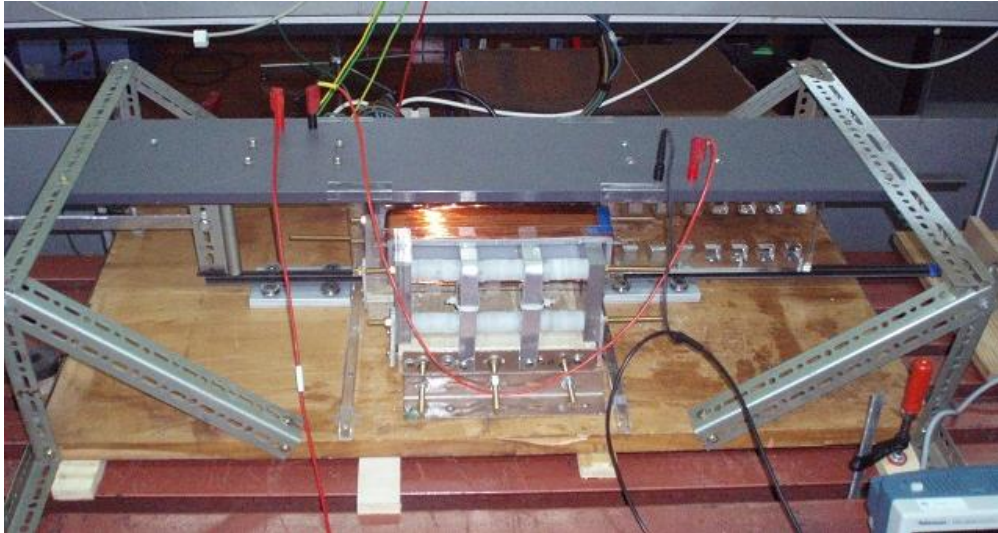




INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO
Universidade Técnica de Lisboa



Protótipo de um Gerador Linear para Aproveitamento de Energia das Ondas num Sistema AWS

Gonçalo Fernandes Beirão

Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Júri

Presidente: Prof. Doutor Paulo José da Costa Branco

Orientador: Prof. Doutor Joaquim António Fraga Gonçalves Dente

Co-Orientador: Prof. Doutor Gil Domingos Marques

Vogal: Prof. Doutor João Martins

Mai 2010

Agradecimentos

Agradeço ao Professor Joaquim Dente toda a disponibilidade e atenção e todo o seu conhecimento e sugestões, que me permitiram avançar e terminar esta dissertação.

Ao Professor Gil Marques, agradeço todo o cuidado e exigência e tanto que me ensinou ao longo destes meses com o seu pragmatismo e visão empírica.

Ao Sr. Duarte, ser tão prestável e expedito a ajudar-me no laboratório e a sua companhia durante o estágio de construção do protótipo.

À D. Noémia, a simpatia e ajuda a ultrapassar as barreiras burocráticas.

Aos meus Pais, Aurora e João, a educação e o amor recebidos e a possibilidade de tirar um curso superior.

Ao meu Irmão Samuel, pelo tempo disponibilizado para rever a dissertação, para uma leitura mais fluída.

À Daniela, a paciência e compreensão que me fizeram descobrir as prioridades da vida.

Aos meus Tios, pelo exemplo que me dão de que as oportunidades recebidas na vida devem ser aproveitadas com todo o esforço e dedicação da nossa parte.

Ao João Mestre, à Filipa, ao João Pedro, à Rita Lúcio e ao Paulo, o apoio durante o curso e o tempo de estudo, que se reflectiram na dissertação. Mais recentemente, ao Bernardo, por também ter ajudado no laboratório e na redacção.

Ao Luís, ao Márcio, ao Cláudio e à Sofia, agradeço o apoio, o ânimo e o descanso que as Amizades possibilitam.

Resumo

A conversão de energia das ondas em energia eléctrica tem sido alvo de estudo e desenvolvimento, por engenheiros e cientistas, ao longo das últimas décadas.

Entre os vários tipos de conversores estudados existem os sistemas de conversão por gerador linear, que convertem o movimento oscilatório de baixa frequência da onda em energia eléctrica.

Este trabalho vem no seguimento de outros trabalhos [1], [2] e [3] que realizaram estudos sobre conversores de energia das ondas e tem como objectivo a construção de um protótipo de um gerador linear de fluxo transverso para aproveitamento de energia das ondas num mecanismo de conversão electromecânico.

Para a topologia proposta neste trabalho serão apresentados modelos teóricos que pretendem prever tanto o comportamento da força electromotriz como das forças de origem electromagnética.

A descrição da construção do protótipo permite documentar aspectos mecânicos e eléctricos. Ou seja, são apresentados os métodos de construção do protótipo onde são descritos os procedimentos tomados e como foram corrigidas as falhas mecânicas do sistema; também são apresentados os resultados dos ensaios em vazio, carga e com ponte de rectificação efectuados ao protótipo.

Esta dissertação tem como objectivo dar um contributo de conhecimentos nesta área e pretende servir de guia para trabalhos futuros.

Abstract

Wave energy conversion in electric energy has been challenging engineers and scientists for the last decades.

There are several converter topologies studied. Between them are the linear generators, which convert the low frequency oscillating wave motion into electric energy.

This work follows others [1], [2] e [3] that studied wave energy converters and has the goal to build a transverse linear flux generator prototype for a power take off system in an electromechanical device.

For the generator presented in this work there are calculated mathematical models that predict the behavior of both electromotive force and electromagnetic forces due to magnetic flux leakage.

The prototype's assembly processes is described in order to record the mechanical and electrical particularities. I.e., there are described the adopted construction methods, the procedures taken and how the mechanical failures were taken care of; there are also presented the no load, load and rectifier bridge results from the prototype's test.

This dissertation seeks to give a contribution in this area and intends to serve as a guide for future prototypes.

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Ondas marítimas como recurso energético	1
1.2	Energia das ondas em Portugal	2
1.3	Enquadramento Histórico	3
1.4	Tecnologias de Conversão de Energia das Ondas	3
1.5	Âmbito do Trabalho	5
2	Descrição da Máquina de Fluxo Transverso (MFT)	7
2.1	Princípio de Funcionamento	7
2.2	<i>Design</i> e Concepção do Protótipo	8
2.3	Modelação do Sistema Mecânico	14
2.4	Modelação do Sistema Eléctrico	16
2.5	Resultados Teóricos em Vazio	24
2.6	Resultados Teóricos em Carga	26
2.7	Resultados Teóricos com Ponte de Rectificação	27
3	Conversão de Energia - Cálculo de Forças de Origem Magnética	29
3.1	Forças no Movimento Perpendicular ao Eixo de Translação - MPET	30
3.1.1	Cálculo Teórico	30
3.1.2	<i>Software</i> de Elementos Finitos 2D e 3D	31
3.1.3	Conclusões e Comparação de Resultados no Estudo das Forças no MPET	33
3.2	Forças no Movimento Segundo o Eixo de Translação - MSET	33
3.2.1	Cálculo Teórico	33
3.2.2	<i>Software</i> de Elementos Finitos 3D	34
3.2.3	Conclusões de Resultados no MSET	36
4	Aspectos Construtivos	37
4.1	<i>Estat</i> or: Primeira Fase	38
4.2	<i>Translator</i> , Sistema de Deslizamento Linear (SDL)	40
4.3	<i>Estat</i> or: Segunda Fase	43
4.4	Estrutura de Ancoragem	44

4.5	Fixação Regulável do <i>Estat</i> or: Primeira Fase	44
4.6	Colagem dos Magnetos	45
4.7	Enrolamento	47
4.8	Braço	49
4.9	Falhas Mecânicas	50
5	Ensa ios	53
5.1	Impedância Síncrona	53
5.2	Descrição do Aparato Experimental	54
5.3	Ensaios em Vazio	55
5.4	Ensaios em Carga	61
5.5	Ensaios com Ponte de Rectificação	64
5.6	Conclusões dos Ensaios	65
6	Conclusão e Trabalhos Futuros	67
	Apêndices	69
A	Ensa io com Entreferro $g = 8 \text{ mm}$	69
	Bibliografia	71

Lista de Figuras

1.1	Distribuição da potência média da energia das ondas no globo terrestre (em kW/m)	1
1.2	Distribuição da potência média da energia das ondas na Europa (em kW/m)	2
1.3	Organigrama das tipologias de conversores de energia das ondas mais relevantes . .	4
1.4	<i>Archimedes Wave Swing</i>	5
2.1	Morfologia dum pólo da Máquina de Fluxo Transverso (MFT) e traçado do fluxo magnético	7
2.2	Dois pares de pólos da MFT	8
2.3	Corte da Peça Polar	9
2.4	Modelo do Protótipo da MFT	9
2.5	Vista Isométrica da MFT	10
2.6	Alçado Frontal da MFT	10
2.7	Alçado Esquerdo da MFT	10
2.8	Representação do Curto-Circuito Magnético	11
2.9	Representação e dimensões da peça polar em mm (profundidade $d = 20 mm$)	12
2.10	Representação Gráfica do <i>Estator</i>	13
2.11	Desenho Conceptual do Protótipo	14
2.12	Eixo com Dois Braços	14
2.13	Sistema Mecânico a Modelar (medidas em mm)	15
2.14	Posição e velocidade do <i>translator</i>	16
2.15	Circuito Eléctrico Equivalente	16
2.16	Circuito Magnético Equivalente	17
2.17	Vista Frontal do Esquema Equivalente do Enrolamento (medidas em mm)	18
2.18	Vista Superior de um lado do <i>Estator</i>	18
2.19	Linhas de Corrente de Densidade de Fluxo Magnético Intervinentes em \mathcal{R}_{m_1} ((a)- Vista Superior (b) - Vista Lateral)	19
2.20	Linhas de Corrente de Densidade de Fluxo Magnético Intervinentes em \mathcal{R}_{m_2} ((a)- Vista Superior (b) - Vista Lateral)	19
2.21	Diagrama Vectorial da Mudança de Meio do Campo Magnético	20
2.22	Linhas de Corrente de Densidade de Fluxo Magnético Intervinentes em \mathcal{R}_{m_1}	21
2.23	Representação Esquemática das Linhas de Corrente de Fluxo Intervinentes em \mathcal{R}_{m_3}	21

2.24	Linhas de Corrente de Densidade de Fluxo Magnético por <i>Software</i> de Elementos Finitos Intervenientes em \mathcal{R}_{m_3}	22
2.25	Circuito Magnético Equivalente	22
2.26	Força Electromotriz em Vazio (E) e Posição (z) com Período de Oscilação de $T_{mec} = 2.54 s$	24
2.27	Evolução da força electromotriz com a variação da frequência eléctrica	25
2.28	Carga resistiva $R = 5 \Omega$	26
2.29	Carga resistiva $R = 10 \Omega$	26
2.30	Tensão em Vazio com Ponte de Rectificação	27
2.31	Tensão em carga ($R = 5 \Omega$) com Ponte de Rectificação	27
3.1	MSET (a) e MPET (b)	30
3.2	Pormenor do Entreferro	31
3.3	Esquema usado na simulação	32
3.4	Evolução da força no MPET	32
3.5	Evolução Normalizada da Força ($f_m(z)$) e da Energia Magnética (W_m) no MSET (teórico)	34
3.6	Esquema usado na simulação	35
3.7	Evolução da força no MSET	35
3.8	Evolução da força no MSET (detalhe em meio passo polar)	36
4.1	Diagrama de Gantt da Construção do protótipo	37
4.2	Placas de ferro	38
4.3	Anilhas em acrílico para espaçamento entre pólos	39
4.4	Circuito Magnético do <i>Estatore</i>	39
4.5	<i>Translator</i> (medidas em mm)	40
4.6	Guias em 'V' para Sistema de Deslizamento Linear (SDL) - <i>Slide Rail</i> NC 25 \times 1076 [mm^2] - ref.179 - 336	40
4.7	Placas de carro para SDL - <i>Carriage Plate</i> - ref.179 - 364	41
4.8	Rolamentos em 'V' para SDL - <i>Bearings</i> - ref.179 - 386 e ref.179 - 370	41
4.9	Nozes em 'T' para SDL - <i>T-Nut</i> - ref.179 - 421	41
4.10	Grupo carro+rolamentos+noz fixos na base	42
4.11	<i>Translator</i> com SDL	42
4.12	Alteamento do <i>Estatore</i>	43
4.13	Elementos de Fixação do <i>Estatore</i>	43
4.14	Estrutura de Ancoragem	44
4.15	Primeira abordagem à estrutura de fixação regulável do <i>estatore</i>	45
4.16	Colagem de metade dos magnetos no <i>translator</i>	45
4.17	Forças entre Magnetos	46
4.18	Caminho a Percorrer pelo Enrolamento	47

4.19	Bobine de Cobre e Enrolamento no Molde de Madeira	47
4.20	Enrolamento no <i>Estató</i> r Parcialmente Desmantelado	48
4.21	Enrolamento Final	48
4.22	<i>Estató</i> r Final	49
4.23	Bornes e Ligações	49
4.24	Eixo com Dois Braços - Pormenor	49
4.25	Representação da Falha Mecânica das fixações em 'I'	50
4.26	Fixações em 'L'	50
4.27	Fixações Reguláveis do <i>Estató</i> r	51
4.28	Falha e Estrutura em 'L' para Correção	51
4.29	Danos no Braço Devido a Falha	52
5.1	Aparato Experimental	54
5.2	Força Electromotriz em Vazio (<i>E</i>) e Posição (<i>z</i>) à Velocidade de 20 <i>Hz</i> do Motor de Indução e Período de Oscilação de $T_{mec} = 5.34 s$	55
5.3	Força Electromotriz em Vazio (<i>E</i>) e Posição (<i>z</i>) com Período de Oscilação de $T_{mec} = 5.34 s$ (teórico)	55
5.4	Força Electromotriz em Vazio (<i>E</i>) e Posição (<i>z</i>) à Velocidade de 30 <i>Hz</i> do Motor de Indução e Período de Oscilação de $T_{mec} = 3.43 s$	56
5.5	Força Electromotriz em Vazio (<i>E</i>) e Posição (<i>z</i>) com Período de Oscilação de $T_{mec} = 3.43 s$ (teórico)	56
5.6	Força Electromotriz em Vazio (<i>E</i>) e Posição (<i>z</i>) à Velocidade de 40 <i>Hz</i> do Motor de Indução e Período de Oscilação de $T_{mec} = 2.54 s$	57
5.7	Força Electromotriz em Vazio (<i>E</i>) e Posição (<i>z</i>) com Período de Oscilação de $T_{mec} = 2.54 s$ (teórico)	57
5.8	Força Electromotriz em Vazio (<i>E</i>) e Posição (<i>z</i>) à Velocidade de 50 <i>Hz</i> do Motor de Indução e Período de Oscilação de $T_{mec} = 1.99 s$	58
5.9	Força Electromotriz em Vazio (<i>E</i>) e Posição (<i>z</i>) com Período de Oscilação de $T_{mec} = 1.99 s$ (teórico)	58
5.10	Força Electromotriz em Vazio (<i>E</i>) e Posição (<i>z</i>) à Velocidade de 60 <i>Hz</i> do Motor de Indução e Período de Oscilação de $T_{mec} = 1.68 s$	59
5.11	Força Electromotriz em Vazio (<i>E</i>) e Posição (<i>z</i>) com Período de Oscilação de $T_{mec} = 1.68 s$ (teórico)	59
5.12	Evolução do Valor Eficaz da Força Electromotriz (E_{RMS}) com a Frequência Eléctrica (f_{ele})	60
5.13	Carga resistiva $R = 5 \Omega$	61
5.14	Carga resistiva $R = 5 \Omega$ (teórico)	61
5.15	Carga resistiva $R = 10 \Omega$	62
5.16	Carga resistiva $R = 10 \Omega$ (teórico)	62
5.17	Ponte de Rectificação em Vazio	64
5.18	Ponte de Rectificação em Carga ($R = 5 \Omega$)	64

6.1	Sugestão de Novo Pólo	68
A.1	Ensaio em Vazio com Entreferro $g = 8 \text{ mm}$ e $v_{med} = 0.25 \text{ m/s}$	69

Lista de Tabelas

1.1	Cronograma dos factos mais relevantes da energia das ondas	3
3.1	Propriedades da Peça Polar	29
5.1	Tabela com valores referentes às Figuras 5.2 a 5.10	60
5.2	Tabela com valores referentes às Figuras 5.13 e 5.14 ($R = 5 \Omega$)	62
5.3	Tabela com valores referentes às Figuras 5.15 e 5.16 ($R = 10 \Omega$)	63

Lista de Acrónimos

IST Instituto Superior Técnico

INETI Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação

AWS *Arquimedes Wave Swing*

CAO Coluna de Água Oscilante

CEO Centro de Energia das Ondas

WavEC Wave Energy Centre

ID Investigação e Desenvolvimento

MFT Máquina de Fluxo Transverso

MPET Movimento Perpendicular ao Eixo de Translação

MSET Movimento Segundo o Eixo de Translação

SDL Sistema de Deslizamento Linear

NTNU Norwegian University of Science and Technology

Lista de símbolos

A	Área do Entreferro [m^2]
B_r	Densidade de Fluxo Magnético Remanescente do Magneto [T]
c	Largura da Perna da Peça Polar em U [m]
c_m	Largura do Magneto [m]
d	Profundidade do Pólo e do Magneto [m]
D	Largura da Peça Polar em U [m]
δ	Profundidade de Penetração [mm]
e	Espaçamento entre Pólos [m]
E	Força Electromotriz [V]
\mathcal{F}_{mm}	Força Magnetomotriz [$A - espira$]
f	Frequência [Hz]
f_m, F	Forças de Origem Magnética [N]
g_{ag}	Aceleração Gravítica [m/s^2]
g	Dimensão do Entreferro [m]
H	Comprimento da Peça Polar em U [m]
H_c	Intensidade de Campo Magnético Coercitivo do Magneto [A/m]
H_w	Altura da Onda [m]
i, I	Corrente Eléctrica [A]
J	Densidade de Corrente [A/m^2]
L	Comprimento do Protótipo [m]
\mathcal{L}	Indutância [H]
l_m, h	Comprimento do Magneto [m]
μ	Permeabilidade Magnética do Meio [H/m]
N	Número de Espiras do Estator
ω	Velocidade Angular [rad/s]

P_w	Potência da Onda [kW/m]
p	Número de Pares de Pólos do Protótipo
ϕ	Fluxo Magnético [Wb]
ψ	Fluxo Magnético Ligado [Wb]
R	Resistência de Carga [Ω]
\mathcal{R}	Relutância Magnética [$A - espira/Wb$]
r_a, r_b	Comprimento do Braço [m]
r_{Cu}	Raio do Condutor de Cobre [mm]
ρ_{H_2O}	Densidade da Água do Mar [kg/m^3]
s	Largura da Secção Disponível para o Condutor [m^2]
S_{Cu}	Secção do Condutor de Cobre [mm]
ρ	Condutividade Eléctrica do Meio [$S.m/mm^2$]
t	Altura da Secção Disponível para o Condutor [m^2]
T	Período [s]
θ, γ	Posição Angular [rad]
U	Tensão na Carga [V]
v	Velocidade [m/s]
W_m	Energia Magnética [J]
x, y, z	Eixos Cartezianos
X	Período Espacial [m]

Capítulo 1

Introdução

1.1 Ondas marítimas como recurso energético

Cerca de 70% do globo terrestre está coberto por oceanos em constante movimento devido a diferentes fontes de energia. Essas fontes de energia devem-se a:

- Interação dos campos gravíticos da lua e do sol (energia das marés);
- Radiação solar incidente na superfície dos oceanos (energia térmica dos oceanos);
- Gradientes de temperatura e salinidade e acção das marés (energia das correntes marítimas);
- Energia transferida pelo vento incidente na superfície dos oceanos (energia das ondas).

Estes factores acima mencionados levaram a estudos que concluíram que a maior densidade de potência média da energia das ondas pode ser encontrada entre as latitudes 30° e 60°, em ambos os hemisférios. Como mostra a Figura 1.1, essas zonas intersectam, no hemisfério Norte, a costa do Canadá, Estados Unidos da América e a costa oeste da Europa, bem como, no hemisfério sul, a costa sul da América do Sul e Austrália.

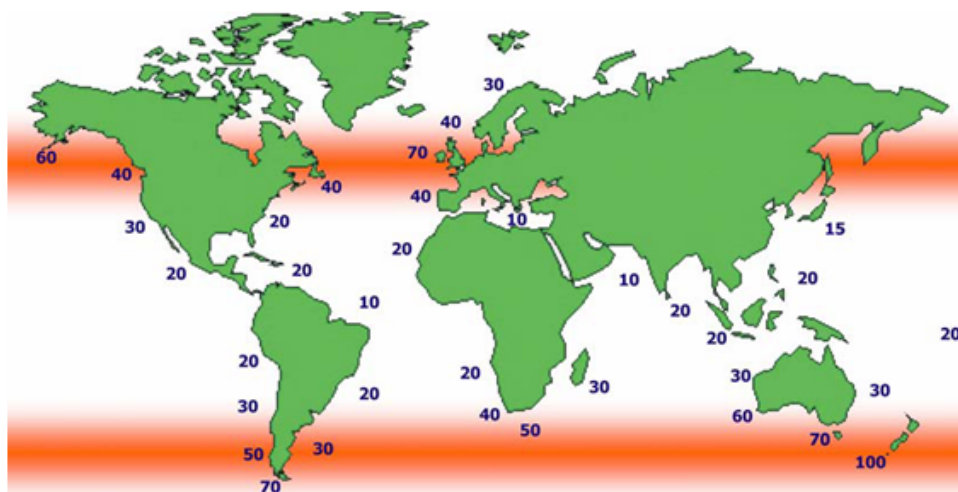


Figura 1.1: Distribuição da potência média da energia das ondas no globo terrestre (em kW/m)

Ao olhar mais em detalhe para a costa oeste da Europa, representada na Figura 1.2, verifica-se que a potência média da energia das ondas toma níveis médio/altos, comparando com o resto do mundo.

Para suportar esta afirmação, estudos realizados nesta área afirmam que o recurso energético das ondas explorável chega aos 290 GW, ou seja, cerca de 400 centrais de ciclo combinado ou ainda 30 centrais hídricas como as Três Gargantas, na China [4].



Figura 1.2: Distribuição da potência média da energia das ondas na Europa (em kW/m)

Usualmente, a potência por unidade de comprimento de uma onda é medida em kW/m . Esta potência tem origem nas energias cinética e potencial da onda, ou seja, maioritariamente na sua altura e velocidade, sendo expressa pela eq. 1.1 [5]:

$$P_w = \frac{\rho_{H_2O} g_{ag}^2 T_w H_w^2}{32\pi} \quad (1.1)$$

1.2 Energia das ondas em Portugal

Portugal está geograficamente situado numa zona que propicia a exploração de energia das ondas. As vantagens do seu território resultam das:

- Características da costa, continental e ilhas, existindo uma vasta costa com uma potência de onda por unidade de comprimento média alta;
- Infra-estruturas presentes ao longo da costa, nomeadamente portos, estaleiros navais e rede eléctrica nacional;
- Políticas governamentais que estabelecem este recurso como energia renovável, sendo a compra de energia obrigatória e a tarifa aplicada sob regime bonificado;
- Conhecimentos técnico-científicos nesta área, nomeadamente com o contributo do Instituto Superior Técnico (IST) e, mais recentemente, com o Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação (INETI).

Na sequência dos trabalhos de investigação destes organismos realizaram-se actividades de desenvolvimento e demonstração das tecnologias investigadas, culminando na construção de várias centrais-piloto: a central de Coluna de Água Oscilante (CAO), na da ilha do Pico, nos Açores (concluída em 1999, com 400 kW), a central AWS ao largo da Póvoa do Varzim (instalada em 2004, com 2 MW), a central de *Pelamis*, na Aguçadora (concluída em 2008, com 3×750 kW). Foram feitos estudos preliminares para uma central de demonstração no quebra-mar da Foz do Douro, ainda que nunca concretizada. Mais recentemente, para a continuidade dos projectos realizados, foi criado em 2003 o Centro de Energia das Ondas (CEO) - Wave Energy Centre (WavEC) - que tem como objectivo o desenvolvimento e promoção da utilização da energia das ondas através de suporte técnico e estratégico a empresas, instituições de I&D, entidades governamentais e autoridades locais.

1.3 Enquadramento Histórico

As ondas são um recurso energético muito vasto. Para o aproveitamento da energia das ondas estão patenteados sistemas desde o final do século XVIII, mas só desde meados do século passado, no Japão, apareceu o primeiro sistema de aplicação industrial. O choque petrolífero dos anos 70 levou ao despoletar de tecnologias para aproveitamento de energia das ondas e, desde então, os investimentos nessa área por parte de países em todo o globo têm vindo a aumentar. Esses investimentos levaram a um crescimento ao nível da investigação, tanto teórica como experimental e culminam nos vários protótipos já a ser testados em condições reais de alto mar. Na Tabela 1.1 estão presentes os acontecimentos mais relevantes na história da investigação, desenvolvimento e execução de projectos de energia das ondas [6].

Tabela 1.1: Cronograma dos factos mais relevantes da energia das ondas

1960	Princípios	
	Meados	Aplicação industrial no Japão
	Finais	
1970	Princípios	Proposta Stephen Salter para produção em larga escala
	Meados	Programa Reino Unido (2 GW)
	Finais	
1980	Princípios	Teoria linear no domínio da frequência
	Meados	Primeiras centrais piloto no Japão e na Noruega
	Finais	Modelos lineares no domínio do tempo de WEC's
1990	Princípios	Análise linear no domínio da frequência de conjuntos de WEC's
	Meados	Modelos "Wave-to-Wire" de WEC's
	Finais	Análise hidrodinâmica não linear de WEC's
2000	Princípios	Teste no mar de diversas centrais piloto
	Meados	Demonstração da tecnologia
	Finais	Demonstração da viabilidade económica da tecnologia

No início de 2010 foi anunciada a entrada da *Siemens* no mercado da energia das marés, pela compra de 10% das acções da maior companhia de energia das marés, *Marine Current Turbines* [7].

1.4 Tecnologias de Conversão de Energia das Ondas

Por ser um campo ainda em estado inicial, existem inúmeros modelos e protótipos de conversores de energia das ondas. Contudo, far-se-á uma divisão destes sistemas segundo as suas características

mecânicas e integração no meio, construindo-se o organigrama Figura 1.3 [8]:

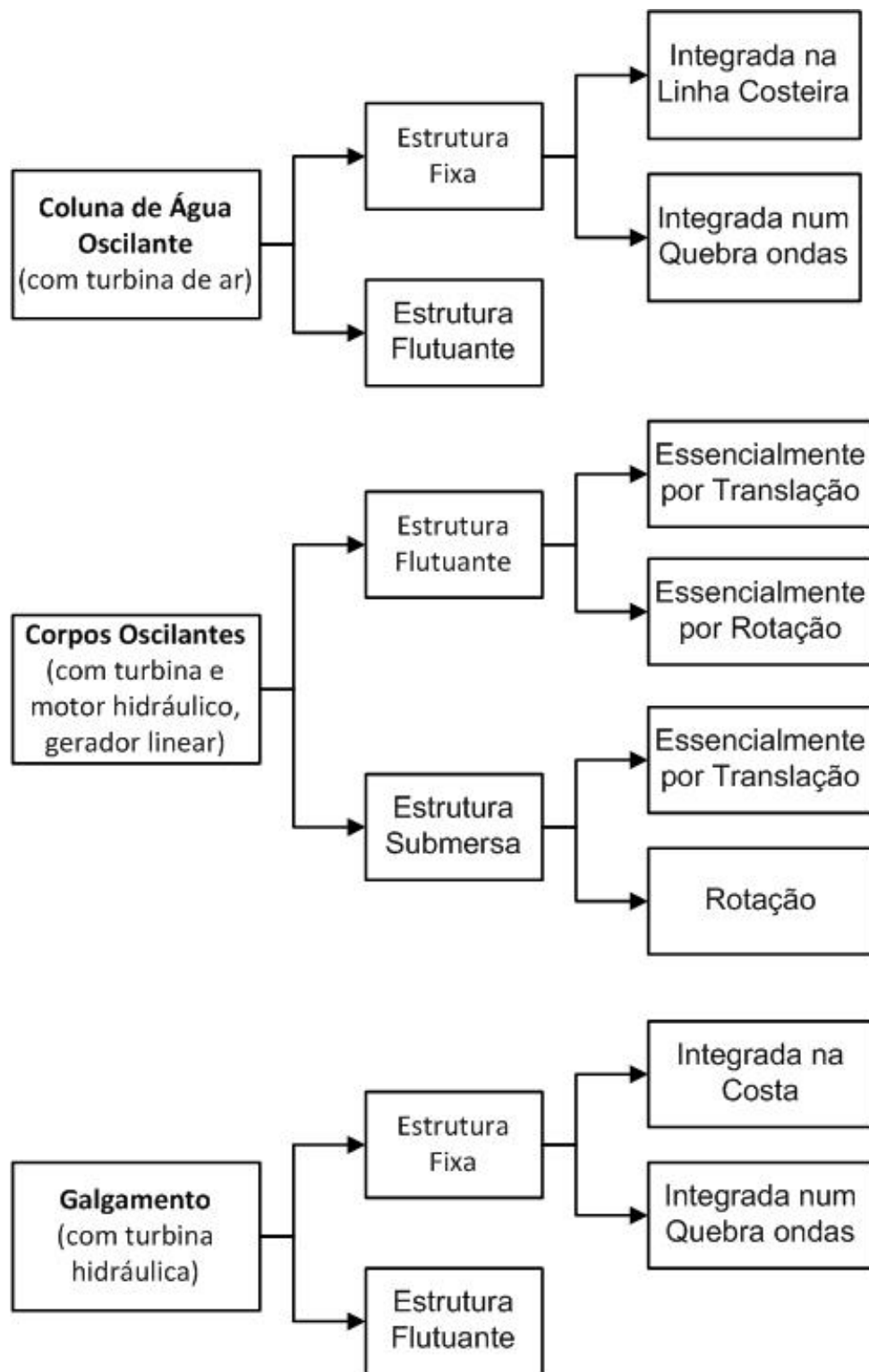


Figura 1.3: Organigrama das tipologias de conversores de energia das ondas mais relevantes

Na Figura 1.3 estão definidos os tipos de conversores de energia das ondas com maior expressão no panorama mundial. Um desses conversores, integrado na divisão de corpos oscilantes submersos, é o sistema *Archimedes Wave Swing* (AWS) [9], representado na Figura 1.4.

