

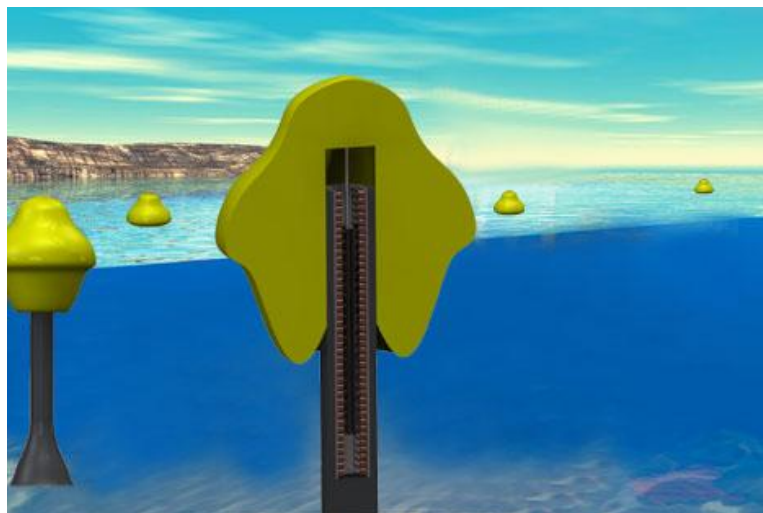


UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR
Engenharia

Energia das Ondas

Desenvolvimento de uma tecnologia de geração

Paulo Miguel Carvalho Godinho



Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Electromecânica
(2º ciclo de estudos)

Orientador: Prof. Doutora Maria do Rosário Alves Calado

Covilhã, Outubro de 2010

Resumo

A presente dissertação de Mestrado em Engenharia Electromecânica tem como objectivo contribuir para a investigação, desenvolvimento e optimização de um novo gerador linear a ser aplicado num sistema conversor de energia das ondas.

A entrega de potência a baixas velocidades é um dos entraves impostos pelo movimento irregular das ondas marítimas, isto exige que se usem máquinas eléctricas capazes de gerar grandes quantidades de força, de forma a compensar as baixas velocidades do movimento ondulatório.

Várias topologias são apresentadas ao longo do texto, contudo achou-se pertinente a escolha da máquina linear de relutância variável devido à sua elevada densidade de força, robustez e fácil modelação e construção.

A introdução a este tipo de máquinas é feita recorrendo aos motores de relutância variável comutados rotativos, sendo posteriormente apresentada uma breve referência aos actuadores lineares, como máquinas que resultam da manipulação geométrica das máquinas rotativas.

O Gerador Linear de relutância variável comutado apresenta uma geometria irregular, física e electromagneticamente não homogénea, exigindo que a análise do seu desempenho, para as diferentes posições relativas entre o primário e o secundário, e para diferentes parâmetros da máquina, seja conduzida mediante a aplicação de métodos numéricos, permitindo, assim, o seu dimensionamento optimizado. A característica teórica do actuador, magnética e funcionais, obtidas através do método de elementos finitos, permite-nos prever o desempenho e comportamento dinâmico do gerador, possibilitando assim uma melhor aproximação ao modelo real.

Palavras chave

Motor de Relutância Variável Comutado
Gerador Linear de Relutância Variável Comutado
Dimensionamento analítico do Gerador
Dispositivos de geração de energia
Energia das Ondas em Portugal
Potencial energético oceânico
Método Numérico de Elementos Finitos

Abstract

This Master's thesis in Electromechanical Engineering aims to contribute to the research, development and optimization of a new linear generator to be applied in a system of wave energy conversion.

The power delivery at low speeds is one of the barriers imposed by the irregular movement of sea waves, this requires the use of electric machines that can produce large amounts of force in order to compensate the low speeds of the wave motion.

Several topologies are presented throughout the text, however it was felt appropriate the choice of a linear variable reluctance machine due to its high power density, robustness and easy modeling and construction.

The introduction to this type of machines is done using the rotating switched reluctance motors, and later presented a brief reference to linear actuators, such as machines that result from geometric manipulation of rotating machinery.

The Linear Switched Reluctance Generator presents an irregular geometry, physics and electro-magnetically inhomogeneous, requiring an analysis of its performance, for the different relative positions between the primary and secondary parts, and for different machine parameters, by applying numerical methods, thus allowing their optimal design. The theoretical characteristics of the generator, magnetic and functional, obtained by the finite element method, allows us to predict its performance and dynamic behavior, thus enabling a better approximation to the real model.

Keywords

Switched Reluctance Motor
Linear Switched Reluctance Generator
Generator Analytical Design
Devices for Energy Generation
Wave Energy in Portugal
Ocean Energy Potential
Finite Elements Method

Agradecimentos

Em primeiro lugar quero expressar o meu maior agradecimento à Professora Doutora Maria do Rosário Alves Calado, pela sua dedicação e entrega. Quero agradecer a disponibilidade e o magnífico apoio que sempre me proporcionou ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

As notas dominantes da sua orientação, foram a utilidade das suas recomendações e a cordialidade com que sempre me recebeu. Estou grato por ambas e também pela liberdade de acção que me permitiu, que foi decisiva para uma melhor elaboração do trabalho, e que contribuiu grandemente para o meu desenvolvimento pessoal.

Ao Professor Doutor António Espírito Santo, pela competência científica e, pela disponibilidade e generosidade reveladas ao longo deste trabalho tese, assim como pelas críticas, correcções e sugestões.

À minha mãe e ao meu pai, a quem devo todo o amparo e incentivo durante o meu período de formação na área da Engenharia electromecânica, quero expressar aqui o meu enorme agradecimento pelo zelo e crença que tiveram em mim.

Índice

1	Introdução.....	2
1.1	Enquadramento	3
1.2	Motivação	6
1.3	Organização do Texto.....	8
1.4	Simbologia	9
2	Enquadramento em Portugal.....	13
2.1	Introdução	14
2.2	Afirmção de Portugal.....	14
2.2.1	Locais com grande potencial para a instalação	18
2.2.2	Análise da faixa de profundidade entre os 50 e 80 metros de profundidade.....	20
2.2.3	Rede eléctrica de transporte junto à costa	21
2.3	Impactos Ambientais	21
2.3.1	Impactos Visuais.....	22
2.3.2	Ruído.....	23
2.3.3	Perigo para a Navegabilidade	23
2.3.4	Perturbação do ambiente circundante	23
2.4	Portugal na ponta do desenvolvimento da energia das ondas	26
2.5	Perspectivas futuras para Portugal	27
2.6	Tratamento de dados relativos às condições marítimas	27
3	Tecnologias existentes e tendências.....	39
3.1	Conceitos básicos sobre as tecnologias de extracção de energia das ondas.....	40
3.2	Classificação das tecnologias	41
3.3	Dispositivos costeiros.....	42
3.3.1	Dispositivo de Coluna de água Oscilante (CAO)	42
3.3.2	Dispositivo de Pêndulo.....	45
3.3.3	Energetech OWC	46
3.4	Dispositivos próximos da Costa	48

3.4.1	OSPREY	48
3.4.2	CEO Douro.....	50
3.5	Dispositivos afastados da costa	51
3.5.1	Archimedes Wave Swing	52
3.5.2	Pelamis	53
3.5.3	Wave Dragon.....	55
3.5.4	Mighty Whale	57
3.5.5	AquaBuOY	58
3.6	Tecnologias de geração linear nos sistemas de conversão de energia das ondas.....	60
3.6.1	Conversão da energia mecânica em energia eléctrica	60
3.6.2	Características dos Geradores Lineares utilizados nos sistemas de conversão da energia das ondas.....	61
3.7	Perspectivas futuras	63
4	A Máquina de relutância variável comutada.....	65
4.1	Introdução	66
4.2	Princípios de conversão de energia de MRVC	67
4.3	Características magnéticas do MRVC	69
4.4	Binário.....	71
4.5	Introdução aos geradores lineares	74
5	Dimensionamento Analítico do GLRVC.....	81
5.1	Introdução	82
5.2	Estrutura	82
5.3	Dimensionamento	84
5.4	Resultados obtidos para o dimensionamento dos geradores	94
6	Análise Numérica dos Geradores Propostos.....	102
6.1	Introdução	103
6.2	Análise numérica do problema	103
6.3	Geometria e malha solução do gerador	104
6.4	Análise do comportamento electromagnético do gerador	107
6.4.1	Curvas Equipotenciais.....	107
6.4.2	Densidade de fluxo	110
6.4.3	Densidade de corrente.....	112
6.5	Componentes da densidade de fluxo magnético na região do entreferro ...	113
6.6	Análise do gerador para uma variação do comprimento de entreferro.....	117

6.6.1	Malha solução para um entreferro de 4 mm	117
6.6.2	Curvas Equipotenciais.....	118
6.6.3	Densidade de fluxo	121
6.6.4	Densidade de corrente.....	123
6.6.5	Componentes da densidade de fluxo magnético na região do entreferro.....	124
6.7	Características mecânicas e magnéticas da máquina	128
7	Conclusões	133
	Referências Bibliográficas.....	136

Lista de Figuras e Tabelas

Fig. 1.1 Distribuição do potencial mundial das ondas em kW/m de frente de onda.....	4
.....	
Fig. 2.1 Representação da zona piloto ao largo da costa portuguesa	17
Fig. 2.2 Zonas potencialmente utilizáveis e possíveis áreas de concessão para parques de energia das ondas na costa ocidental portuguesa	19
Fig. 2.3 Representação esquemática da constituição dos fundos oceânicos da costa portuguesa na batimétrica dos 50 metros.....	20
Fig. 2.4 Localização das estações meteorológicas que efectuaram a recolha dos dados aqui analisados.	28
Fig. 2.5 Valores médios mensais da ondulação	31
Fig. 2.6 Valores médios mensais do período	32
Fig. 2.7 Valores médios mensais da frequência.	32
Fig. 2.8 Valores médios mensais da ondulação.	36
Fig. 2.9 Valores médios mensais do período.	37
Fig. 2.10 Valores médios mensais da frequência.	37
.....	
Fig. 3.1 Dispositivo de Coluna de Água Oscilante	43
Fig. 3.2 Limpet CAO.	44
Fig. 3.3 Central piloto europeia da Ilha do Pico.....	45
Fig. 3.4 Dispositivo de Pêndulo.	46
Fig. 3.5 Desenho virtual do sistema de coluna de agua oscilante da Energetech.	47
Fig. 3.6 Esboço da turbina de passo variável desenvolvida pela Energetech.	47
Fig. 3.7 Imagem virtual da futura central de energia das ondas do Douro.	50
Fig. 3.8 Esquema do sistema a ser utilizado na central do Douro.....	51
Fig. 3.9 Esquema de funcionamento do sistema AWS	53
Fig. 3.10 Fotografia da central piloto AWS no porto de Viana do Castelo.	53

Fig. 3.11 Vista interna do modulo de conversão de energia.	54
Fig. 3.12 Foto da Pelamis ao largo da costa Portuguesa na Aguçadoura.	55
Fig. 3.13 Ilustração do princípio de funcionamento do Wave Dragon.	56
Fig. 3.14 Turbina de Kaplan durante os testes na Universidade Técnica	56
Fig. 3.15 Protótipo do Wave Dragon instalado na Dinamarca.	57
Fig. 3.16 Lançamento do Mighty Wale à água.	58
Fig. 3.17 AquaBuOY em funcionamento em alto mar.	59
Fig. 3.18 Imagem ilustrativa do sistema AquaBuOY.	60
Fig. 3.19 Gerador linear de magnetos permanentes do sistema AWS.	63
.....	
Fig. 4.1 Representação do funcionamento do motor de relutância variável comutado. Posição de alinhamento 1-1'.....	67
Fig. 4.2 Representação do funcionamento do motor de relutância variável comutado. Posição de não-alinhamento.	68
Fig. 4.3 Representação do funcionamento do motor de relutância variável comutado. Posições. Posições intermédias de aproximação e de afastamento da posição de alinhamento.	68
Fig. 4.4 Representação das características magnéticas, em termos qualitativos, da máquina	70
Fig. 4.5 Representação da variação teórica da indutância e do binário do MRVC.....	73
Fig. 4.6 Desenrolando uma máquina eléctrica rotativa.	76
Fig. 4.7 Ilustração da obtenção de uma máquina linear com duplo estator, a partir de uma máquina rotativa.....	76
Fig. 4.8 Representação da obtenção de um actuador linear tubular a partir de uma máquina rotativa.....	77
Fig. 4.9 Representação de um gerador linear plano elementar.	79
.....	
Fig. 5.1 Representação esquemática de um gerador linear.	83
Fig. 5.2 Parâmetros dimensionais característicos do GLRVC	84
Fig. 5.3 Representação do movimento do translator do gerador	86
Fig. 5.4 Características $\psi(i)$ simplificadas.....	88
Fig. 5.5 Principais dimensões do gerador linear respeitante ao Cabo da Roca	96
Fig. 5.6 Principais dimensões do gerador linear respeitante ao Baleal	98
Fig. 5.7 Dimensões do gerador linear	99
Fig. 5.8 Desenho de conjunto do sistema de geração proposto	99

