobinas em uma estrutura auxiliar (gabarito) com formato cilíndrico que foi retirada posteriormente. A Figura 12.15 mostra as bobinas já inseridas e fixadas através de alguns grupos de lâminas do estator.

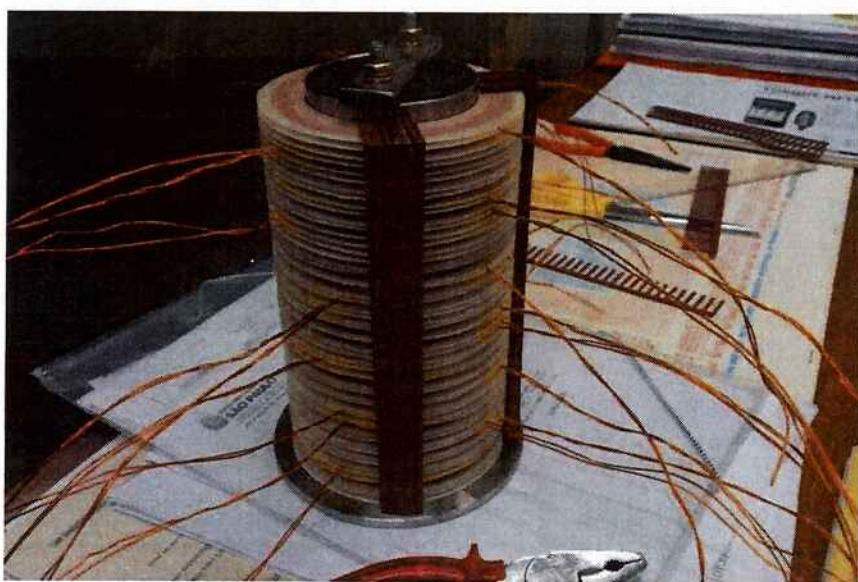
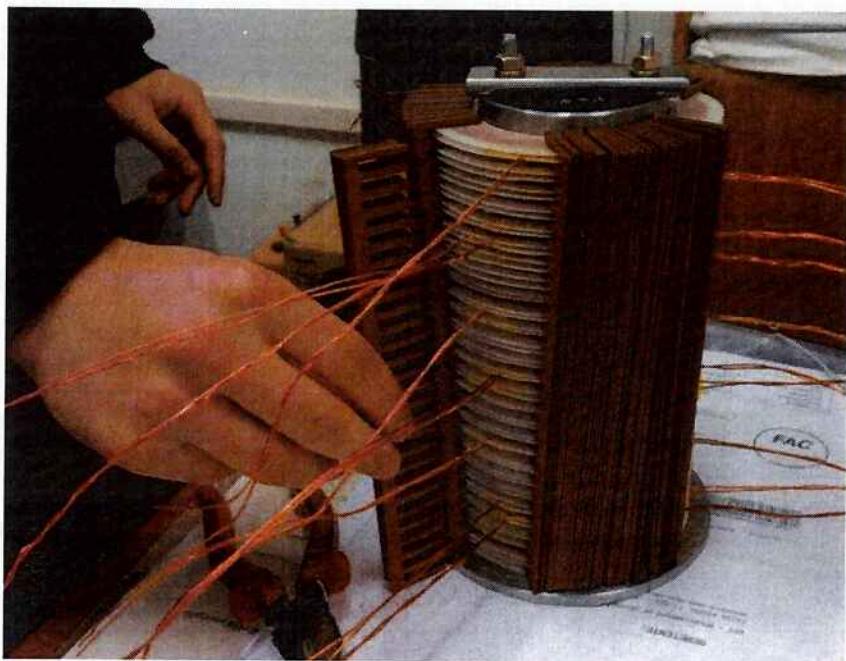
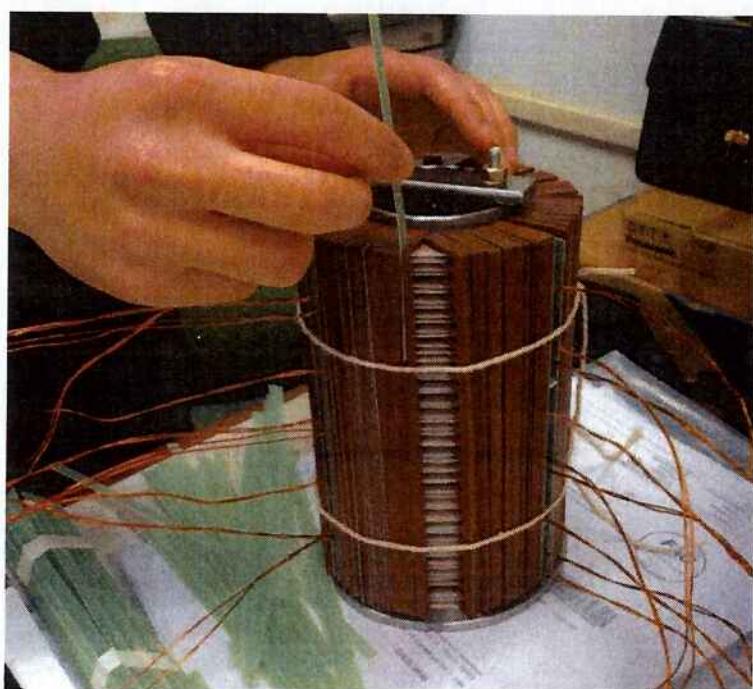


Figura 12.15 – Foto das bobinas encaixadas em alguns pentes do estator



**Figura 12.17 – Processo de montagem das lâminas do estator**

O próximo passo foi inserir as tiras entre os espaços que se formam na linha que corresponde ao raio externo dos pentes, proporcionando solidez ao estator e o deixando com forma cilíndrica. A Figura 12.18 mostra o processo sendo realizado e as figuras 12.19 e 12.20 ilustram a estrutura resultante:



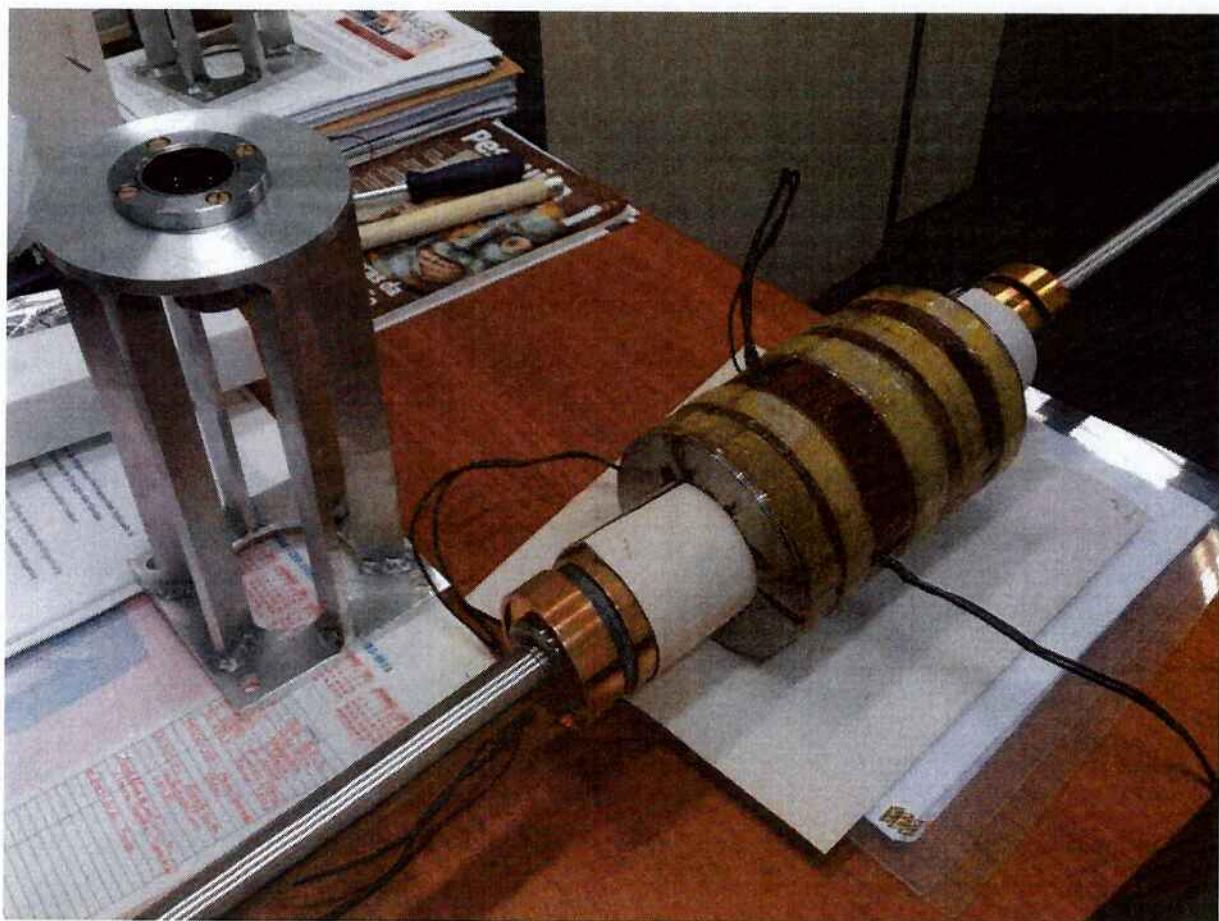
**Figura 12.18 – Inserção das tiras entre as lâminas do estator**

Após a conexão dos enrolamentos, impregnou-se o estator com uma resina, de modo que o conjunto se transformasse em uma peça única. Observa-se na Figura 12.22 o estator completamente montado com seis cabos expostos, correspondentes às saídas das três fases.



Figura 12.20 – Foto do estator completo

A montagem do transladador se iniciou com a inserção sequencialmente alternada de uma sapata polar e de dois ímãs, atentando-se para a polaridade dos magnetos de forma a se criar um norte magnético alternado com um sul magnético. O resultado é exibido nas fotos a seguir:



**Figura 12.23 – Processo de montagem do gerador na estrutura de suporte**

Finalmente, acoplou-se a estrutura de suporte ao gerador (estator e transladador) com auxílio de porcas e parafusos, dando forma ao protótipo completo observado na Figura 12.26.



**Figura 12.24 – Foto do gerador linear montado**

## 13 TESTES E ENSAIOS DO PROTÓTIPO DE GERADOR LINEAR

Logo após a conclusão da montagem do protótipo, foram realizados alguns testes manuais para verificar se, a princípio, a máquina estava em conformidade com o que se esperava.

Primeiramente, verificou-se se as polaridades dos magnetos montados no eixo estavam alternadas, ou seja, caso a polaridade de um par de ímãs de um polo fosse norte, a polaridade do par de ímãs do polo seguinte deveria ser sul. Para realizar este teste, utilizou-se uma peça de ímã que havia sobrado e aproximou-se uma de suas faces sobre cada polo. Observou-se que, enquanto um polo repelia o ímã, o próximo polo (polo vizinho) o atraía e assim sucessivamente. Concluiu-se, portanto, que a montagem dos magnetos estava correta.

Posteriormente, movimentou-se o eixo da máquina com a mão, verificando que nenhuma parte do transladador tocava no estator e, portanto, que o entreferro estava sendo preservado. Além disso, notou-se que a movimentação do eixo fluía sem que fosse necessário aplicar muita força. Tal fato é resultado da inclinação aplicada às sapatas polares descrita na seção 11.3.

### 13.1 ESTRUTURA PARA ACIONAMENTO DO GERADOR

Para ensaiar o protótipo de gerador construído, elaborou-se um mecanismo para acionar a máquina de forma que seu eixo realizasse o movimento de translação de ida e volta, conforme ocorreria em uma aplicação no mar.

A Figura 13.1 ilustra o sistema concebido para acionar o gerador. Ele é composto por dois braços mecânicos interconectados – um acoplado ao transladador e outro acoplado ao eixo de um motor de corrente contínua de pequeno porte (visto de frente na figura). Na medida em que o eixo do motor gira, os braços proporcionam um movimento linear ao transladador, cuja velocidade adquirida é aproximadamente senoidal.

O conjunto inteiro foi parafusado a uma base de madeira. O gerador foi fixado a ela através de quatro presilhas, que foram encaixadas nas roscas transversais do estator e parafusadas à base, conforme indicado na Figura 13.2. Para o motor,

Na sequência, são apresentadas fotos do sistema de acionamento do protótipo:

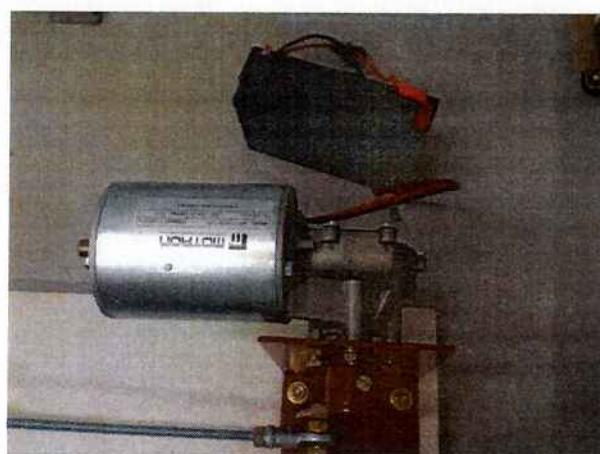
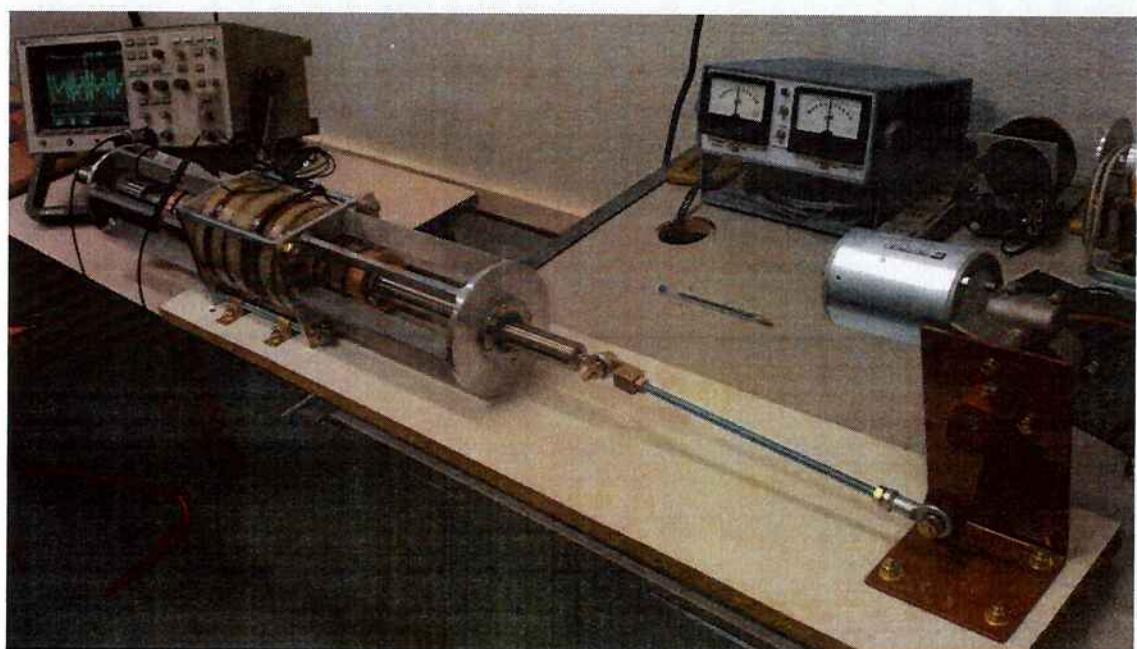
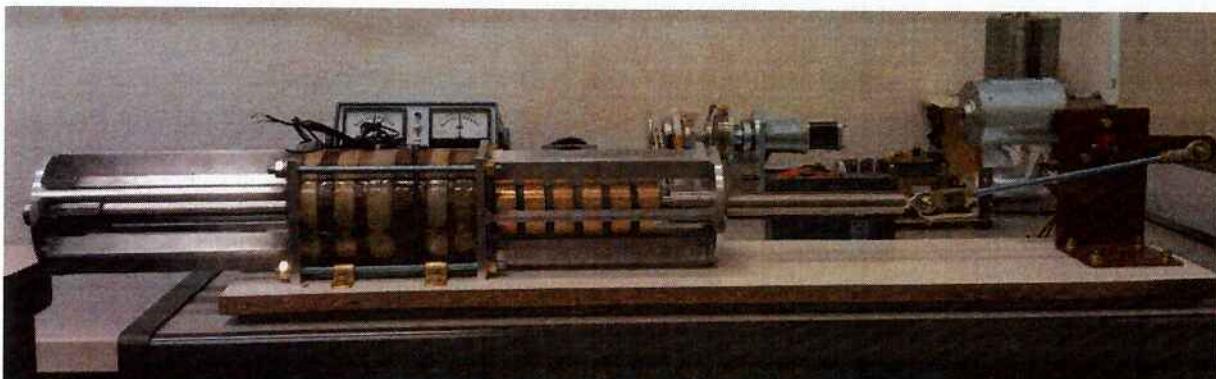
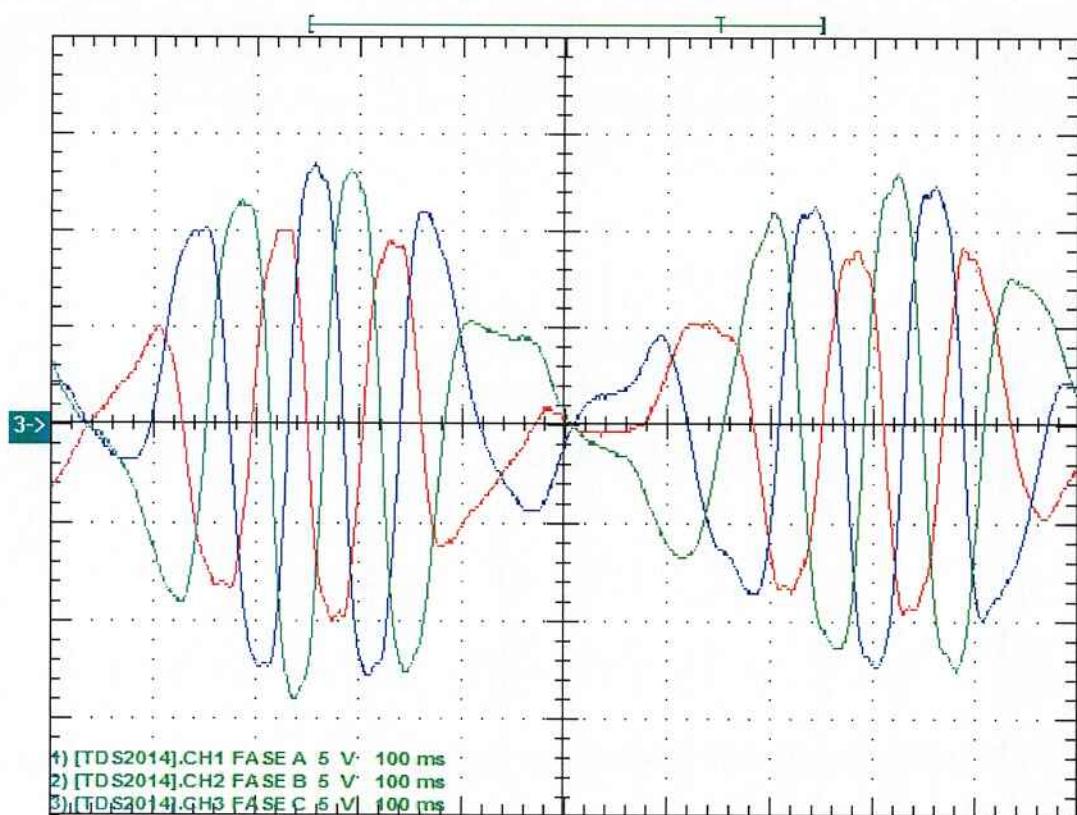
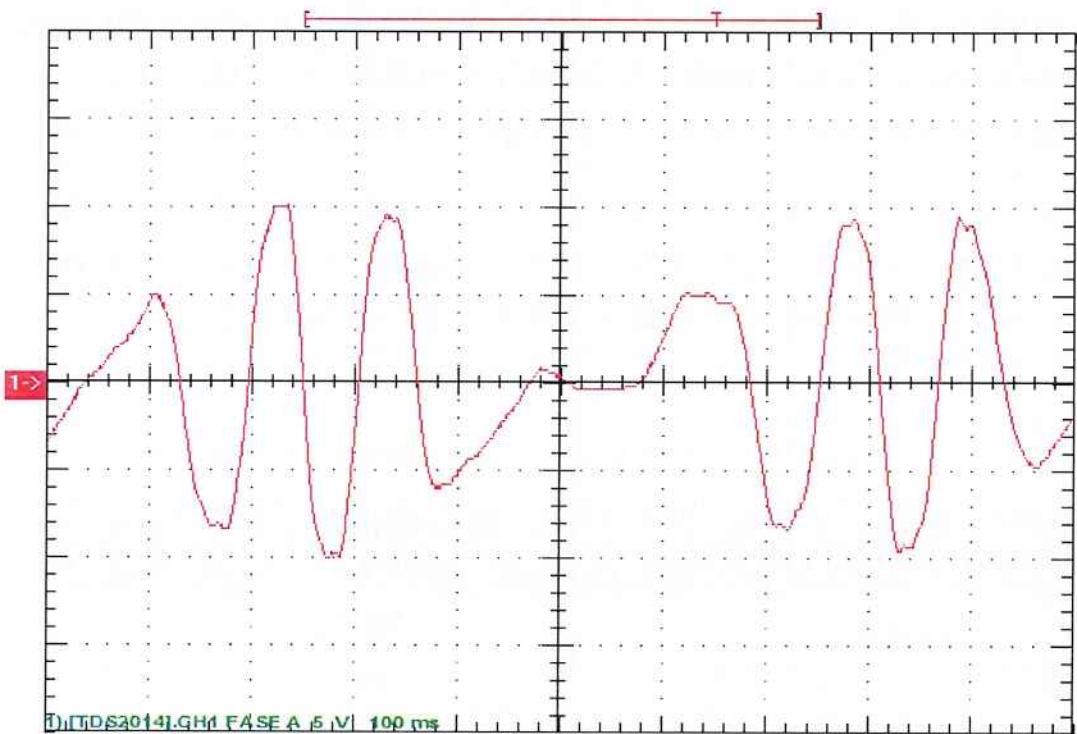