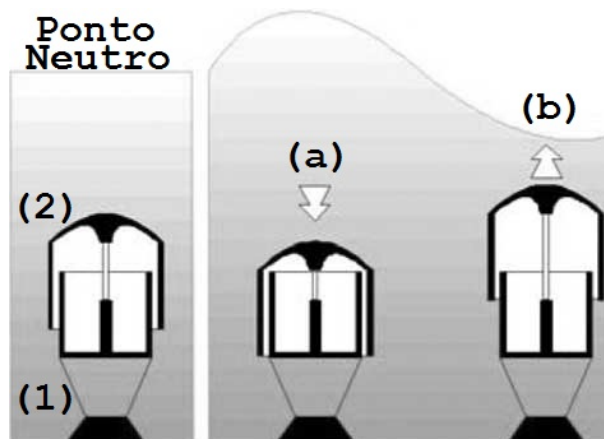


Figura 1.4: Archimedes Wave Swing

O AWS é formado por uma estrutura fixa ao fundo do oceano, chamada base ou pontão (Figura 1.4(1)) onde oscila, verticalmente, um flutuador (Figura 1.4(2)). Com a mudança periódica de pressão em cima do flutuador, devido à passagem das ondas, inicia-se o movimento oscilatório do flutuador. Ou seja, o flutuador move-se para baixo quando a altura de água aumenta acima do ponto neutro (Figura 1.4(a)) e move-se para cima quando a altura de água diminui abaixo do ponto neutro (Figura 1.4(b)). A potência mecânica necessária para amortecer as oscilações do sistema é convertida em energia eléctrica por meio de um gerador eléctrico linear [10]. Este sistema é mais vantajoso que muitos outros, na categoria de aproveitamento de energia das ondas, porque esta tecnologia permite ultrapassar a necessidade do uso de sistemas hidráulicos que convertem o movimento linear em rotacional para depois accionar um gerador eléctrico rotativo.

1.5 Âmbito do Trabalho

No capítulo 1.4 foi descrito o sistema de aproveitamento de energia das ondas AWS. Neste sistema está incorporado um gerador linear que permite converter a energia mecânica de oscilação em energia eléctrica. Este trabalho vem no seguimento de outros trabalhos [1], [2] e [3] que realizaram estudos sobre conversores de energia das ondas e tem como objectivo a construção de um protótipo de um gerador linear para aproveitamento de energia das ondas num sistema AWS.

No capítulo 2 é descrita a tecnologia usada para construção do protótipo do gerador – a tecnologia de fluxo transversal: o seu princípio de funcionamento, as características do protótipo e uma aproximação teórica ao que será o *output* esperado do sistema. Para esta aproximação teórica é feito um modelo para o sistema mecânico e outro para o sistema eléctrico que, relacionados, permitem determinar resultados da evolução da posição e da tensão, em diferentes situações (vazio, carga e com ponte de rectificação).

A Máquina de Fluxo Transverso (MFT) com excitação por magnetos permanentes está sujeita a forças resultantes do campo magnético de dispersão. Estas forças são caracterizadas e quantificadas no capítulo 3, com o objectivo de, no capítulo 4, os materiais escolhidos para a construção do protótipo conseguirem suportá-las.

O capítulo 4 aponta-nos o principal objectivo do trabalho, descrevendo, cronologicamente, os passos para a construção do protótipo, os materiais escolhidos e os pontos onde ocorreram falhas e como foram corrigidas. Em pormenor, são documentadas as empresas que forneceram os materiais e as referências destes. Algum material, por não estar disponível no mercado, foi manufacturado; por essa razão é descrito o processo de manufactura dos mesmos. A agregação desses materiais para

a construção do protótipo é levada a cabo segundo técnicas de construção pré-estabelecidas [1] ou criadas no momento consoante as necessidades e dificuldades apresentadas. No final do capítulo 4 são descritas as falhas do sistema e sua posterior correcção para o normal funcionamento do protótipo. Estas falhas ocorreram porque alguns materiais ou processos de montagem não suportaram as forças descritas no capítulo 3.

Após a construção do protótipo, no capítulo 5, são medidos parâmetros e realizados ensaios: em vazio (com velocidade variável), carga e com ponte de rectificação onde é feita a aquisição de dados experimentais do gerador. A conjugação destes dados com os resultados obtidos na capítulo 2 permitiram acrescentar um factor de aproximação ao modelo teórico.

Por fim, no capítulo 6 são tiradas conclusões do trabalho realizado e são feitas sugestões para trabalhos futuros, nomeadamente novas morfologias do protótipo e novas técnicas de construção. Pretende-se, assim, que este trabalho sirva de guia para a construção de futuros geradores lineares de fluxo transversal.

Capítulo 2

Descrição da Máquina de Fluxo Transverso (MFT)

Chama-se Máquina de Fluxo Transverso (MFT) ao protótipo a realizar, pois utiliza um circuito magnético onde as linhas de fluxo dispõem-se no plano transversal à direcção do movimento e circulação de corrente [11].

A tecnologia de fluxo transverso já existe há mais de cem anos; a sua primeira patente foi feita por W. M. Morday no ano de 1895. Quando aplicada a uma máquina de fluxo transverso, esta tecnologia é muitas vezes considerada como difícil e complicada de implementar, logo demasiado dispendiosa, pelo que a maioria das empresas evita o seu uso [12].

2.1 Princípio de Funcionamento

Na Figura 2.1 está representado um pólo da máquina, onde é traçada a densidade de fluxo magnético causada pela presença de magnetos permanentes. Cada pólo do *estator* da máquina é composto por dois tipos de peças, umas em forma de U e outras em forma de I (na Figura 2.1 à esquerda e à direita respectivamente). Entre elas existem dois magnetos permanentes de *neodymium* que, ao trocarem de polaridade periodicamente, causam uma variação de fluxo magnético nas peças polares do *estator*. Esta variação de fluxo magnético nas peças polares gera uma força electromotriz aos terminais de um enrolamento com N espiras em torno da peça em U.

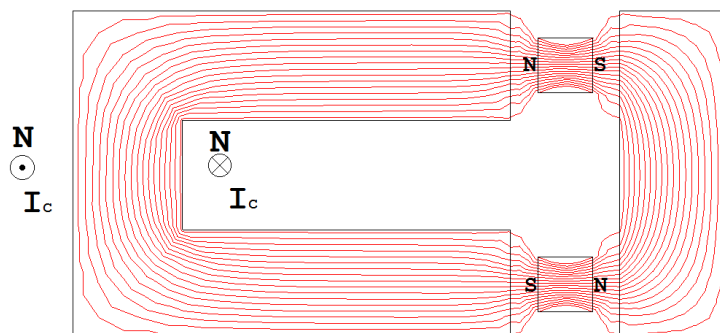


Figura 2.1: Morfologia dum pólo da MFT e traçado do fluxo magnético

2.2 Design e Concepção do Protótipo

a máquina é concebida com dois objectivos: que seja capaz de suportar os esforços mecânicos a que estará sujeita e que se possam obter resultados viáveis a estudo e crítica. A Figura 2.2 apresenta um esquema de dois pares de pólos da MFT e a simbologia das medidas que irão ser usadas ao longo deste trabalho. Para cada par de pólos existem quatro magnetos permanentes.

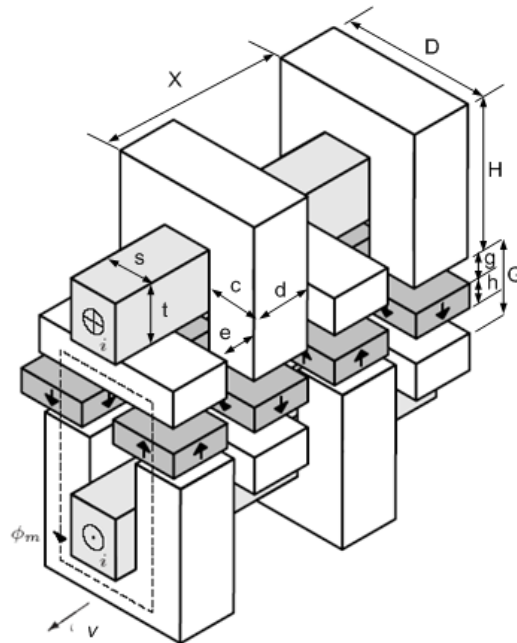


Figura 2.2: Dois pares de pólos da MFT

O sistema AWS gera velocidades lineares baixas, pelo que é desejável o protótipo ter um número elevado de pares de pólos, sendo este dado pela eq. 2.1:

$$p = \frac{L}{X} \quad (2.1)$$

onde L representa o comprimento da máquina e X o período espacial, dado pela eq. 2.2:

$$X = 2d + 2e \quad (2.2)$$

Exemplificando, uma máquina com 40 pares de pólos, tendo cada pólo uma espessura $d = 5 \text{ mm}$ e espaçamento entre pólos $e = 5 \text{ mm}$ obtém-se uma máquina com $L = 80 \text{ cm}$:

$$L = 2p(d + e) = 2 \times 40 \times (.5 + .5) = 80 \text{ cm}$$

As peças polares, como referido anteriormente, têm forma de U e forma de I. Numa placa de ferro com área $D \times H \text{ [m}^2\text{]}$ é possível destacar a peça polar em I da peça em U (Figura 2.3), para que não haja desperdício de ferro. A escolha desta tipologia deveu-se à disponibilidade destas peças no mercado, já que a sua morfologia é usada para outros fins, o que permitiu reduzir os custos relativamente ao ferro usado.

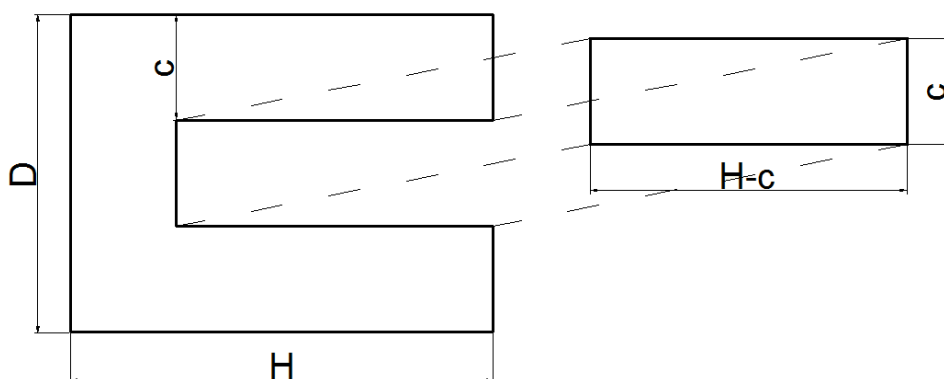


Figura 2.3: Corte da Peça Polar

De início, foi construído um modelo em *K-line* do protótipo. O *K-line* é um material de fácil manuseamento, para qual se utilizou x-acto para o corte das peças polares e uma cola de uso geral (*UHU*) para colar os pólos entre si, como mostra a Figura 2.4. Foi também desenhado um modelo do protótipo à escala recorrendo a um programa de desenho assistido por computador, o *Autocad Mechanical 2010* (Figuras 2.5, 2.6 e 2.7) onde por manipulação gráfica é possível desenhar todos os constituintes do protótipo. Estes dois modelos permitem determinar soluções construtivas e obter uma visão crítica sobre a disposição de fluxo magnético (verificação da viabilidade de entreferros).

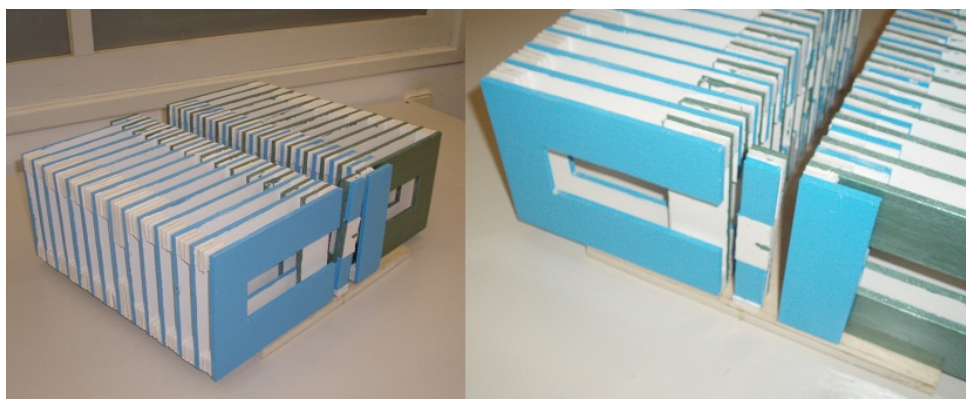


Figura 2.4: Modelo do Protótipo da MFT

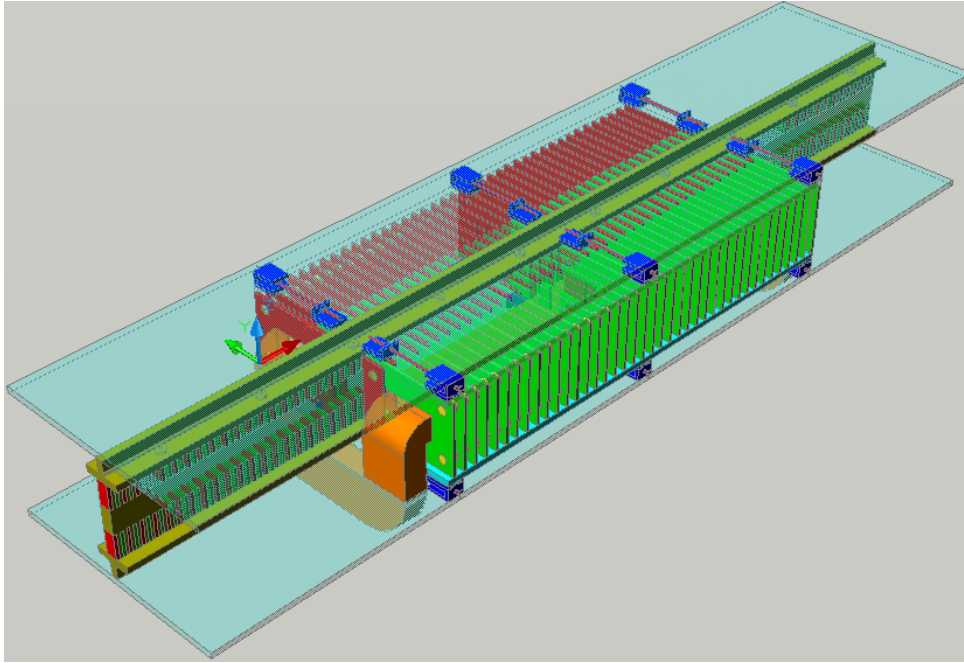


Figura 2.5: Vista Isométrica da MFT

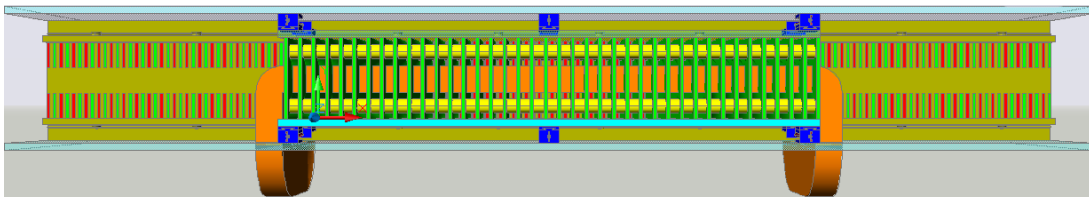


Figura 2.6: Alçado Frontal da MFT

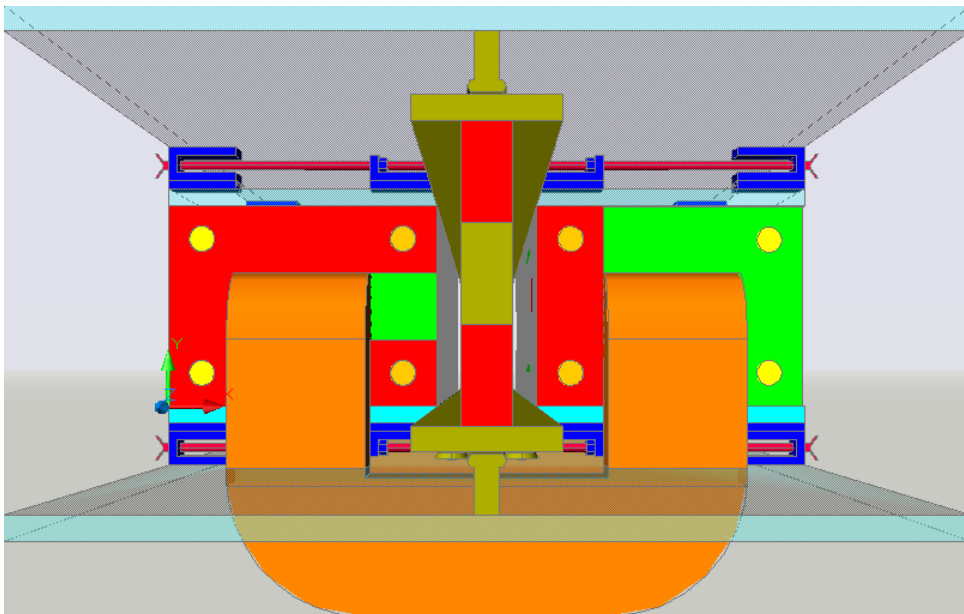


Figura 2.7: Alçado Esquerdo da MFT

Ao analisar o modelo das Figuras 2.4, 2.5, 2.6 e 2.7 verifica-se que, com as condições laboratoriais e materiais disponíveis não é viável a construção de um protótipo com tal espessura polar. Já se sentiu em trabalhos anteriores [1] a dificuldade de garantir entreferros na ordem dos milímetros. Com espessura polar $d = 5 \text{ mm}$ o entreferro g seria muito maior que a distância entre magnetos e , o que causaria um curto-circuito magnético entre os magnetos. Este facto pode-se comprovar pela análise das linhas de fluxo magnético traçadas na Figura 2.8, graças ao *software* de simulação de problemas magnéticos, FEMM, onde foi simulada a situação $g = 4e$.

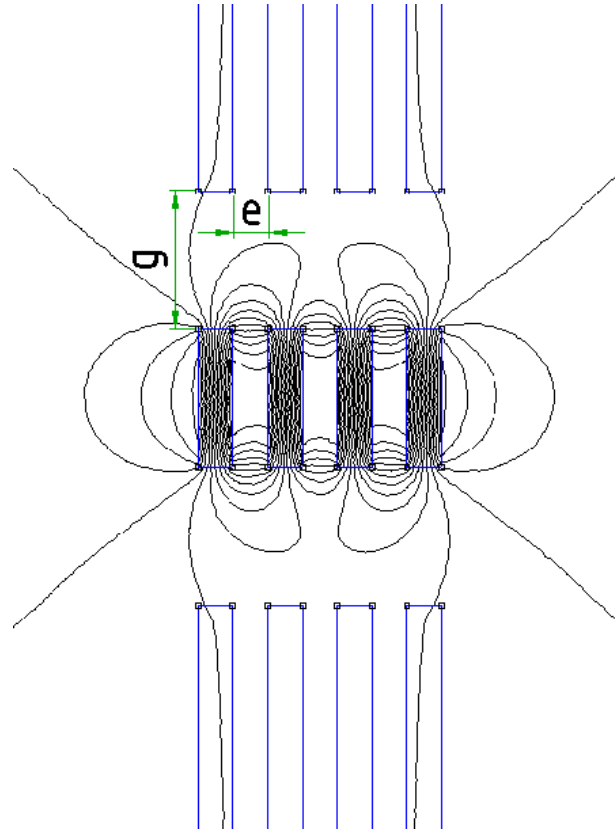


Figura 2.8: Representação do Curto-Circuito Magnético

No laboratório estavam disponíveis magnetos com morfologia cúbica, com 20 mm de largura, o que levou ao aumento da espessura polar de $d = 5 \text{ mm}$ para $d = 20 \text{ mm}$ e do espaçamento entre pólos de $e = 5 \text{ mm}$ para $e = 20 \text{ mm}$. Para melhor adaptabilidade às condições laboratoriais e com o aumento da espessura polar, o comprimento da máquina foi reduzido, o que levou à diminuição do número de pares de pólos do protótipo de $p = 40$ para $p = 4$ resultando numa redução do comprimento da máquina de $L = 80 \text{ cm}$ para $L = 32 \text{ cm}$:

$$L = 2 \times 4 \times 2 \times 20 = 320 \text{ mm} = 32 \text{ cm}$$

Especificadas todas as dimensões da peça polar e dos magnetos é possível desenhar o esquema da Figura 2.9 em que estão representadas as especificações da peça polar e dos magnetos.

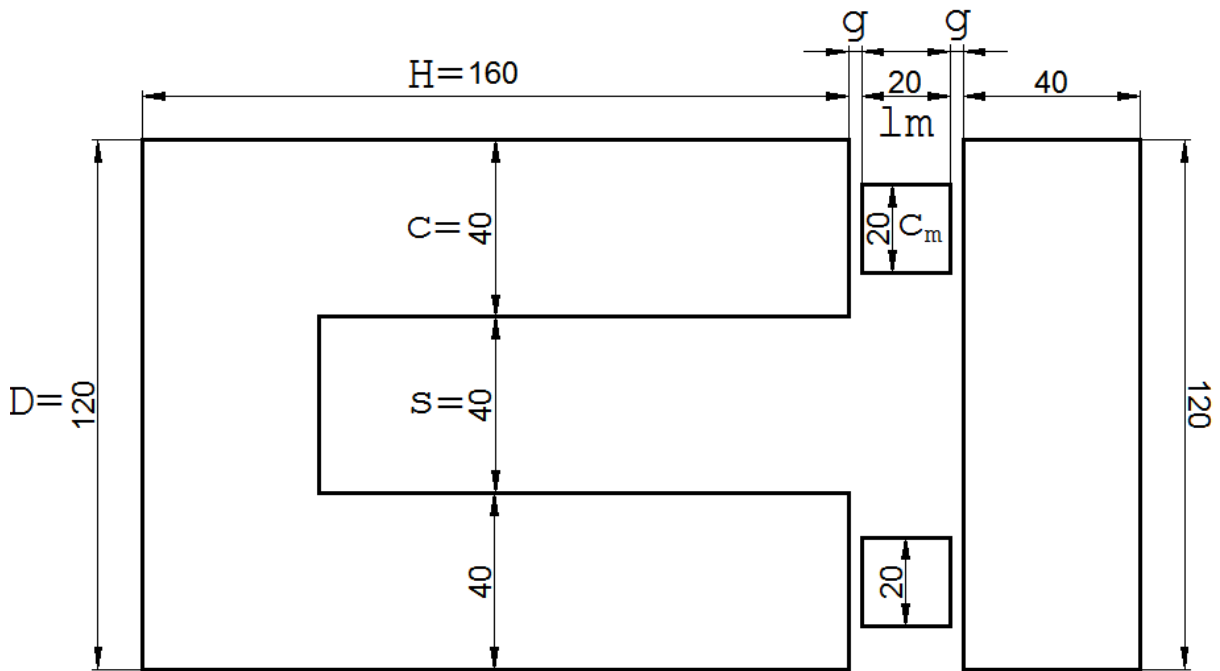


Figura 2.9: Representação e dimensões da peça polar em mm (profundidade $d = 20 mm$)

Para determinar se o ferro dos pólos necessita de ser laminado calcula-se a profundidade de penetração pela equação 2.3:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} \quad (2.3)$$

Para o caso particular do ferro tem-se que a uma frequência $f_{ele} = 50 Hz$ a profundidade de penetração $\delta = 1 mm$. Particulariza-se então a eq. 2.3:

$$\delta = \sqrt{\frac{50}{f_{ele}}} [mm]$$

Para baixas frequências eléctricas, na ordem de $f_{ele} \approx 10 Hz$ o valor resultante é $\delta = 2 mm$, concluindo-se então que o ferro terá de ser laminado. O ferro da peça polar, como dito anteriormente, tem características *standard* de mercado, sendo a espessura disponível de cada lâmina igual a $0.5 mm$. Ou seja, para obter uma peça polar com $d = 20 mm$ são necessárias 40 lâminas de ferro.

Relativamente ao circuito eléctrico, nesta máquina o número de enrolamentos de cobre é independente do número de pólos, o que é vantajoso tendo em conta que o preço por kg de cobre é muito superior ao preço por kg de ferro. Na Figura 2.10 está representada graficamente o *estator* (à esquerda) e do enrolamento de cobre (à direita).

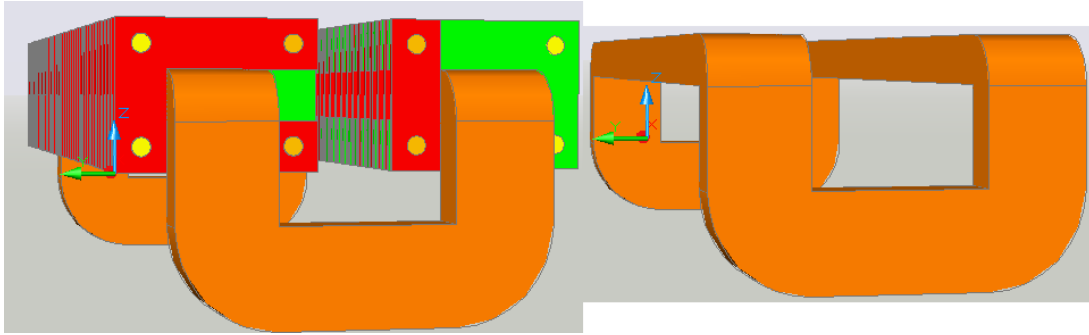


Figura 2.10: Representação Gráfica do *Estator*

Para determinar o número N de espiras possíveis de colocar no enrolamento do *estator* é necessário calcular a área disponível para o circuito eléctrico e a área ocupada por cada fio de cobre. Pelas Figuras 2.2 e 2.9 a área disponível para o circuito eléctrico é dada por:

$$A_{disp} = s \times t \leftrightarrow 40 \times 80 [mm^2]$$

A área útil que o enrolamento ocupa depende do número de espiras N e da secção do condutor S_{Cu} :

$$A_{util} = N \times S_{Cu}$$

A força magnetomotriz no caminho fechado da perna da peça polar é dado por:

$$\mathcal{F}_{mm} = NI \tag{2.4}$$

Sendo $I = J.S_{Cu}$ a eq. 2.4 pode-se exprimir da forma:

$$\mathcal{F}_{mm} = N.J.S_{Cu} \Leftrightarrow \mathcal{F}_{mm} = A_{util} \times J$$

Fixando a densidade de corrente J tem-se que a força magnetomotriz depende apenas da área útil. Como a área útil está limitada pela área disponível ($A_{util} \leq A_{disp}$) ao aumentar o número de espiras a secção de cobre terá que diminuir, levando a tensões elevadas e correntes baixas. Ao aumentar a secção do cobre, o número de espiras terá de diminuir levando a correntes elevadas e tensões baixas.

O condutor disponível no laboratório tem uma secção de $S_{Cu} = 0.75 mm^2$, que é muito menor comparando com a área disponível. Assim, o número de espiras terá de ser elevado para garantir tensões na ordem das dezenas de Volt aos terminais do enrolamento. Calcula-se, então, um número de espiras $N = 500$ para o enrolamento.

Não estão disponíveis no laboratório ferramentas que possibilitem efectuar automaticamente o enrolamento, dadas as suas dimensões. É, por isso, necessário dividir o enrolamento de $N = 500$ espiras em dois enrolamentos de $N = 250$ espiras, como mostra o desenho final do modelo do protótipo, realizado por computador, na Figura 2.11.

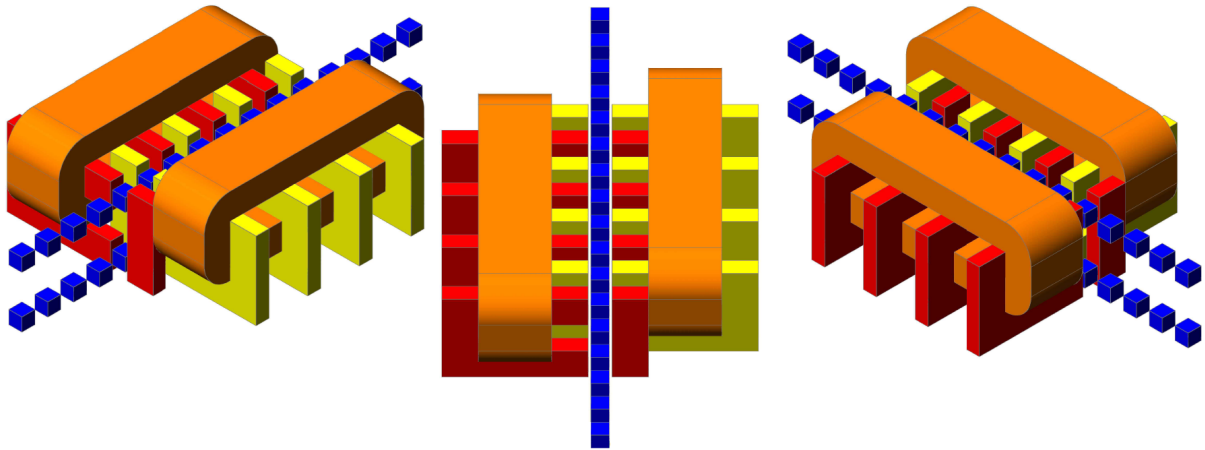


Figura 2.11: Desenho Conceptual do Protótipo

2.3 Modelação do Sistema Mecânico

Para accionar o protótipo no laboratório é usado um sistema de um eixo com dois braços (r_a e r_b), para converter movimento rotativo em movimento linear representado na Figura 2.12

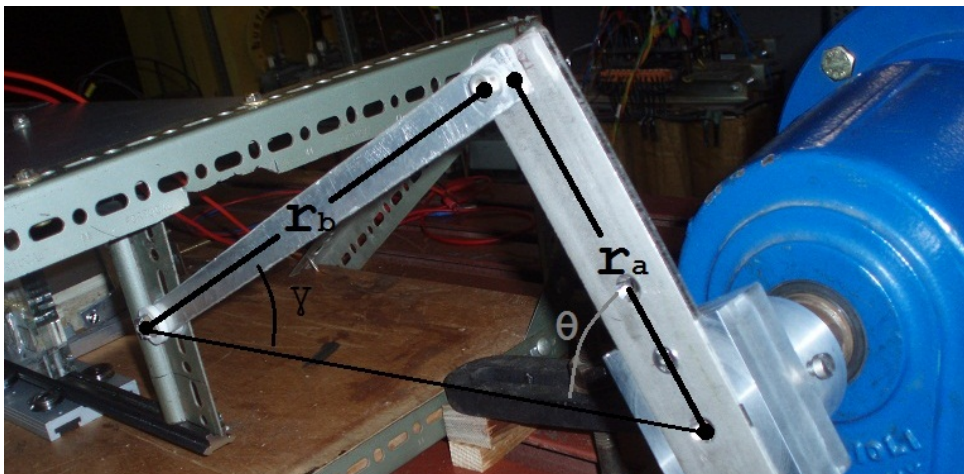


Figura 2.12: Eixo com Dois Braços

Na Figura 2.13 está representada a morfologia do sistema mecânico a modelar, bem como as variáveis dependentes do sistema.