Fig. 5.9 Sistema de conversão e controlo.....	101
.....	
Fig. 6.1 Geometria do gerador linear construída no software de elementos finitos.....	105
Fig. 6.2 Malha solução de elementos finitos.	105
Fig. 6.3 Corte da máquina com a malha solução de elementos finitos.....	106
Fig. 6.4 Ilustração da curvas equipotenciais do gerador linear para a posição de alinhamento.	108
Fig. 6.5 Ilustração da curvas equipotenciais do gerador linear para um deslocamento de 10 mm.	108
Fig. 6.6 Ilustração da curvas equipotenciais do gerador linear para um deslocamento de 20 mm.	108
Fig. 6.7 Ilustração da curvas equipotenciais do gerador linear para um deslocamento de 30 mm.	109
Fig. 6.8 Ilustração da curvas equipotenciais do gerador linear para um deslocamento de 40 mm.	109
Fig. 6.9 Ilustração da curvas equipotenciais do gerador linear para a posição de não-alinhamento.	109
Fig. 6.10 Ilustração da densidade de fluxo na posição de alinhamento.....	110
Fig. 6.11 Ilustração da densidade de fluxo para um deslocamento de 10 mm.....	111
Fig. 6.12 Ilustração da densidade de fluxo para um deslocamento de 20 mm.....	111
Fig. 6.13 Ilustração da densidade de fluxo para um deslocamento de 30 mm.....	111
Fig. 6.14 Ilustração da densidade de fluxo para um deslocamento de 40 mm.....	112
Fig. 6.15 Ilustração da densidade de fluxo na posição de não-alinhamento.	112
Fig. 6.16 Ilustração da densidade de corrente na posição de alinhamento.	113
Fig. 6.17 Gráfico da componente normal da densidade de fluxo ao longo do entreferro, na posição de alinhamento.	114
Fig. 6.18 Gráfico da componente tangencial da densidade de fluxo ao longo do entreferro, na posição de alinhamento.....	114
Fig. 6.19 Gráfico da componente normal da densidade de fluxo ao longo do entreferro, na posição de quase não-alinhamento.	115
Fig. 6.20 Gráfico da componente tangencial da densidade de fluxo ao longo do entreferro, na posição de quase não-alinhamento.	115
Fig. 6.21 Gráfico da componente normal da densidade de fluxo ao longo do entreferro, na posição de não-alinhamento.	116
Fig. 6.22 Gráfico da componente tangencial da densidade de fluxo ao longo do entreferro, na posição de não-alinhamento.	116

Fig. 6.23 Malha solução de elementos finitos do gerador com um entreferro igual a 4 mm.	117
Fig. 6.24 Corte representativo da malha solução.	118
Fig. 6.25 Ilustração da curvas equipotenciais do gerador linear para a posição de alinhamento.	119
Fig. 6.26 Ilustração da curvas equipotenciais do gerador linear para um deslocamento de 10 mm.	119
Fig. 6.27 Ilustração da curvas equipotenciais do gerador linear para um deslocamento de 20 mm.	119
Fig. 6.28 Ilustração da curvas equipotenciais do gerador linear para um deslocamento de 30 mm.	120
Fig. 6.29 Ilustração da curvas equipotenciais do gerador linear para um deslocamento de 40 mm.	120
Fig. 6.30 Ilustração da curvas equipotenciais do gerador linear para a posição de não-alinhamento.	120
Fig. 6.31 Ilustração da densidade de fluxo na posição de alinhamento.	121
Fig. 6.32 Ilustração da densidade de fluxo para um deslocamento de 10 mm.	121
Fig. 6.33 Ilustração da densidade de fluxo para um deslocamento de 20 mm.	122
Fig. 6.34 Ilustração da densidade de fluxo para um deslocamento de 30 mm.	122
Fig. 6.35 Ilustração da densidade de fluxo para um deslocamento de 40 mm.	122
Fig. 6.36 Ilustração da densidade de fluxo para um deslocamento de 50 mm.	123
Fig. 6.37 Ilustração da densidade de corrente na posição de alinhamento.	123
Fig. 6.38 Gráfico da componente normal da densidade de fluxo ao longo do entreferro, na posição de alinhamento.	125
Fig. 6.39 Gráfico da componente tangencial da densidade de fluxo ao longo do entreferro, na posição de alinhamento.	125
Fig. 6.40 Gráfico da componente normal da densidade de fluxo ao longo do entreferro, na posição de quase não-alinhamento.	126
Fig. 6.41 Gráfico da componente tangencial da densidade de fluxo ao longo do entreferro, na posição de quase não-alinhamento.	126
Fig. 6.42 Gráfico da componente normal da densidade de fluxo ao longo do entreferro, na posição de não-alinhamento.	127
Fig. 6.43 Gráfico da componente tangencial da densidade de fluxo ao longo do entreferro, na posição de não-alinhamento.	127
Fig. 6.44 Gráfico das forças entre o estator e transitor.	129
Fig. 6.45 Gráfico do ciclo de energia no gerador.	129

Fig. 6.46 Gráfico da indutância durante a deslocação do translato.	130
Fig. 6.47 Gráfico das forças entre o estator e translator	131
Fig. 6. 48 Gráfico do ciclo de energia no gerador.....	132
Fig. 6. 49 Gráfico da indutância durante a deslocação do translato	132
.....	
Tab. 2.1- Áreas do território e dos espaços marítimos de Portugal (Km ²).....	15
Tab. 2.2- Zonas com grande potencial de utilização e possível uso para a instalação de parques de energia das ondas.	18
Tab. 2.3- Possíveis impactos na fase de Construção e Instalação.....	25
Tab. 2.4- Possíveis impactos na fase de Construção e Instalação.....	29
Tab. 2.5- Valores mensais do período das ondas em segundos	30
Tab. 2.6- Valores mensais da altura das ondas em metros.....	34
Tab. 2.7- Valores mensais do período das ondas em segundos	35
.....	
Tab. 5.1- Parâmetros de dimensionamento	85
Tab. 5. 2- Resultados obtidos para o gerador respeitante à zona do Cabo da Roca	94
Tab. 5.3- Resultados obtidos para o gerador respeitante à zona do Baleal	96
.....	
Tab. 6.1- Valores obtidos para o gerador com um entreferro de 2 mm	128
Tab. 6.2- Valores obtidos para o gerador com um entreferro de 4 mm	131

Lista de Acrónimos

GLRVC	gerador linear de relutância variável comutado
MEF	método de elementos finitos
MRVC	motor de relutância variável comutado
Mtep	milhões toneladas equivalentes de petróleo
IST	Instituto Superior Técnico
ZEE	Zona económica exclusiva
PIB	Produto Interno Bruto
CEO	Centro de Energia das Ondas
REN	Rede Eléctrica Nacional
INETI	Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação
EDP	Energias de Portugal
EDA	Electricidade dos Açores
EFACEC	Energia máquinas e equipamentos eléctricos
CAO	coluna de água oscilante
IPTM	Instituto Português e dos Transportes Marítimos.

Glossário

Batimetria - É a medição da profundidade dos oceanos, lagos e rios e é expressa cartograficamente por curvas batimétricas que unem pontos da mesma profundidade com equidistâncias verticais, à semelhança das curvas de nível topográficas.

Ripple - Refere-se a componente alternada (v_{ca}) que incide sobre uma fonte de corrente contínua (v_{cc}).

Força hidrodinâmica - Força provocada por um fluido numa superfície ao longo do seu escoamento.

Sinusoidal - É uma forma de onda cujo gráfico é idêntico ao da função seno generalizada.

Pressão hidrostática - A pressão, que é uma força exercida pela água ou qualquer outro fluido numa superfície qualquer, por exemplo, numa barragem ou numa comporta.

Binário - É uma medida da força rotacional exercida sobre um eixo, mede-se em newton metro (Nm) e é reportado à rotação do motor em que é atingido.

CAPÍTULO

1

Introdução

Neste capítulo introdutório são abordados todos os aspectos relacionados com o enquadramento, a motivação, a organização do texto, e a simbologia, intrínsecas a esta dissertação. Mais concretamente, no enquadramento são tidas algumas considerações relativamente à importância do desenvolvimento das tecnologias associadas às energias renováveis, fundamentalmente do ponto de vista da energia associada as ondas marítimas. Na motivação, expõem-se as razões da escolha do tema da dissertação, apresentando-se também a sequência dos trabalhos realizados Também se terá em conta os objectivos propostos pela comissão europeia para as energias renováveis, para uma melhor abordagem quer a nível científico quer a nível estratégico. Na organização do texto, explicitam-se as opções ortográficas adoptadas, discriminando-se o conteúdo programático de cada um dos capítulos. Para uma melhor compreensão no que concerne à leitura e interpretação desta dissertação, optou-se por apresentar uma listagem dos símbolos utilizados, indicando-se, para cada um deles, qual o seu significado, assim como a respectiva unidade do sistema internacional.

1.1 Enquadramento

As ondas são um recurso renovável e inesgotável que se encontra em abundância em todo o planeta, contudo esta energia pode ser maior ou menor consoante a localização. Este recurso tem vindo a ser investigado por países europeus. Tem-se observado ao longo da última década consideráveis progressos a nível Europeu na investigação e desenvolvimento de tecnologias associadas ao aproveitamento da energia das ondas, resultando na comercialização de algumas destas tecnologias. O apoio para a investigação e desenvolvimento destas tecnologias tem surgido através de programas nacionais e programas de pesquisa e desenvolvimento tecnológico da comissão europeia, que tem estimulado neste campo um trabalho coordenado entre os países europeus e tem contribuído significativamente para o progresso da utilização da energia das ondas na Europa [1].

Em termos de capacidade instalada, a indústria das energias renováveis marítimas está mais de 15 anos atrasada em relação à indústria da energia eólica. Contudo, os avanços na ciência e engenharia, previsão de performance, construção, instalação, operação e manutenção, assim como o aumento do interesse político na tecnologia marítima, irão levar-nos a uma evolução inteligente e concisa de diferentes sistemas como aconteceu com o vento.

O consumo mundial de energia deverá aumentar consideravelmente nas próximas décadas, e no mesmo período o consumo de energia na União Europeia aumentará quase uma quantidade similar. Sendo constantemente lembrados de que os métodos tradicionais de produção de energia estão a contribuir para sérios problemas ambientais, os governos dos Estados-Membros têm visto a necessidade urgente de geração de energia sem que daí advenha mais poluição. O sector da energia foi forçado por um processo de renovação, que vê a sua abertura para energias renováveis. Na evolução dinâmica da indústria de energia renovável, vê-se agora um emergir de novas soluções para o problema energético. A tecnologia é relativamente nova e actualmente ainda não é economicamente competitiva com outras tecnologias mais maduras como o caso da energia eólica, no entanto o interesse por parte dos governos e da indústria continua a crescer sendo preponderante o facto de as ondas possuírem elevada densidade energética, que é a maior dos recursos renováveis existentes.

A ideia de converter a energia das ondas de superfície do oceano em formas de energia útil não é nova. Existem técnicas que foram pela primeira vez patenteado logo em 1799 (Girard & Son, França), e, além disso, referências na literatura técnica existem ideias que prescrevem estas técnicas.

A energia das ondas apresenta-se assim como particularmente atractiva para ilhas ou países com grandes faixas costeiras, pelo que, após o choque petrolífero de 1973, países que satisfazem as condições geográficas necessárias e partilham as necessidades de importação de energia elegeram a energia das ondas em programas de carácter governamental ou em instituições de investigação e desenvolvimento. Como exemplos temos os casos do Reino Unido, Noruega, Dinamarca, Suécia e Portugal, na Europa, os Estados Unidos da América na América do Norte e a China, Índia e Japão na Ásia [2]. O recurso global atribuído à energia das ondas ronda os 2 TW, sendo assim equiparável à potência eléctrica média anual consumida mundialmente. O recurso energético das ondas encontra-se exemplificado na Figura 1 onde o potencial de cada zona é representado em kW por metro de frente de onda. Estes valores representam o fluxo médio anual de energia que atravessa cada metro de frente de onda e são variáveis, podendo atingir, em estados de tempestade, o 1 MW/m. O recurso energético das ondas na Europa representa cerca de 16% do mundial, contabilizando assim 320 GW.