Figura 13.3 – Fotos do protótipo montado com a estrutura de acionamento



**Figura 13.4 – Tensões de fase (trifásico) em vazio (5 V/div; 100 ms/div)**



**Figura 13.5 (A) – Tensão na fase A em vazio (100 ms/div)**

### 13.2.2 Ensaio em carga ( $10 \Omega$ )

As ondas obtidas no ensaio em carga resistiva ( $10 \Omega$  por fase) são mostradas a seguir:

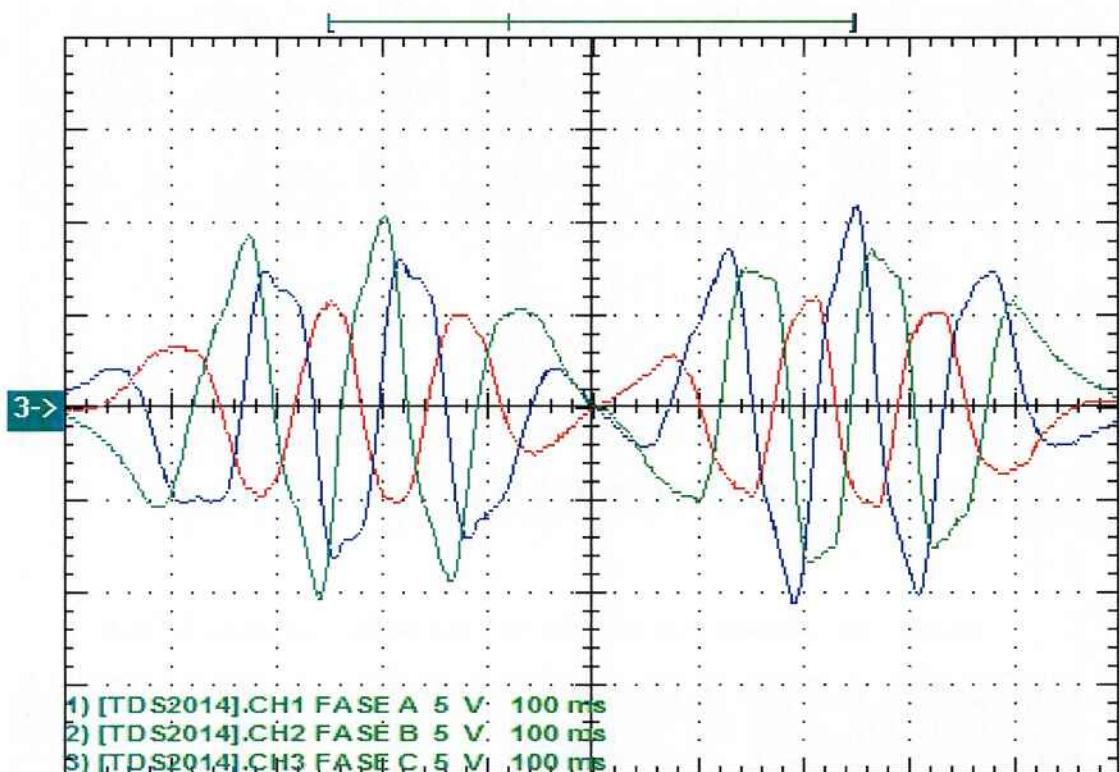


Figura 13.6 – Tensões de fase em carga (5 V/div; 100 ms/div)