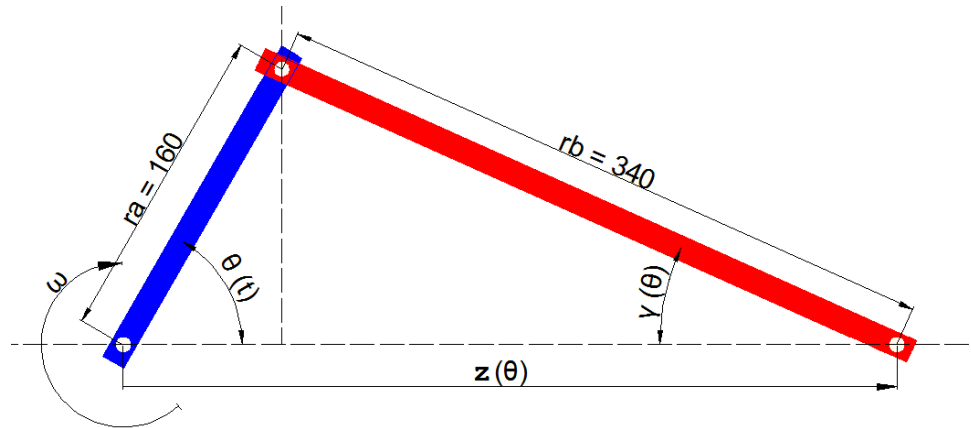


Figura 2.13: Sistema Mecânico a Modelar (medidas em mm)

O percurso total do *translator* será tanto quanto o comprimento do protótipo $L = 32 \text{ cm}$, fixando o comprimento do raio r_a em metade do valor do comprimento da máquina $r_a = 16 \text{ cm}$. Quanto ao comprimento do braço r_b , para a evolução do movimento $z(t)$ ser aproximadamente sinusoidal, este terá de tomar um valor tanto maior quanto for possível; definiu-se então $r_b \approx 2r_a \leftrightarrow r_b = 34 \text{ cm}$.

Decompondo as componentes polares (θ, γ) em componentes lineares (z, y) , o sistema pode ser descrito pela equação 2.5:

$$\begin{cases} z(t) = r_a \cos(\theta(t)) + r_b \cos(\gamma(\theta)) \\ r_a \sin(\theta(t)) = r_b \sin(\gamma(\theta)) \end{cases} \quad (2.5)$$

De seguida, elimina-se qualquer dependência das coordenadas lineares com as componentes polares, exprimindo γ em função de θ e resolvendo as equações em ordem ao tempo.

$$\theta(t) = \omega t = 2\pi f_{mec} t$$

$$\gamma(\theta) = \arcsin \frac{r_a \sin \theta(t)}{r_b}$$

$$\frac{d\theta(t)}{dt} = 2\pi f_{mec} = \omega$$

$$\frac{d\gamma(\theta)}{dt} = \frac{\cos(\theta(t)) \frac{r_a}{r_b} \omega}{\sqrt{1 - \sin^2(\theta(t)) \left(\frac{r_a}{r_b}\right)^2}}$$

$$v(t) = \frac{dz}{dt} = -r_a \frac{d\theta(t)}{dt} \sin(\theta(t)) - r_b \frac{d\gamma(\theta)}{dt} \sin(\gamma(\theta))$$

$$v(t) = -r_a \omega \sin(2\pi f_{mec} t) - r_b \frac{d\gamma(\theta)}{dt} \sin(\gamma(\theta))$$

Após o cálculo da posição do *translator* ao longo do seu curso $(z(t))$ e da sua velocidade $(v(t))$ é possível traçar o gráfico da Figura 2.14.

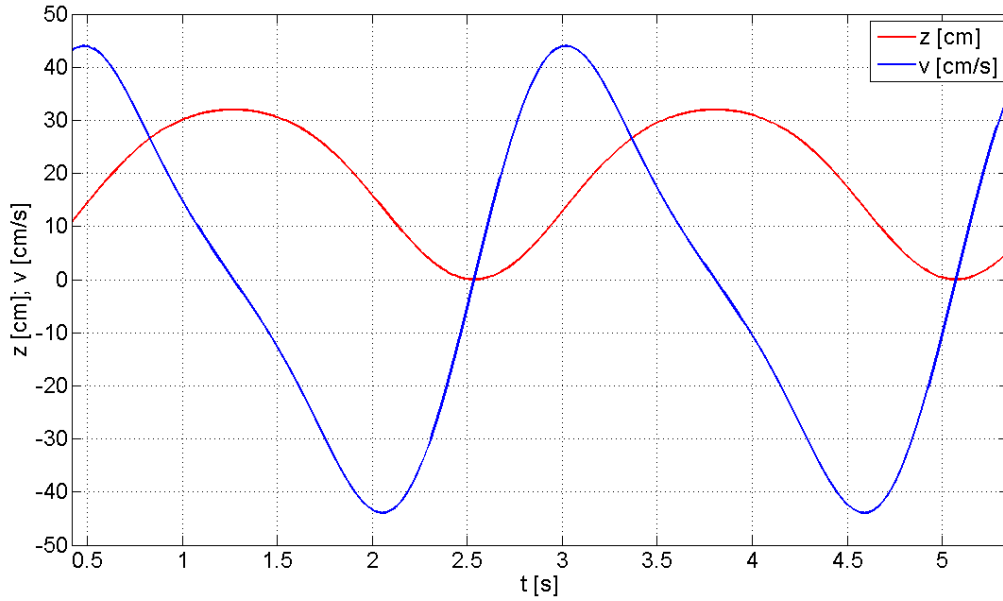


Figura 2.14: Posição e velocidade do *translator*

2.4 Modelação do Sistema Eléctrico

O sistema eléctrico do protótipo pode ser modelado como um gerador síncrono, ou seja, uma força electromotriz ($E(t)$) em série com uma impedância síncrona constituída por uma resistência (perdas por efeito de Joule no condutor) em série com uma reactância síncrona (Figura 2.15):

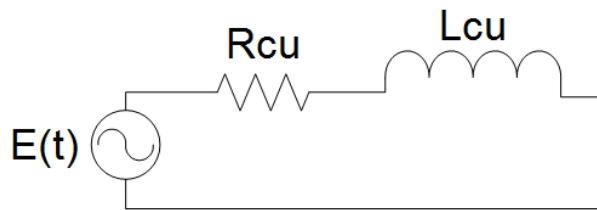


Figura 2.15: Circuito Eléctrico Equivalente

A força electromotriz aos terminais dos enrolamentos da máquina irá ser modelada, tanto em amplitude como em frequência, pela velocidade linear do *translator* ($v(t)$) calculada no capítulo 2.3. A força electromotriz é enunciada pela lei da indução eletromagnética na eq. 2.6:

$$E(t) = -\frac{d\psi}{dt} \quad (2.6)$$

O cálculo do fluxo por pólo (ϕ_m) é realizado recorrendo à representação equivalente do circuito magnético por meio de relutâncias magnéticas e forças magnetomotrizes (Figura 2.16).

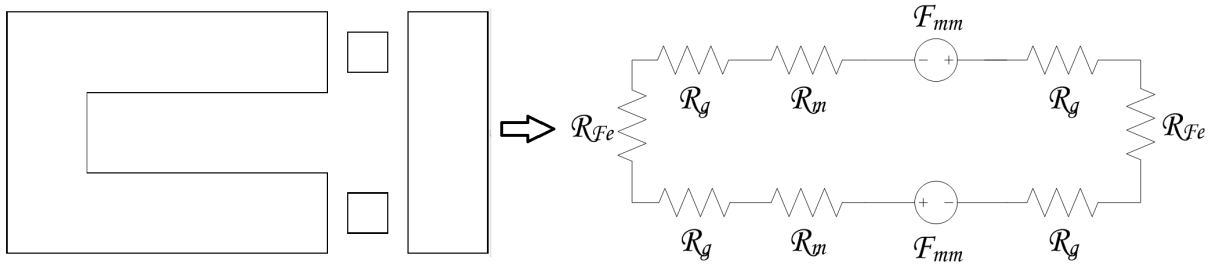


Figura 2.16: Circuito Magnético Equivalente

Tendo em conta que:

$$\mathcal{F}_{mm_m} = l_m H_c \quad (2.7)$$

$$\mathcal{R}_g = \frac{g}{\mu_o A_g}$$

$$\mathcal{R}_m = \frac{l_m}{\mu_R A_m}$$

Calcula-se o fluxo no pólo da forma:

$$\phi_m = \frac{l_m H_c}{\mathcal{R}_{m_{total}}} \quad (2.8)$$

$$\phi_m = \frac{2l_m H_c}{4\mathcal{R}_g + 2\mathcal{R}_m} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow \phi_m = \frac{2l_m H_c}{\frac{4g}{\mu_o A_g} + \frac{2l_m}{\mu_R A_m}} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow (\phi_m)_{máx} = \frac{l_m H_c}{\frac{2g}{\mu_o A_g} + \frac{l_m}{\mu_R A_m}}$$

Pode-se, então, calcular o fluxo ligado máximo da forma:

$$(\psi_m)_{máx} = 2pN(\phi_m)_{máx} \quad (2.9)$$

Admitindo que o fluxo ligado tem uma variação sinusoidal ao longo da sua posição $z(t)$, $\psi_m(z(t))$ é dado por:

$$\psi_m(z) = (\psi_m)_{máx} \cos\left(2\pi p \frac{z(t)}{L}\right) \quad (2.10)$$

A partir da eq. 2.6 tem-se a força electromotriz aos terminais do protótipo, modelada pela variação do fluxo ligado pela posição e velocidade do *translator*:

$$E(t) = -\frac{d\psi_m(z)}{dt} = -\frac{d\psi_m(z)}{dz} \frac{dz}{dt} = -\frac{d\psi_m(z)}{dz} v(t) \Leftrightarrow \quad (2.11)$$

$$\Leftrightarrow E(t) = -v(t)(\psi_m)_{máx} 2\pi p \frac{1}{L} \sin\left(2\pi p \frac{z(t)}{L}\right)$$

Para modelar o restante sistema eléctrico é necessário calcular a impedância interna do sistema ($R_{Cu} + j\omega L_{Cu}$). A parte real da impedância é determinada por:

$$R_{Cu} = \frac{\rho_{Cu} L_{Cu}}{S_{Cu}} [\Omega] \quad (2.12)$$

Onde, L_{Cu} é determinado tendo em conta o comprimento médio do condutor pela Figura 2.17:

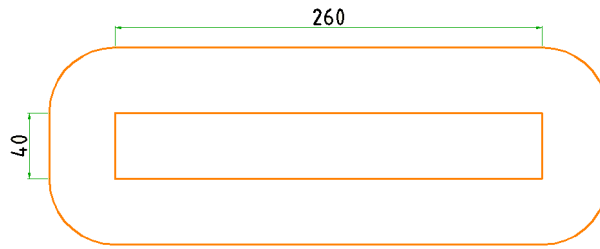


Figura 2.17: Vista Frontal do Esquema Equivalente do Enrolamento (medidas em mm)

Ou seja, $L_{Cu} = N \times 2(260 \times 10^{-3} + 40 \times 10^{-3}) = 150 \text{ m}$ por cada enrolamento. Para os dois enrolamentos tem-se um comprimento combinado de $L_{Cu} = 300 \text{ m}$ e a resistência é calculada da forma:

$$R_{Cu} = \frac{0.0178 \times 300}{0.75} = 7.12 \Omega$$

Para o cálculo da indutância de cada enrolamento é necessário contabilizar as fugas presentes no sistema. Na Figura 2.18 está representada uma vista superior de um dos lados do *estator* onde é representada a corrente de teste que passa no enrolamento (Ni), o fluxo gerado em cada peça polar ($\phi_{1,4}$) e as relutâncias envolvidas (\mathcal{R}_m).

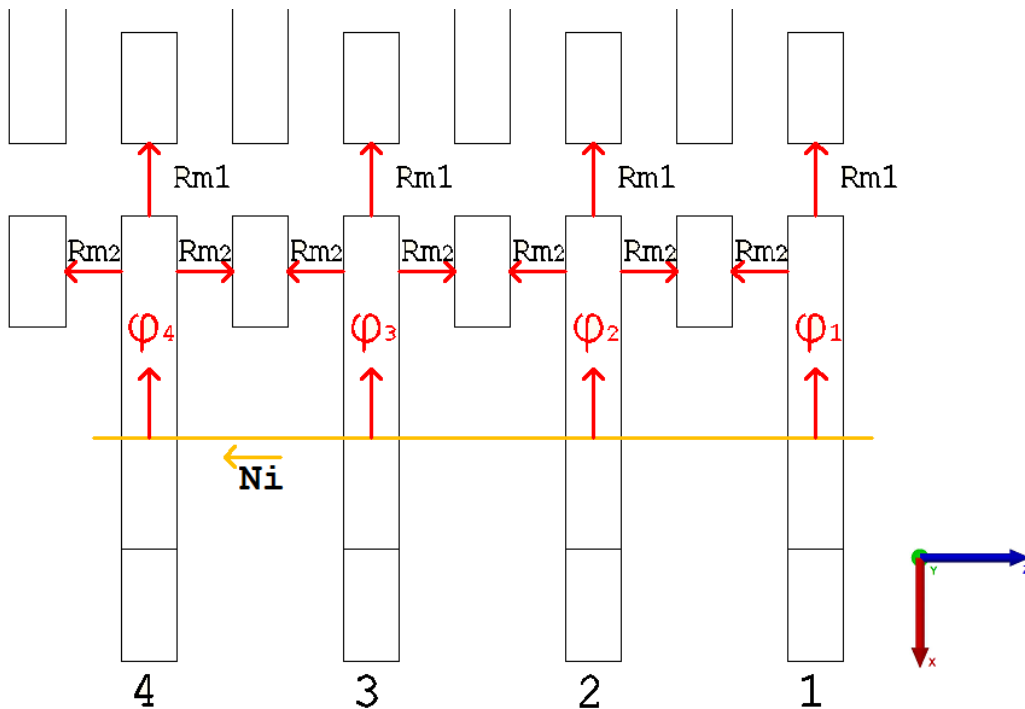


Figura 2.18: Vista Superior de um lado do *Estator*

Para melhor se compreender a origem das relutâncias \mathcal{R}_{m_1} e \mathcal{R}_{m_2} estão traçadas nas Figuras 2.19 e 2.20 as linhas de corrente de fluxo magnético de fugas envolvido.

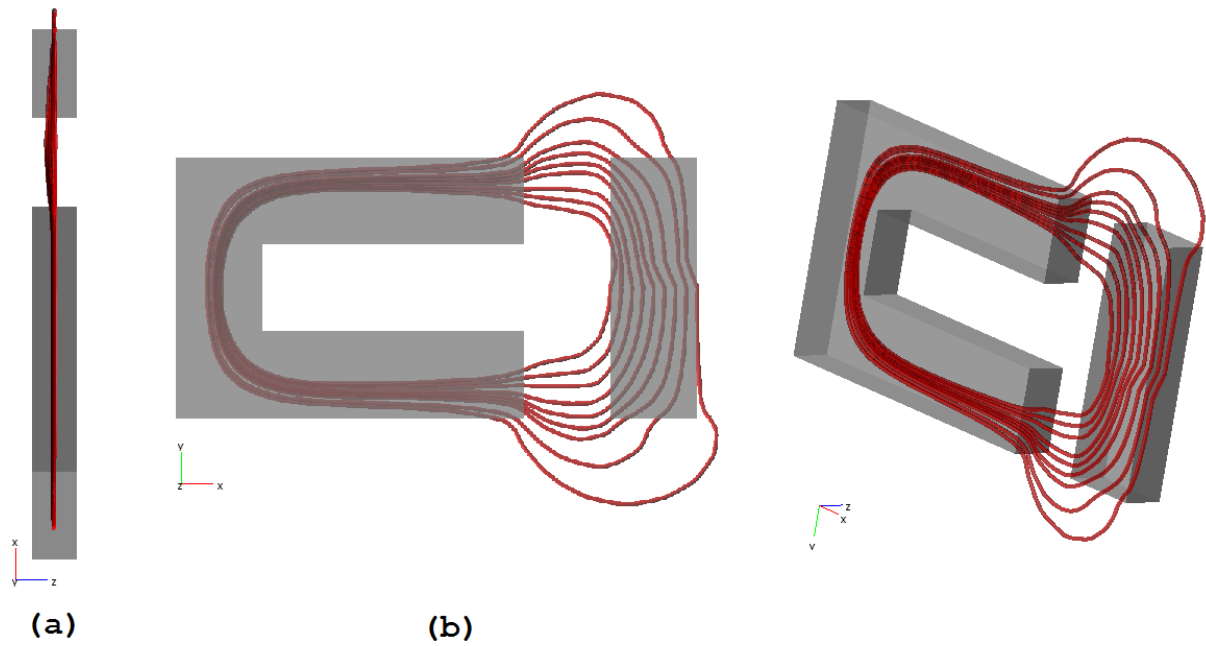


Figura 2.19: Linhas de Corrente de Densidade de Fluxo Magnético Intervinentes em \mathcal{R}_{m_1} ((a)- Vista Superior (b) - Vista Lateral)

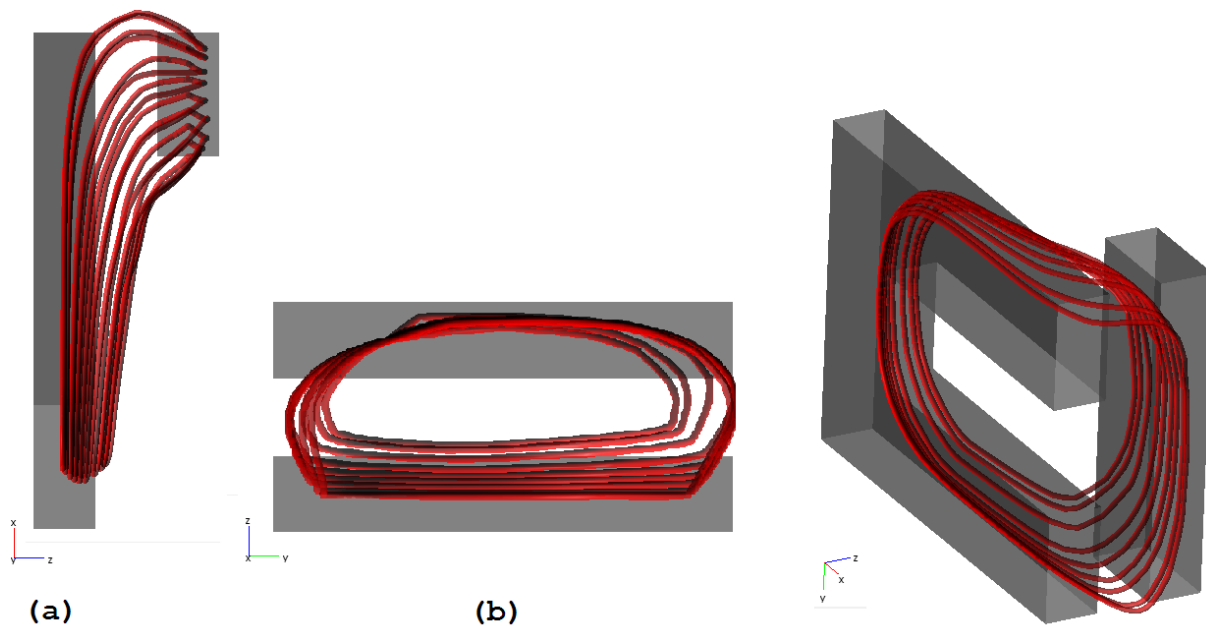


Figura 2.20: Linhas de Corrente de Densidade de Fluxo Magnético Intervinentes em \mathcal{R}_{m_2} ((a)- Vista Superior (b) - Vista Lateral)

Nas representações das Figuras 2.19 e 2.20 está traçado apenas um andamento aproximado das linhas de corrente de densidade fluxo do campo magnético. Ou seja, quando uma linha de densidade fluxo magnético passa do ferro para o ar - muda de meio - dá-se uma alteração na sua direcção que não é notória nas Figuras 2.19 e 2.20. Isto deve-se à malha de cálculo usada no programa a 3D já que, devido ao número de cálculos que o programa tem de efectuar, não é possível utilizar uma malha de cálculo fina o suficiente para essa mudança ser notória. A mudança de direcção deve-se à diferença de permeabilidade magnética entre os meios e pode ser comprovado pelo desenvolvimento

das eq. 2.13 e eq. 2.14 que mostram como se comporta a densidade de fluxo do campo magnético normal e tangencial na mudança de meio.

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.13)$$

Pela eq. 2.13 na sua forma diferencial:

$$\oint_S \vec{B} d\vec{S} = 0$$

E escolhendo a superfície de fronteira entre meios ΔS como superfície de integração:

$$\begin{aligned} \vec{B}_{n_{Fe}} \cdot \vec{n} \cdot \Delta S - \vec{B}_{n_0} \cdot \vec{n} \cdot \Delta S &= 0 \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow \vec{B}_{n_{Fe}} &= \vec{B}_{n_0} \end{aligned}$$

Ou seja, a componente normal da densidade de fluxo do campo magnético mantém-se após a transição de meios.

Quanto à componente tangencial:

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} \quad (2.14)$$

Na sua forma integral e sabendo que não existe densidade de corrente \vec{J} envolvida:

$$\oint_s \vec{H} \cdot d\vec{s} = 0$$

E escolhendo o caminho na fronteira entre meios ds como caminho de integração:

$$\begin{aligned} \vec{H}_{t_{Fe}} - \vec{H}_{t_0} &= 0 \Leftrightarrow \\ \frac{\vec{B}_{t_{Fe}}}{\mu_R} &= \frac{\vec{B}_{t_0}}{\mu_0} \end{aligned}$$

Ou seja, quando as linhas de corrente de densidade de fluxo do campo magnético passam do ferro para o ar $\|\vec{B}_{t_{Fe}}\| \gg \|\vec{B}_{t_0}\|$ pois $\mu_R \gg \mu_0$. Sendo que $\|\vec{B}_{n_{Fe}}\| = \|\vec{B}_{n_0}\|$ o argumento de $\vec{B}_0 \rightarrow 0^\circ$ (Figura 2.21).

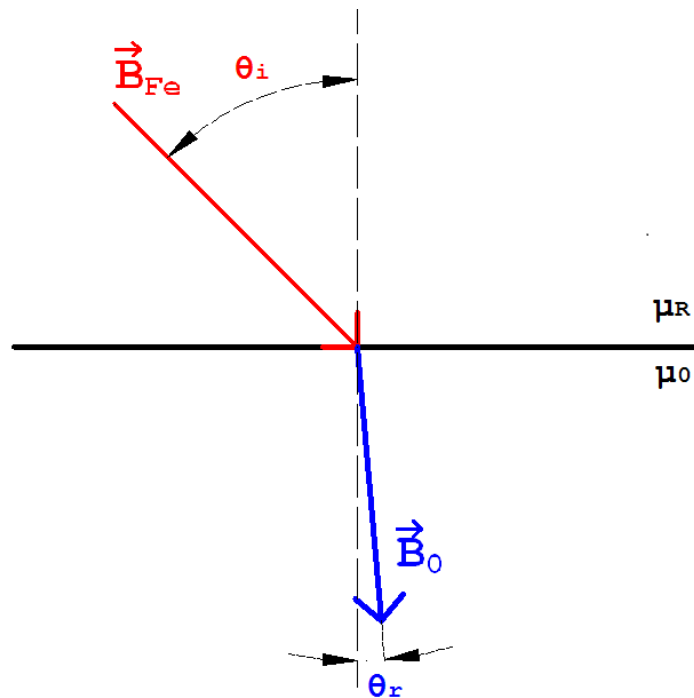


Figura 2.21: Diagrama Vectorial da Mudança de Meio do Campo Magnético

Para exemplificar o que é traduzido pelas eq. 2.13 e 2.14 na Figura 2.22 são traçadas as linhas de corrente de densidade de fluxo do campo magnético para \mathcal{R}_{m_1} como foi feito para a Figura 2.19 mas, ao invés de usar um programa de elementos finitos a 3D é usado um a 2D onde se pode usar uma malha de cálculo mais refinada.

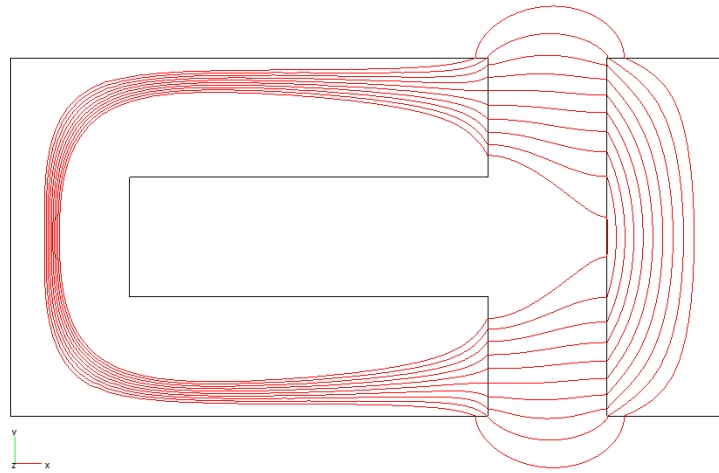


Figura 2.22: Linhas de Corrente de Densidade de Fluxo Magnético Intervinentes em \mathcal{R}_{m_1}

Existem ainda linhas de corrente de fluxo que se fecham pela própria peça, representadas nas Figuras 2.23 e 2.24 que variam ao longo da peça polar em Δx ($\phi(x)$) resultando na relutância \mathcal{R}_{m_3} .

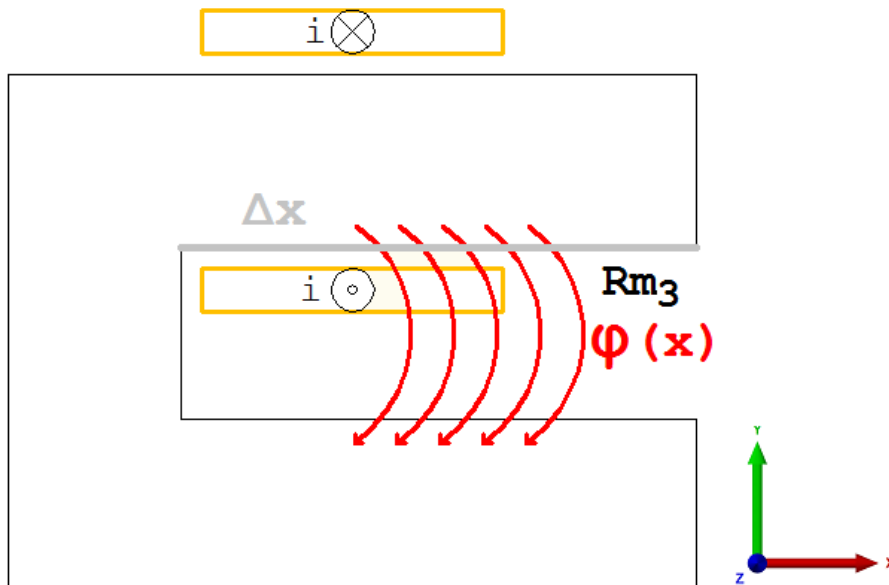


Figura 2.23: Representação Esquemática das Linhas de Corrente de Fluxo Intervinentes em \mathcal{R}_{m_3}

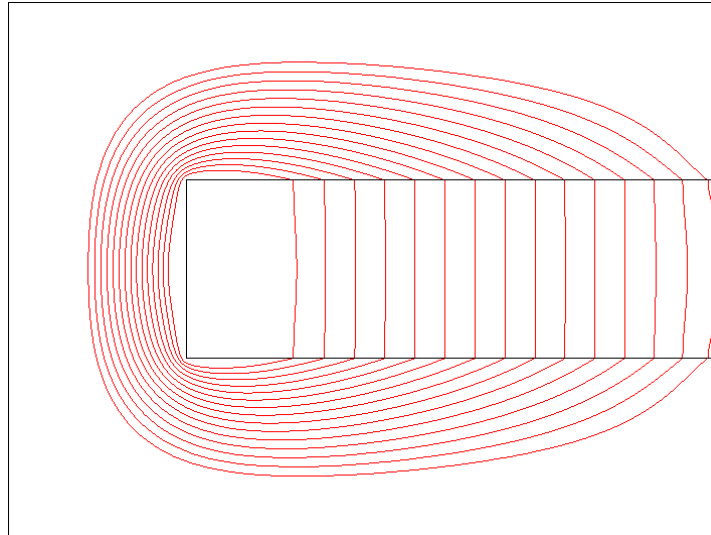


Figura 2.24: Linhas de Corrente de Densidade de Fluxo Magnético por *Software* de Elementos Finitos Intervinentes em \mathcal{R}_{m_3}

Ao analisar a corrente de densidade de fluxo e como se divide, pode-se desenhar o circuito magnético equivalente para cada peça polar. Para a peça nº1 tem-se o circuito equivalente da Figura 2.25(a), para as restantes tem-se o da Figura 2.25(b).