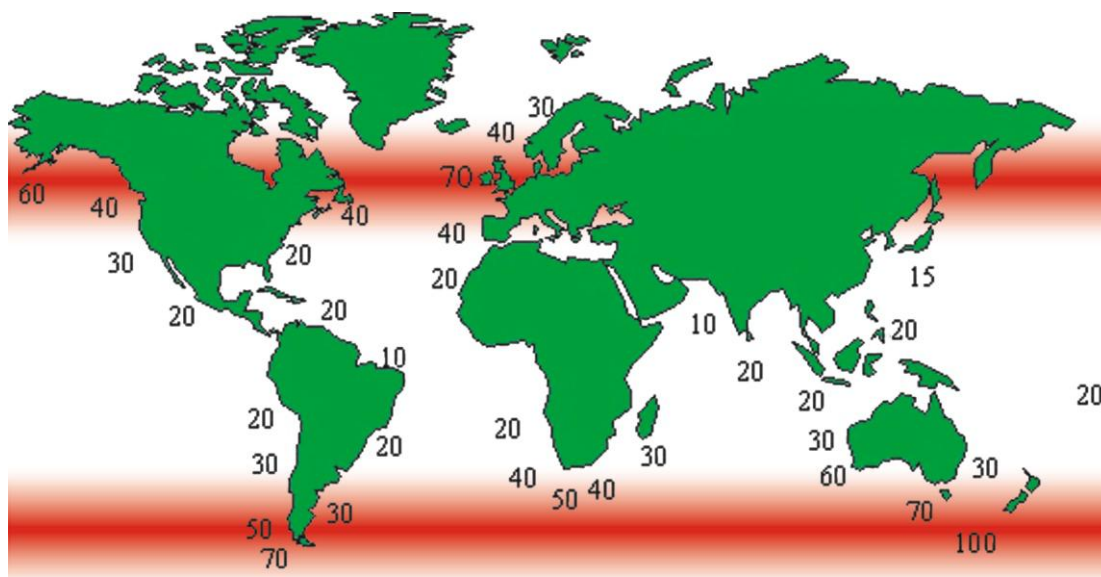


Fig. 1.1 Distribuição do potencial mundial das ondas em kW/m de frente de onda[12].

A energia contida nos oceanos pode ter origens diferentes, o que origina diferentes classificações [3]. As mais relevantes são sem dúvida a energia das marés, fruto da interacção dos campos gravíticos da lua e do sol, a energia térmica dos oceanos, consequência directa da radiação solar incidente, a energia das correntes marítimas, cuja origem está nos gradientes de temperatura e salinidade e na acção das marés e finalmente a energia das ondas, que resulta do efeito do vento na superfície do oceano. Esta última forma de energia pode ser considerada uma forma concentrada da energia solar, pois é esta que, pelo aquecimento desigual da superfície terrestre, é responsável pelos ventos. Uma vez criadas as ondas podem viajar milhares de quilómetros no alto mar praticamente sem perdas de energia. Em regiões costeiras a densidade de energia presente nas ondas diminui devido à interacção com o fundo do mar. Esta diminuição pode ser atenuada por fenómenos naturais, como veremos mais à frente. A potência de uma onda é proporcional ao quadrado da sua amplitude e ao seu período. Ondas de elevada amplitude (cerca de 2 m) e de período elevado (7 a 10 s) excedem normalmente os 50 kW por metro de frente de onda [4].

Situada num dos extremos do atlântico, o tipo de ondas formadas ao longo da costa oeste da Europa são altamente energéticas. Estas quantidades de energia são apenas encontradas nas zonas mais a sul da América do sul e também no sul da Austrália.

Estudos recentes incidentes no noroeste do oceano atlântico e mar do norte concluíram que a energia disponibilizada pelas ondas é aproximadamente de 290 Gw. Em termos anuais, o poder das ondas aumenta de cerca de 25 kW/m na parte sul da costa atlântica, atingindo os 71 kW/m na Irlanda e na Escócia. No mar do norte, este recurso muda significativamente, variando de 21 kW/m na parte mais exposta a norte, para quase metade deste valor na parte mais abrigada a sul [5]. No mediterrâneo, o nível anual do poder das ondas na costa dos países europeus, varia entre 4 e 11 kW/m, obtendo-se assim os maiores valores a sudoeste do Mar Egeu.

A totalidade anual dos recursos de águas profundas do mediterrâneo ao longo das costas da Europa é da ordem dos 30 Gw; o recurso total de energia das ondas para a Europa resulta assim em 320 Gw [4].

Tudo isto nos leva a crer que a energia das ondas é um recurso energético eficaz que nos pode levar a um novo nível, já que esta é infindável e existe em enorme quantidade. Contudo o desenvolvimento de tecnologias capazes de eficientemente retirar deste grande recurso a energia capaz de ser utilizada enfrenta bastantes dificuldades, entre as quais:

- Dificuldade em obter uma eficiência máxima dentro da gama de frequências de excitação, devido às irregularidades da amplitude, período e direcção das ondas.

- Necessidade de efectuar cálculos estruturais, pois as condições atmosféricas no mar podem ser bastante adversas, o que pode causar danos no sistema de geração.
- As ondas têm um avanço lento, normalmente com frequências da ordem de aproximadamente 0.1 Hz, enquanto que os geradores eléctricos clássicos operam a frequências nominais de 50 Hz; esta discrepância cria grandes dificuldades ao sistema de geração.

Nos últimos 5 anos houve um despertar de interesse na energia das ondas, especialmente na Europa. As empresas emergentes que começaram a interessar-se pela energia das ondas apostaram fortemente no desenvolvimento de novos sistemas de conversão de energia, como são exemplo a Pelamis, a Archimedes Wave Swing e a Wave Dragon.

Presentemente, a energia das ondas já contribui com cerca de 2000 Twh/ano para o mercado energético mundial, sendo este valor cerca de 10% do consumo de energia eléctrica a nível mundial [6].

Apesar desta já considerável contribuição para o consumo mundial, esta é ainda bastante onerosa; contudo, a previsão de custos de geração de energia eléctrica através das ondas do mar mostra uma tendência de decréscimo, que tem vindo a verificar-se nos últimos 20 anos, tendo-se atingido um preço médio de aproximadamente 0,08 €/Kwh. Comparando este valor, com o preço médio de energia eléctrica na União Europeia, que é aproximadamente 0,04 €/Kwh [7], ainda se trata de uma diferença elevada (cerca do dobro), mas esta grande diferença vai diminuir drasticamente com o avançar dos anos e conseqüente desenvolvimento da tecnologia, tal como se verificou no caso da energia eólica.

1.2 Motivação

Actualmente todos nós estamos cientes da importância das energias renováveis. Estas energias vêm apoiar as principais fontes de energia já adoptadas (essencialmente a partir de recursos fósseis), que no passado e também recentemente, com o sucessivo aumento de preço desses recursos, levaram a um abrandamento da economia mundial. A dependência dos combustíveis fósseis, incentiva a procura de outros tipo de energias, quer a nível de outros recursos, quer a nível de novas tecnologias, possibilitando alguma independência relativamente às principais economias exportadoras de petróleo e seus derivados.

De todos os recursos existentes à face da terra, pode-se dizer que a energia das ondas é um recurso ainda pouco utilizado comparativamente com a energia do vento ou ainda a energia solar. Quanto às energias do vento e do sol, existem já técnicas de conversão bem definidas

e bastante desenvolvidas, encontrando-se em funcionamento uma grande quantidade de instalações. Em relação à energia das ondas não se pode afirmar o mesmo, apesar de existirem alguns projectos a nível mundial, embora ainda enfrentando algumas debilidades. Dada a debilidade destes sistemas, pretende-se com a realização desta tese, o desenvolvimento de um sistema de geração que possa colmatar a inexistência de um sistema que seja economicamente viável e que venha responder aos apelos da Comissão da Comunidade Europeia.

No panorama complexo da política energética Europeia, as energias renováveis são um sector capaz de reduzir as emissões de gases com efeito de estufa, e estas constituem um elemento crucial para um desenvolvimento sustentável da comunidade europeia no futuro próximo.

O Conselho Europeu de Março de 2006 apelou para uma liderança da UE em matéria de energias renováveis e solicitou à Comissão que fizesse uma análise sobre o modo de proceder a uma maior promoção das energias renováveis a longo prazo, por exemplo aumentando a sua quota no consumo interno bruto para 15% até 2015. O Parlamento Europeu apelou, por uma esmagadora maioria, para uma meta de 25% de energias renováveis no consumo energético global da UE em 2020 [8].

Apesar do apelo da comissão europeia para uma maior utilização das energias renováveis, estas têm muitos obstáculos que já foram mencionados anteriormente (custo associado à exploração, capitais mais elevados em relação aos combustíveis fósseis, falta de confiança dos investidores, governos e utilizadores, devido a alguma falta de conhecimento em relação ao potencial económico subjacente, etc.); contudo, e para ultrapassar estes obstáculos, a UE propõe a implementação de uma estratégia política composta por quatro elementos distintos [9]:

- Em primeiro, deve haver um aumento ávido e realista da contribuição das energias renováveis para a economia energética comunitária, e a definição de um objectivo ambicioso que permita criar os meios necessários para que os governantes possam tomar as decisões acertadas para este domínio.
- Em segundo, deve-se propor uma cooperação entre os estados membros em relação às energias renováveis. A implementação de políticas rigorosas a nível nacional e um organismo de coordenação dos esforços a nível comunitário também será fundamental.
- Em terceiro lugar, é necessário que a comunidade fortaleça as políticas que afectam directamente o desenvolvimento das fontes de energia renovável, incidindo principalmente nos custos que advêm deste tipo de energias.

- O quarto ponto incide sobre uma melhor avaliação e monitorização, quanto à penetração das energias renováveis no mercado.

O sucesso destas políticas irá traduzir-se em poupanças importantes nas emissões de gases com efeito estufa, sendo o consumo de combustíveis fósseis reduzido em mais de 250 Mtep até 2020 [8], dos quais 200 Mtep teriam sido importados. Então, a redução destes custos poderá ser significativa para uma maior aposta nas energias renováveis.

1.3 Organização do Texto

Esta dissertação encontra-se estruturada em sete capítulos, que visam explicitar o trabalho realizado ao longo do processo de desenvolvimento, tendo também como objectivo criar uma certa ordem de acontecimento das coisas.

Deste modo esta dissertação pode ser descrita da seguinte forma.

No capítulo 2, é feita uma alusão ao potencial energético associado às ondas do mar relativamente à costa portuguesa, bem como o enquadramento de Portugal a nível geográfico, económico, tecnológico e político.

Assim, e com o mesmo objectivo, é feita uma abordagem ao estado da industria naval, e à actual configuração da rede de distribuição energética junto à costa, tendo também em conta os custos ambientais inerentes a este tipo de tecnologia.

Tendo já em vista o posterior dimensionamento do sistema é feito um estudo relativamente aos dados obtidos em duas estações costeiras distintas.

No Capítulo 3, apresentam-se alguns conceitos que regem os princípios de funcionamento dos sistemas de conversão de energia das ondas, assim como a teoria que explica o processo de formação das ondas do mar.

Faz-se uma descrição pormenorizada das tecnologias de extracção de energia das ondas que actualmente estão em funcionamento ou já foram testadas. É também feita uma abordagem às tecnologias que se encontram ainda em fase de desenvolvimento.

No capítulo 4, apresentam-se alguns conceitos que regem o funcionamento dos motores e geradores de relutância variável comutados, bem como uma introdução à futura abordagem aos seus homólogos Geradores lineares.

Assim, e com o mesmo objectivo, tecem-se ainda algumas considerações acerca das máquinas lineares e da forma como estas são concebidas.

No capítulo 5, é desenvolvido e apresentado um método de cálculo, que permite o dimensionamento de geradores lineares de relutância variável.

Este método de cálculo foi posteriormente inserido numa folha de cálculo do Microsoft Excel, tendo como objectivo contornar a morosidade do processo de cálculo e facilitar a alteração das variáveis para uma melhor escolha do gerador.

São também apresentadas as tabelas com os valores teóricos obtidos para os dois geradores referentes aos dados da estação costeira do Cabo da Roca e Baleal.

No capítulo 6, faz-se a análise numérica, por aplicação do método de elementos finitos, das máquinas que foram anteriormente dimensionadas no capítulo 5, através do programa FLUX 2D da CEDRAT.

Tendo em consideração que as máquinas em estudo têm uma geometria irregular, e não homogénea fisicamente, faz-se neste capítulo uma análise das expectativas do seu desempenho e da influência da alteração dos seus parâmetros nesse desempenho, através do conhecimento da distribuição do fluxo magnético nas diferentes regiões da máquina, para as diferentes posições relativas.

1.4 Simbologia

Na preparação desta dissertação foram identificadas todas as expressões matemáticas, figuras e tabelas, recorrendo a uma numeração sequencial, concernente a cada capítulo, sendo esta representada através de parênteses curvos.

Relativamente às referências bibliográficas, assinaladas ao longo do texto, elas são identificadas através de parêntesis rectos []. No final do texto, apresenta-se uma listagem completa de toda a bibliografia referenciada. As unidades das grandezas referidas ao longo do texto são também escritas entre parêntesis recto []. Apresenta-se continuamente uma lista dos símbolos utilizados no ao longo da elaboração do texto, normalmente escritos em itálico, acompanhados do seu significado e das respectivas unidades. Estas unidades nem sempre correspondem às unidades do sistema internacional (SI), nomeadamente por motivos relacionados com a execução dos cálculos.