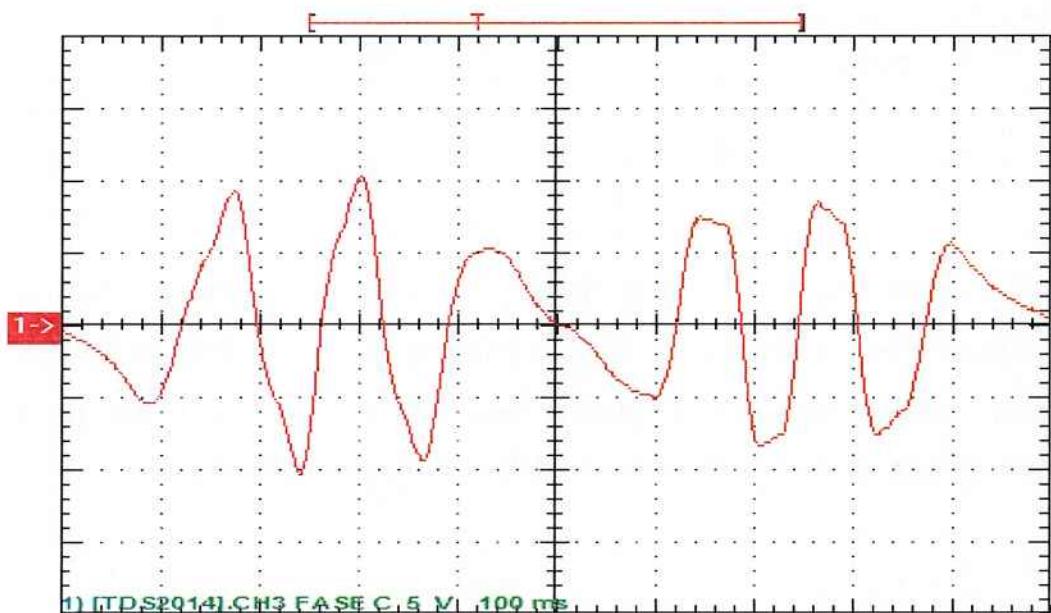


Figura 13.7 (A) – Tensão na fase C em carga (100 ms/div)

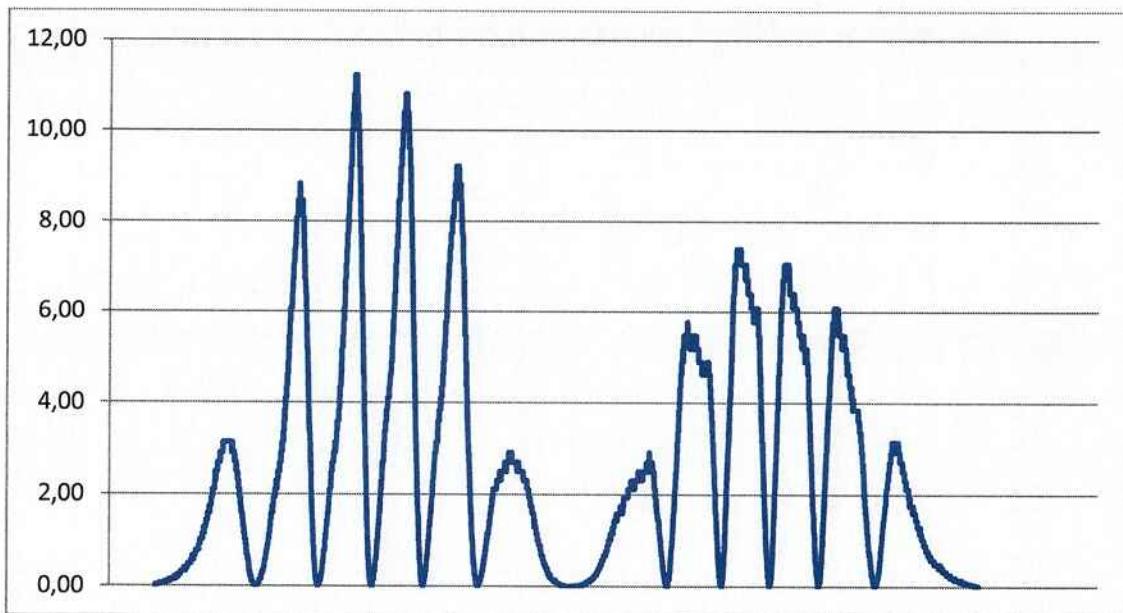


Figura 13.8 – Potência na fase C em watts [W] (1 ciclo)

### 13.2.3 Formas de onda para diferentes frequências

A fim de verificar se, com o aumento da frequência mecânica, a frequência elétrica e a amplitude da tensão máxima realmente aumentavam, foram feitos alguns testes com frequências diferentes de 1,0 Hz. Os efeitos da modulação previstos na seção 9 puderam ser verificados. A seguir são mostradas as formas de onda da tensão na fase C em vazio para diferentes frequências mecânicas:

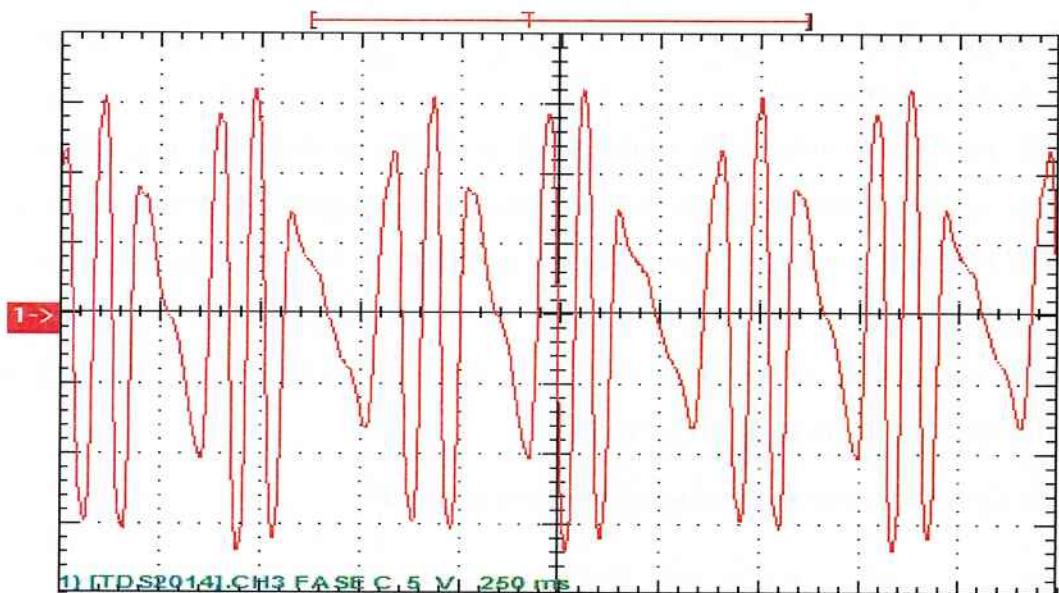
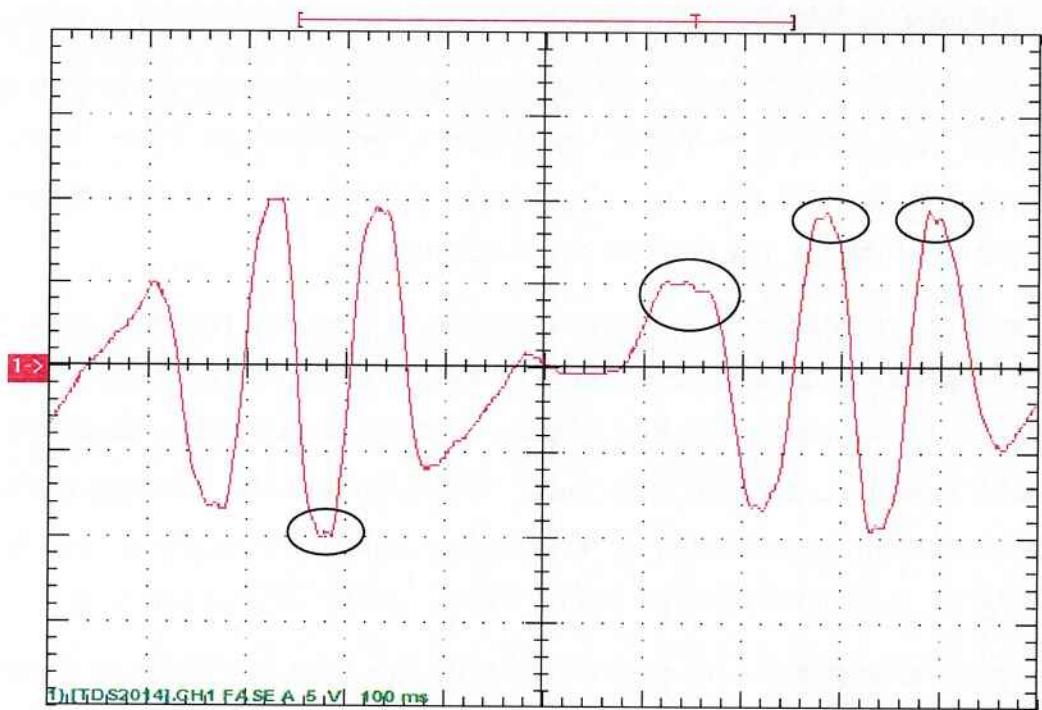
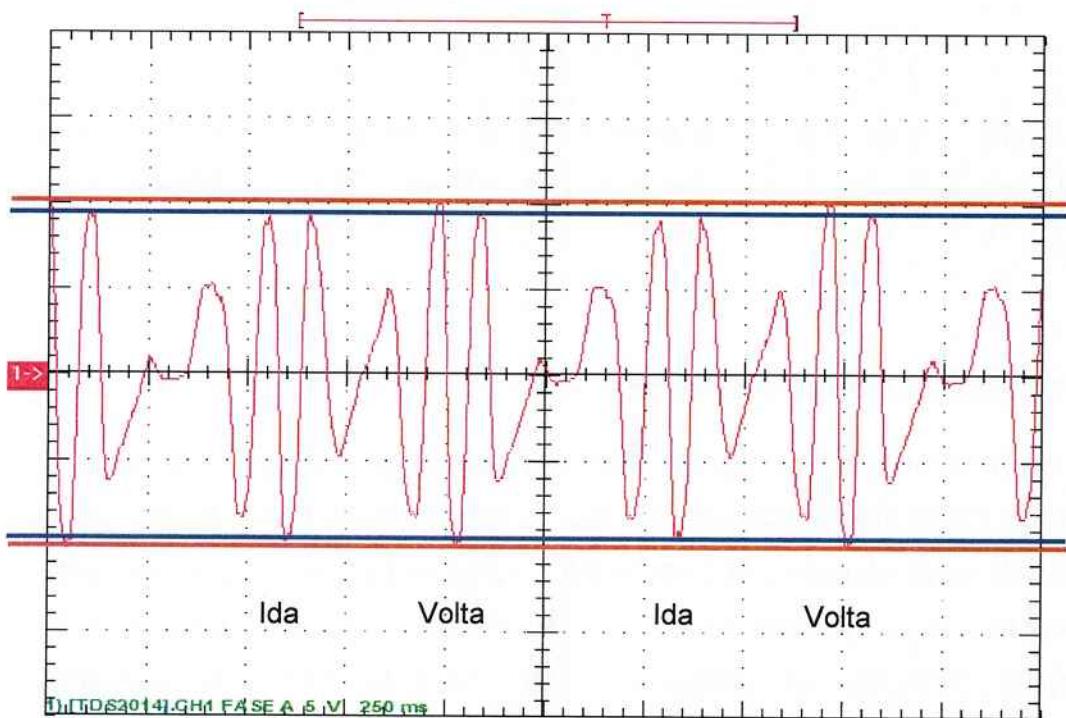


Figura 13.9 – Tensão em vazio na fase C para  $f_{onda} = 1,2 \text{ Hz}$  (5 V/div; 250 ms/div)



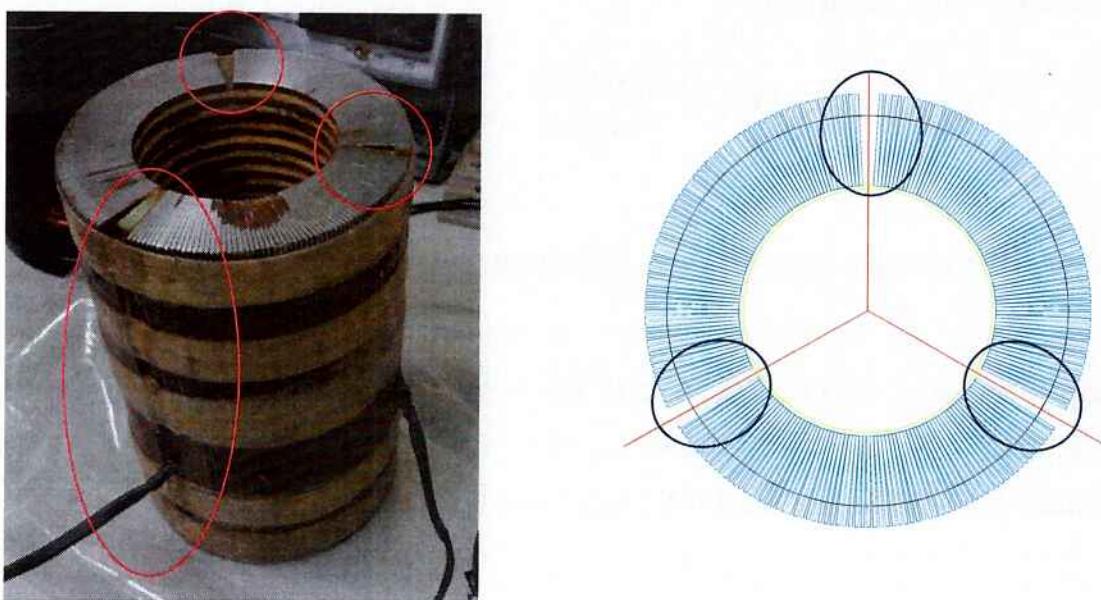
**Figura 13.11 – Ilustração das ondulações causadas pelas vibrações do sistema mecânico**