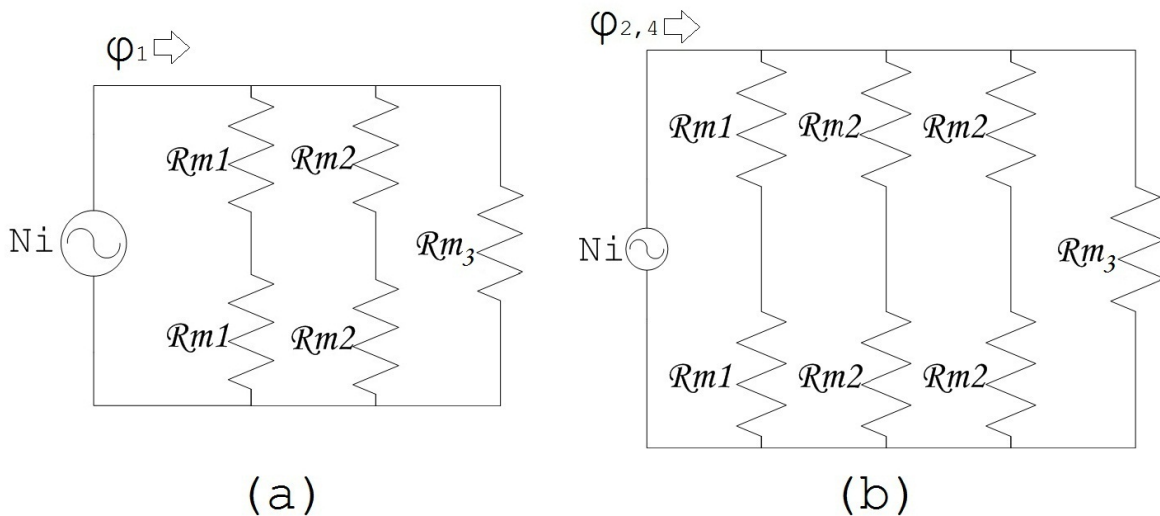


Figura 2.25: Circuito Magnético Equivalente

A relutância \mathcal{R}_{m_1} pode ser calculada em função de \mathcal{R}_{m_2} da forma:

$$\mathcal{R}_{m_2} = \frac{e}{\mu_0 c^2}$$

$$\mathcal{R}_{m_1} = \frac{2e}{\mu_0 \frac{c^2}{2}} \Leftrightarrow \mathcal{R}_{m_1} = 4\mathcal{R}_{m_2}$$

Pela corrente de densidade de fluxo variar com a posição x , a relutância \mathcal{R}_{m_3} foi calculada recorrendo a um programa de elementos finitos, com uma corrente de teste de $Ni = 250 \text{ A} - \text{espira}$.

Ao integrar segundo Δx obteve-se o fluxo de fugas e conseqüente relutância:

$$\phi = 13.1 \mu Wb$$

$$\mathcal{R}_{m3} = \frac{Ni}{\phi} = \frac{250}{13.1 \times 10^{-6}} = 1.91 \times 10^7 [A - espira/Wb]$$

Assim, calcula-se pelo método da sobreposição cada contribuição dos fluxos $\phi_{1,4}$ para a indutância:

$$\psi = \frac{N^2}{\mathcal{R}_{meq}} i \Rightarrow \mathcal{L} = \frac{N^2}{\mathcal{R}_{meq}}$$

Onde,

$$\begin{aligned} \mathcal{R}_{m_a} = 2\mathcal{R}_{m1} // 2\mathcal{R}_{m2} // \mathcal{R}_{m3} &\Leftrightarrow \mathcal{R}_{m_a} = 8\mathcal{R}_{m2} // 2\mathcal{R}_{m2} // \mathcal{R}_{m3} \Leftrightarrow \\ &\Leftrightarrow \mathcal{R}_{m_a} = 8.6815 \times 10^6 [A - espira/Wb] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathcal{R}_{m_b} = 2\mathcal{R}_{m1} // 2\mathcal{R}_{m2} // 2\mathcal{R}_{m2} // \mathcal{R}_{m3} &\Leftrightarrow \mathcal{R}_{m_b} = 8\mathcal{R}_{m2} // \mathcal{R}_{m2} // \mathcal{R}_{m3} \Leftrightarrow \\ &\Leftrightarrow \mathcal{R}_{m_b} = 6.0440 \times 10^6 [A - espira/Wb] \end{aligned}$$

$$\frac{1}{\mathcal{R}_{meq}} = \frac{1}{\mathcal{R}_{m_a}} + \frac{3}{\mathcal{R}_{m_b}}$$

$$\mathcal{L} = \frac{N^2}{\mathcal{R}_{m_a}} + 3\frac{N^2}{\mathcal{R}_{m_b}} \Leftrightarrow \mathcal{L} = \frac{N^2}{\mathcal{R}_{meq}} \Leftrightarrow \mathcal{L} = 38.2 mH$$

Nos sistemas em que os entreferros são muito grandes e a dispersão presente é muito elevada, para o cálculo da relutância do sistema incrementa-se à área do entreferro um valor proporcional à dimensão do entreferro, da forma $A_g = (comprimento + g)(largura + g)$ [13]. Repetindo os cálculos com este factor de aproximação obtém-se:

$$\mathcal{R}_{m1} = \frac{2e}{\mu_0 A_{g1}} \Leftrightarrow \mathcal{R}_{m1} = \frac{2e}{\mu_0 \frac{(c+g)^2}{2}} \Leftrightarrow$$

$$\mathcal{R}_{m1} = 4.421 \times 10^6$$

$$\mathcal{R}_{m2} = \frac{e}{\mu_0 A_{g2}} \Leftrightarrow \mathcal{R}_{m2} = \frac{2e}{\mu_0 (c+g)^2} \Leftrightarrow$$

$$\mathcal{R}_{m2} = 6.631 \times 10^6$$

$$\mathcal{R}_{m_a} = 4.152 \times 10^6 [A - espira/Wb]$$

$$\mathcal{R}_{m_b} = 2.825 \times 10^6 [A - espira/Wb]$$

$$\frac{1}{\mathcal{R}_{meq}} = \frac{1}{\mathcal{R}_{m_a}} + \frac{3}{\mathcal{R}_{m_b}}$$

$$\mathcal{L} = \frac{N^2}{\mathcal{R}_{m_a}} + 3\frac{N^2}{\mathcal{R}_{m_b}} \Leftrightarrow \mathcal{L} = \frac{N^2}{\mathcal{R}_{meq}} \Leftrightarrow \mathcal{L} = 81.4 mH$$

Com estes resultados é possível, através de uma ferramenta de *software* (*Matlab*), determinar resultados para testes da máquina em vazio, em carga e com um andar rectificador.

2.5 Resultados Teóricos em Vazio

Substituindo na eq. 2.11 todos os valores descritos no capítulo 2.2 traça-se o gráfico da Figura 2.26, a partir de um programa em *Matlab*.

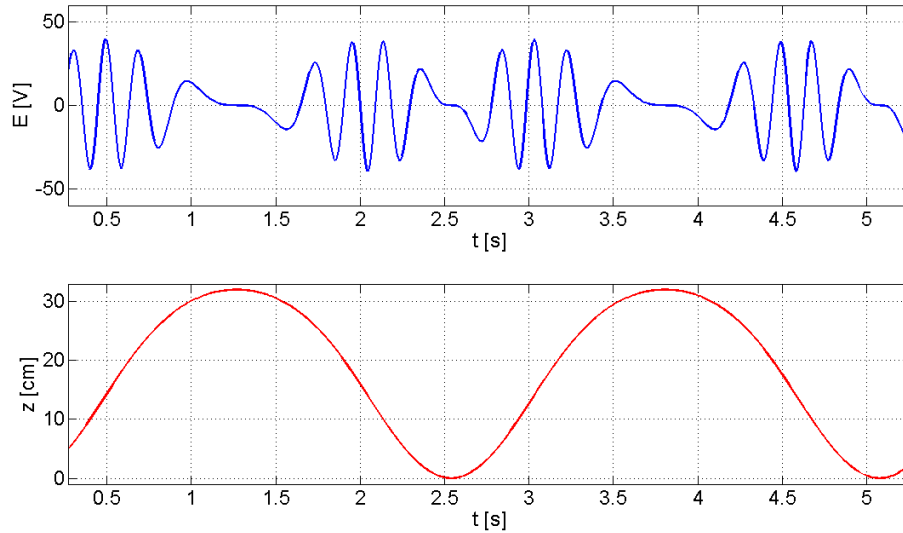


Figura 2.26: Força Electromotriz em Vazio (E) e Posição (z) com Período de Oscilação de $T_{mec} = 2.54 s$

O gráfico da Figura 2.26 representa a força electromotriz aos terminais do protótipo, quando o *translator* atinge uma velocidade média de $v_{med} = 0.25 m/s$, correspondente a um regime oscilatório do *translator* de $T_{mec} = 2.54 s$, resultando num valor eficaz de tensão de $E_{RMS} = 18.59 V$ à frequência eléctrica média de $f_{ele} = 3.15 Hz$.

Pela análise do resultado da eq. 2.11 verifica-se que a força electromotriz aos terminais da máquina aumenta com o aumento da velocidade do *translator* numa relação linear traçada no gráfico da Figura 2.27.

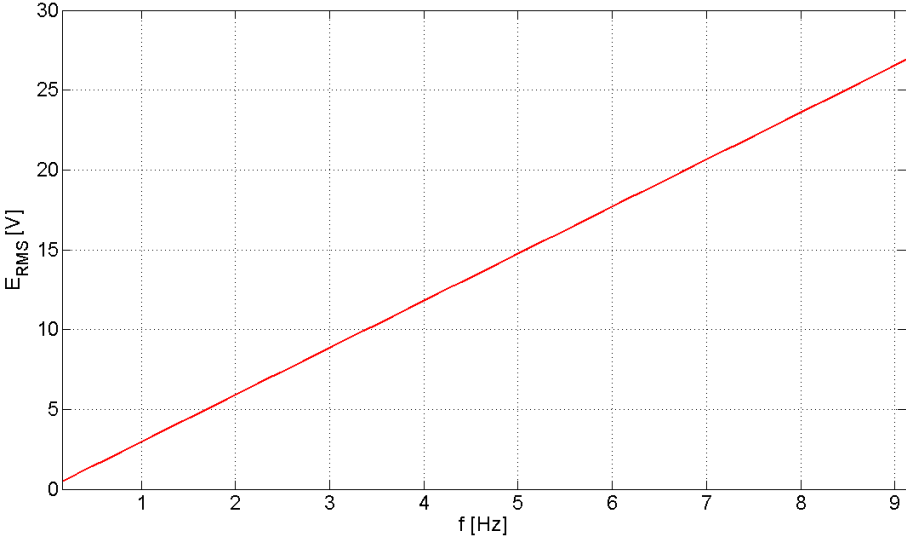


Figura 2.27: Evolução da força electromotriz com a variação da frequência eléctrica

2.6 Resultados Teóricos em Carga

Para calcular a evolução da tensão e corrente aos terminais de uma carga ligada ao gerador executa-se um programa na ferramenta *Simulink*, do *software Matlab*. Os pontos da evolução da força electromotriz obtidos no capítulo 2.5 foram convertidos em sinal de tensão; este foi aplicado à impedância interna da máquina em série com uma carga de $R = 5 \Omega$ e $R = 10 \Omega$ onde foram medidos os sinais de tensão e corrente, representados nas Figuras 2.28 e 2.29.

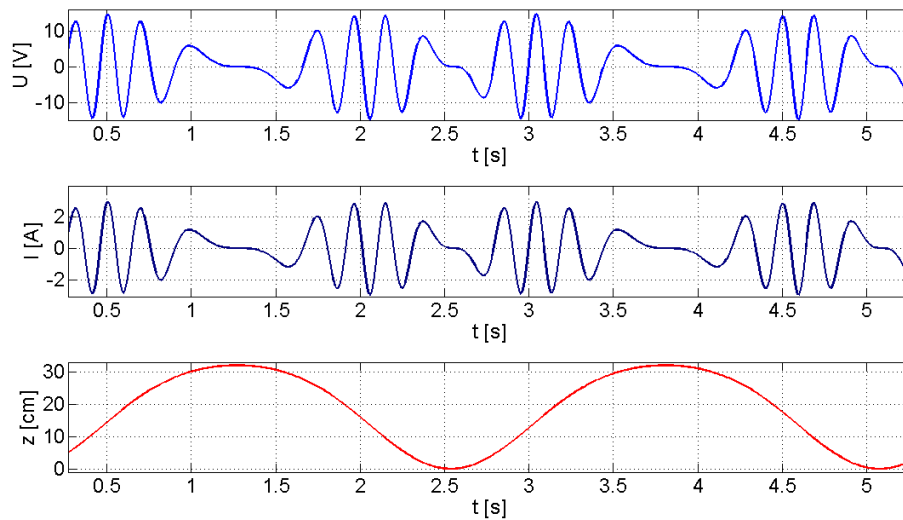


Figura 2.28: Carga resistiva $R = 5 \Omega$

$$U_{RMS_{5\Omega}} = 7.10 \text{ V} \quad I_{RMS_{5\Omega}} = 1.42 \text{ A} \quad P_{av_{5\Omega}} = 10.08 \text{ W}$$

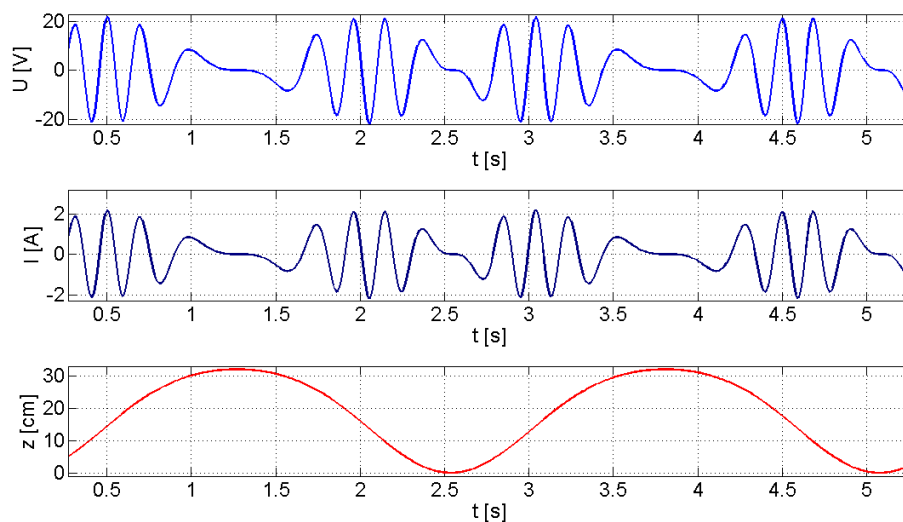


Figura 2.29: Carga resistiva $R = 10 \Omega$

$$U_{RMS_{10\Omega}} = 10.39 \text{ V} \quad I_{RMS_{10\Omega}} = 1.04 \text{ A} \quad P_{av_{10\Omega}} = 10.80 \text{ W}$$

2.7 Resultados Teóricos com Ponte de Rectificação

Numa aplicação real, a tensão à saída do protótipo, antes de ser injectada na rede ou alimentar qualquer tipo de carga, tem de ser tratada. Ou seja, não tendo nem amplitude nem frequência constante a tensão tem de passar por um andar rectificador e posteriormente por um andar inversor, para que a tensão injectada na rede tenha a mesma frequência que esta, taxa de distorção harmónica baixa e amplitude da tensão eficaz constante. Ao programa realizado para o cálculo dos resultados no capítulo 2.6 foi adicionada uma ponte rectificadora a diodos. Os resultados de tensão e corrente, após a ponte rectificadora, estão traçados nos gráficos das Figuras 2.30 e 2.31; em vazio e com uma carga $R = 5 \Omega$, respectivamente.

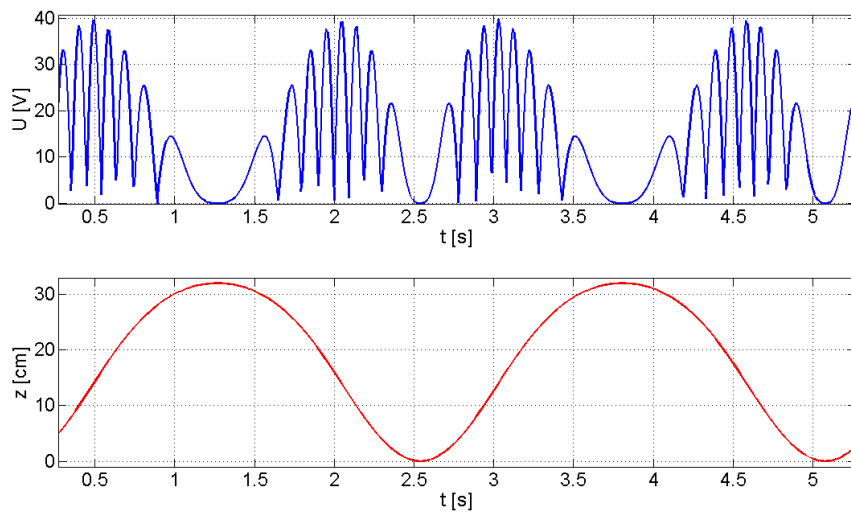


Figura 2.30: Tensão em Vazio com Ponte de Rectificação

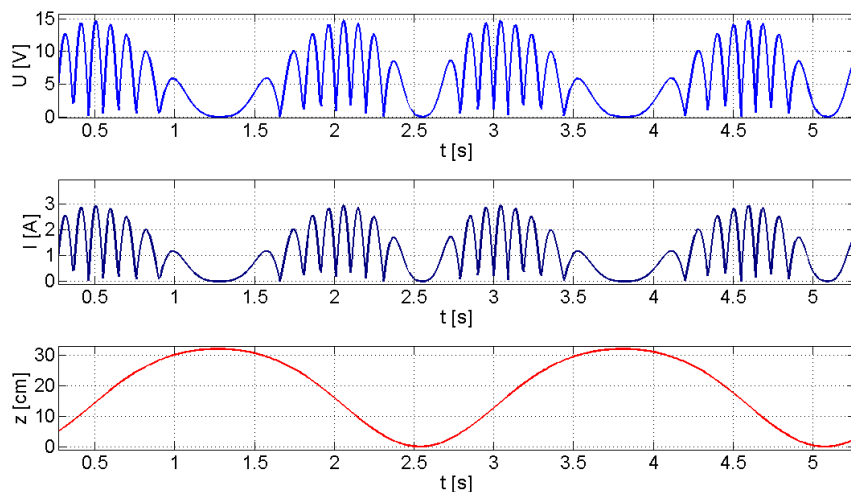


Figura 2.31: Tensão em carga ($R = 5 \Omega$) com Ponte de Rectificação

Os valores de tensão e corrente eficaz e potência média nestas duas situações são iguais aos resultados obtidos nos capítulos 2.5 e 2.6, respectivamente, já que é considerada uma ponte rectificadora ideal, sem quedas de tensão nos diodos.

Capítulo 3

Conversão de Energia – Cálculo de Forças de Origem Magnética

Para sistemas de estrutura fixa (*estator*) com partes móveis (*translator*) existem perdas aquando da conversão de energia mecânica para energia eléctrica. Devido à presença de entreferros entre o *estator* e o *translator*, e das não idealidades dos materiais constituintes, parte do campo magnético envolvido na conversão dispersa-se. O campo magnético de dispersão leva à formação de forças nas três direcções (x , y , z) que irão ser alvo de estudo neste capítulo, com o objectivo de melhor dimensionar os materiais e componentes para a construção do protótipo.

Para o estudo das forças envolvidas no sistema utiliza-se a configuração polar da máquina representada na Figura 2.9 tendo em conta as propriedades magnéticas e dimensão dos entreferros apresentados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Propriedades da Peça Polar

B_r	1.25 T
H_c	940 kA.m^{-1}
μ_{Fe}	$2500\mu_0 \text{ H.m}^{-1}$
μ_R	$1.03\mu_0 \text{ H.m}^{-1}$
g	3 mm

O cálculo das forças envolvidas no sistema está directamente relacionado com a posição do *translator* relativamente ao *estator*, o que leva ao estudo dessas forças segundo dois tipos de movimento:

- Movimento Segundo o Eixo de Translação (MSET) (Figura 3.1(a));
- Movimento Perpendicular ao Eixo de Translação (MPET) (Figura 3.1(b)).

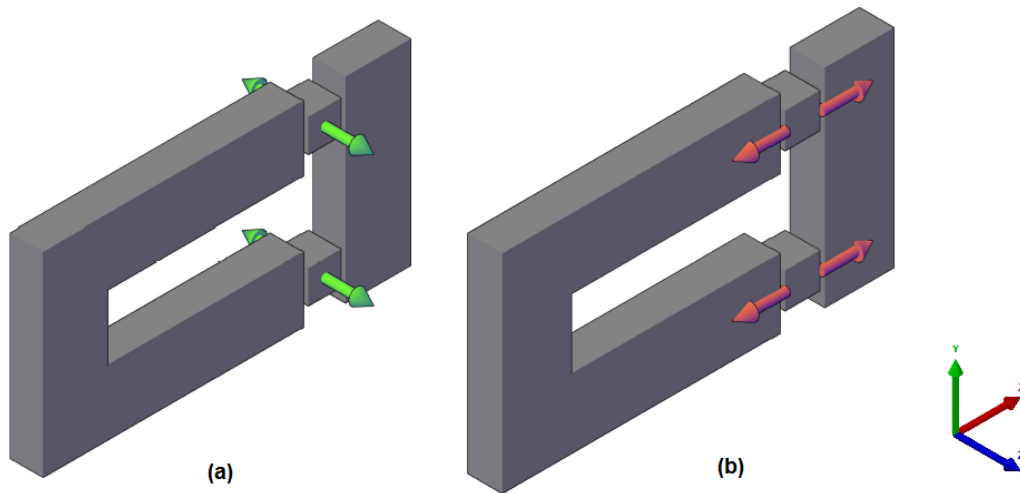


Figura 3.1: MSET (a) e MPET (b)

São usados três modelos distintos no estudo do MPET e do MSET e das suas forças resultantes:

- Cálculo teórico pelo teorema da conservação de energia;
- Cálculo com *software* de elementos finitos 2D pelo Tensor de Maxwell;
- Cálculo com *software* de elementos finitos 3D pelo Tensor de Maxwell.

A posição relativa dos magnetos em relação ao *estator* da máquina é levada a cabo segundo as coordenadas x , y e z . A configuração representada na Figura 3.1 transpõe a posição $[xyz] = [000]$ dos magnetos nos eixos ordenados.

3.1 Forças no Movimento Perpendicular ao Eixo de Translação - MPET

Como a interacção entre pólos não é significativa o sistema em estudo é constituído apenas por um pólo, representado na Figura 3.1(b).

3.1.1 Cálculo Teórico

Para o cálculo das forças de origem magnética envolvidas no sistema aborda-se o seu estudo pelo método de conservação de energia. Na eq. 2.8 do capítulo 2.4 foi calculado o fluxo por pólo. Particularizando para o cálculo das forças, discriminam-se os entreferros da forma:

$$\phi_m = \frac{2l_m H_c}{2(\mathcal{R}_{g_1} + \mathcal{R}_{g_2} + \mathcal{R}_m)} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow \phi_m = \frac{l_m H_c}{\frac{g_1}{2\mu_0 A_g} + \frac{g_2}{2\mu_0 A_g} + \frac{l_m}{\mu_R A_m}}$$

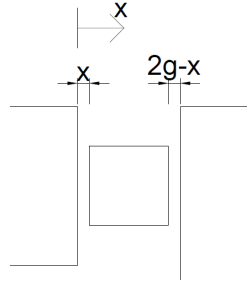


Figura 3.2: Pormenor do Entreferro

Ao analisar a Figura 3.2 tem-se que $g_1 = x$ e $g_2 = 2g - x$, então ϕ_m vem da forma:

$$\phi_m = \frac{l_m H_c}{\frac{x+(2g-x)}{2\mu_0 A_g} + \frac{l_m}{\mu_R A_m}} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow \phi_m = \frac{l_m H_c}{\frac{2g}{\mu_0 A_m} + \frac{l_m}{\mu_R A_m}}$$

$$W_m = \frac{1}{2} \mathcal{R}_{m_{total}} \phi_m^2 \quad (3.1)$$

Ou seja, uma variação da posição dos magnetos em x não provoca nenhuma variação no fluxo e, conseqüentemente, a energia magnética do sistema mantém-se constante.

$$f_m = -\frac{\partial W_m}{\partial x} = 0 \quad (3.2)$$

A força de origem magnética dada pela eq. 3.2 mostra que esta é nula, pois não existe variação da energia magnética com o deslocamento.

Segundo este modelo, a conclusão é verdadeira, já que o mesmo contabiliza todo o campo no entreferro como campo útil, não contabilizando o campo que irá originar forças, o campo de dispersão.

Assim sendo, para o estudo das forças envolvidas no sistema para o Movimento Perpendicular ao Eixo de Translação ter-se-ão que usar métodos de cálculo que contabilizem esse campo, ou seja, cálculo com *software* de elementos finitos 2D e 3D pelo Tensor de Maxwell.

3.1.2 Software de Elementos Finitos 2D e 3D

Os programas de simulação 2D e 3D permitem estudar as forças de origem magnética por meio do método do Tensor de Maxwell a duas e três dimensões, respectivamente. Com o auxílio de um script fez-se o varrimento do magneto desde a sua posição inicial (Figura 3.3(a)), passando pela posição de normal funcionamento (Figura 3.3(b)) até à sua posição final (Figura 3.3(c)), para a obter a evolução da força a que os magnetos estão sujeitos ao longo da sua posição (Figura 3.4).

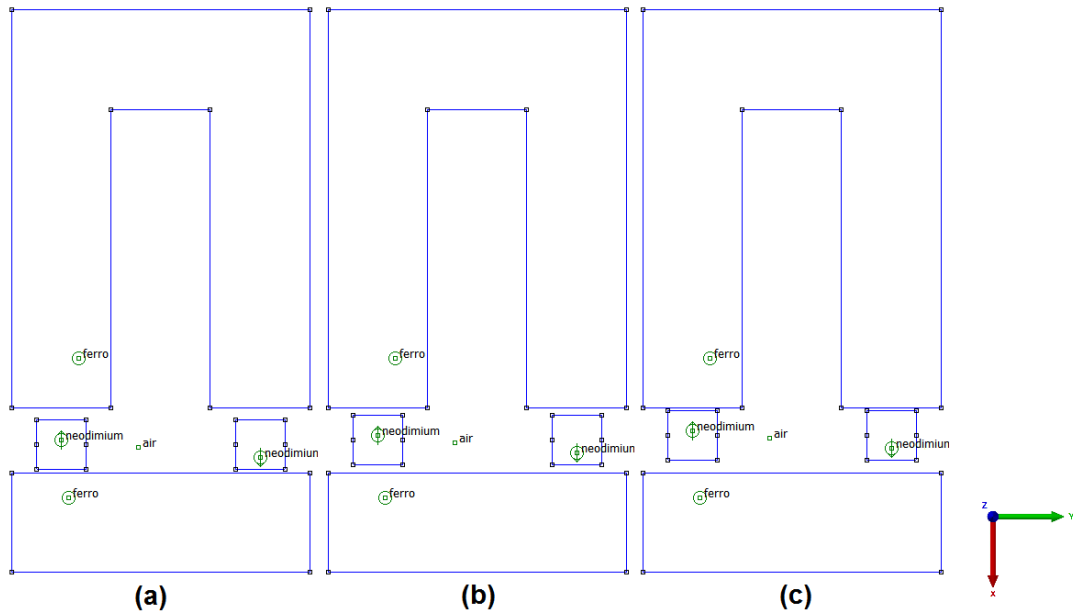


Figura 3.3: Esquema usado na simulação

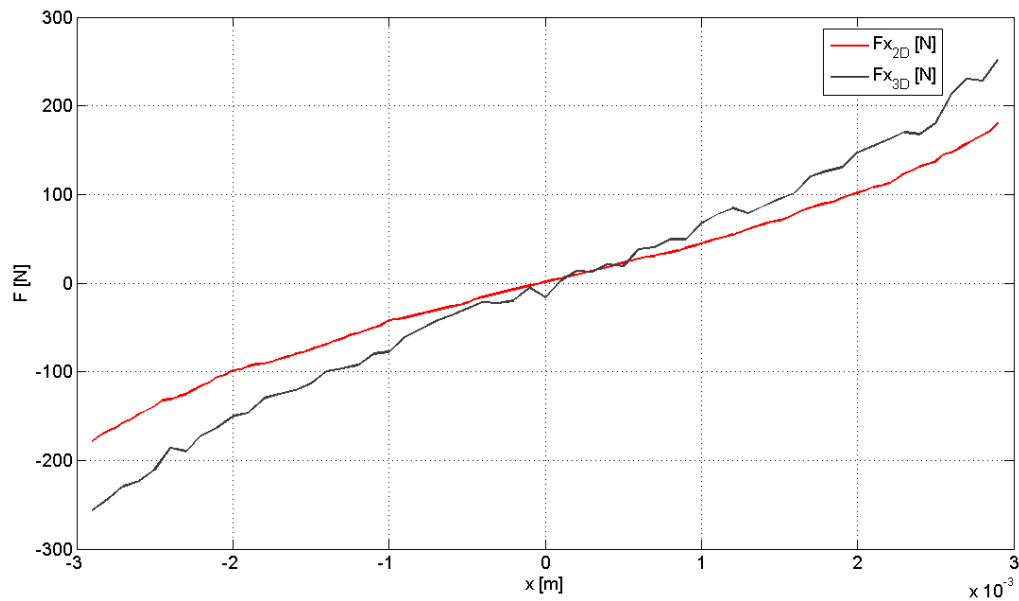


Figura 3.4: Evolução da força no MPET

Ao analisar o gráfico da Figura 3.4 verifica-se uma evolução linear entre a força e o deslocamento. Isto deve-se à localização dos magnetos entre duas placas de ferro, ou seja, existe uma compensação pelas duas placas de ferro dando origem a uma evolução linear da força com o deslocamento. Ainda assim, quando o deslocamento dos magnetos está próximo do limite, final ou inicial, existe um crescimento mais acentuado na força, por a influência da placa de ferro oposta ser menos expressiva.