A	amplitude da onda	[m]
A_{cu}	área da cava ocupada pelos condutores	[m ²]
A_p	área da cava	[m ²]
B	vector densidade de fluxo magnético	[T]
B	densidade de fluxo magnético	[T]
B_g	densidade média de fluxo no entreferro	[T]
B_k	densidade de fluxo no troço k do circuito magnético	[T]
bp	largura dos dentes do primário	[m]
b_s	largura dos dentes do secundário	[m]
c_p	largura das cavas do primário	[m]
c_s	largura das cavas do secundário	[m]
d_{cu}	diâmetro do condutor da bobinagem	[m]
f	frequência angular	[Rad/s]
F_x	força tangencial de superfície	[kN/m ²]
g	comprimento do entreferro	[m]
H_p	altura do primário	[m]
H_s	altura do secundário	[m]
H_c	força coerciva	
H	altura da onda	[m]
h_p	altura das cavas do primário	[m]
h_s	altura das cavas do secundário	[m]
I	intensidade da corrente de excitação das bobinas	[A]
I_c	intensidade da corrente de excitação da fase correspondente a um período de condução	[A]
J	<i>densidade</i> de corrente	[A/m ²]

i	corrente de excitação das bobinas	[A]
J	densidade de corrente no cobre	[A/m ²]
k_e	factor de enchimento das cavas	
k_c	factor de correcção devido a L_{as} ser diferente de L_{na}	
k_t	factor de carga	
L	indutância, ou coeficiente de auto-indução	[H]
L_{an}	indutância de não saturação na posição de alinhamento	[H]
L_{na}	indutância na posição de não alinhamento	[H]
L_1	comprimento médio da bobina	[m]
L	comprimento da onda	[m]
m	número de fases do actuador	
N	superfície livre da onda	
N_1	número de espiras por bobina	
n_p	espessura do núcleo do primário	[m]
n_s	espessura do núcleo do secundário	[m]
P_{cu}	perdas no cobre	[W]
P_{mec}	potência mecânica	[W]
P_{ele}	potência eléctrica	[KW]
R_b	resistência eléctrica da bobina	[Ω]
S_{cu}	área total de cobre	[m ²]
S_{cu}	secção recta do condutor	[m ²]
T	período da onda	[s]
t	tempo	[s]
T	binário	[N]
W_c	co-energia magnética	[J]
w	largura das laminações	[m]
x	<i>passo</i> distância de passo	[m]

v	velocidade linear	[m/s]
ρ_{cu}	resistividade do cobre	[Ω m]
θ	coordenada de posição angular	[rad]
τ_p	passo de cava do primário	[m]
τ_s	passo de cava do secundário	[m]
Φ	fluxo induzido	[Wb]
Ψ	fluxo ligado	[Wb]
Ψ_c	fluxo ligado correspondente a um período de condução	[Wb]
η	Rendimento da máquina	[%]

CAPÍTULO

2

Enquadramento em Portugal

Neste capítulo é feita uma abordagem relativamente ao potencial energético associado às ondas na costa portuguesa e também em pontos mais afastados da costa. Será feita uma análise aos dados disponibilizados pelo Instituto Português de Meteorologia, relativos aos valores diários de ondulação (Altura, Rumo e Período), referentes ao ano de 1992 e ao ano de 2009. Estes dados foram obtidos pela estação costeira situada no cabo da Roca, e serão importantes para o posterior dimensionamento do gerador e restantes componentes do mecanismo.

2.1 Introdução

O problema associado à energia das ondas é particularmente importante no que respeita a Portugal. Neste contexto, Portugal foi dos primeiros países a prestar uma atenção especial a esta problemática e ainda tem uma grande contribuição para o desenvolvimento internacional incidente neste sector.

Apesar de esta tecnologia ainda estar em fase de desenvolvimento e testes, o seu desenvolvimento em Portugal iniciou-se no IST em 1978, motivada pelo aparecimento de um invento português, da autoria do Sr. Agnelo Gonçalves David, um comerciante de Almeirim premiado em feiras internacionais de invenções [10].

Esta elevada participação no desenvolvimento destas tecnologias deve-se em grande parte, ao facto de Portugal possuir uma costa onde se desenvolvem ondas com elevado nível energético. Contudo Portugal apresenta uma acentuada dependência energética relativamente a outros países, o que impulsiona ainda mais a vontade de investir em energias renováveis que nos possam garantir um futuro promissor e sustentável.

Actualmente a empresa Martifer e outras seguem a estratégia nacional de redução de emissões de CO₂ e consumo de combustíveis fósseis, apresentando sistemas que visam a utilização dos recursos energéticos internos, reduzindo assim a dependência do exterior, e que vai de encontro aos compromissos assumidos no protocolo de Quioto.

Portugal tem nos seus recursos marítimos uma clara oportunidade de desenvolvimento económico. Neste momento esta vantagem comparativa não está a ser convenientemente aproveitada. É um sector negligenciado, quer pelo sector público quer pelos empresários.

2.2 Afirmação de Portugal

A Energia das Ondas é uma forma de energia para a qual não existe tecnologia definida, podendo Portugal ser pioneiro no aproveitamento deste recurso natural. Portugal é caracterizado por um fluxo médio anual de energia das ondas na ordem dos 30 kW/m a 40 kW/m em águas com profundidade igual ou superior a 50 m. O maior potencial de energia das ondas é encontrado no noroeste da costa portuguesa e no arquipélago dos Açores. Estima-se que o recurso total da energia das ondas em Portugal tenha um valor médio de aproximadamente 10 GW, e metade deste valor pode ser potencialmente explorado [11], o que faz da nossa costa uma das mais apetecíveis a nível mundial para a exploração energética.

O triângulo marítimo de Portugal, que engloba Portugal continental, Açores e Madeira, delineiam uma das maiores zonas económicas exclusivas de mar na Europa, com uma extensão de 200 milhas marítima.

Com efeito, Portugal possui uma área terrestre de cerca de 91.763 km², o que corresponde ao 110º lugar na ordenação dos países em termos de dimensão. No entanto, possui soberania ou jurisdição sobre uma extensíssima área marítima, da ordem de 1.720.560 km², incluindo águas interiores, mar territorial e Zona Económica Exclusiva (ZEE) (Tab. 2.1). Esta área marítima corresponde a cerca de 18,7 vezes a área terrestre nacional [12].

O mar representa, actualmente, 11% do PIB, 12% do emprego e 17% dos impostos indirectos em Portugal¹.

Tab. 2.1- Áreas do território e dos espaços marítimos de Portugal (Km²)

	Território	Águas Interiores	Mar Territorial	ZEE	Áreas SAR
Continente	88.600	6.510	16.476	287.715	572.438
Madeira	833	825	10.823	442.316	
Açores	2.331	6.083	23.660	926.149	5.220.302
Total	91.763	13.419	50.960	1.656.181	5.792.740

Foram realizados vários estudos relativamente à situação da economia portuguesa ligada ao mar, e estes vieram a demonstrar que esta se encontra em forte decadência. Isto é o resultado de vários factores, entre os quais poderemos apontar:

- A queda do sector dos transportes marítimos, devido ao envelhecimento progressivo das frotas;
- A pesca tem vindo a diminuir nas últimas décadas, registando actualmente valores muito baixos;

¹ UNIVERSIDADE CATOLICA PORTUGUESA, 2004.

- As empresas de construção naval têm grandes dificuldades em acompanhar o avanço tecnológico conseguido por outras empresas a nível mundial, ficando assim na cauda da tecnologia da construção naval;
- Os portos existentes não estão preparados para receber os navios recentes, devido ao seu tamanho e ineficiência, tornando-se assim eles próprios ineficientes;
- A falta de investimento público e privado leva cada vez mais este sector para um problemático declínio.

É neste contexto e enquadramento que existe uma forte motivação para Portugal tomar uma atitude arrojada relativamente à energia das ondas, para que nos possamos afirmar a nível mundial no aproveitamento desta energia.

O sector da energia das ondas poderá vir a representar cerca de 30% do PIB, visto que Portugal se encontra numa posição estratégica. Portugal, dentro de algumas décadas, poderá vir a dominar 10% do mercado mundial de equipamentos, se o governo patrocinar empresas que estejam realmente interessadas no desenvolvimento desta tecnologia. Segundo António Sarmento, presidente do centro de energia das ondas (CEO), o valor do mercado mundial adicionado ao mercado nacional, equivalerá a 40 mil milhões de euros, cerca de 30 % do PIB, além de gerar 10 mil postos de trabalho durante 40 anos².

Para António Sarmento, “um campo de energia das ondas tem capacidade para gerar três vezes mais energia eléctrica que um campo de energia eólica. A energia eléctrica gerada a partir das ondas tem também a particularidade de ser mais facilmente integrável na rede eléctrica nacional, graças à maior previsibilidade”. Isto acontece porque as ondas do atlântico norte propagam-se mais quilómetros sem perder energia, e graças aos sistemas de previsão que existem nos dias que correm, consegue-se obter previsões com bastante precisão, permitindo um melhor dimensionamento do sistema, quer a nível mecânico, quer a nível eléctrico. Esta particularidade também ajuda bastante aquando das instalações dos equipamentos, já que a previsibilidade do comportamento das ondas, numa determinada localização, reduz o risco de enfrentar condições adversas.

O actual governo tem mostrado bastante interesse no que toca às energias renováveis, tendo subido o patamar para os 250 MW de produção de energia eléctrica através das ondas do mar. Para alcançar este objectivo foi criada uma zona piloto ao largo de São Pedro de Moel [10]. A Fig. 2.1 esquematiza a localização dessa zona piloto. A criação desta base é um

² ANTÓNIO SARMENTO, EM ENTREVISTA AO DIÁRIO ECONÓMICO EM 21 DE NOVEMBRO DE 2005.

grande passo para o desenvolvimento desta tecnologia, e irá sem dúvida dar um novo fôlego à indústria marítima e naval, criando novos postos de trabalho e implementando novos métodos de trabalho a uma indústria ultrapassada tecnologicamente.

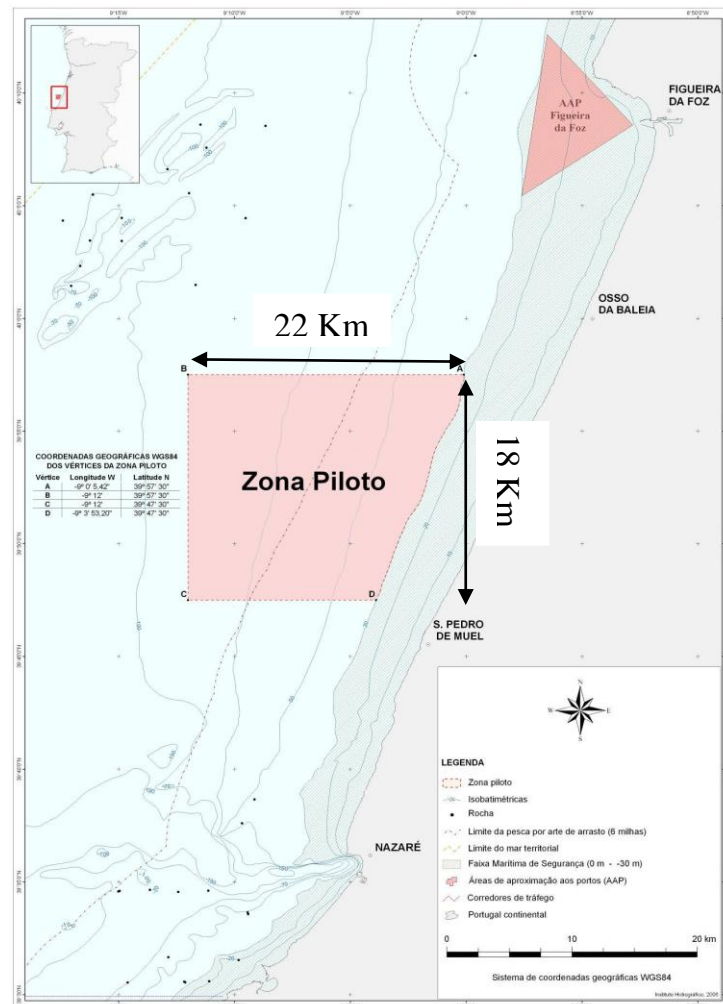


Fig. 2.1 Representação da zona piloto ao largo da costa portuguesa.

Potencial de instalação em Portugal

A costa portuguesa é bastante favorável para o aproveitamento da energia das ondas, isto graças ao facto de ser banhada por um dos oceanos com maior agitação marítima, mas também devido a uma característica particular que é o facto de existirem águas relativamente profundas a uma distância bastante curta da costa.