**Figura 13.12 – Ilustração da diferença entre os níveis de tensão dos semiciclos**

### 13.3.3.1 Volume de ar entre as lâminas do estator

Um dos fatores que causa uma diminuição do fluxo magnético e pode ser quantificado de forma simples é a presença de ar entre os conjuntos de lâminas estatóricas nas aberturas reservadas para a saída dos terminais das bobinas (Figura 13.13).



**Figura 13.13 – Ilustração dos espaços por onde saem os terminais dos enrolamentos**

No total, foram deixadas três aberturas (uma para cada fase) com espaço suficiente para encaixar seis lâminas de aço-carbono em cada uma delas. Considerando-se que a relutância do ar é muito maior que a do aço em questão, a presença do gás entre os grupos de lâminas ocasiona uma redução da densidade de fluxo magnético que percorre o estator. Esta perda é proporcional ao volume de ar presente em relação ao volume total do estator e pode, portanto, ser calculada através da relação entre os comprimentos de circunferência da seção transversal do induzido.

Conforme Tabela 8.3, o diâmetro interno do estator é de 71 mm. Então, o comprimento de circunferência interno  $L_{est\_int}$  é dado por:

$$L_{int\_est} = \pi \cdot 71 = 223,05 \text{ mm}$$

Pelos recursos do arquivo da simulação, onde se pode observar as linhas de campo que se desviam de um polo para as sapatas vizinhas, verificou-se que o fluxo magnético total na base da sapata central ( $\phi_p$ ) é de aproximadamente 130,5 mWb (conforme exposto na seção 8). Porém, o fluxo na seção do entreferro que envolve a mesma sapata ( $\phi_g$ ) é de 112,6 mWb, ou seja, existe uma perda magnética nesta ocasião que não é desprezível:

$$\Delta\phi_{\%d} = 1 - \frac{\phi_g}{\phi_p} = 1 - \frac{112,6}{130,5} = 13,7\%$$

### 13.3.3.3 Tensão induzida teórica corrigida

Considerando-se os fatores de perdas magnéticas  $\Delta\phi_{\%ar}$  e  $\Delta\phi_{\%d}$  calculados nas subseções anteriores e utilizando-se a tensão de pico em vazio como referência, é possível realizar uma comparação mais precisa entre os valores de tensão calculados e medidos:

$$E_{fpico\_corr} = E_{fpico} (1 - \Delta\phi_{\%ar} - \Delta\phi_{\%d})$$

O valor calculado de  $E_{fpico}$  é 18,2 V (Tabela 9.1). Então:

$$E_{fpico\_corr} = 18,2 \text{ V} \cdot (1 - 0,081 - 0,137) = 14,2 \text{ V}$$

Conforme Tabela 13.2, o valor de pico da tensão medida nas fases B e C, cujas bobinas estão ligadas corretamente, é de 13,0 V. Portanto, o erro entre o valor calculado e o medido vale:

$$\epsilon_{Ef} = \frac{14,2 - 13}{13} = 9,5\%$$

A fim de buscar justificativas para essa diferença residual, empregou-se uma sonda de campo magnético para medir a densidade de fluxo gerada pelos ímãs permanentes em diferentes pontos do protótipo. Em uma das inspeções realizadas, o transladador foi empurrado até uma das extremidades do protótipo, de modo que vários polos ficassem expostos, sem a cobertura e a influência da relutância magnética do estator. Dessa forma, mediu-se o campo na superfície de diversas sapatas e observou-se que os valores variavam, às vezes consideravelmente.

## 14 CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

No trabalho descrito neste documento, foram executadas basicamente todas as etapas necessárias para o desenvolvimento de uma nova máquina elétrica – desde a idealização do modelo de protótipo, a partir de pesquisas e processos criativos, até os ensaios do protótipo construído para validação das grandezas dimensionadas durante a fase de projeto.

Apesar das perdas magnéticas descobertas e analisadas após os ensaios, o modelamento eletromagnético do gerador linear (seções 6, 7 e 8) foi realizado de maneira coerente e seus resultados puderam ser consolidados através das simulações em métodos dos elementos finitos (seção 10) e dos testes do protótipo (seção 13). Os fatores de perdas não considerados durante a fase de projeto, após serem analisados, propiciaram a justificativa de divergências entre valores calculados e medidos. Portanto, em relação à tensão gerada (seção 9), o protótipo atende consistentemente ao que foi proposto pelo equacionamento teórico (após se descontar os fatores descritos na subseção 13.3.3).

O detalhamento mecânico do protótipo (seção 11) foi de extrema importância para a correta fabricação dos componentes, o que permitiu uma montagem executada sem grandes problemas nem retrabalhos (seção 12). As partes do gerador, mesmo não sendo grandes, são bastante pesadas. Assim, os materiais escolhidos e a estrutura de suporte concebida foram essenciais para que a estrutura geral do protótipo se preservasse quando ele entrasse em operação, evitando-se, por exemplo, que a espessura do entreferro fosse alterada.

Os aspectos de projeto atribuídos para que o protótipo apresentasse forças parasitas menores foram aplicados. Não foi realizada uma comparação quantitativa direta entre um gerador com e sem as medidas de melhoria propostas. Porém, pelo equacionamento realizado para o caso de um estator com número fracionário de dentes por polo (seção 7), é perceptível que o conteúdo harmônico e, portanto, as pulsações de campo magnético são consideravelmente reduzidas quando comparadas ao caso de um estator com número inteiro de dentes por polo. Adicionalmente, sabe-se, pela própria experiência do orientador do projeto, que seria mais difícil movimentar o transladador se as sapatas polares não fossem inclinadas (subseção 11.3).