3.1.3 Conclusões e Comparação de Resultados no Estudo das Forças no MPET

Analisando os resultados obtidos no capítulo 3.1.2 verifica-se que o sistema é instável, isto é, quando o magneto sai da posição de equilíbrio $x = 0$ tende sempre a juntar-se com o pólo $x = 3 \text{ mm}$. No gráfico pode-se observar ainda o mesmo andamento na evolução da força com o deslocamento a 2D (Figura 3.4 ($F_{x_{2D}}$)) comparado com o deslocamento a 3D (Figura 3.4 ($F_{x_{3D}}$)). Detalhadamente, pode-se verificar que a 2D a força tem um máximo $F_{x_{2D}} = 180 \text{ N}$ aos $2,9 \text{ mm}$ enquanto que para a mesma posição a 3D, $F_{x_{3D}} = 252 \text{ N}$. A 3D o cálculo tem em conta mais campo de dispersão levando a esta diferença. O estudo realizado para o Movimento Perpendicular ao Eixo de Translação (3.1) incidiu apenas num pólo; extrapolando para os quatro pares de pólos presentes na máquina e usando o valor de força do pior caso obtém-se:

$$F_x = 2\rho F_{x_{3D}} = 2 \times 4 \times 250 = 2000 \text{ N}$$

3.2 Forças no Movimento Segundo o Eixo de Translação - MSET

3.2.1 Cálculo Teórico

Como visto no capítulo 3.1.1, cálculo teórico pelo teorema da conservação da energia, o fluxo magnético polar não depende da posição relativa dos magnetos segundo o Movimento Perpendicular ao Eixo de Translação. O mesmo não se poderá verificar no Movimento Segundo o Eixo de Translação já que a relutância total do sistema (\mathcal{R}_{total}) altera-se com a variação da área total do entreferro ($A_g(z)$). Reescrevem-se, então, as eq. 2.8 e 3.2 segundo o MSET:

$$\phi_m = \frac{2l_m H_c}{\mathcal{R}_{total}(z)} \quad (3.3)$$

$$f_{m_z} = -\frac{\partial W_m}{\partial z} \quad (3.4)$$

A relutância total do sistema pode então ser calculada da forma:

$$\begin{aligned} \mathcal{R}_{total}(z) &= 4\mathcal{R}_g(z) + 2\mathcal{R}_m(z) \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow \mathcal{R}_{m_{total}} &= \frac{4g}{\mu_0 A_g(z)} + \frac{2l_m}{\mu_R A_m(z)} \\ A_g(z) &= \frac{3}{4}c(d - |z|) \\ A_m(z) &= h(d - |z|) \end{aligned}$$

A fim de calcular a energia magnética do sistema (W_m) recorre-se à equação 3.1, resultando:

$$W_m(z) = \frac{H_c^2 l_m^2}{\frac{3}{4}\mu_0 c(d - |z|) + \frac{l_m}{\mu_R h(d - |z|)}}$$

Para obter a força segundo z ($f_z(z)$) deriva-se a expressão 3.4 em ordem ao Movimento Segundo o Eixo de Translação:

$$f_m(z) = \frac{3H_c^2 l_m^2 \mu_0 \mu_r h}{3l_m \mu_0 + 8gh \mu_r} \text{sign}(z)$$

Onde a função $\text{sign}(z)$ é dada por:

$$\text{sign}(z) = \begin{cases} 1, & z > 0 \\ -1, & z < 0 \end{cases} \quad (3.5)$$

Na Figura 3.5 é traçada a evolução da força $f_m(z)$ no intervalo desde que o magneto está completamente desalinhado à esquerda ($z = -20 \text{ mm}$), passando pelo alinhamento com o pólo ($z = 0$) até este estar completamente desalinhado à direita ($z = 20 \text{ mm}$).

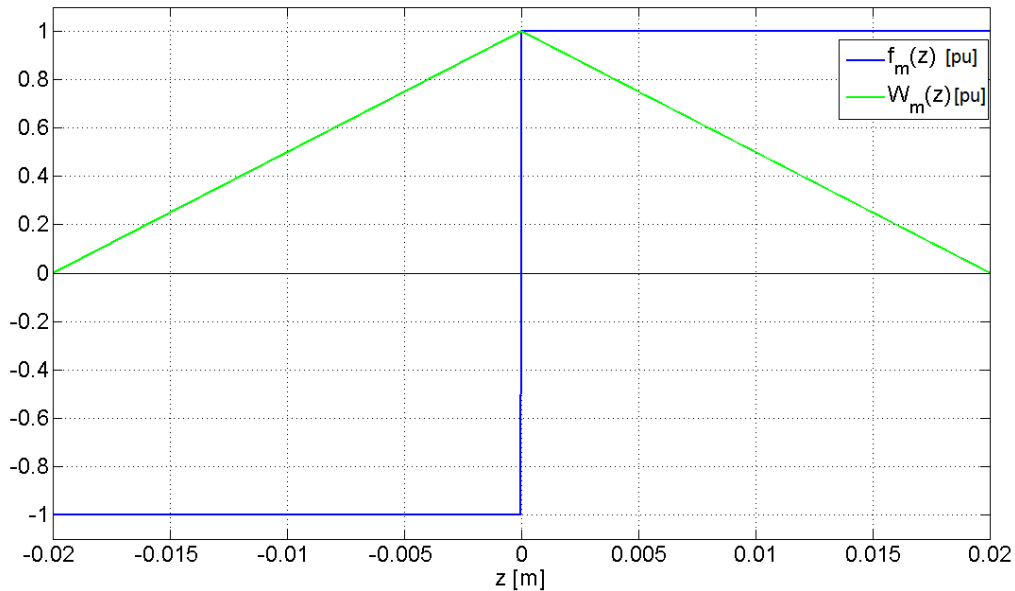


Figura 3.5: Evolução Normalizada da Força ($f_m(z)$) e da Energia Magnética (W_m) no MSET (teórico)

A força $f_m(z)$ é calculada considerando apenas um sistema constituído por um pólo, não sendo assim contabilizada a influência dos pólos adjacentes. Por este modelo, o magneto tende a alinhar-se com a peça polar em $z = 0$, sujeito a uma força constante e igual a $f_m(z) = 453.73 \text{ N}$, sendo esta positiva ou negativa consoante $z > 0$ ou $z < 0$, respectivamente. Ou seja, $z = 0$ é um ponto de equilíbrio do sistema estável.

3.2.2 Software de Elementos Finitos 3D

O programa de simulação 3D permite estudar as forças de origem magnética por meio do método do Tensor de Maxwell a três dimensões. Isto significa que com este método é possível calcular as forças envolvidas para uma representação do protótipo completo (Figura 3.6). Realizou-se, com o auxílio de um script em *Matlab*, o varrimento do magneto desde a sua posição inicial, até à sua posição final de modo a obter a evolução da força a que os magnetos estão sujeitos ao longo da sua posição (Figura 3.7 e Figura 3.8).

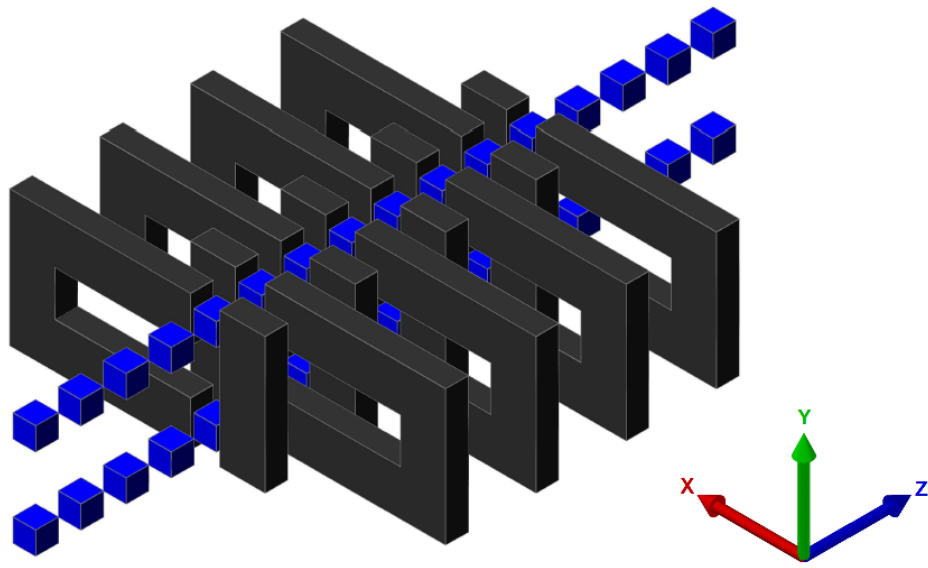


Figura 3.6: Esquema usado na simulação

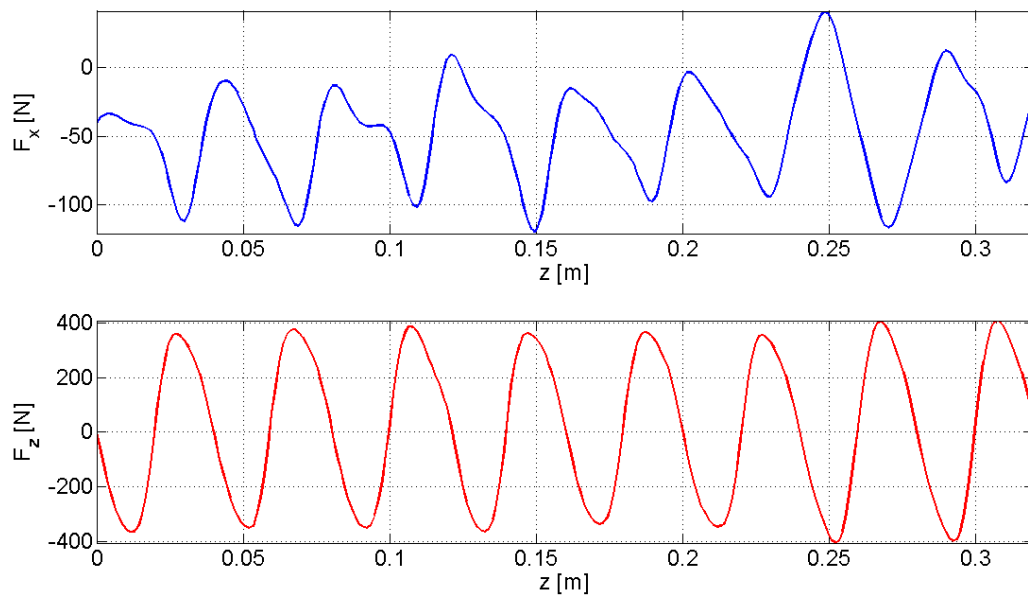


Figura 3.7: Evolução da força no MSET

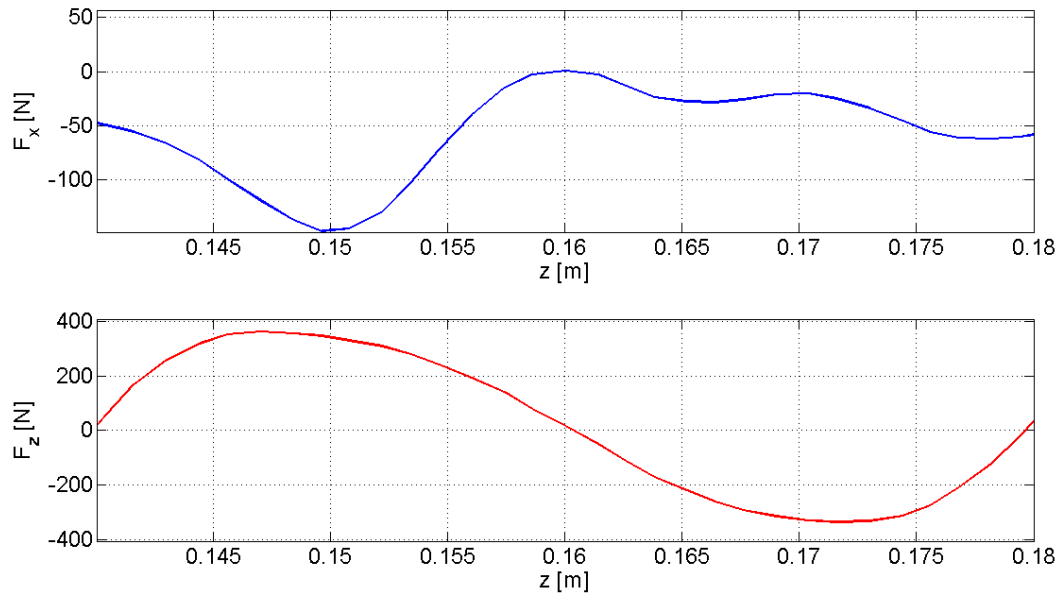


Figura 3.8: Evolução da força no MSET (detalhe em meio passo polar)

3.2.3 Conclusões de Resultados no MSET

A força resultante do Movimento Segundo o Eixo de Translação irá influenciar o funcionamento da máquina como foi analisado pelos resultados obtidos nos capítulos 3.2.1 e 3.2.2. No capítulo 3.2.1 o cálculo da força permite observar o andamento geral da força de um pólo do sistema, enquanto que no capítulo 3.2.2 para além do andamento da força, já com a interacção entre pólos, é possível estimar o valor do módulo da força máxima:

$$F_{z_{max}} = 407.48 \text{ N}$$

Este valor de força ao longo do eixo z permite verificar a força a que o braço descrito no capítulo 2.3 terá de superar para movimentar o *translator* ao longo do seu percurso.

Capítulo 4

Aspectos Construtivos

Neste capítulo será descrito o processo de construção do protótipo. Como qualquer processo de construção não standardizado, à medida que a construção avançou apareceram erros, a maioria dos quais corrigidos, e os não corrigidos, mesmo assim, estão apresentados neste capítulo para que não sejam cometidos no futuro. Muito material, por não existir ou os seus custos saírem fora do orçamento, foram manufacturados de raiz o que levou a erros dimensionais e, para os quais, foi necessário o uso de equipamento de protecção (óculos, máscaras e luvas) para não colocar em risco a saúde dos intervenientes, nomeadamente pela libertação de vapores vindos de polímeros (corte de acrílico e manuseamento de colas).

Abordou-se a construção do protótipo utilizando as seguintes linhas de orientação:

- A maior parte dos materiais de construção com $\mu_R \approx \mu_0$ (latão, acrílico, madeira, alumínio);
- O máximo de componentes standardizados e já catalogados (calhas, rolamentos);
- Componentes com peças únicas e uniformes, com poucos pontos fracos (*translator*);
- Colas e resinas de elevada capacidade de fixação.

A cronologia dos eventos mais relevantes da construção do modelo da máquina está representada no diagrama da Figura 4.1, o que permite ter a percepção do tempo de construção de cada parte do protótipo.

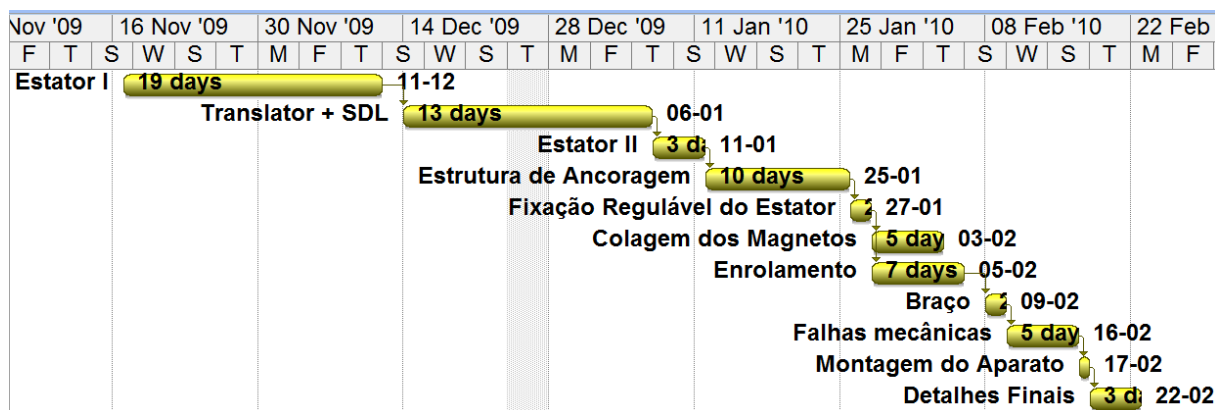


Figura 4.1: Diagrama de Gantt da Construção do protótipo

A construção do protótipo teve início a 17 de Novembro, após a chegada do ferro para as peças polares, e finalizou-se a 22 de Fevereiro, com a correcção de falhas que não permitiam o normal

funcionamento do protótipo. Durante três meses todos os eventos e detalhes da construção foram registados num diário de obra com anotações, fotografias e vídeos. Assim, a divisão deste capítulo é feita segundo o diário de obra. Mesmo que nalgumas situações esta divisão possa parecer pouco organizada foi propositadamente escolhida para que, em trabalhos futuros, possa servir de guia e não se cometam erros desnecessários.

4.1 *Estator*: Primeira Fase

O esqueleto do *estator* é feito por quatro varões roscados, numa liga de latão, com permeabilidade magnética baixa, 8 mm de diâmetro e 50 cm de comprimento. Este esqueleto, para além de dar estrutura ao *estator* e suportar as forças calculadas no capítulo 3, dá a possibilidade de fixar cada pólo, independentemente, com quatro porcas de latão, por ser roscado.

Como referido no capítulo 2.2 cada pólo tem $d = 20\text{ mm}$ de espessura e é constituído por 40 placas com 0,5 mm de espessura. Foram adquiridas placas de ferro catalogadas com 0,5 mm de espessura, com a morfologia atrás descrita e com furações nas extremidades de forma a serem empilhadas nos varões roscados. Foram juntas em grupos de 40, resultando 8 grupos de peças em U e 8 grupos de peças em I (Figura 4.2).

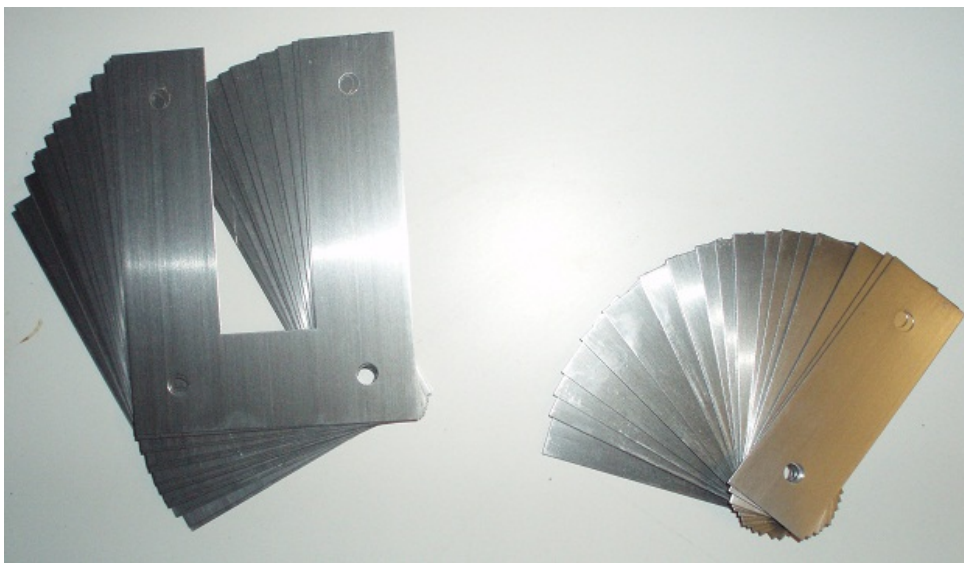


Figura 4.2: Placas de ferro

Para o espaçamento entre pólos foram usados dois tipos de anilhas em acrílico (Figura 4.3). As anilhas de tipo **B** são usadas para cobrir as porcas em latão e as de tipo **A** para preencher o resto do espaço entre pólos. As anilhas são manufacturadas a partir de duas placas de acrílico, existentes no laboratório, com 5 mm de altura, coladas entre si por uma cola específica para acrílico também disponível no laboratório (*Tensol 21*). As anilhas de espaçamento do tipo **A** diferem do tipo **B** somente no seu diâmetro interior (8 mm e 12 mm, respectivamente) mantendo ambas um diâmetro exterior de 25 mm e 10 mm de altura para manter a distância entre pólos definida ($e = 20\text{ mm}$). Este material foi usado já que para além de ter permeabilidade magnética baixa reflecte pouca deformação quando sujeito a forças de compressão. Ou seja, é um material que, para o efeito de espaçamento entre pólos, não varia a sua espessura devido à compressão a que está sujeito.

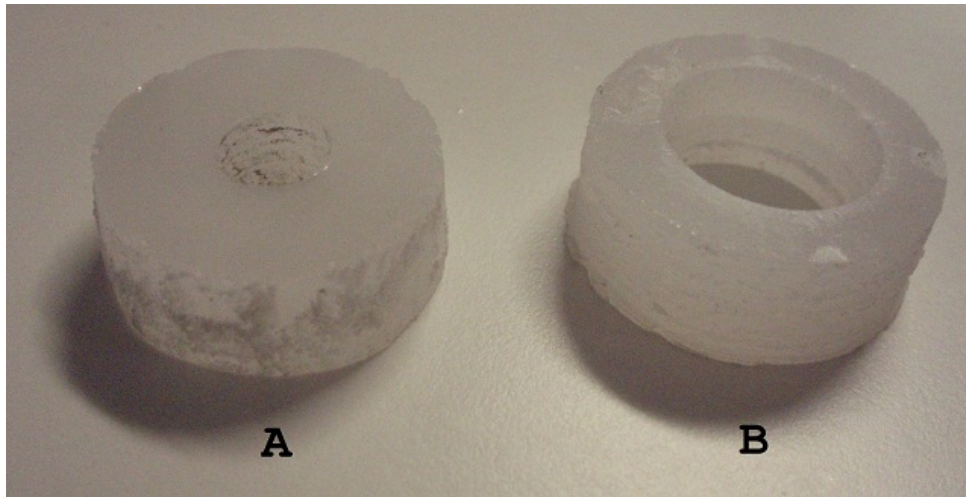


Figura 4.3: Anilhas em acrílico para espaçamento entre pólos

Foi feito o empilhamento das placas de ferro agrupadas e das anilhas de espaçamento com os varões roscados, na ordem:

- Placas de ferro em U fixas com quatro porcas;
- Quatro anilhas de espaçamento tipo B a cobrir as porcas;
- Anilhas de espaçamento tipo A (duas na parte frontal e quatro na rectaguarda);
- Placas de ferro em I fixas com duas porcas;
- Duas anilhas de espaçamento tipo B a cobrir as porcas;
- Duas anilhas de espaçamento tipo A na parte frontal.

Este processo é repetido quatro vezes até um dos lados do circuito magnético do *estator* estar completamente montado. Para o outro lado do *estator* é executado o mesmo processo. No final, obteve-se o circuito magnético representado na Figura 4.4.

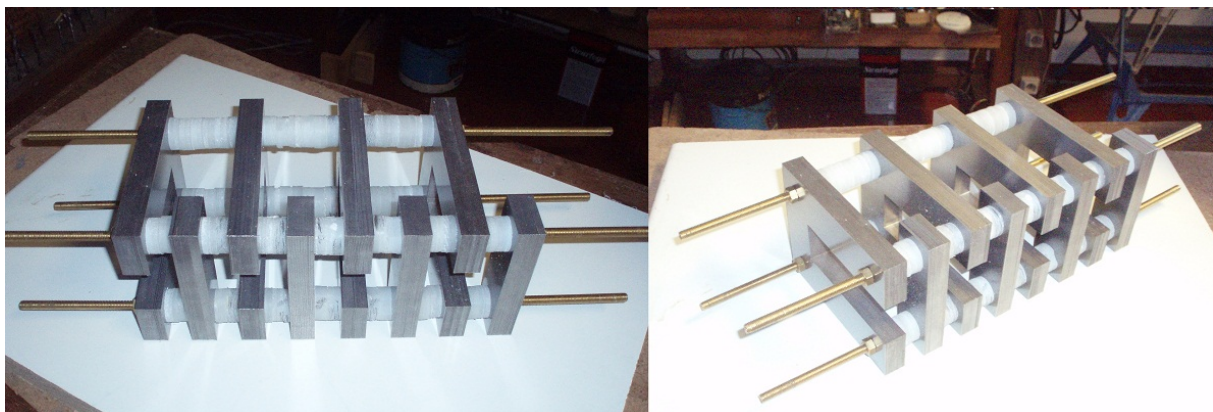


Figura 4.4: Circuito Magnético do *Estator*

4.2 *Translator*, Sistema de Deslizamento Linear (SDL)

A base da máquina é constituída por uma placa de madeira com dimensões $90 \times 120 \text{ cm}^2$ e o topo por uma placa de madeira com dimensões $30 \times 120 \text{ cm}^2$, que permitem agregar e servir de referencial a todos os constituintes.

O SDL onde é montado o *translator* é um dos sistemas em que os erros dimensionais têm de ser mínimos e os alinhamentos têm de ser garantidos, não só para que todo o sistema circule com o mínimo de vibrações devido às forças calculadas no capítulo 3, mas também para que os entreferros sejam mantidos constantes ao longo do percurso do *translator*.

O *translator* é constituído por uma peça única em acrílico com 32 orifícios cortados à medida dos magnetos ($d \times c_m \times h$) e separados pela distância entre pólos (e), ambos definidos no capítulo 2.2. Para garantir a precisão da posição relativa dos magnetos no *translator* foi encomendada a peça da Figura 4.5 à empresa *Dagol*, especializada em acrílicos.

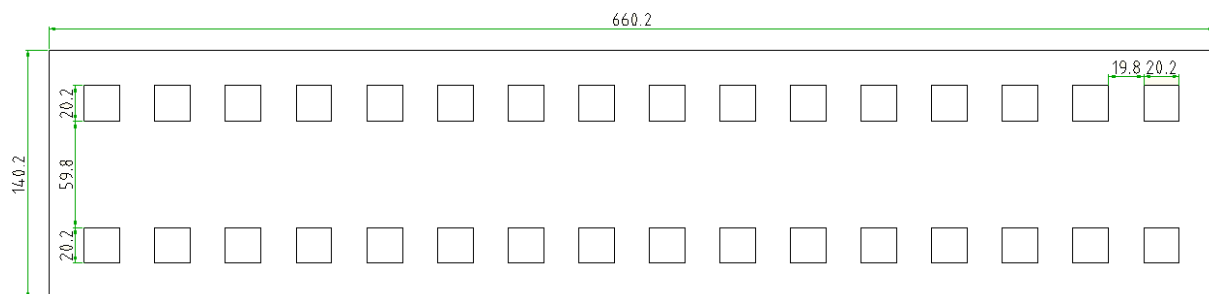


Figura 4.5: *Translator* (medidas em *mm*)

Para realizar o Sistema de Deslizamento Linear optou-se por adotar um sistema previamente adquirido e catalogado de guias e rolamentos à empresa *RS*. Foram usadas duas guias (Figura 4.6), quatro carros (Figura 4.7), oito rolamentos cêntricos e oito excêntricos (Figura 4.8) e dezasseis nozes de fixação (Figura 4.9) de modo a manter o *translator* fixo na base e no topo.

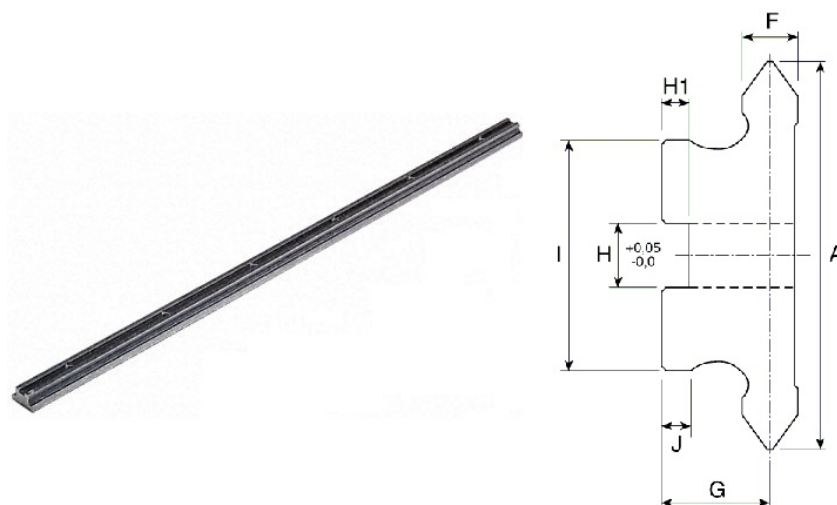


Figura 4.6: Guias em 'V' para SDL - *Slide Rail NC 25 × 1076 [mm²]* - ref.179 – 336

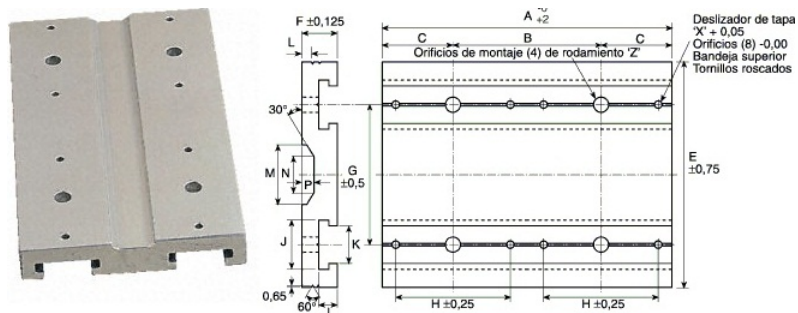


Figura 4.7: Placas de carro para SDL - *Carriage Plate* - ref.179 – 364

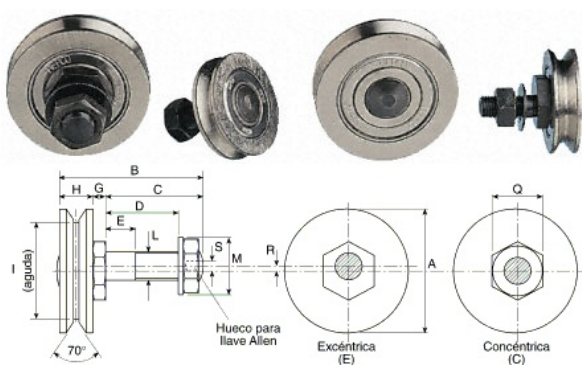


Figura 4.8: Rolamentos em 'V' para SDL - *Bearings* - ref.179 – 386 e ref.179 – 370

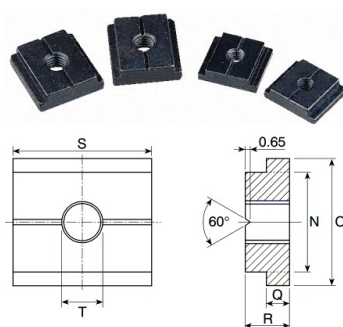


Figura 4.9: Nozes em 'T' para SDL - *T-Nut* - ref.179 – 421

Na Figura 4.8 estão representados dois tipos de rolamentos, um com o eixo de fixação cêntrico e outro excêntrico. Esta particularidade permite regular e afinar o carro no carril com um conjunto especial de chaves a fim de eliminar qualquer tipo de folga.

Este sistema foi utilizado num modo diferente do convencional: geralmente, o movimento de translação dá-se com a guia fixa e o carro móvel, mas neste caso, por motivos estruturais, optou-se por fazer o contrário, fixando o carro à base e a guia foi deixada móvel.

Montaram-se os rolamentos no carro e procedeu-se à sua fixação à base com as nozes da Figura 4.9, como mostra a Figura 4.10.