Outras das vantagens é o facto de existirem pontos de ligação à rede eléctrica muito próximos da costa, e estruturas de apoio (portos, empresas de construção naval, etc.) ao desenvolvimento, teste e construção, muito próximos dos locais onde é mais viável serem instalados estes dispositivos. Todas estas vantagens são uma mais-valia na redução dos elevados custos iniciais, que dão de alguma forma algum alento a potenciais investidores, mas que também beneficiam o consumidor, que poderá pagar menos pelo kWh de energia consumida.

2.2.1 Locais com grande potencial para a instalação

Foram realizados vários estudos na costa portuguesa pelo centro de energia das ondas, com a finalidade de identificar os locais com maior potencial e viabilidade para a instalação de parques de energia das ondas. Estes estudos tiveram vários factores em consideração para que fossem credíveis, entre eles, evitar conflitos com as pescas, navegação e zonas protegidas. Através destas análises foram identificadas varias zonas ao longo da costa portuguesa, considerando assim zonas com maior prioridade e zonas com menor prioridade à instalação, como mostra a Tab. 2.2.

Tab. 2.2- Zonas com grande potencial de utilização e possível uso para a instalação de parques de energia das ondas.

Zona	Localização	Comprimento	Profundidade
1. Zonas Prioritárias Sem interferência significativa com outros usos			
1	Entre Caminha e Viana do Castelo	8 km	50 m
2	Entre Viana e Póvoa de Varzim	38 km	50 m
3	Entre Aveiro e Figueira da Foz	24 km	50 m
4	Entre Figueira da Foz e Nazaré	46 km	50 m
5	Entre Nazaré e Peniche	22 km	50 m
6	Entre Peniche e Cascais	71 km	50 m
7	Entre Sesimbra e Sines	28 km	60 - 80 m

2. Zonas de segunda prioridade Possíveis conflitos de usos com a pesca de arrasto			
8	Entre Douro e Aveiro	16 km	50 m
3. Zonas de segunda fase Sem conflitos de usos, mas com eventuais dificuldades de ligação à rede eléctrica			
9	Entre Sines e Sagres	82 km	60 - 80 m

As zonas descritas na Tab. 2.2, englobam um comprimento total de costa de aproximadamente 335 km (Fig. 2.2), dos quais 67 km são reservados para canais de navegação local [13].

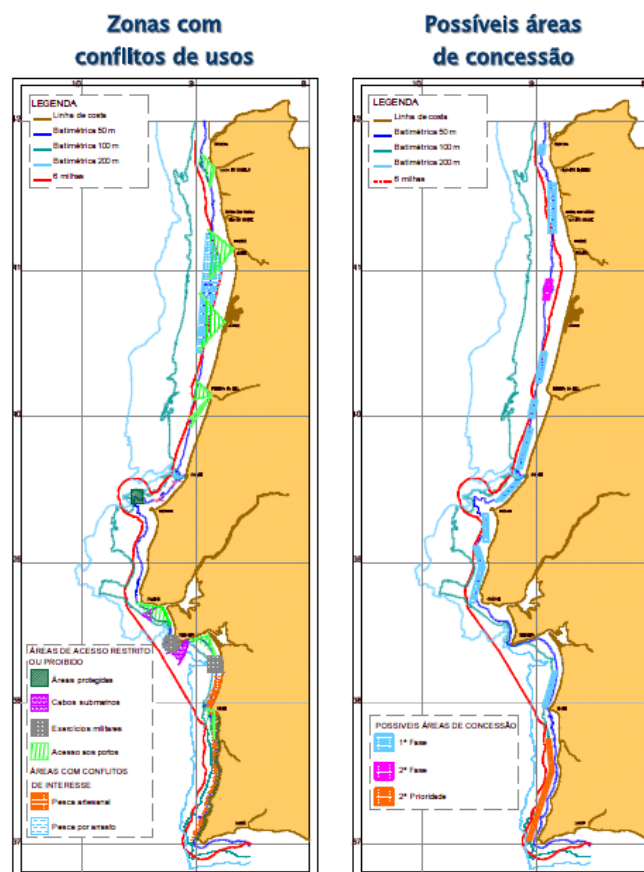


Fig. 2.2 Zonas potencialmente utilizáveis e possíveis áreas de concessão para parques de energia das ondas na costa ocidental portuguesa.[12]

2.2.2 Análise da faixa de profundidade entre os 50 e 80 metros de profundidade

Os estudos realizados pelo CEO, evidenciados na Tab. 2.2 mostram que, as zonas preferenciais para a instalação dos parques de energia das ondas se situam numa faixa de profundidades entre os 50 e os 80 metros.

Foi realizado um estudo pelo Instituto Geológico e Mineiro aos fundos das zonas adjacentes às áreas sobre a jurisdição das seguintes capitânias: Caminha, Viana do Castelo, Póvoa de Varzim, Vila do Conde, Leixões, Douro, Aveiro, Figueira da Foz, Nazaré, Peniche, Cascais, Sesimbra, Sines e Lagos (Fig. 2.3).

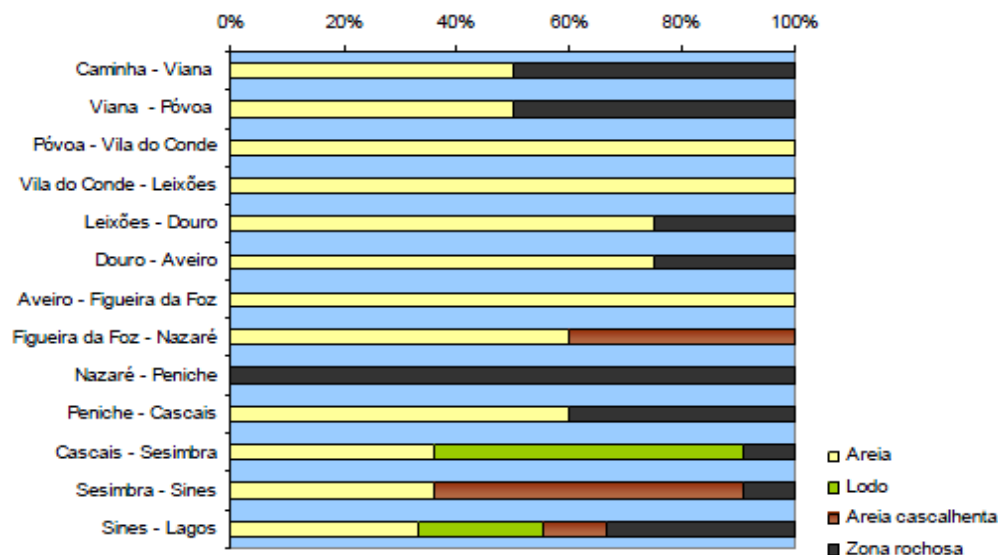


Fig. 2.3 Representação esquemática da constituição dos fundos oceânicos da costa portuguesa na batimétrica dos 50 metros.[13]

Deste estudo conclui-se que a maioria dos fundos é constituída por areia e rocha, principalmente desde a zona de Caminha até Cascais; nas regiões mais a sul se Cascais os fundos além de serem compostos por areia e rocha, também têm alguma quantidade de lodo e cascalho. Entre todos estes tipos de fundo, os mais problemáticos são os rochosos porque daí advêm grandes problemas quanto à instalação dos cabos, principalmente em profundidades inferiores a 50 m. Nestes casos os tubos têm que ser protegidos com um

revestimento metálico ou então têm que ser entubados [14]. Esta situação torna-se indesejável porque vai implicar custos mais elevados, afectando o preço final do kWh.

2.2.3 Rede eléctrica de transporte junto à costa

Um ponto fundamental para o desenvolvimento da energia das ondas é a proximidade e a existência de pontos de ligação à rede. O constante desenvolvimento das energias renováveis levou a um melhoramento da potência instalada e ordenamento das redes de distribuição de energia. A Rede Eléctrica Nacional (REN) tem prevista a instalação de cerca de 6670 MW de potência PRE (produção em regime especial) até ao fim do ano de 2010, em que 3750 MW estão previstos serem da produção de energia eólica [13].

Para um melhor posicionamento dos pontos de recepção, tem de existir um trabalho conjunto entre as entidades instaladoras e a REN, para que não se cometam erros. O CEO prevê que quando a potência dos parques de energia das ondas ultrapassar os 50 MW, a REN terá disponível para ligação redes de muito alta tensão de 150-220 kV ou 400 kV.

2.3 Impactos Ambientais

Outro factor que afecta a economia de energia das ondas (e outras fontes renováveis) é o potencial custo ambiental. As tecnologias de energias renováveis estão actualmente em desvantagem em relação aos métodos mais convencionais de geração de energia eléctrica. Estes últimos podem causar danos ambientais para uma ampla gama de receptores, incluindo a saúde humana, ecossistemas naturais e meio envolvente.

Estes danos são referidos como custos “externos” ou “externalidades”, porque estes não são reflectidos no preço de mercado da energia. A avaliação económica tradicional tem ignorado as externalidades; no entanto, há um crescente interesse em adoptar uma abordagem mais realista e aprimorada, que envolva a quantificação dos impactos ambientais e sanitários da produção de energia e respectivos custos externos [15].

A implementação dos dispositivos de conversão de energia das ondas pode ter um gama ampla de impactos ambientais, alguns benignos mas outros prejudiciais. Estes impactos ainda não são bem conhecidos devido ao facto de se tratar de uma tecnologia emergente, e ainda não haver um intervalo de tempo de funcionamento destas tecnologias que permita apurar com algum rigor os malefícios inerentes à sua instalação.

Esta questão é de extrema importância para Portugal, visto que se trata de um país com uma grande extensão de costa, mas também porque Portugal tem no mar e na sua costa uma das suas principais economias, daí a razão para que uma eventual instalação destes dispositivos em grande escala seja arquitectada de forma racional, de maneira a reduzir os impactos no meio marinho.

No entanto em Portugal existem áreas protegidas que abrangem o meio marinho, definidas como áreas de “reservas marinhas” ou “parques marinhos”, que têm por objectivo o uso de medidas dirigidas para a protecção das comunidades e dos habitats marinhos mais sensíveis a transformações, de assegurar a biodiversidade marinha e o uso sustentável dos recursos marinhos [13]. Foram identificadas inúmeras áreas que podem constituir um problema à instalação destes parques ou até mesmo à passagem dos cabos eléctricos até à costa, e que são:

- Reserva Natural das Berlengas;
- Parque Natural do Sudoeste Alentejano e Costa Vicentina;
- Reserva Natural da Arrábida;
- Paisagem protegida do Litoral de Esposende;
- Reserva Natural das Dunas de S. Jacinto;
- Parque Natural de Sintra - Cascais;
- Paisagem protegida da Arriba Fóssil da Costa da Caparica.

De todas as áreas referidas apenas a Reserva Natural das Berlengas e o Parque Natural do Sudoeste Alentejano e Costa Vicentina interferem com a instalação de parques à batimétrica de 50 m.

2.3.1 Impactos Visuais

O impacto visual é variável conforme o tipo de sistema e, especialmente, a sua localização. Em algumas áreas a profundidade da água exigida para a instalação destes dispositivos pode ser alcançada a apenas algumas centenas de metros da costa. Assim sendo, nestes casos o impacto visual pode ser considerável. No caso dos sistemas totalmente submersos, o seu impacto é praticamente nulo, e mesmo que sejam semi-submersos a distância à costa é suficientemente elevada para minimizar este impacto. Em suma, do ponto de vista paisagístico, os sistemas de energia das ondas são elementos de avaliação subjectiva e o seu impacto dependerá em grande parte da sua visibilidade, da dimensão do parque e da altura

do dispositivo acima do nível médio da água [13]. O impacto visual destes sistemas será muito reduzido quando comparado com o impacto visual dos parques eólicos.

2.3.2 Ruído

Alguns dispositivos de energia das ondas tendem a ser ruidosos, especialmente em condições extremas. O ruído produzido viaja longas distâncias subaquáticas e isso pode ter implicações para o sistema de orientação e comunicação de certos animais, principalmente focas e cetáceos [16]. Pensa-se que seja pouco provável que os cetáceos sejam afectados, pois o ruído é susceptível de ser gerado abaixo do nível limiar auditivo (frequência) dos golfinhos. Para os dispositivos instalados perto da costa, potencialmente os níveis de ruído podem constituir um incómodo na praia. No entanto, quando o dispositivo está totalmente operacional, o ruído do dispositivo é susceptível de ser mascarado pelo ruído do vento e ondas, proporcionando assim uma amenização do som.

2.3.3 Perigo para a Navegabilidade

Os riscos da navegabilidade não se podem considerar como impactos, mas é certo que da instalação dos dispositivos de energia das ondas podem resultar potenciais perigos à navegação, isto porque os dispositivos têm uma borda livre baixa, o que pode dificultar a sua detecção, quer visualmente, quer por radar. Uma das formas de minimizar este risco é a realização de mapas detalhados das posições dos dispositivos, quando estes são instalados. O risco de colisão vai estar sempre presente, isto porque as áreas preferenciais para a instalação destes dispositivos, ao longo da costa portuguesa, fazem parte das principais rotas de navegação.