## REFERÊNCIAS

- [1] Empresa de Pesquisa Energética (EPE), "Plano Decenal de Expansão de Energia" (PDE 2021), 2013 ([http://www.epe.gov.br/PDEE/20130326\\_1.pdf](http://www.epe.gov.br/PDEE/20130326_1.pdf))
- [2] Barroca, Tiago N. P., "Dimensionamento de um gerador linear para o aproveitamento da energia das ondas", Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre – Universidade Técnica de Lisboa, 2012
- [3] Empresa de Pesquisa Energética (EPE), "Plano Nacional de Energia (PNE 2030)", 2008, pág. 37, 51 ([http://www.epe.gov.br/PNE/20080512\\_9.pdf](http://www.epe.gov.br/PNE/20080512_9.pdf))
- [4] Rodrigues, Julia da R. H.; Ribas, Vinicius E., "Projeto de Gerador Elétrico Linear de Ímãs Permanentes Acionado por Máquina a Vapor", Projeto de Formatura da Escola Politécnica da USP, 2012
- [5] Beirão, Gonçalo F., "Protótipo de um Gerador Linear para Aproveitamento de Energia das Ondas num Sistema AWS", Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre – Universidade Técnica de Lisboa, 2010
- [6] Elwood, D.; Solomon, C.Y.; Prudell, J; Stillinger, C.; Von Jouanne, A.; Brekken, T.; Brown, A.; Paasch, R., "Design, construction, and ocean testing of a taut-moored dual-body wave energy converter with a linear generator power take-off"
- [7] Vermaak, R., "Development of a Novel Air-Cored Permanent Magnet Linear Generator for Direct Drive Ocean Wave Energy Converters", 2012
- [8] Joseph, D.M.; Cronje, W.A., "Design and Analysis of a Double-Sided Tubular Linear Synchronous Generator with Particular Application to Wave-Energy Conversion," Power Engineering Society Conference and Exposition in Africa, 2007. PowerAfrica '07. IEEE , vol., no., pp.1-8, 16-20 July 2007
- [9] Uyekita, Anderson H.; Yada, Claudio S., "Projeto: Desenvolvimento de um Protótipo de Gerador de Energia Elétrica utilizando Ondas Marítimas", Projeto de Formatura da Escola Politécnica da USP, 2009
- [10] Liwschitz, M., "Macchine Elettriche" Ulrico Hoepli Milano, 1964, vol. 3, pág. 41, 65

## REFERÊNCIAS COMPLEMENTARES

- [12] Valentini, Leonardo M.; Benevenuto, Rodolfo G., "Aplicação de Motores Lineares em Sistemas de Portas Ferroviárias", Projeto de Formatura da Escola Politécnica da USP, 2011
- [13] Hodgins, N.; Keysan, Ozan; McDonald, A.S.; Mueller, M.A., "Design and Testing of a Linear Generator for Wave-Energy Applications," Industrial Electronics, IEEE Transactions on , vol.59, no.5, pp.2094,2103, May 2012
- [14] Hodgins, N.; Keysan, Ozan; McDonald, A.; Mueller, M., "Linear generator for direct drive wave energy applications," Electrical Machines (ICEM), 2010 XIX International Conference on , vol., no., pp.1,6, 6-8 Sept. 2010
- [15] Cecconi, Vittorio; Trapanese, M., "An optimum design of the magnetic circuit of a PM linear electrical generator for the exploitation of sea waves.," Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, 2006. SPEEDAM 2006. International Symposium on , vol., no., pp.116,119, 23-26 May 2006
- [16] Chen, H.; Wang, X.; Gu, J.J.; Lu, S., "Design of bilateral Switched Reluctance linear generator," Electric Power and Energy Conference (EPEC), 2010 IEEE , vol., no., pp.1,5, 25-27 Aug. 2010
- [17] Polinder, H.; Mueller, M.A.; Scuotto, M.; Goden, de Sousa Prado M, "Linear Generator System for Wave Energy Conversion"
- [18] Drew, B.; Plummer, A. R.; Sahinkaya, M.N., "A review of wave energy converter technology", 2009
- [19] Rhinefrank, K.; Agamloh, E.B.; Von Jouanne, A.; Wallace, A.K.; Prudell, J.; Kimble, K.; Aills, J.; Schmidt, E.; Chan, P.; Sweeny, B.; Schacher, A. "Novel ocean energy permanent magnet linear", 2005
- [20] Falcão, A.F. De O. "Wave energy utilization: A review of the technologies", 2009
- [21] Gieras, J.F.; Piech, Z.J.; Tomczuk, B.Z. "Linear Synchronous Motors Transportation and Automation Systems", 2011
- [22] Waters, R., "Energy from Ocean Waves Full Scale Experimental Verification of a Wave Energy Converter", 2008

## ANEXO I - TABELA DE FIOS AWG

<b>AWG</b>	<b>Ø (mm)</b>	<b>Área (mm<sup>2</sup>)</b>	<b>Resistência do fio de cobre a 20 °C (Ohm/m)</b>	<b>Corrente Máxima (A)</b>
0	11,7	107	0,000161	380,00
000	10,4	85,0	0,000203	328,00
00	9,26	67,4	0,000256	283,00
0	8,25	53,5	0,000323	245,00
1	7,35	42,4	0,000407	211,00
2	6,54	33,6	0,000513	181,00
3	5,83	26,7	0,000647	158,00
4	5,19	21,1	0,000815	135,00
5	4,62	16,8	0,00103	118,00
6	4,11	13,3	0,00130	101,00
7	3,66	10,5	0,00163	89,00
8	3,26	8,36	0,00206	73,00
9	2,91	6,63	0,00260	64,00
10	2,59	5,26	0,00328	55,00
11	2,30	4,17	0,00413	47,00
12	2,05	3,31	0,00521	41,00
13	1,83	2,62	0,00657	35,00
14	1,63	2,08	0,00829	32,00
15	1,45	1,65	0,0104	28,00
16	1,29	1,31	0,0132	22,00
17	1,15	1,04	0,0166	19,00
18	1,02	0,823	0,0210	16,00
19	0,912	0,653	0,0264	14,00
20	0,812	0,518	0,0333	11,00
21	0,723	0,410	0,0420	9,00
22	0,644	0,326	0,0530	7,00
23	0,573	0,258	0,0668	4,70
24	0,511	0,205	0,0842	3,50
25	0,455	0,162	0,106	2,70
26	0,405	0,129	0,134	2,20
27	0,361	0,102	0,169	1,70
28	0,321	0,0810	0,213	1,40
29	0,286	0,0642	0,268	1,20
30	0,255	0,0509	0,339	0,86
31	0,227	0,0404	0,427	0,70
32	0,202	0,0320	0,538	0,53
33	0,180	0,0254	0,679	0,43
34	0,160	0,0201	0,856	0,33
35	0,143	0,0160	1,08	0,27
36	0,127	0,0127	1,36	0,21
37	0,113	0,0100	1,72	0,17
38	0,101	0,00797	2,16	0,13
39	0,0897	0,00632	2,73	0,11
40	0,0799	0,00501	3,44	0,09