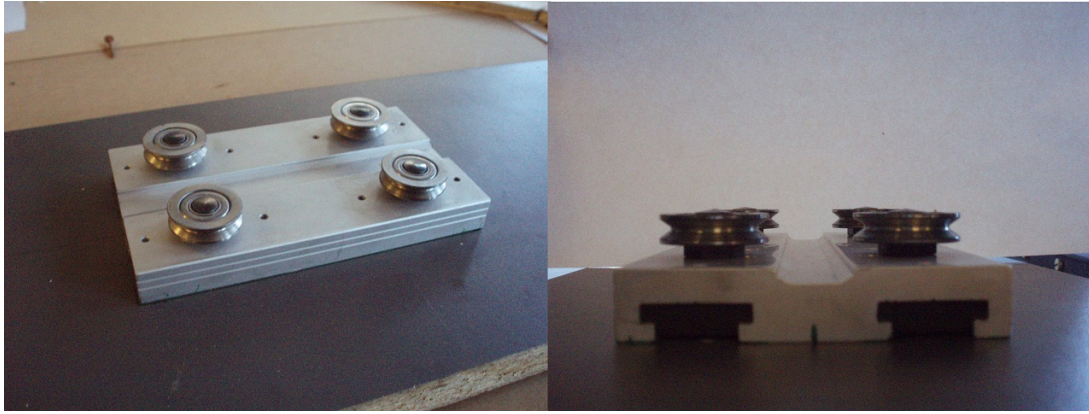


Figura 4.10: Grupo carro+rolamentos+noz fixos na base

Para fixar à base e ao topo os quatro carros usados, onde o *translator* desliza, usou-se o método de:

- Deixar uma distância de 36 *cm* entre carros de modo a estes não interferirem com o *estator* com $L = 32$ *cm*;
- Fixar o primeiro carro totalmente e deixar o segundo carro fixo mas com alguma folga;
- Inserir a guia nos dois carros para o primeiro carro servir de referência de alinhamento ao segundo;
- Fixar o segundo carro;
- Afiar os rolamentos excêntricos de forma a eliminar qualquer folga.

Para finalizar a construção do *translator* com o SDL foram feitas 16 furações no *translator* (8 no topo e 8 na base) onde foram fixadas as guias recorrendo a parafusos de latão de baixa permeabilidade magnética. Neste tipo de fixação (o mais indicado para este caso) existem vários pontos onde as forças calculadas no capítulo 3 se podem dispersar. Veja-se o resultado obtido na Figura 4.11

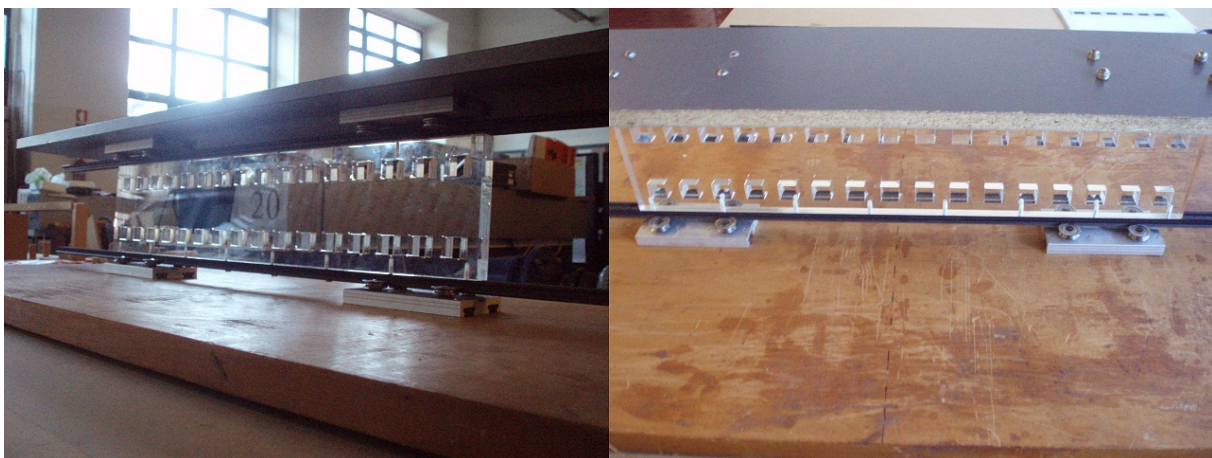


Figura 4.11: *Tanslator* com SDL

4.3 Estator: Segunda Fase

Após o estado de construção atingido na secção 4.2 verificou-se que era necessário altear o *estator* de modo a ficar alinhado com os magnetos do *translator*. Recorreu-se a duas placas de madeira que, agrupadas, têm a medida exacta pretendida (Figura 4.12).



Figura 4.12: Alteamento do *Estator*

Para fixar o *estator* à estrutura de alteamento usaram-se peças em alumínio em 'I' representadas na Figura 4.13 que foram manufacturadas de raiz. Estas fixações usam os varões roscados do *estator* para o fixar à estrutura de alteamento. Após os primeiros testes ao protótipo ocorreu uma falha devido a estas fixações, pois não revelaram robustez suficiente para suportar as forças calculadas no capítulo 3.1.

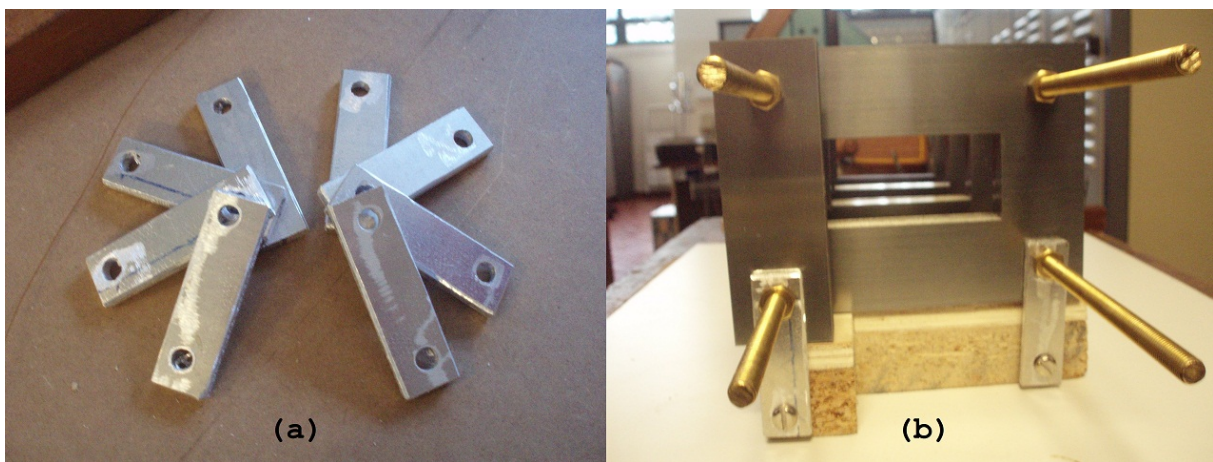


Figura 4.13: Elementos de Fixação do *Estator*

4.4 Estrutura de Ancoragem

Para dar rigidez à estrutura do grupo *translator* e SDL foi feito um enquadramento com perfis em ferro denominados *handy*, que estavam disponíveis no laboratório. Esta estrutura, representada na Figura 4.14, para além de minimizar as forças e vibrações a que a máquina está sujeita, permitiu a sua fixação à bancada do laboratório.



Figura 4.14: Estrutura de Ancoragem

Na Figura 4.14 distinguem-se duas partes da estrutura com as letras **(a)** e **(b)**. Os travamentos oblíquos identificados pela letra **b** foram adicionados após a primeira tentativa de construção da estrutura para anular as forças no sentido z (estudadas no capítulo 3.2).

4.5 Fixação Regulável do *Estator*: Primeira Fase

Desejou-se desde o início que o entreferro da máquina fosse regulável; porém, foi motivo de falhas do protótipo no decurso dos primeiros testes. Explicando: segundo o resultado obtido por simulação nos capítulos 3.1.3 e 3.2.3 a estrutura de fixação regulável tem de suportar tanto as forças segundo x como as vibrações causadas pelas forças segundo z o que não se verificou nesta fase. A primeira abordagem à solução está representada na Figura 4.15 e tem como constituintes os elementos representados pelas letras:

- (a) - 3 varões roscados com diâmetro $0,5\text{ mm}$ fixos a (c) por porcas e reguláveis segundo (b) por porcas de orelhas;
- (b) - estrutura em *handy* fixa à base da máquina;
- (c) - estrutura em *handy* fixa à estrutura de alteamento do *estator*;
- (d) - calhas de suporte minimizando as vibrações do *estator* segundo z .

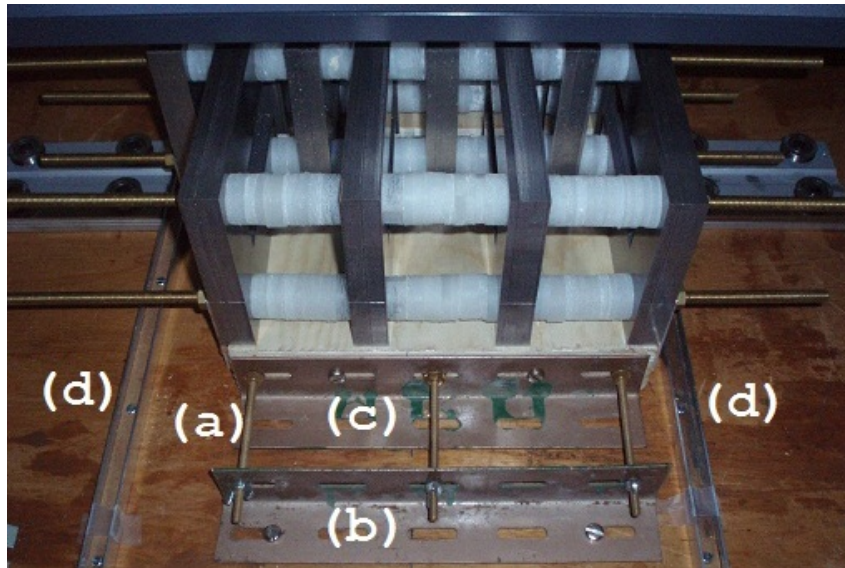


Figura 4.15: Primeira abordagem à estrutura de fixação regulável do *estator*

Nesta fase, a maior parte da máquina foi desmontada com o intuito de realizar o enrolamento e colar os magnetos ao *translator*.

4.6 Colagem dos Magnetos

No capítulo 3 calcularam-se forças na ordem das centenas e milhares de Newton ($F_z = 407\text{ N}$ no MSET e $F_x = 2000\text{ N}$ no MPET) e, com experiência em trabalhos anteriores [1], foi escolhida a cola *Araldite* cuja força de ligação, após 3 dias de secagem, é de 320 kg/cm^2 (dado do fabricante). Numa primeira fase, e para não sobrecarregar mecanicamente o protótipo, foram só colados metade dos magnetos na parte central do *translator*, como mostra a Figura 4.16.

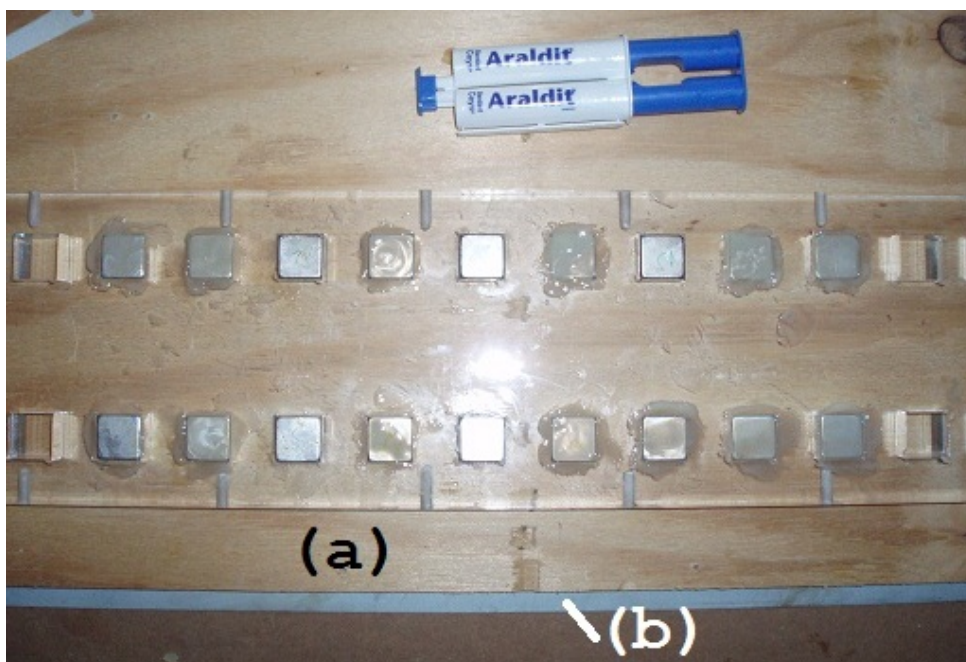


Figura 4.16: Colagem de metade dos magnetos no *translator*

Como já se disse, a cola usada tem um tempo de secagem demorado. Levantou-se o problema da atracção dos magnetos durante o processo de colagem, uma vez que estavam dispostos com pólos alternados. Para resolver a situação colocou-se uma placa de metal e uma de madeira (identificadas na Figura 4.16 pelas letras **(a)** e **(b)**, respectivamente).

Durante a colagem dos magnetos verificou-se não ser possível colocá-los nos orifícios um a seguir ao outro, já que as forças de atracção os faziam sair dos orifícios e unirem-se. Então, preencheram-se os orifícios do *translator* alternadamente: a cada orifício com magneto seguia-se um orifício vazio. Deste modo, a distância entre os magnetos tornou-se suficiente para minimizar as forças de atracção e estes puderam ser atraídos em direcção à placa de metal.

Após a secagem completa do primeiro conjunto de magnetos puderam colar-se os restantes sem o risco de saírem do orifício pela força de atracção provocada pelos magnetos adjacentes (Figura 4.17(a)); como estes equilibram essas forças segundo o eixo z (Figura 4.17(b)), o somatório das forças no magneto a colar faz com que ele se ajuste à posição desejada.

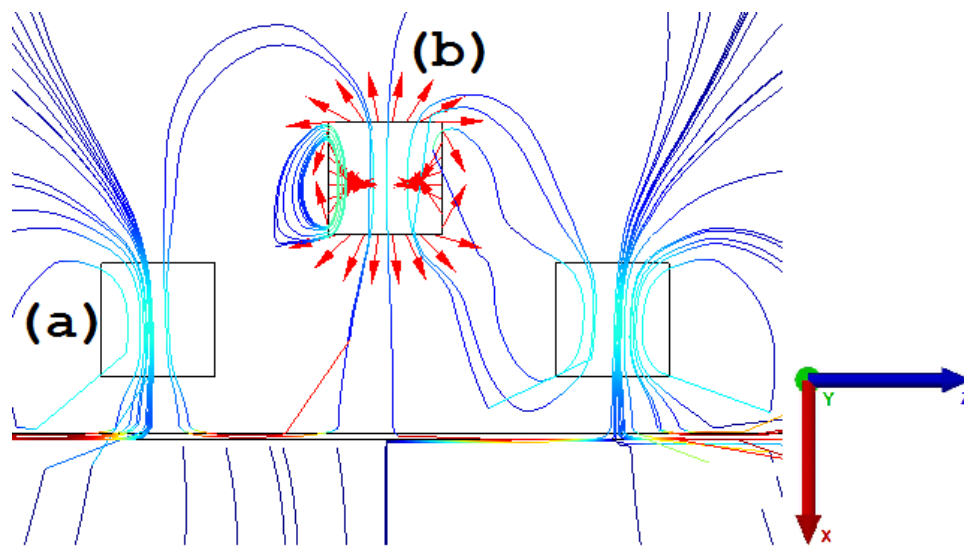


Figura 4.17: Forças entre Magnetos

4.7 Enrolamento

No capítulo 2.2 verificou-se que, pelas condições laboratoriais disponíveis, não seria possível realizar o enrolamento conforme o pretendido. Numa abordagem inicial tentou-se efectuar manualmente o enrolamento, o que não foi viável dada a complexidade do caminho representado na Figura 4.18 (de (a) a (d)).

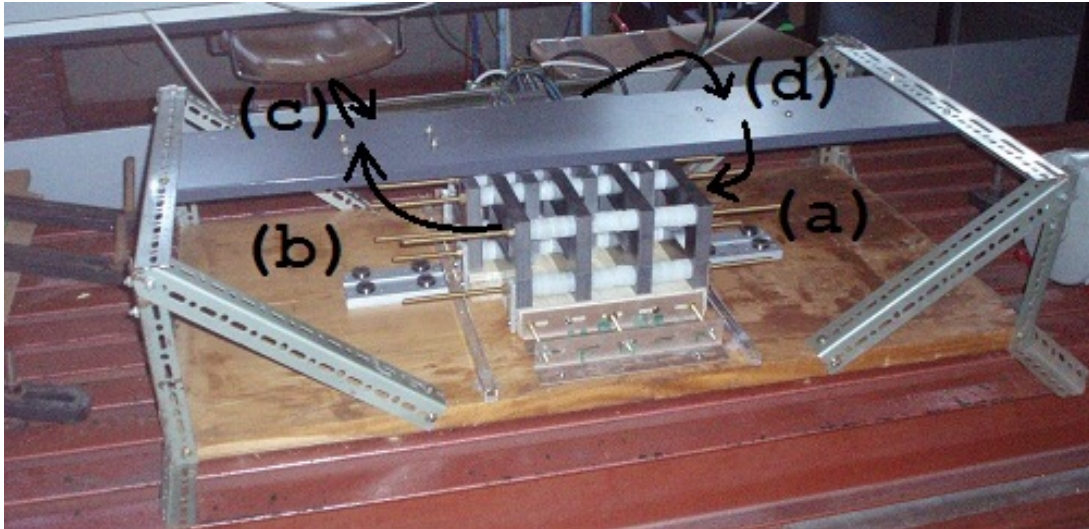


Figura 4.18: Caminho a Percorrer pelo Enrolamento

Assim, ao invés do concebido inicialmente em 2.2, o enrolamento de $N = 500$ espiras foi dividido em dois enrolamentos de $N = 250$ espiras, um de cada lado do *estator*. Para isso, foi feito um molde em madeira com abas de suporte onde foi enrolado, manualmente, um enrolamento com $N = 250$ espiras (Figura 4.19).

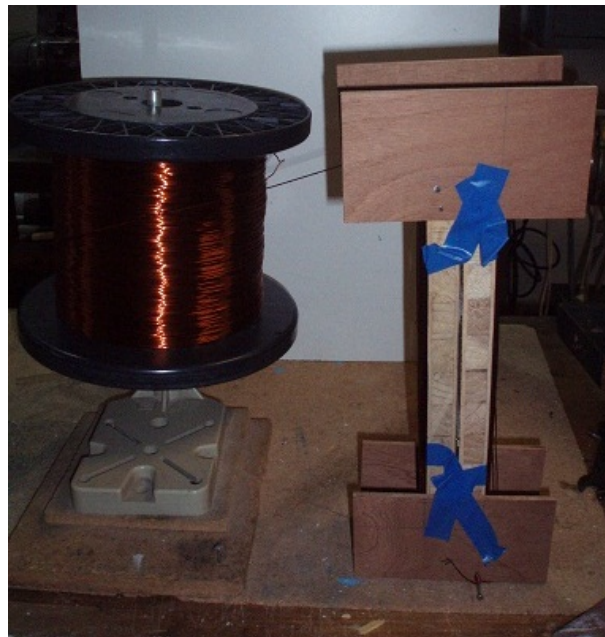


Figura 4.19: Bobine de Cobre e Enrolamento no Molde de Madeira

O processo de retirar o enrolamento feito no molde e posterior integração com o circuito magnético

do *estator* levou a uma desmontagem parcial do circuito magnético para que o enrolamento fosse inserido. Depois, verificou-se que, devido ao enrolamento estar desprovido de qualquer protecção, a camada isolante do cobre ficou danificada, uma vez que este não tinha folga suficiente para não existir fricção com as arestas do ferro do circuito magnético. Na Figura 4.20 representa-se o enrolamento no *estator* parcialmente desmontado e pode-se também observar a força que o enrolamento realiza no ferro, fazendo-o deformar-se.

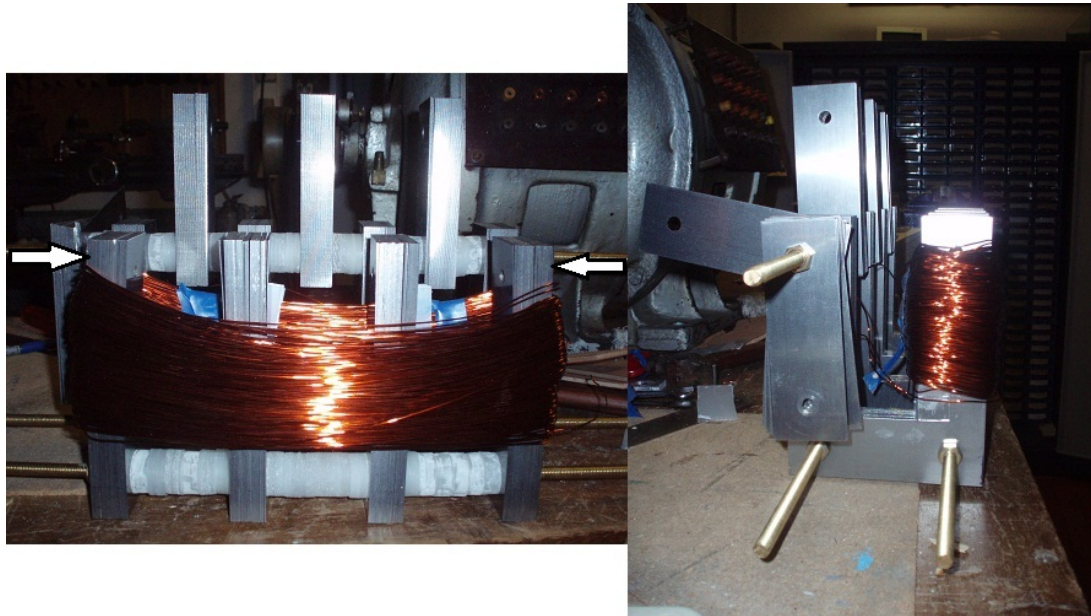


Figura 4.20: Enrolamento no *Estator* Parcialmente Desmontado

A terceira abordagem, foi feita com o mesmo tipo de enrolamento, embora se tivesse introduzido o molde no *estator*. Fez-se um molde rectangular, com abas, em acrílico com $(c + \Delta M) \times (L + \Delta M) = 60 \times 322 \text{ mm}^2$ onde se definiu a folga $\Delta M = 20 \text{ mm}$ (Figura 4.21(a)). De seguida, fizeram-se 250 espiras manualmente (Figura 4.21(b)) obtendo-se o enrolamento final (Figura 4.21(c)), que após inserção no *estator*, está representado na Figura 4.22.

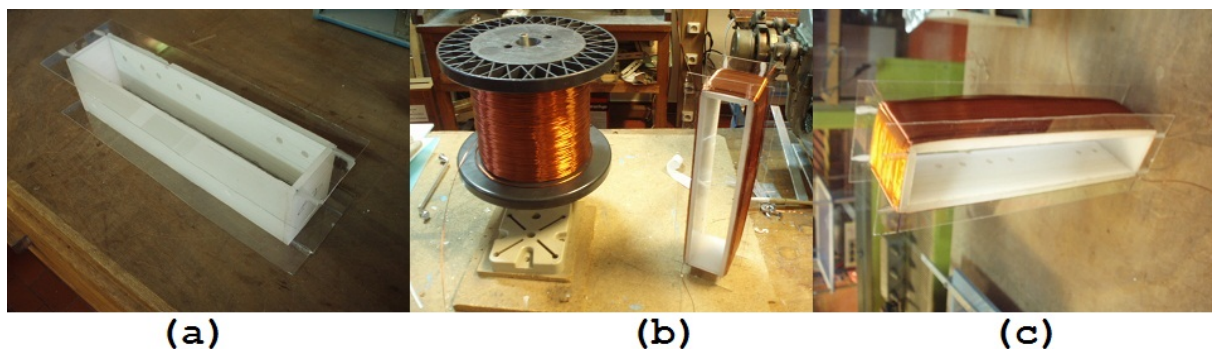


Figura 4.21: Enrolamento Final

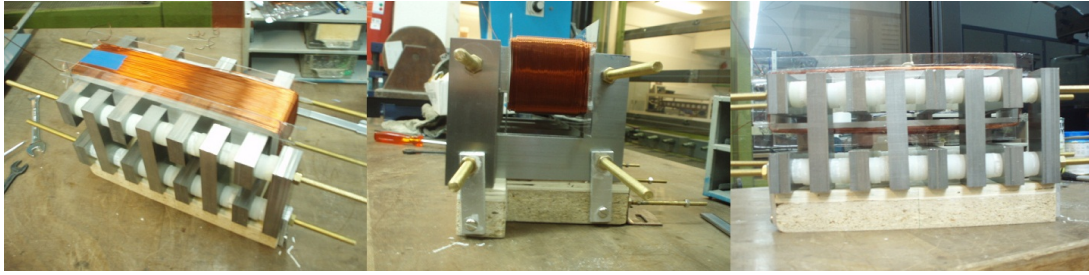


Figura 4.22: Estator Final

Este processo foi repetido para o lado oposto do circuito magnético e todo o sistema foi montado de novo na estrutura de ancoragem. Para efectuar as ligações em série dos enrolamentos e posterior ligação aos aparelhos de medida e cargas foi necessário incorporar bornes aos seus terminais, estando estes representados na Figura 4.23.

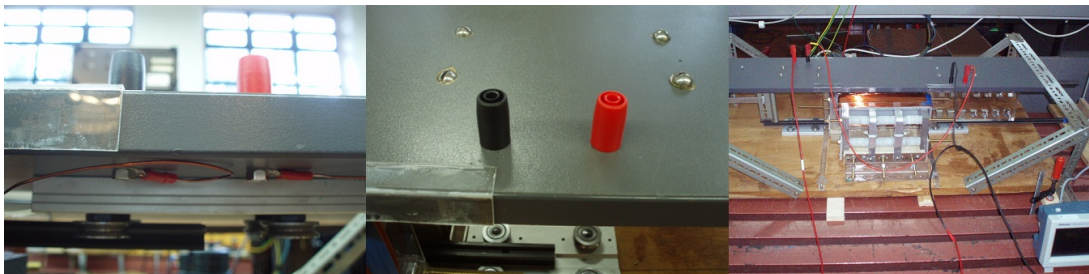


Figura 4.23: Bornes e Ligações

4.8 Braço

Para accionar a máquina, no capítulo 2.3, foi definido um conjunto de dois braços, que permite a transformação do movimento de uma máquina rotativa, para movimento linear do *translator*. Recorrendo à Figura 2.13 construíram-se dois braços, r_a e r_b com 16 cm e 32 cm, respectivamente.

Para as uniões usaram-se parafusos com anilhas para reduzir o atrito (Figura 4.24(1)). Na união com o *translator*, fez-se passar na guia em 'V' um varão roscado com 5 mm de diâmetro fixo com duas porcas nas extremidades (Figura 4.24(2)). Nele é inserido uma estrutura em *handy* com enchimento de borracha para suavizar as mudanças de sentido na velocidade do *translator*(Figura 4.24(3)).

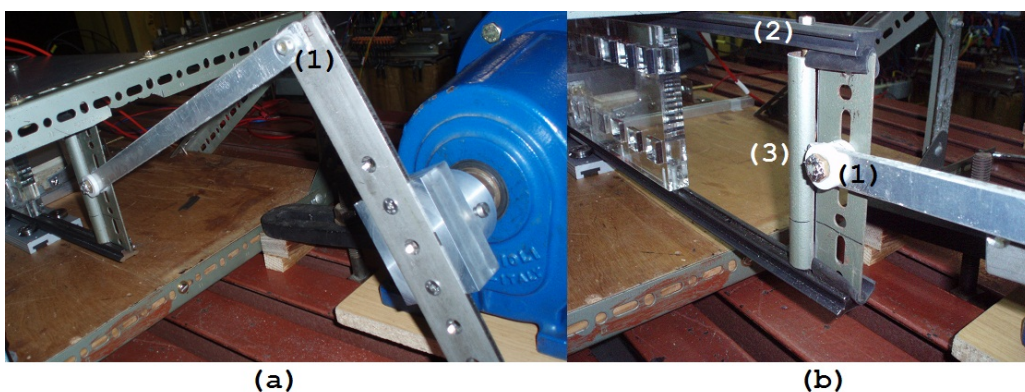


Figura 4.24: Eixo com Dois Braços - Pormenor

4.9 Falhas Mecânicas

Com o protótipo completo realizou-se um teste mecânico para verificar a robustez do sistema. Ao longo destes testes ocorreram falhas mecânicas caracterizadas pela união do *estator* com o *translator*, ou seja, as forças segundo x superaram as forças que a estrutura consegue suportar, resultando num entreferro $g = 0$, que bloqueia o movimento do *translator* no seu eixo.

Existiu, então, uma falha mecânica do sistema, representada na Figura 4.25, devido às forças calculadas no capítulo 3.1. Essas forças aplicadas no *estator* resultam num binário sobre as fixações em 'I'. Por não ser capaz de suportar o binário, o *estator* uniu-se com os magnetos.

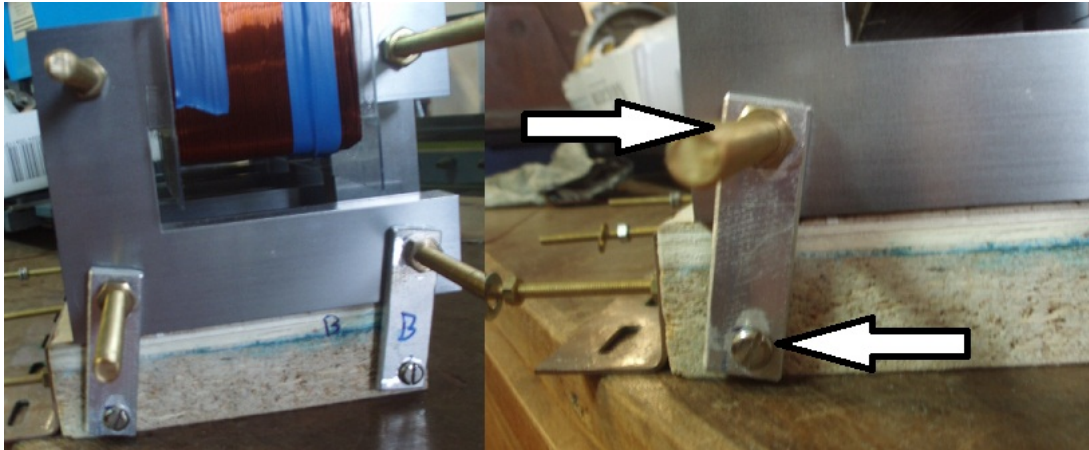


Figura 4.25: Representação da Falha Mecânica das fixações em 'I'

A falha foi corrigida substituindo as fixações em 'I' por fixações em 'L' de forma a eliminar os efeitos do binário descrito (Figura 4.26).