2.3.4 Perturbação do ambiente circundante

Como já foi mencionado anteriormente, o maior impacto associado a esta tecnologia tem a ver com as interferências que provocam no meio onde se encontram inseridos, nas fases de

construção, instalação e vida útil do sistema. É de notar que alguns dos sistemas são construídos em terra, minimizando de imediato o impacto da construção em alto mar.

De facto, as interacções entre os dispositivos e o meio ambiente são mais complexas do que se pensa, isto porque os dispositivos vão representar novos habitats. Este facto pode ser constatado nas explorações petrolíferas offshore, em que as superfícies fornecem um ponto de fixação para uma grande variedade de algas e invertebrados, e pensa-se que nos dispositivos de conversão de energia das ondas aconteça o mesmo, embora esta ocorrência seja dependente de vários factores como a distância à costa, tipo de dispositivo, profundidade e clareza das águas, condições meteorológicas, posição em relação ao litoral e as correntes e a velocidade dessas correntes [17].

Um outro cuidado deve ser tomado, estando este relacionado com as tintas anti-corrosão e com o tipo de protecção empregue para prevenir as incrustações de organismos marinhos. No passado, estes produtos eram muito tóxicos podendo ser a longo prazo prejudiciais para algumas espécies marinhas; contudo, a grande indústria naval desenvolveu produtos não tóxicos que podem ser utilizados sem que hajam danos colaterais.

A instalação em grande escala destes dispositivos pode provocar alterações não só no clima mas também nas correntes marítimas, no regime de marés e nos padrões de mistura de espécies microscópicas, que constituem a base da cadeia alimentar de inúmeras espécies do meio marinho [18].

No caso dos dispositivos afastados da costa, e quando colocados em parques, é de prever uma redução da acção das ondas nas zonas costeiras mais próximas, o que tanto pode constituir uma vantagem como uma desvantagem, dependendo da utilização dessas mesmas zonas [9].

Uma outra questão é a construção e instalação destes dispositivos, que apesar de não libertarem gases poluentes durante a sua operação, libertam grandes quantidades de gases poluentes durante estas duas fases, não podendo ser simplesmente ignorados. Em baixo são referidas algumas das etapas que podem causar algum impacto:

- Extracção e movimentos de terras (dispositivos costeiros);
- Processamento de materiais;
- Produção e transporte de componentes;
- Construção e operação do dispositivo;
- Desmantelamento;
- Tratamento dos resíduos resultantes.

Pode-se afirmar que o grosso das emissões poluentes acontece maioritariamente na fase de produção dos componentes do dispositivo, ficando o resto distribuído pelas restantes etapas. A Tab. 2.3 representa, de uma forma esquemática, os potenciais impactos na fase de construção e instalação.

Tab. 2.3- Possíveis impactos na fase de Construção e Instalação

Construção e Instalação		
Operação	Impactos Possíveis	Medidas de minimização
Instalação de cabos submarinos	Efeitos semelhantes nas turbinas eólicas offshore: perturbação (temporária) de alguns habitats nas imediações do cabo	Evitar a colocação de cabos submarinos em zonas referenciadas
Instalação de cabos na costa	Efeitos semelhantes nas turbinas eólicas offshore: perturbação (temporária) de alguns habitats nas imediações do cabo	Evitar a colocação de dispositivos e toda a sua estrutura envolvente em zonas referenciadas
Instalação do sistema de amarração	Efeitos semelhantes na amarração de navios: perturbação (temporária) de alguns habitats	Evitar a colocação de blocos de amarração (âncoras) em zonas referenciadas
Construção do dispositivo	Impactos diversos (visuais, ruído, ...)	Sempre que possível evitar a construção do dispositivo no local
Tráfego marítimo durante a instalação	Aumento do tráfego marítimo durante a instalação de dispositivos não costeiros, o que pode afectar uma gama variada de espécies	Evitar a instalação de dispositivos em períodos relevantes para as espécies locais (migrações, períodos de descanso, ...)

2.4 Portugal na ponta do desenvolvimento da energia das ondas

Portugal iniciou a sua actividade de investigação e desenvolvimento nesta área pelo IST em 1978 [13]. Desde então teve participação em três grandes projectos europeus, tendo sido líder num deles. Portugal liderou o projecto de construção da central piloto de energia das ondas na ilha do Pico, e teve uma participação muito activa nos outros dois projectos, o LIMPET na ilha de Islay na Escócia e a Archimedes Wave Swing (AWS) em Viana do Castelo. A central piloto europeia da Ilha do Pico representa o culminar do esforço conjunto do IST, do INETI e de algumas empresas, tais como a EDP, a EDA e a EFACEC, no que diz respeito à implementação de tecnologias de conversão da energia das ondas.

A central da ilha do Pico revelou-se importante juntamente com a central da ilha de Islay na Escócia, na posterior criação de um atlas europeu do recurso energético das ondas (“Atlas of Wave Energy Resource in Europe”) [9], isto sob a alçada do programa Joule, que tinha como objectivo fazer uma caracterização do recurso energético das águas profundas (offshore), junto à costa do continente Europeu. Este atlas encontra-se agora em fase de finalização.

Apesar das potencialidades da energia das ondas não estarem bem interiorizadas na sociedade, já existem algumas empresas portuguesas interessadas na I&D e na exploração. A Enersis, que participou no desenvolvimento do projecto Archimedes Wave Swing, também está presente no desenvolvimento da tecnologia Pelamis na Aguçadoura, perto da Póvoa de Varzim. Também a Martifer Energia, que pertence ao grupo Mota-Engil, está a trabalhar no terreno. Por sua vez, o grupo EDP lançou em 2008 um projecto comercial de energia das ondas. Trata-se de uma joint-venture com 77% detidos por um grupo de três impulsionadores: EDP, Efacec e Babcock & Brown e 23% detidos pelo tecnólogo A Pelamis Wave Power Limited. O investimento é de cerca de nove milhões de euros. O Instituto Superior Técnico e o INETI centralizam a actividade e a capacidade de I&D e a competência específica nesta área. O projecto do Pico permitiu às empresas nele participantes (EDP, EDA, EFACEC, Profabril.) adquirirem experiência nesta área.

Portugal tem todas as condições para vingar nesta área, mas será preciso que o governo e as empresas trabalhem em uníssono para o desenvolvimento de uma tecnologia que venha a beneficiar não só Portugal, como o mundo.

2.5 Perspectivas futuras para Portugal

Portugal tem nos seus recursos marítimos uma grande oportunidade para se afirmar na Europa, como um dos países com maior produção de energia eléctrica, provinda de fontes renováveis. O futuro deste tipo de produção de energia reside essencialmente em parques offshore, e prevê-se que em Portugal, devido ao grande potencial inerente às ondas, se possa ter em 2025 cerca de 20% da energia eléctrica consumida no país a partir desta origem. Esta perspectiva subentende que haverá um aperfeiçoamento progressivo das tecnologias que estão agora a dar os primeiros passos.

Actualmente o grande desafio com que se depara esta tecnologia é a dificuldade imposta pelo Oceano Atlântico. Apesar de o Atlântico garantir um fluxo energético praticamente constante, existem situações, nomeadamente em caso de tempestade, em que a forte ondulação pode danificar os sistemas de conversão de energia. É assim importante estudar convenientemente os materiais a utilizar na construção destes dispositivos, e também projectar estruturas que minimizem as fragilidades das mesmas. Se os investigadores portugueses, conseguirem desenvolver um sistema que resista à forte ondulação do Atlântico, poderemos ter assim um sistema que nos dê garantias, e que venha a tornar a energia das ondas uma fonte complementar às energias eólica, hidroeléctrica e solar.

Uma outra forma de aproveitar a energia do Oceano prende-se com a energia das marés. Em Portugal existem os chamados moinhos de maré que funcionaram desde o século XIV na margem sul do estuário do Tejo, e de certa forma é uma boa oportunidade para se começar a explorar devidamente a energia das marés, já que temos uma extensa costa.

2.6 Tratamento de dados relativos às condições marítimas

É de extrema importância a realização de um estudo em relação aos dados climatéricos do mar para que o desenvolvimento a ser realizado seja mais preciso e coerente.

Os dados aqui estudados foram facultados pelo Instituto Português de Meteorologia, sendo estes dados referentes a dois pontos distintos (Fig. 2.4) e em anos distintos. A informação foi obtida na estação costeira do Cabo da Roca durante o ano de 1992 e na estação costeira de Peniche, mais precisamente no baleal, sendo estes últimos dados referentes ao ano de 2009.

Os dados obtidos por estas estações dão-nos informação referente ao rumo, altura e período, mas apenas os dois últimos parâmetros vão ser importantes para o desenvolvimento

e dimensionamento do nosso sistema, isto porque, como se vai tratar de um sistema de absorção pontual, o rumo não vai ser um factor importante, pelo contrário os valores da altura e período vão ser bastante relevantes.



Fig. 2.4 Localização das estações meteorológicas que efectuaram a recolha dos dados aqui analisados.

Na Tab. 2.4 apresentam-se os valores de ondulação mensais e na Tab. 2.5 os valores mensais do período da ondulação, relativos à estação do Cabo da Roca.

Tab. 2.4- Possíveis impactos na fase de Construção e Instalação

DIA	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
1	1,5	2,0	3,0	2,5	2,0	1,5	1,5		2,0		2,5	3,0
2	1,5	1,5	3,0	3,0	2,0	1,5	1,5	1,5	2,5	2,5	1,5	2,5
3	2,0	1,5	1,5	3,0	2,5	2,0	1,5	1,0		2,0	2,0	3,0
4	1,5	3,0	2,0	3,0	2,0	2,0	2,0	2,0	1,5	2,5	2,0	3,5
5	2,0	1,5	3,5	3,0	1,0	1,5	2,5		1,5	3,0	1,5	3,0
6	2,0	1,5		2,5	1,5	1,5	2,0	2,0	1,5	2,5	1,5	2,5
7	2,5	1,5	2,0		1,5	1,5	1,5	2,0	1,5	2,0	1,5	2,5
8	2,5	3,0	2,5	2,0	1,5	1,0	1,5	2,0	1,5	2,0		3,0
9	2,5	2,0	1,5	2,5	2,0	2,0	1,5	2,0	2,0	1,0		3,0
10	2,5	3,5	1,5	1,5	2,0	1,5	2,0	1,5	2,5	1,5	1,5	3,0
11	1,5	3,0	1,5	1,5	2,5	2,0	1,5	2,0	2,0	1,5	2,0	2,0
12	1,0	2,5	2,5	2,0	2,0	1,5	2,0	2,0	2,0	1,5	2,5	1,5
13	1,0	4,0	2,0	1,5	1,5	2,0	2,0	2,0	1,5	1,5	2,5	1,5
14	1,5	3,5	2,0	1,5	1,5	2,0		2,0	1,5	1,0	2,5	1,5
15	2,5	2,5	2,0	2,0	2,5	1,5		2,0	1,5	1,0	2,5	1,5
16	1,5	3,0	2,0	2,0	2,0		2,0	2,0	1,0	2,5	2,5	3,0
17	2,0	2,0	1,5	2,0	2,0			1,5	1,5	2,0	2,0	2,5
18	2,0	2,0	1,5	1,5	1,5	2,0		1,5	2,0	1,5	2,0	3,5
19	1,5	2,0	1,5	1,5	1,5	1,5		2,0	2,0	1,5	2,0	3,0
20	1,5	2,0	1,5	1,0	1,5	1,5		2,0	1,5	1,0	2,0	3,0
21	2,5	1,5	2,5	1,0	1,5	1,5	2,0	1,5	1,5	1,5	1,5	2,5
22	3,0	2,5	2,5	1,5	1,5	2,0	1,5	1,0	2,5	2,0	1,5	2,5
23	3,5	2,5	3,0	1,5	2,5	2,0	1,5		2,5	2,0	1,5	2,5
24	1,5	2,5	3,5	1,5	2,0	2,0	1,5	1,5	1,5	2,5	2,5	2,0
25	1,5	1,5	3,0	2,0	2,0	1,5	1,5	1,5	1,0	2,5	3,0	1,5
26	2,0	2,0	3,5	2,5	3,0	1,0	1,5		1,5	2,5	2,5	1,5
27	1,5	2,5	3,5	2,5	2,5	1,0	1,5	2,0	2,0	2,5		1,5
28	1,5	3,0	3,0	2,0	2,5	2,0				1,5	2,5	2,0
29	1,5	2,0	2,0	2,5	2,0	1,0		2,5	2,5		2,0	2,0
30	1,5		4,0	1,5	1,5	1,0		2,5		3,0	2,0	2,0
31	3,0		4,5		1,5		1,5	2,5		3,0		1,5
Média	1,9	2,3	2,5	2,0	1,9	1,6	1,7	1,8	1,8	2,0	2,1	2,4

Tab. 2.5- Valores mensais do período das ondas em segundos

DIA	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
1	10	12	12	11	10	10	10		12		10	13
2	11	11	12	12	10	10	10	10	12	10	10	12
3	12	10	10	12	11	11	10	10		11	10	12
4	10	13	11	12	11	11	10	11	10	12	11	14
5	11	10	15	10	10	10	11		10	12	11	12
6	11	10		12	10	10	11	11	10	12	10	12
7	12	10	12		10	10	10	12	10	11	10	12
8	12	13	11	12	10	9	10	11	10	11		14
9	12	12	10	11	10	11	10	11	11	10		12
10	12	13	10	10	11	10	11	12	12	10	10	13
11	11	14	11	10	11	11	10	10	11	10	11	11
12	10	12	11	11	11	10	10	10	11	11	12	11
13	10	13	11	10	10	11	11	12	10	11	11	10
14	10	12	11	10	10	11		11	10	11	12	10
15	13	11	11	11	11	10		12	10	10	11	10
16	10	13	10	11	11		11	12	9	12	12	13
17	11	11	10	12	11			10	10	12	11	12
18	10	11	11	10	10	11		10	11	10	10	14
19	12	11	11	10	10	10		10	11	11	10	13
20	10	12	10	9	9	10		11	10	12	11	12
21	12	10	12	9	10	10	11	11	10	11	10	12
22	14	12	12	10	10	11	10	11	12	10	10	12
23	14	11	12	10	12	11	10		12	12	10	12
24	11	12	13	10	11	11	10	10	10	11	11	10
25	11	10	12	11	12	10	10	10	10	12	12	10
26	11	11	13	12	14	10	10		12	12	12	10
27	11	11	12	12	12	9	10	11	11	12		10
28	10	12	12	10	12	11				10	12	11
29	10	11	10	11	11	10		12	10		12	12
30	10		14	10	10	10		12		12	11	12
31	14		14		10		10	12		13		11
Média	11,2	11,5	11,5	10,7	10,7	10,3	10,3	11,0	10,6	11,2	10,9	11,7

Como se pode observar na Tab. 2.4 e na Tab. 2.5, foi realizada a média dos valores obtidos em cada mês, isto para ser mais fácil a análise dos valores. Ainda nas referidas tabelas, pode-se verificar que existem dias em que não se obtiveram registos devido à ausência de valores ou a falhas de informação.

A partir dos valores médios da ondulação da Tab. 2.4, foi obtido o gráfico da Fig. 2.5, que mostra que os valores máximos de ondulação, que foram observados nos meses de Outono e

Inverno. É também importante verificar que entre o valor de ondulação mais baixo e o valor mais alto existem apenas 90 cm de amplitude. Apesar de existir apenas uma amplitude de 0.9 m entre o valor máximo e o valor mínimo de ondulação, é necessário ter em consideração que as condições marítimas podem mudar bruscamente, devido a tempestades e outros fenómenos naturais. Em condições normais de funcionamento o gerador tem que suportar vagas com aproximadamente 2.5 m de altura, então toda a estrutura tem de ser dimensionada para valores de ondulação superiores.

A Fig. 2.6 mostra os valores do período ao longo dos meses do ano. Estes valores são muito importantes para o desenvolvimento do gerador porque, por razões hidrodinâmicas, os sistemas de extracção de energia das ondas são muito sensíveis ao período da onda.

O período da onda é um factor crucial pois este é inversamente relacionado com a frequência, ou seja apesar de termos ondas com grande altura, não quer dizer que o sistema de extracção vá produzir energia mais eficientemente, pelo contrário, existe um ponto óptimo de funcionamento para cada sistema.

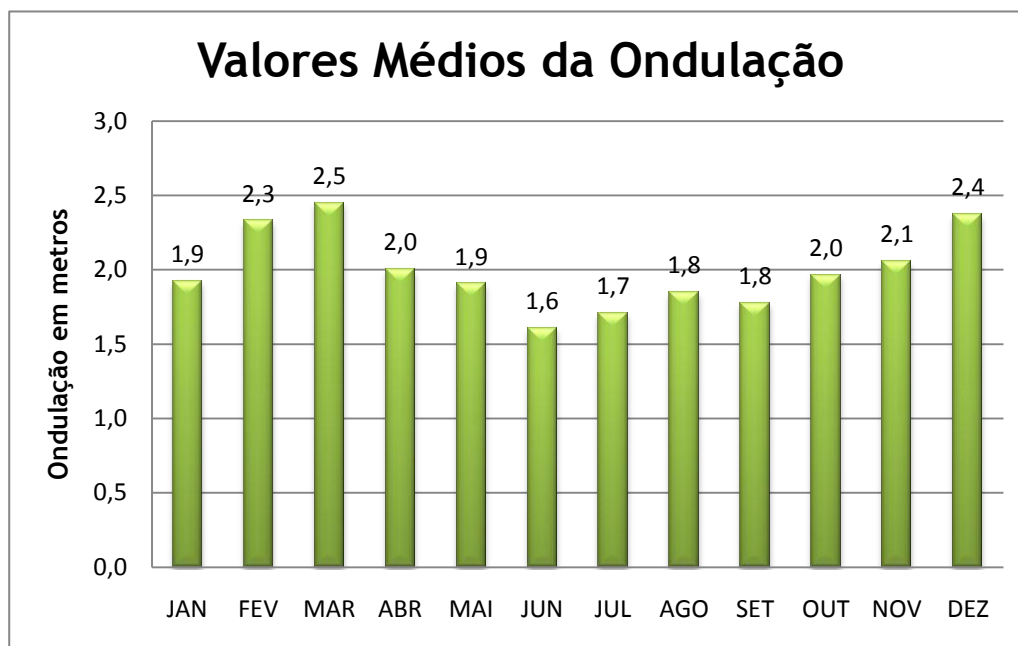


Fig. 2.5 Valores médios mensais da ondulação

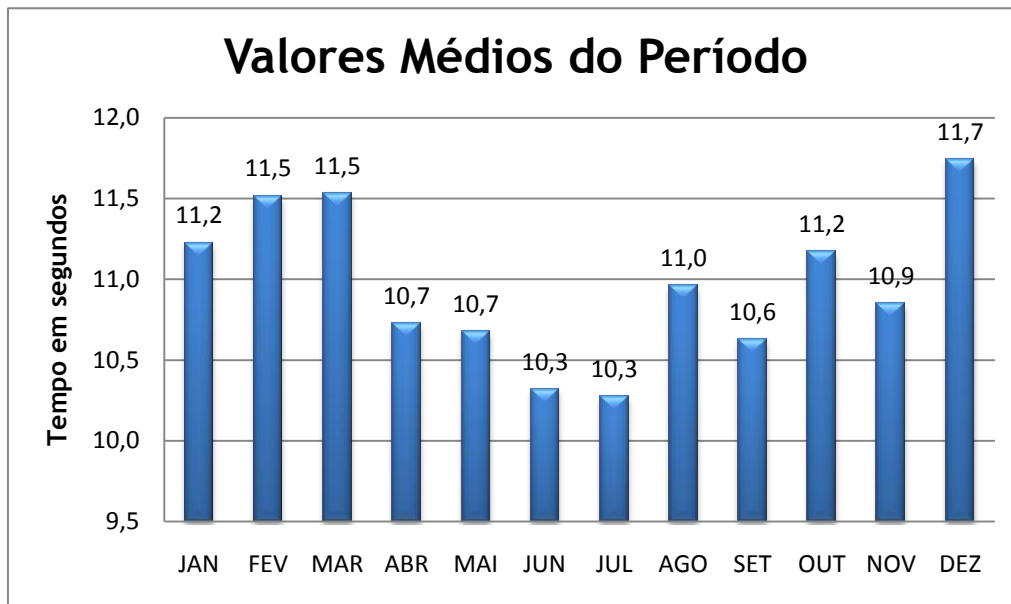


Fig. 2.6 Valores médios mensais do período

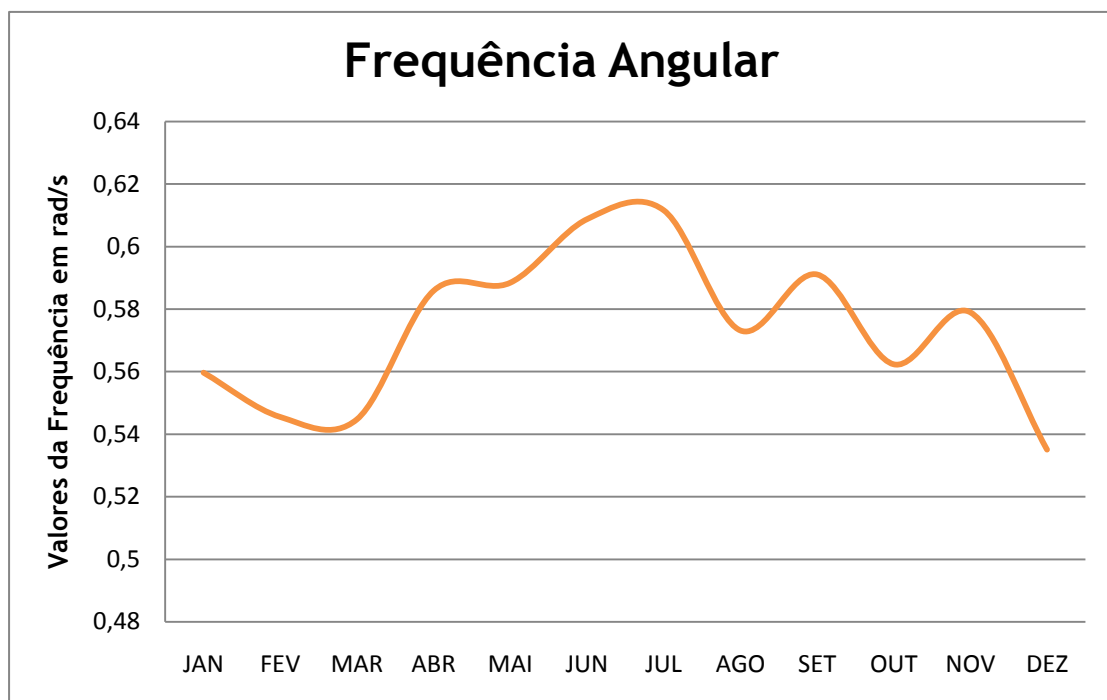


Fig. 2.7 Valores médios mensais da frequência.

A frequência das ondas não se pode definir como uma variável sinusoidal, tal como se pode verificar na Fig. 2.7.

A máxima eficiência de aproveitamento da energia obtém-se para uma onda cuja frequência é idêntica à frequência própria de oscilação (isto é àquela com que sistema fica a oscilar quando é perturbado da sua posição de equilíbrio) [13].

A taxa com que a eficiência de extracção de energia decresce com a frequência é uma característica de cada sistema de extracção e pode variar significativamente com o tipo de sistema.

O mesmo também acontece com a direcção de propagação da onda, mas no nosso caso, como o sistema de extracção será axial, este parâmetro não irá afectar o desempenho do nosso sistema. Na Tab. 2.6 apresentam-se os valores de ondulação mensais e na Tab. 2.7 os valores mensais do período da ondulação relativos à estação do Baleal (Peniche) no ano de 2009.