Figura 4.26: Fixações em 'L'

A falha seguinte ocorreu devido à fixação regulável do *estator*, descrita no capítulo 4.5. A falha deveu-se ao diâmetro reduzido dos varões roscados e ao comprimento excessivo destes entre a estrutura em *handy* fixa à base e a estrutura de alteamento do *estator*. Substituíram-se por varões roscados com diâmetro maior (8 mm) e o seu comprimento reduzido. Também foram feitas novas

furações, tanto na base como na estrutura de alteamento do *estator*, para existirem mais pontos onde a força exercida se pudesse distribuir (Figura 4.27).

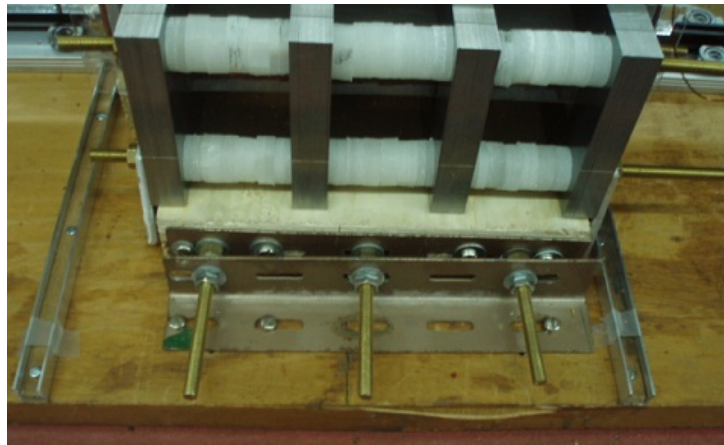


Figura 4.27: Fixações Reguláveis do *Estator*

Com um novo teste verificou-se que o *estator* não se mantinha junto à estrutura de alteamento, inclinando-se como mostra a Figura 4.28, provocando a falha do sistema. Isto deveu-se ao problema do binário atrás descrito não ter sido completamente eliminado pelas fixações em 'L'. Para corrigir esta falha foram manufacturadas duas peças em 'L' (Figura 4.28) que impedem o movimento vertical do *estator*.



Figura 4.28: Falha e Estrutura em 'L' para Correção

Com estas correções, o protótipo ficou robusto o suficiente para operar com um entreferro de $g = 1 \text{ cm}$. Todos os ensaios apresentados no capítulo seguinte foram feitos com este entreferro.

O entreferro foi ainda reduzido para $g = 0.8 \text{ cm}$ onde se conseguiram obter resultados (Anexo A), mas ao diminuir a velocidade até zero, ocorreu a falha da máquina, danificando toda a estrutura do braço (Figura 4.29).

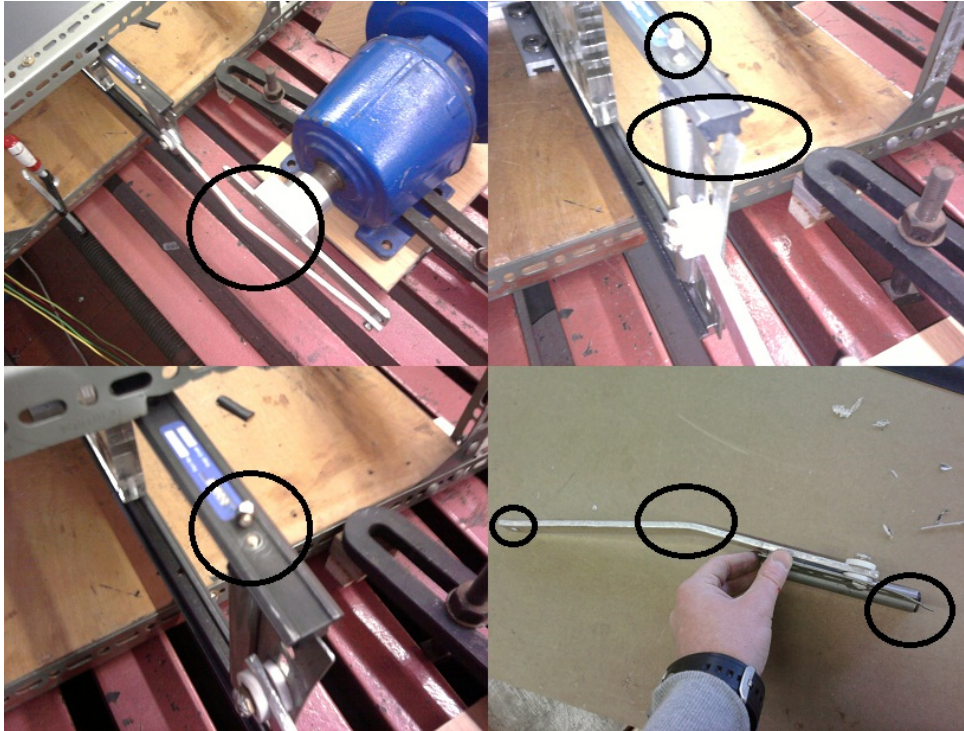


Figura 4.29: Danos no Braço Devido a Falha

Capítulo 5

Ensaaios

Neste capítulo serão apresentados os ensaios realizados ao protótipo, nomeadamente, ensaios em vazio, carga e com ponte rectificadora a díodos. Serão também apresentados os resultados dos métodos experimentais para determinação da impedância interna do protótipo.

Para melhor comparação entre os ensaios experimentais e os resultados teóricos, apresentados nos capítulos 2.5, 2.6 e 2.7, serão também apresentados neste capítulo, juntamente aos ensaios, os resultados teóricos obtidos para as diferentes situações, sujeitos a uma aproximação. Esta aproximação é feita devido ao modelo obtido no capítulo 2.4 não contabilizar as fugas do sistema. Os resultados obtêm-se a partir do desenvolvimento da eq. 2.11 do capítulo 2.4 apresentado na eq. 5.1:

$$E(t) = -K(\psi_m)_{\max} v(t) 2\pi p \frac{1}{L} \sin(2\pi p \frac{z(t)}{L}) \quad (5.1)$$

Este desenvolvimento tem em conta um factor de correcção ao fluxo magnético do modelo obtido, K , calculado a partir dos ensaios em vazio. Ou seja, K é obtido da relação entre os valores eficazes das forças electromotrizes teórica e experimental, ambas com um período de oscilação de $T_{mec} = 2.54$ s, da forma:

$$K = \frac{E_{RMS_{exp}}}{E_{RMS_{teo}}} = \frac{18.65}{11.22} = 0.6$$

Aos ensaios em carga juntaram-se também os resultados teóricos onde se substituíram os valores de indutância interna calculada pelos valores medidos (capítulo 5.1).

5.1 Impedância Síncrona

No capítulo 2.4 foi calculada a impedância interna do protótipo. Neste capítulo é determinada recorrendo a aparelhos de medida e ensaios experimentais.

Recorrendo ao aparelho de medida da ISO-TECH, modelo LCR Meter LCR819, obtêm-se os seguintes resultados:

$$R_1 = 5 \Omega$$

$$R_2 = 4.6 \Omega$$

$$\mathcal{L}_1 = 94.966 \text{ mH}$$

$$\mathcal{L}_2 = 79.767 \text{ mH}$$

Recorreu-se a outro método experimental ligando o enrolamento a uma tensão com frequência de 50 Hz. Aumentou-se a tensão tal que, no enrolamento passa uma corrente de 1 A. Registando

a tensão eficaz aos terminais de cada enrolamento (V_1 e V_2), calcula-se a indutância de cada um deles da forma:

$$V_1 = 40 \text{ V} \Rightarrow \mathcal{L}_1 = \frac{V_1}{\omega I_1} = \frac{40}{2\pi 50} = 127.3 \text{ mH}$$

$$V_2 = 30 \text{ V} \Rightarrow \mathcal{L}_2 = \frac{V_2}{\omega I_2} = \frac{30}{2\pi 50} = 95.5 \text{ mH}$$

Após quatro métodos para a determinação do valor da indutância dos enrolamentos (dois teóricos em 2.4 e dois experimentais neste capítulo) verificam-se algumas discrepâncias entre eles. Em primeiro lugar, toma-se o valor do aparelho de medida como o valor de base, ou seja $\mathcal{L}_{total} = 94.966 + 79.767 = 174.7330 \text{ mH}$. Os valores medidos no teste a 50 Hz têm um erro em relação aos valores de base já que, ainda que diminuta, não é considerada a queda de tensão resistiva no enrolamento, que quando contabilizada diminui o valor de indutância medido. Os valores calculados teoricamente no capítulo 2.4 ($\mathcal{L} = 38.2 \text{ mH}$), não contabilizam a maior parte do fluxo que contribui para o valor final de indutância, incorrendo num erro de 60% em relação ao valor base. Por fim, os valores calculados teoricamente, e sujeitos ao factor de correcção, aproximam-se do valor base ($\mathcal{L} = 81.4 \text{ mH}$), apresentando um erro relativo de 15%, mesmo que a aproximação feita seja um pouco grosseira.

5.2 Descrição do Aparato Experimental

Para realizar os ensaios pretendidos foi feita a montagem representada na Figura 5.1. Para accionar o *translator*, o sistema de braços foi acoplado a um motor de indução (Figura 5.1(a)) e este a um desmultiplicador de velocidade (Figura 5.1(b)). O ajuste de velocidade do motor de indução é feito por um ALTIVAR (Figura 5.1(c)) a funcionar no modo V/f , obtendo-se binário alto a baixa velocidade. Para medir a posição, e consequente velocidade, usa-se um sensor de posição a ultra-sons, modelo *UNAM 18U6903/S14* da *Baumer* (Figura 5.1(d)), que converte a posição do *translator* num sinal analógico numa gama de $0 < V_{sensor} < 10 \text{ [V]}$. Para medir a tensão e formas de onda usa-se um osciloscópio digital (Figura 5.1(e)), que permite a aquisição de dados para posterior tratamento das formas de onda por computador, com o auxílio de um programa em *Matlab*.

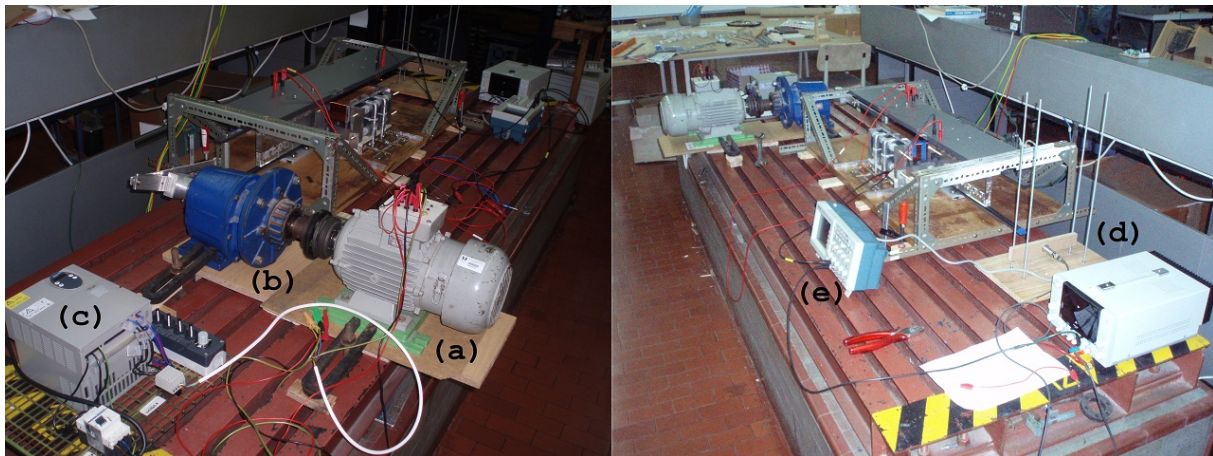


Figura 5.1: Aparato Experimental

5.3 Ensaio em Vazio

Para o ensaio da máquina em vazio foram necessários vários testes de velocidade de modo a obter a mais adequada para o *translator*. Neste sentido, foram realizados testes de velocidade do protótipo no intervalo $20 < f_{asin} < 60 [Hz]$ do motor de indução, que correspondeu a um período de oscilação do *translator* entre $1.68 < T_{mec} < 5.34 [s]$. As formas de onda obtidas pelo osciloscópio foram tratadas em computador, pela elaboração do programa em *Matlab*, o que possibilitou traçar os gráficos das Figuras 5.2, 5.4, 5.6, 5.8 e 5.10. A estes juntam-se os gráficos sujeitos aos factores de correcção, representados nas Figuras 5.3, 5.5, 5.7, 5.9 e 5.11.

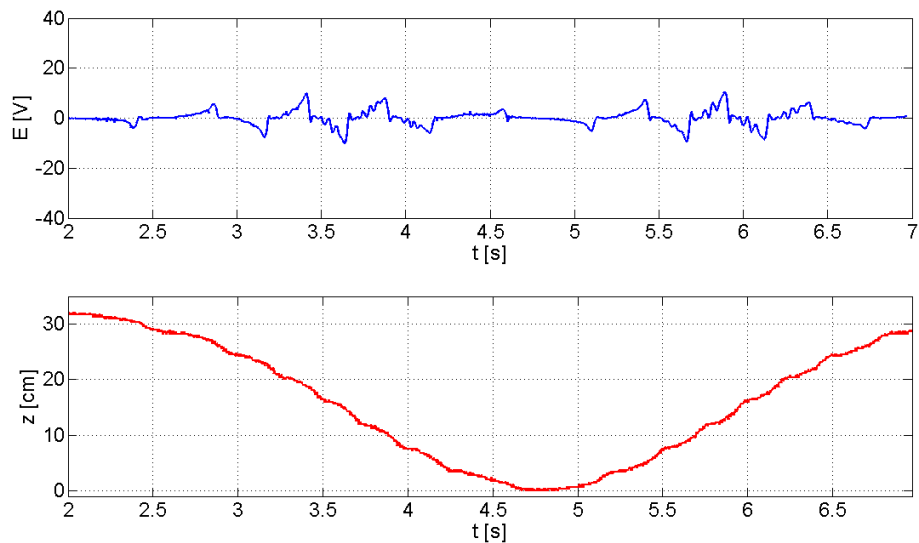


Figura 5.2: Força Electromotriz em Vazio (E) e Posição (z) à Velocidade de $20 Hz$ do Motor de Indução e Período de Oscilação de $T_{mec} = 5.34 s$

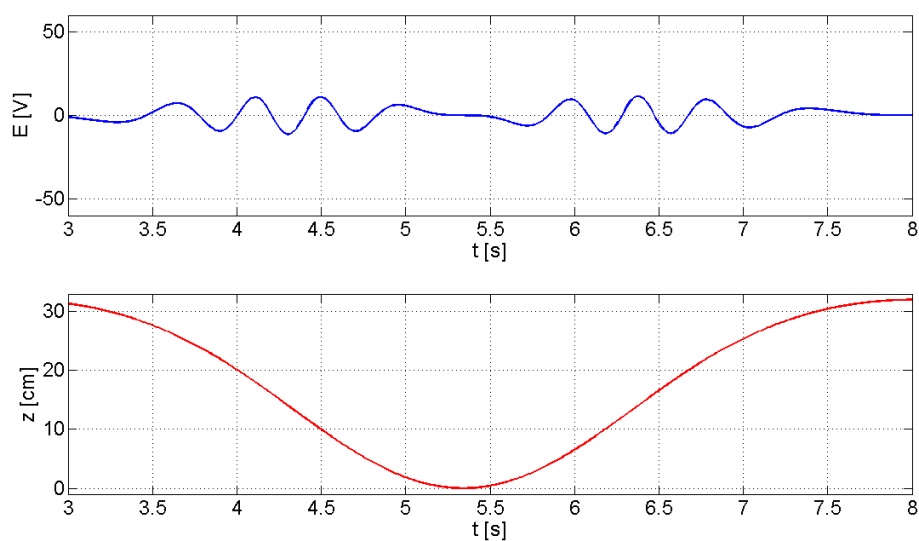


Figura 5.3: Força Electromotriz em Vazio (E) e Posição (z) com Período de Oscilação de $T_{mec} = 5.34 s$ (teórico)

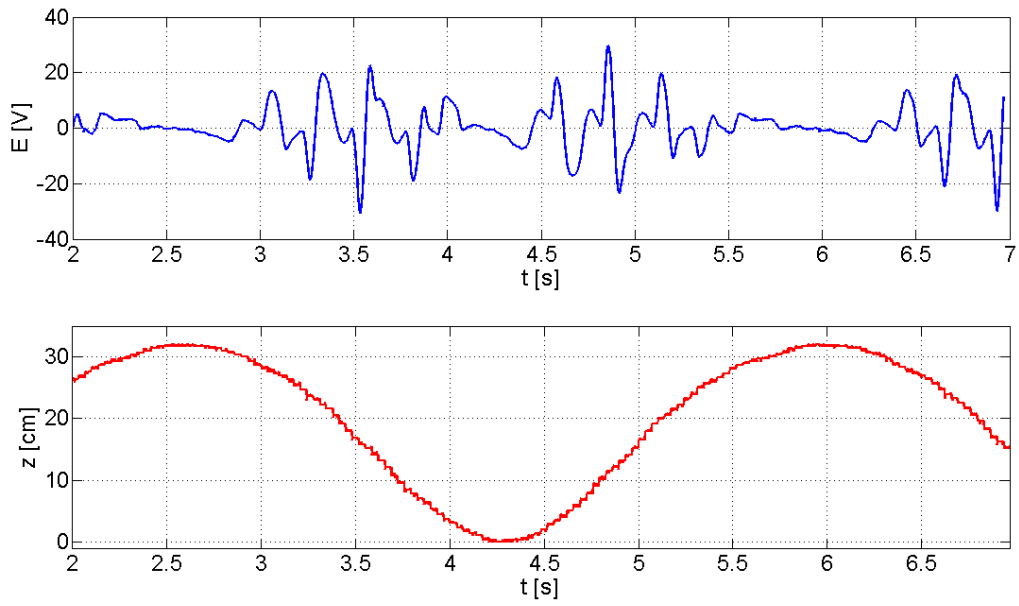


Figura 5.4: Força Electromotriz em Vazio (E) e Posição (z) à Velocidade de 30 Hz do Motor de Indução e Período de Oscilação de $T_{mec} = 3.43\text{ s}$

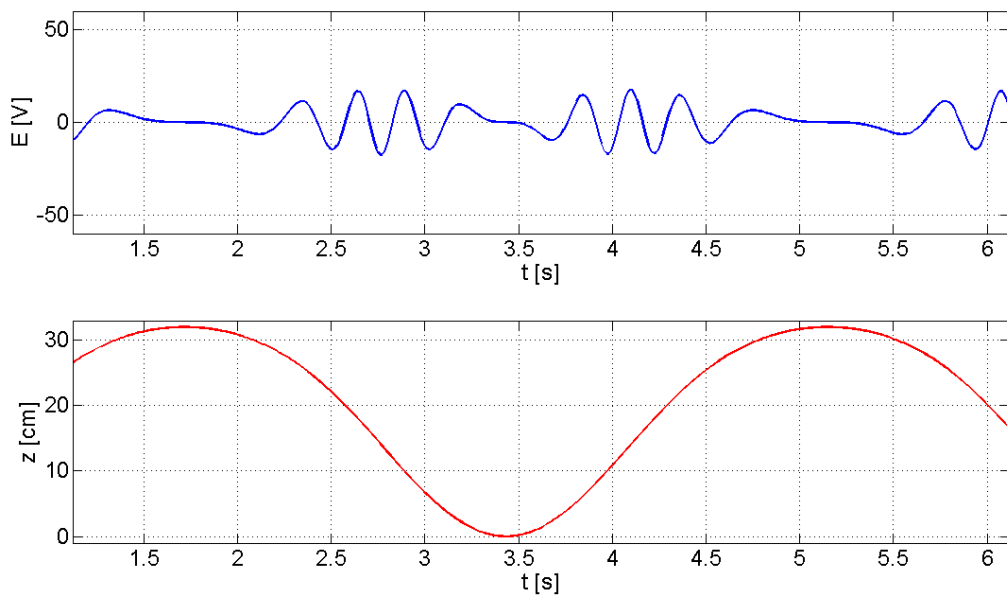


Figura 5.5: Força Electromotriz em Vazio (E) e Posição (z) com Período de Oscilação de $T_{mec} = 3.43\text{ s}$ (teórico)

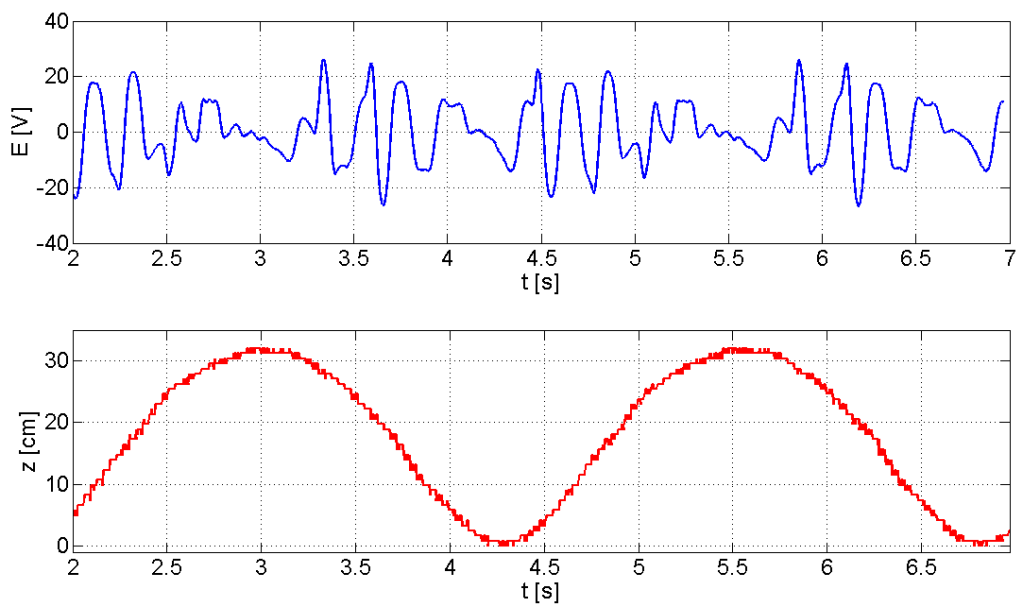


Figura 5.6: Força Electromotriz em Vazio (E) e Posição (z) à Velocidade de 40 Hz do Motor de Indução e Período de Oscilação de $T_{mec} = 2.54\text{ s}$

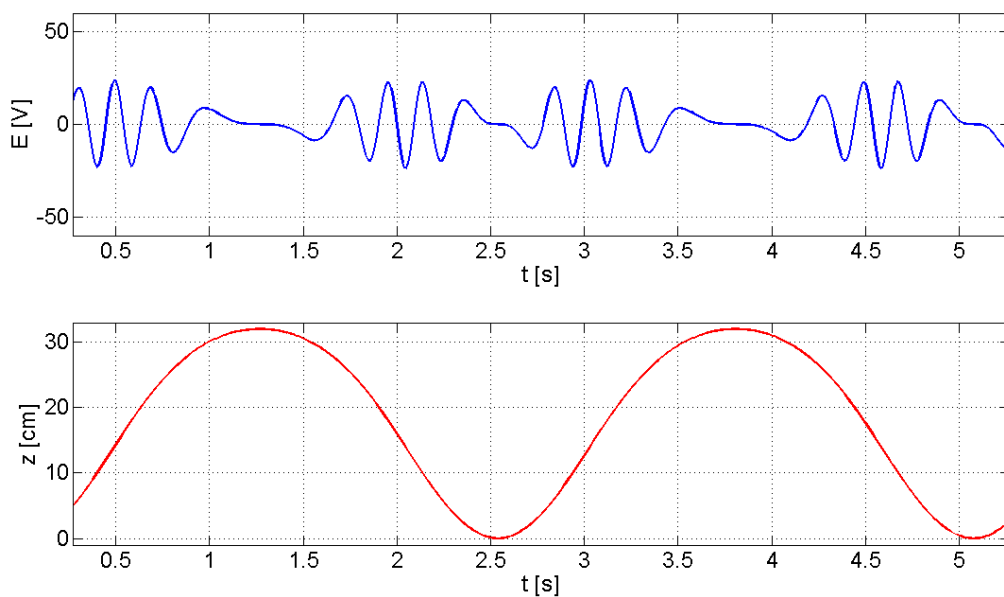


Figura 5.7: Força Electromotriz em Vazio (E) e Posição (z) com Período de Oscilação de $T_{mec} = 2.54\text{ s}$ (teórico)

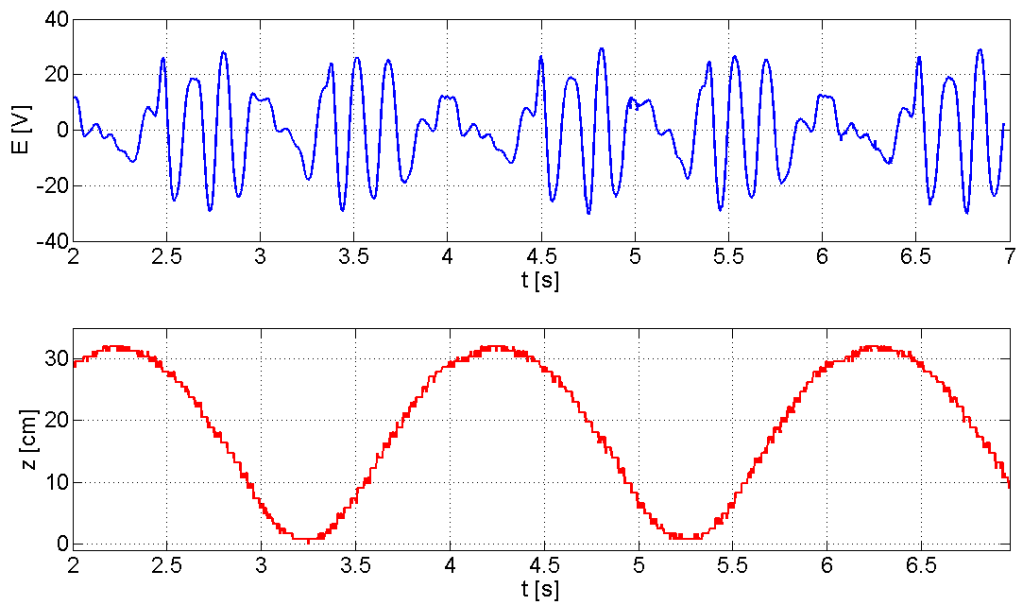


Figura 5.8: Força Electromotriz em Vazio (E) e Posição (z) à Velocidade de 50 Hz do Motor de Indução e Período de Oscilação de $T_{mec} = 1.99\text{ s}$

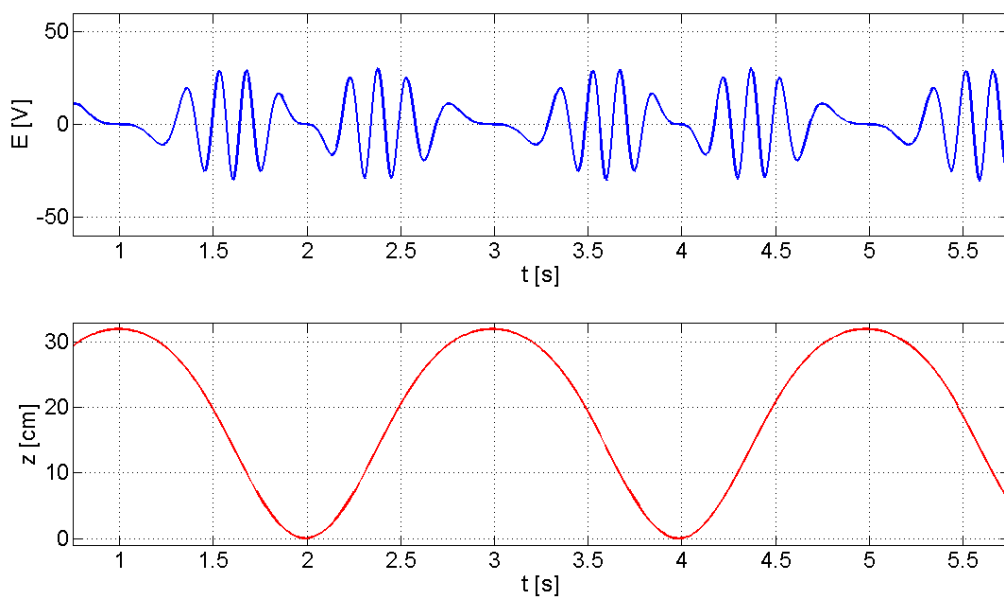


Figura 5.9: Força Electromotriz em Vazio (E) e Posição (z) com Período de Oscilação de $T_{mec} = 1.99\text{ s}$ (teórico)

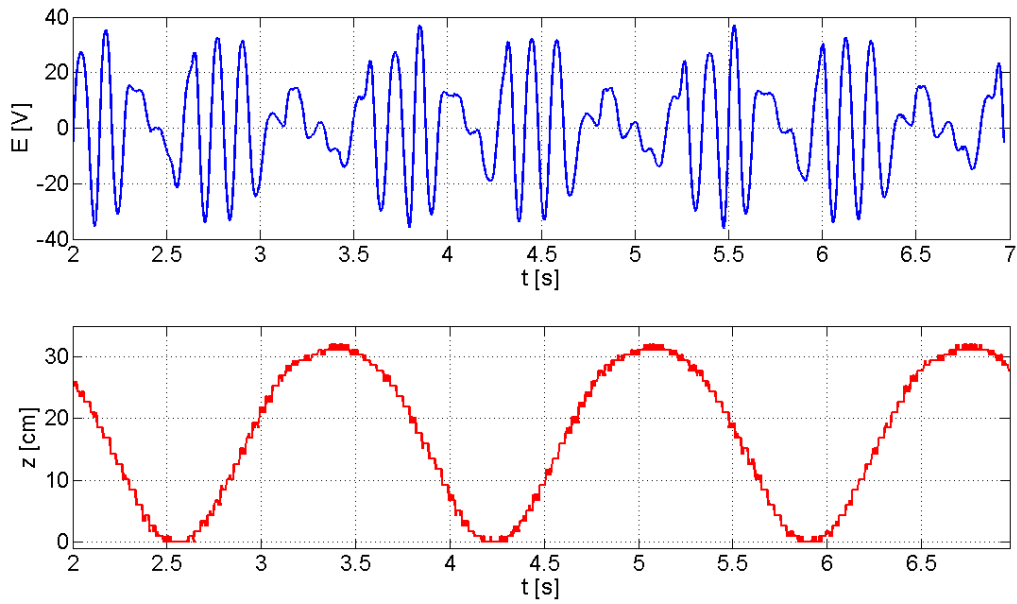


Figura 5.10: Força Electromotriz em Vazio (E) e Posição (z) à Velocidade de 60 Hz do Motor de Indução e Período de Oscilação de $T_{mec} = 1.68\text{ s}$

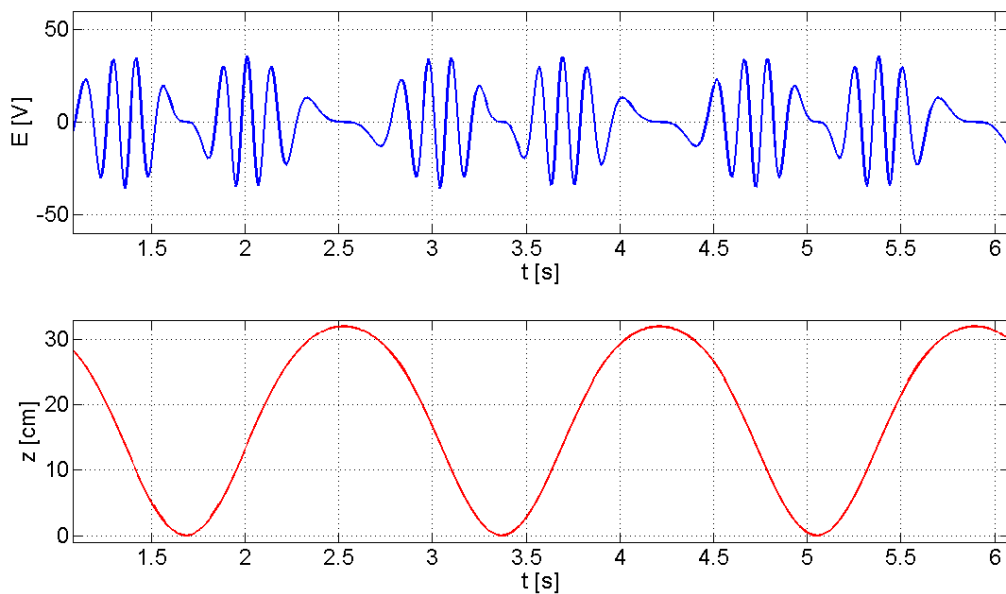


Figura 5.11: Força Electromotriz em Vazio (E) e Posição (z) com Período de Oscilação de $T_{mec} = 1.68\text{ s}$ (teórico)

O tratamento de dados a partir do programa elaborado permite obter os resultados apresentados na Tabela 5.1. Representa-se também na Tabela 5.1 o valor eficaz da força electromotriz determinado a partir dos resultados obtidos na eq. 5.1 e o erro $|\delta|$, que representa o erro relativo entre o valor eficaz da força electromotriz medida experimentalmente e calculada ($E_{RMS_{teoK}}/E_{RMS_{exp}}$):

Tabela 5.1: Tabela com valores referentes às Figuras 5.2 a 5.10

f_{asin}	T_{mec} [s]	f_{ele} [Hz]	$E_{RMS_{teo}}$ [V]	$E_{RMS_{teoK}}$ [V]	$E_{RMS_{exp}}$ [V]	$ \delta $ [%]
20 Hz	5.34	1.50	9.12	5.47	2.91	46.8
30 Hz	3.43	2.33	12.69	7.69	7.88	2.4
40 Hz	2.54	3.15	18.65	11.19	11.22	--
50 Hz	1.99	4.01	22.48	14.07	14.10	--
60 Hz	1.68	4.75	28.49	16.84	16.91	--

Com os valores da Tabela 5.1 é possível traçar a evolução do valor eficaz da força electromotriz em função da frequência eléctrica obtida ($E_{RMS}(f_{ele})$), representada na Figura 5.12.

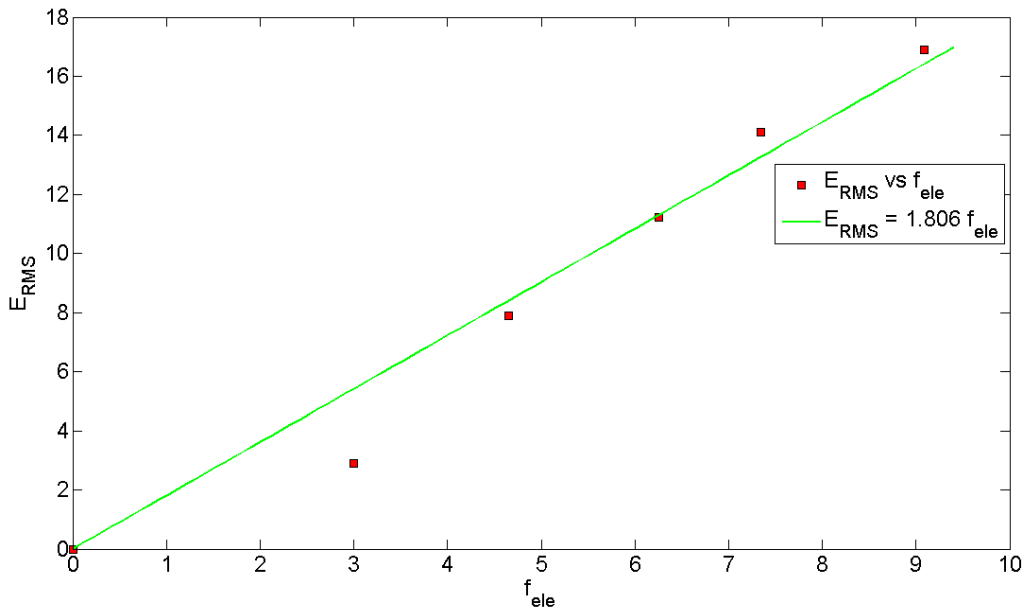


Figura 5.12: Evolução do Valor Eficaz da Força Electromotriz (E_{RMS}) com a Frequência Eléctrica (f_{ele})

Por análise dos resultados obtidos na Tabela 5.1, e por constrangimentos de origem mecânica, os restantes ensaios foram realizados com um período de oscilação de $T_{mec} = 2.54$ s, correspondente a $f_{asin} = 40$ Hz do motor de indução.

5.4 Ensaios em Carga

Realizaram-se ensaios em carga recorrendo a uma carga resistiva variável, fazendo-a tomar os valores de $R = 5 \Omega$ e $R = 10 \Omega$. Os resultados obtidos foram traçados nos gráficos das Figuras 5.13 e 5.15. Nos gráficos das Figuras 5.14 e 5.16 estão traçados os gráficos dos resultados nas mesmas situações de carga para o modelo teórico sujeito a aproximações.

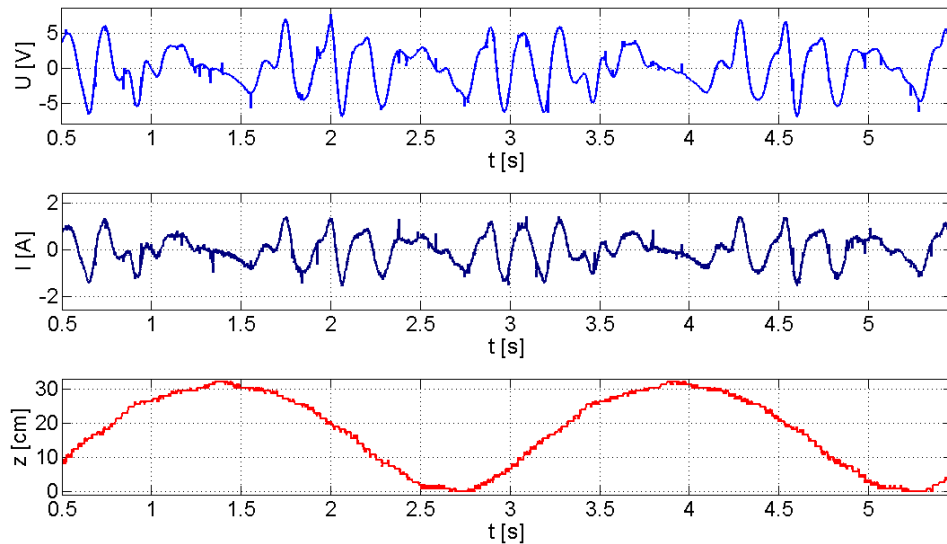


Figura 5.13: Carga resistiva $R = 5 \Omega$

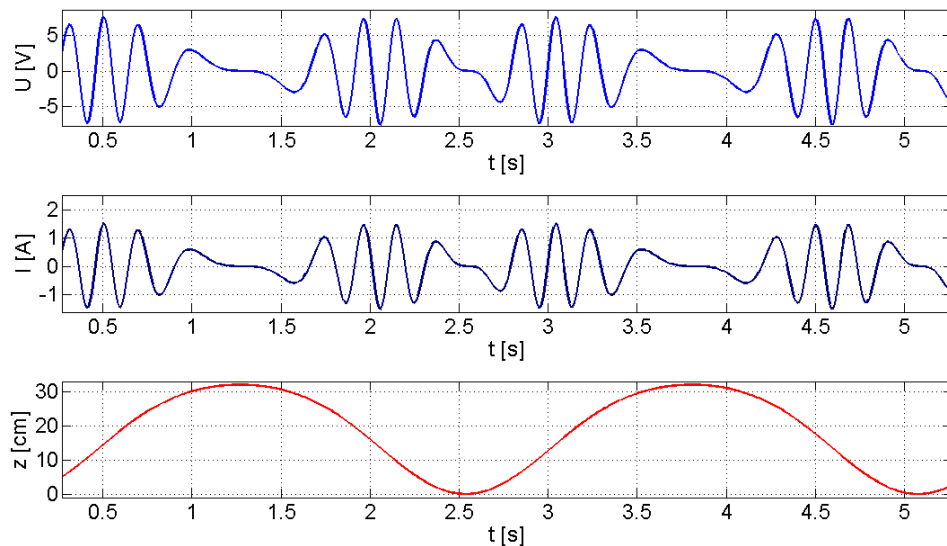


Figura 5.14: Carga resistiva $R = 5 \Omega$ (teórico)

Na Tabela 5.2 estão registados os valores medidos experimentalmente e calculados teoricamente de tensão, corrente e potência na carga. É também determinado o erro relativo da tensão na carga entre o valor medido experimentalmente e os valores calculados teoricamente.

Tabela 5.2: Tabela com valores referentes às Figuras 5.13 e 5.14 ($R = 5 \Omega$)

	$U_{RMS_{5\Omega}}$ [V]	$I_{RMS_{5\Omega}}$ [A]	$P_{av_{5\Omega}}$ [W]	$ \delta $ [%]
Experimental	3.10	0.64	1.95	
Teórico	7.10	1.42	10.08	80.65
Teórico _K	3.62	0.72	2.62	25.57

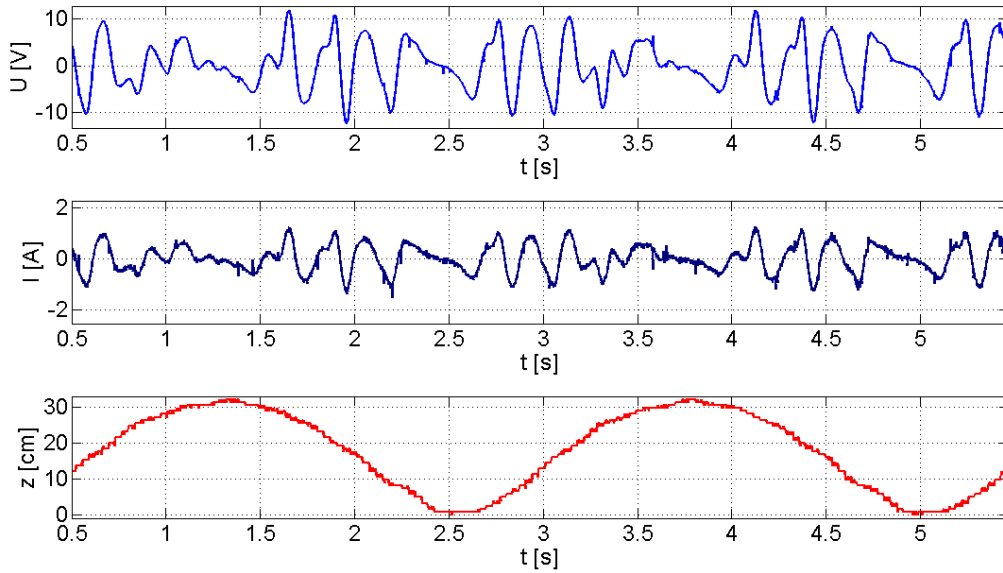


Figura 5.15: Carga resistiva $R = 10 \Omega$

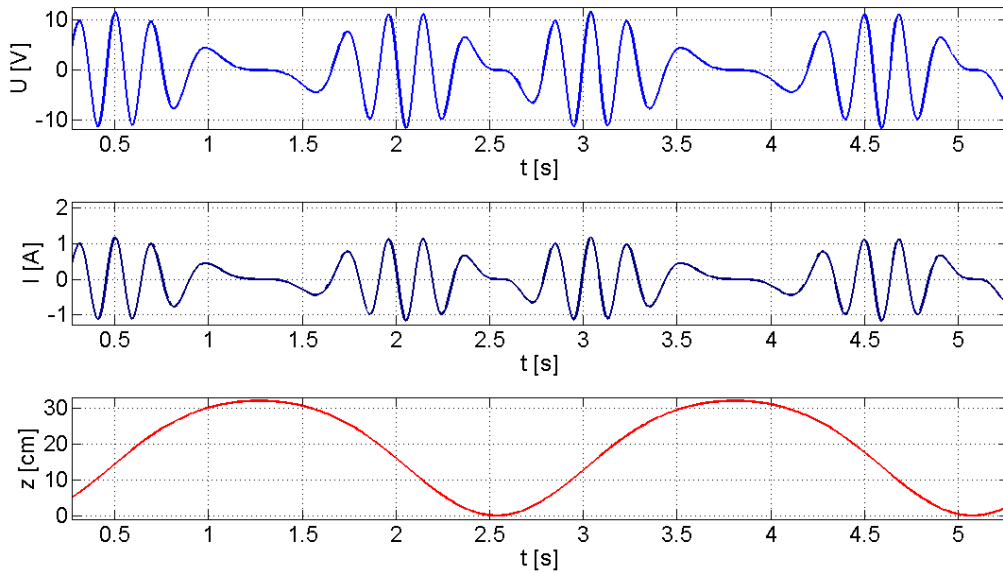


Figura 5.16: Carga resistiva $R = 10 \Omega$ (teórico)

Na Tabela 5.3 estão registados os valores medidos experimentalmente e calculados teoricamente de tensão, corrente e potência na carga. É também determinado o erro relativo da tensão na carga entre o valor medido experimentalmente e os valores calculados teoricamente.

Tabela 5.3: Tabela com valores referentes às Figuras 5.15 e 5.16 ($R = 10 \Omega$)

	$U_{RMS_{10\Omega}}$ [V]	$I_{RMS_{10\Omega}}$ [A]	$P_{av_{10\Omega}}$ [W]	$ \delta $ [%]
Experimental	5.29	0.54	2.83	
Teórico	10.39	1.04	10.80	73.8
Teórico _K	5.52	0.55	3.05	7.21

5.5 Ensaios com Ponte de Rectificação

Nos gráficos das Figuras 5.17 e 5.18 estão traçados o andamento da tensão e corrente após o andar rectificador para as situações de vazio e a alimentar uma carga resistiva de $R = 5 \Omega$.

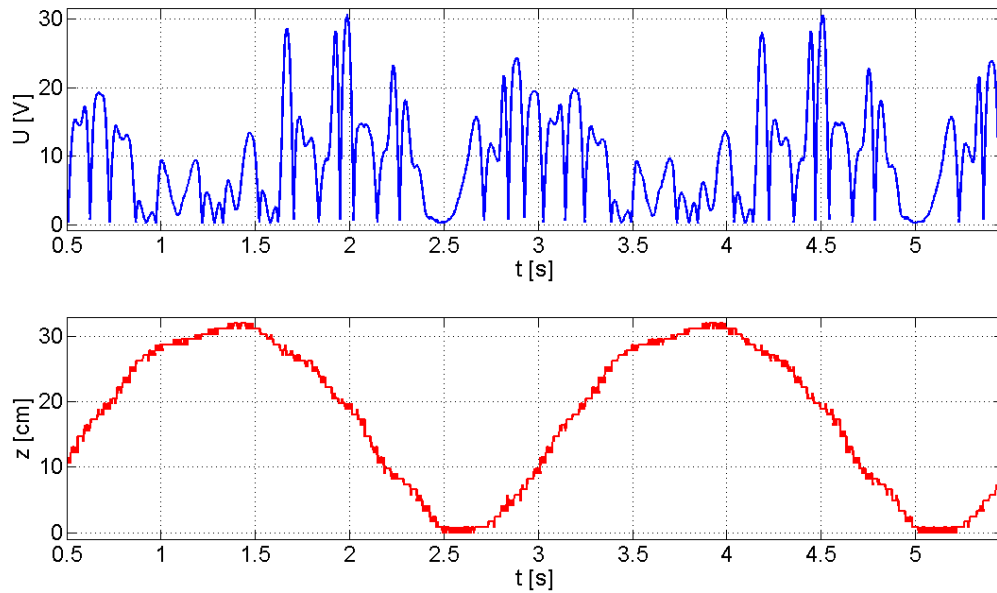


Figura 5.17: Ponte de Rectificação em Vazio

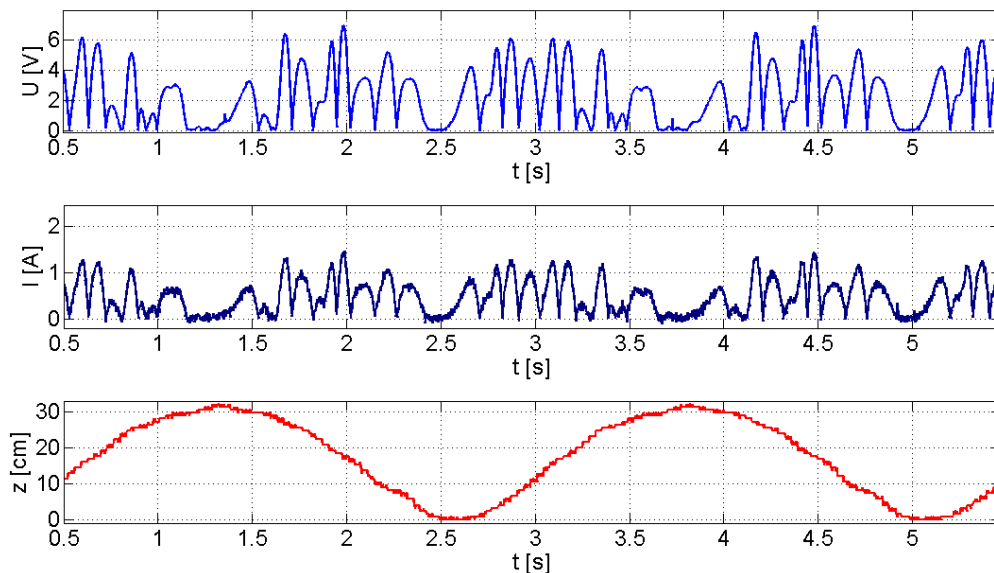


Figura 5.18: Ponte de Rectificação em Carga ($R = 5 \Omega$)

$$U_{RMS_{rect}} = 2.89 \text{ V} \quad I_{RMS_{rect}} = 0.60 \text{ A} \quad P_{av_{rect}} = 1.72 \text{ W}$$

Comparando os resultados obtidos no ensaio em carga com ponte de rectificação com o seu correspondente sem ponte de rectificação, verifica-se uma pequena descida nas medidas efectuadas. Este facto deve-se à queda de tensão, e conseqüente consumo de potência, por parte dos díodos da ponte rectificadora.

5.6 Conclusões dos Ensaio

Aos resultados obtidos teoricamente estão associados erros relativos aos resultados obtidos experimentalmente. Este facto deve-se a situações que o modelo teórico não contabiliza. O principal factor é o modelo teórico não levar em conta a dispersão do campo magnético que, com um entreferro $g = 1 \text{ cm}$, é considerada preponderante. Deve-se também a falhas na modelação do sistema mecânico, pois foram determinadas, no capítulo 3, forças que perturbam a evolução da posição e velocidade (capítulo 2.3). Assim foi introduzida uma aproximação ao modelo obtido no capítulo 2.4, evidenciada na eq. 5.1. Esta aproximação permitiu a diminuição do erro entre a força electromotriz medida e calculada. No entanto, para frequências baixas de oscilação do *translator*, esta aproximação não é suficiente, já que não consegue modelar o efeito das forças calculadas no capítulo 3.2.

Capítulo 6

Conclusão e Trabalhos Futuros

Este trabalho teve como objectivo a modelação e construção do protótipo de um gerador linear de fluxo transverso. O *design* do protótipo foi feito de acordo com o princípio de funcionamento da máquina de fluxo transverso tendo em conta os recursos, monetários e físicos, disponíveis. Foram feitos estudos onde o sistema foi modelado por uma força electromotriz em série com uma impedância síncrona (2.4) o que permitiu determinar resultados teóricos, em vazio (2.5), em carga (2.6) e com ponte de rectificação (2.7). O processo de construção descrito no capítulo 4 foi onde este trabalho mais se focou; por essa razão, todos os pormenores de construção foram detalhados por ordem cronológica, concluindo assim na concretização de um protótipo funcional onde foi possível realizar os ensaios em vazio (5.3), em carga (5.4) e com ponte de rectificação (5.5). Aliando os resultados do capítulo 2 aos ensaios do capítulo 5 foi ainda calculado um modelo teórico mais aproximado aos resultados dos ensaios, representados conjuntamente no capítulo 5.

Os projectos de aproveitamento de energia das ondas, na maioria dos casos, não chegam à fase experimental. Neste trabalho foi concluído um protótipo que servirá de exemplo a projectos futuros, não só por ser um projecto materializado onde é possível realizar ensaios e testes, mas também pela redacção deste documento que serve de guia à construção de futuros protótipos. Ao longo da execução deste projecto foram registados os pontos em que o protótipo falha e pontos a melhorar no *design* e optimização, que poderão ser feitos em trabalhos futuros.

A morfologia da peça polar mostrou-se preponderante na dimensão da reactância síncrona, que existe devido ao campo de dispersão. Para atenuar os efeitos descritos no cálculo da reactância síncrona no capítulo 2.4, é necessária uma diferente morfologia da peça polar, nomeadamente, uma peça polar onde a distância s (Figura 2.2) seja aumentada e a área A_g for diminuída, aquando do cálculo de \mathcal{R}_{m2} . Uma resolução possível, sem entrar em muito detalhe, é apresentada na Figura 6.1.

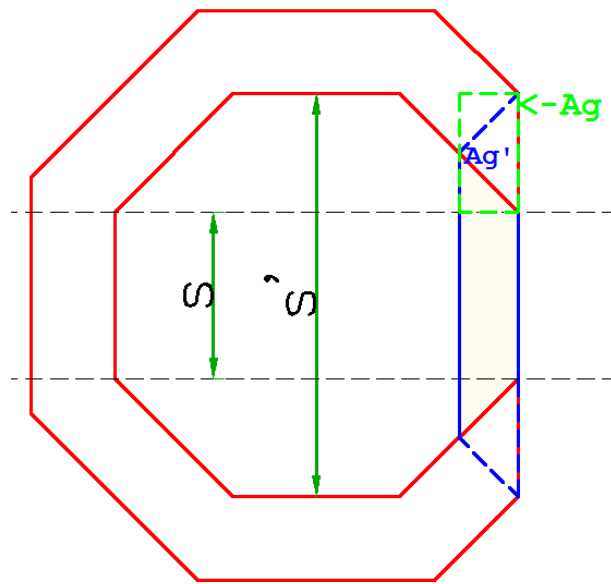


Figura 6.1: Sugestão de Novo Pólo

No capítulo 3 foram dimensionadas as forças que actuam no sistema devido ao campo magnético de dispersão. Essas forças, na construção e realização de ensaios, são limitativas para a optimização do protótipo, por introduzirem acelerações indesejáveis no movimento do *translator* e impedirem que o entreferro tome valores inferiores a $g = 1 \text{ cm}$. Existem então diferentes soluções a este problema que, conjugadas, são uma fonte de optimização para futuros protótipos. Deste modo, para garantir entreferros menores, o sistema de fixação regulável do *estator* terá de apresentar mais robustez, sendo de evitar o uso de materiais como madeira e para uma melhor distribuição da força pode ser considerada a utilização de cabos de aço. Para atenuar as forças segundo o movimento de translação pode ser considerado o *design* de uma máquina polifásica, nomeadamente uma máquina trifásica.

Também pode ser considerado um sistema de controlo para a excitação da máquina. Para isso será necessário alterar o sistema de excitação por magnetos, passando a ser feito por electroímans. Este sistema, caso seja alvo de estudo, representará um avanço em termos de controlo das forças segundo o movimento de translação e representará também uma possibilidade de controlar a potência gerada pela máquina. O campo magnético de excitação será desenvolvido por uma corrente no electroíman. Esta corrente será induzida a partir de corrente injectada nos enrolamentos do *estator*.

O protótipo construído apresenta 4 pares de pólos. O gerador de aplicação real tem o número de pares de pólos maior, levando a dificuldades acrescidas na construção de um protótipo maior, por outro lado, como a força electromotriz aumenta proporcionalmente com o aumento do número de pares de pólos (eq. 2.6, 2.9), a velocidade linear de oscilação do *translator* diminui o que representará, em trabalhos futuros, alvo de estudo.

Apêndice A

Ensaio com Entreferro $g = 8 \text{ mm}$

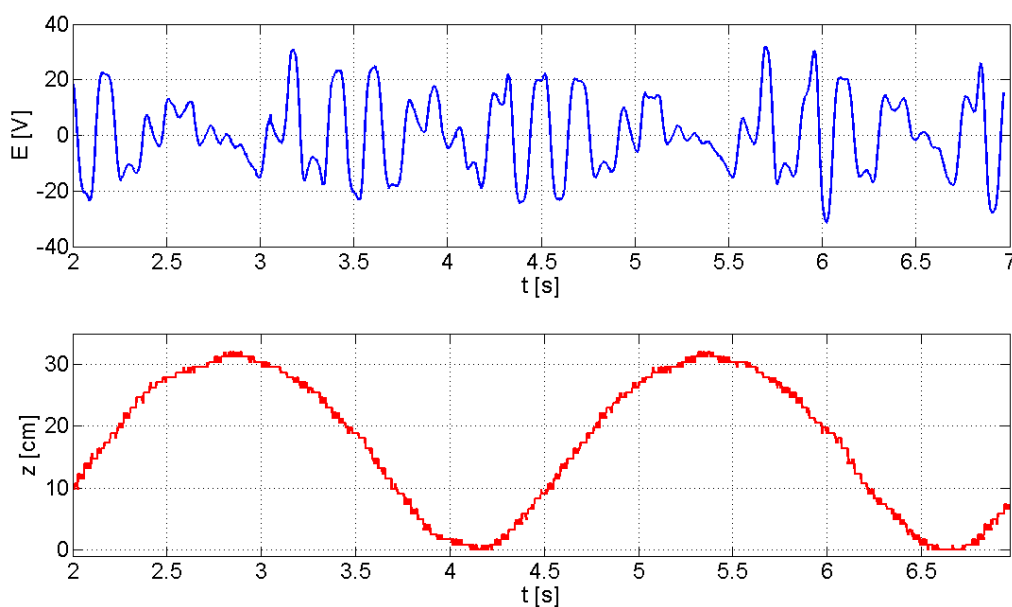


Figura A.1: Ensaio em Vazio com Entreferro $g = 8 \text{ mm}$ e $v_{med} = 0.25 \text{ m/s}$

Como referido no capítulo 4.9, este ensaio levou à falha da máquina, danificando certos constituintes do protótipo. Ainda assim, conseguiu-se traçar o gráfico da Figura A.1 e determinar $E_{RMS} = 13.35 \text{ V}$, que representa um acréscimo de aproximadamente 1% em relação ao ensaio com um entreferro $g = 1 \text{ cm}$.

Bibliografia

- [1] PRIETO, P. A. S. - *Construção de um Oscilador Electromecânico para o Aproveitamento da Energia das Ondas*. Dissertação (Mestrado), Outubro 2008.
- [2] MONTEIRO, I. M. N. - *Gerador Linear com Magnetos Permanentes para Aproveitamento da Energia das Ondas*. Dissertação (Mestrado), Outubro 2009.
- [3] COELHO, L. M. E. - *Conversores de Acção Directa no Aproveitamento de Energia das Ondas*. Dissertação (Mestrado), Outubro 2007.
- [4] OCEAN Energy Conversion in Europe - Recent advancements and prospects. 2006. Disponível em: <<http://www.ca-oe.org>>.
- [5] WAVE Energy Potential on the U.S. Outer Continental Shelf. Maio 2006.
- [6] CRUZ, J. M. B. P.; SARMENTO, A. J. N. A. - *Energia das Ondas: Introdução aos Aspectos Tecnológicos, Económicos e Ambientais*. 2004.
- [7] *Bloomberg - New Energy Finance*, VI, n. 24, March 2010.
- [8] MARQUES, F. A.; BEIRAO, G. F.; MESTRE, J. T. - *Wave Energy: Generator and Grid Integration*. 2008.
- [9] POLINDER, H.; DAMEN, M. E. C.; GARDNER, F. - *Linear PM Generator System for Wave Energy Conversion in the AWS*. Setembro 2004.
- [10] WAVENET. - *Results from the work of the European Thematic Network on Wave Energy*. Março 2003.
- [11] SVECHKARENKO, D.; SOULARD, J.; SADARANGANI, C. - *Novel Transverse Flux Generator in Direct-Driven Wind Turbines*.
- [12] BOSCH, G. K. e R. - *Design of a novel transverse flux machine*.
- [13] FITZGERALD, A. E.; JR., C. K.; UMANS, S. D. - *Electric Machinery*. 6ª. ed. : McGraw-Hill, 2002.