Tab. 2.6- Valores mensais da altura das ondas em metros

DIA	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1	1,5	3,5	2,1	1,7	2,6	1,3	0,9	1,4	2,2	1,1	1,9	2,7
2	1,9	3,8	2,5	1,7	2,5	1,1	0,9	2,0	2,4	1,0	3,5	3,2
3	2,3	2,8	2,5	1,8	2,6	1,0	0,9	1,5	1,9	0,9	4,0	5,8
4	2,2	5,6	6,9	1,8	2,6	1,0	1,1	1,3	2,0	1,3	5,6	3,4
5	2,0	5,4	10,0	1,8	2,4	1,0	1,4	2,1	2,2	1,5	7,2	2,6
6	2,2	6,0	6,2	1,6	1,7	1,7	2,0	2,9	1,8	1,3	4,9	3,4
7	2,0	4,0	3,7	2,7	1,4	1,6	2,5	2,5	1,8	1,4	4,9	3,3
8	1,6	2,4	3,2	2,3	2,4	3,0	2,7	2,4	1,6	1,4	7,7	3,0
9	1,2	2,2	3,5	1,9	2,8	2,3	2,4	2,8	2,0	1,4	4,2	3,4
10	1,2	3,6	2,7	4,0	1,9	1,6	2,0	2,1	2,3	1,4	2,3	3,4
11	1,4	2,7	1,7	3,2	1,4	1,4	1,1	1,8	1,6	1,8	1,8	1,7
12	1,9	2,1	1,4	2,5	1,6	1,8	1,1	1,7	1,5	1,7	2,4	1,6
13	2,4	1,4	1,3	2,1	1,7	2,0	1,7	1,7	1,1	1,6	2,9	2,0
14	2,2	1,2	1,8	3,6	2,9	1,9	2,3	1,5	1,4	1,1	4,3	2,0
15	3,3	1,4	2,4	4,4	2,8	2,3	2,3	1,2	2,1	1,2	3,7	1,8
16	5,0	1,4	1,7	3,3	2,4	2,1	1,7	1,3	2,7	1,5	2,5	1,6
17	3,5	1,4	1,5	1,9	2,8	1,5	2,4	1,4	2,3	1,2	2,1	3,0
18	5,0	1,4	1,2	1,5	2,9	1,9	2,6	1,5	1,7	1,1	1,7	1,9
19	6,4	1,9	0,9	1,8	2,2	2,3	2,3	1,0	1,3	1,0	1,8	2,1
20	8,5	1,9	1,1	1,5	2,0	2,3	1,7	1,3	1,4	2,8	2,2	1,4
21	7,8	1,7	1,8	1,6	1,6	2,0	1,1	2,7	1,8	6,1	2,2	2,4
22	4,3	1,7	2,3	1,6	1,6	1,4	1,2	2,8	1,5	5,6	5,9	3,5
23	4,7	1,7	1,9	1,4	1,2	0,9	1,5	2,0	1,5	2,6	6,0	3,0
24	6,8	1,4	1,8	2,5	1,7	0,8	1,4	1,6	1,6	1,4	3,5	3,5
25	7,1	1,3	2,0	3,1	2,1	1,0	1,7	2,2	1,6	1,5	2,3	2,6
26	8,4	1,2	2,0	3,0	2,3	1,0	1,6	1,8	1,8	1,7	3,5	2,7
27	4,2	1,2	2,3	2,4	2,4	0,9	1,8	1,8	1,6	2,3	3,5	2,5
28	3,0	1,2	4,6	3,3	1,7	1,1	1,8	3,0	1,4	1,9	3,3	2,5
29	2,9		4,5	2,5	1,2	1,0	1,4	2,9	1,3	1,5	5,2	3,2
30	2,2		2,8	1,9	1,4	0,9	1,5	2,3	1,0	1,8	4,8	3,0
31	3,4		1,7		1,4		1,3	1,6		2,0		4,0
Média	2,9	1,8	2,1	2,0	2,1	1,5	1,7	1,8	1,7	1,5	3,5	2,7

Tab. 2.7- Valores mensais do período das ondas em segundos

DIA	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1	8,1	11,9	9,5	8,0	7,0	8,3	7,3	6,2	8,0	7,7	9,2	9,2
2	8,8	11,4	8,9	8,0	9,4	8,2	6,9	6,9	9,1	7,2	8,7	9,9
3	9,6	8,9	8,0	7,0	9,0	6,9	6,2	7,4	8,3	6,7	11,0	11,6
4	9,0	12,2	12,1	7,7	8,3	6,1	6,3	7,3	6,6	9,1	11,6	10,9
5	8,5	12,9	13,6	8,3	8,1	6,4	6,6	8,3	6,9	8,9	12,8	9,9
6	8,1	11,3	11,5	7,8	7,5	6,4	6,7	8,2	6,4	7,0	11,0	11,2
7	7,6	10,7	9,1	8,7	7,6	6,9	6,8	7,4	5,8	7,0	10,3	11,5
8	7,7	8,5	7,9	9,4	10,9	8,7	6,7	6,5	5,6	7,7	13,0	11,1
9	8,2	8,5	10,3	8,2	11,1	8,1	6,5	6,8	6,8	7,8	10,7	12,7
10	8,6	9,4	10,3	9,1	9,9	7,2	6,2	6,4	8,6	6,1	8,3	12,3
11	10,4	9,0	8,6	9,1	8,0	7,8	5,6	6,3	7,7	6,9	8,0	10,4
12	10,7	7,9	8,4	8,1	7,4	6,2	6,6	7,0	6,9	7,8	9,6	9,8
13	9,7	7,9	9,9	9,0	7,4	6,7	7,4	7,2	6,3	7,3	10,6	8,5
14	9,4	9,0	8,8	11,7	7,6	6,7	9,3	7,1	6,3	7,1	11,6	8,0
15	11,9	7,7	8,8	12,3	8,7	6,5	9,5	5,3	7,0	6,8	12,1	8,5
16	13,4	8,7	8,9	10,5	9,1	6,4	8,0	5,2	7,1	7,1	10,4	8,1
17	12,3	9,1	9,4	8,3	9,3	6,4	6,3	5,4	7,3	7,1	9,9	8,4
18	13,9	9,1	8,5	7,4	9,6	6,8	6,7	5,5	7,3	7,2	9,4	7,8
19	13,5	8,2	6,8	7,0	9,0	7,7	6,5	5,7	6,4	7,6	9,7	7,7
20	13,5	8,6	8,3	7,8	6,6	8,5	6,4	6,8	6,2	9,0	9,9	7,7
21	14,6	8,6	7,0	7,2	7,0	8,3	6,6	7,3	6,3	13,4	10,1	9,8
22	11,8	7,3	8,4	7,3	7,6	7,0	6,8	7,4	6,6	11,7	13,3	10,1
23	11,0	7,9	7,8	7,6	6,9	6,3	7,2	6,9	7,8	10,1	13,9	10,1
24	12,4	7,8	7,6	8,8	8,0	5,8	7,2	7,7	7,6	7,5	11,7	9,5
25	12,4	7,7	8,0	9,1	6,9	5,8	6,2	9,3	7,2	8,7	9,8	9,7
26	13,4	7,4	8,1	8,1	7,2	6,4	6,3	8,9	7,5	10,8	11,4	9,1
27	11,1	7,4	7,3	8,0	8,1	6,2	6,8	8,7	7,2	11,8	10,7	9,8
28	10,7	8,0	9,3	9,2	7,6	6,6	6,6	7,2	6,8	10,7	10,3	9,2
29	10,6		9,4	9,5	6,5	6,4	7,3	8,4	6,5	9,2	10,5	9,9
30	10,6		8,0	6,9	6,3	6,7	7,3	8,1	6,8	10,4	10,3	9,2
31	9,5		7,4		7,2		7,1	6,8		10,9		9,6
Média	10,6	8,6	8,6	8,1	7,6	6,7	6,7	7,1	6,9	7,7	10,4	9,8

Como se pode verificar pelos valores apresentados nas tabelas, não existe uma grande discrepância entre os valores obtidos nas duas estações meteorológicas. Contudo, é de extrema importância haver este cruzamento de dados para que sejam eliminados todos os tipos de erros subjacentes a estas medições.

Relativamente à ondulação, a zona do Cabo da Roca apresenta uma ondulação média anual de 2 m, que é ligeiramente superior à média anual verificada na zona do Baleal, que é de

1,9 m. Os valores obtidos são muito aproximados, podendo afirmar-se que os dois locais apresentam aproximadamente a mesma altura média de onda. No entanto, era de esperar que a altura média de onda na zona do Baleal fosse superior à do Cabo da Roca, isto porque a zona do Baleal se situa mais a norte, e a densidade energética aumenta à medida que avançamos para norte ao longo da costa. Como estes dois locais se encontram afastados aproximadamente de 70 km de costa vamos considerar esta diferença irrelevante, isto porque esta distância a níveis náuticos é bastante reduzida (1 milha náutica \approx 1852 metros). Em termos de período, os valores obtidos nas duas estações são bastante diferentes como se pode observar da comparação da Tab. 2.5 com a Tab. 2.7. Na zona do Cabo da Roca os valores médios mensais do período apresentam-se todos acima dos 10 segundos, enquanto na estação do Baleal apenas em dois meses do ano se verificaram valores de período acima dos 10 segundos. Relativamente à média anual, o Cabo da Roca apresenta um valor de exactamente 11 segundos, que é superior, em aproximadamente 3 segundos, ao valor registado na zona do Baleal que é de 7,9 segundos. Apesar dos níveis de ondulação serem ligeiramente superiores no Cabo da Roca, o período das ondas verificado na zona do Baleal é bastante inferior ao do Cabo da Roca, o que nos leva a concluir que os níveis de densidade energética por unidade de tempo são superiores na zona do baleal, devido ao seu reduzido período de onda. Os gráficos resultantes dos valores mostrados na Tab. 2.6 e na Tab. 2.7 são apresentados na Fig. 2.8 e Fig. 2.9 respectivamente: O gráfico da Fig. 2.10 mostra a curva da frequência mensal, para o Baleal.

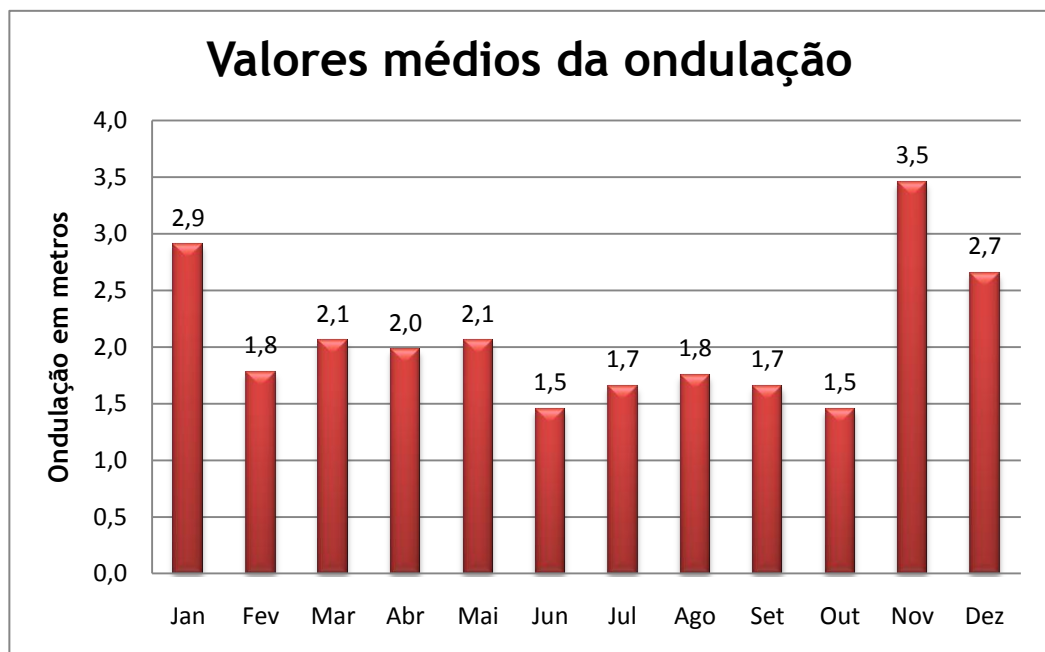


Fig. 2.8 Valores médios mensais da ondulação.

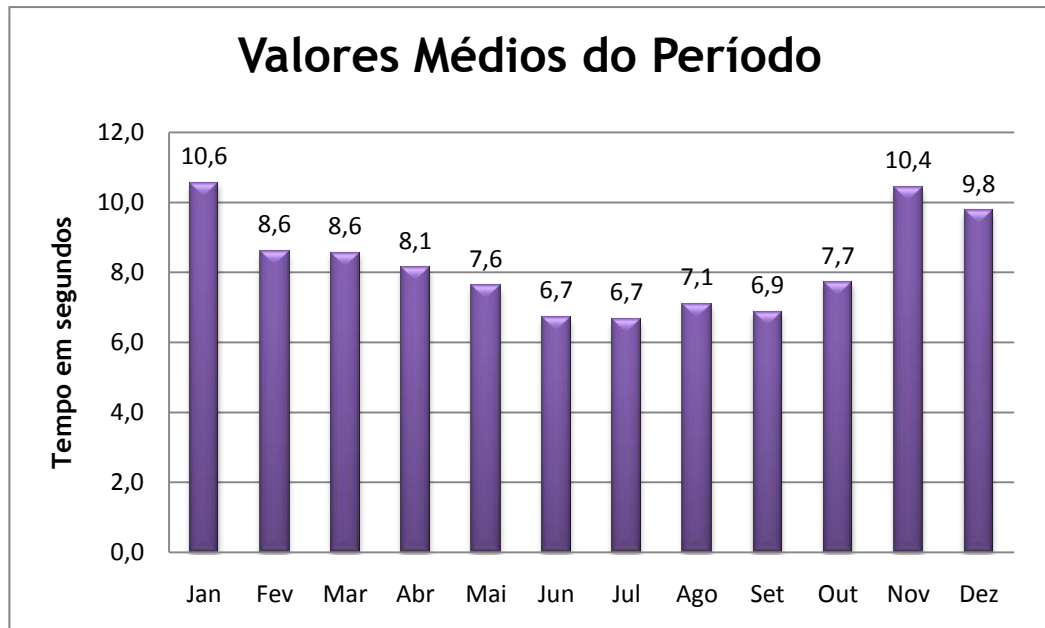


Fig. 2.9 Valores médios mensais do período.

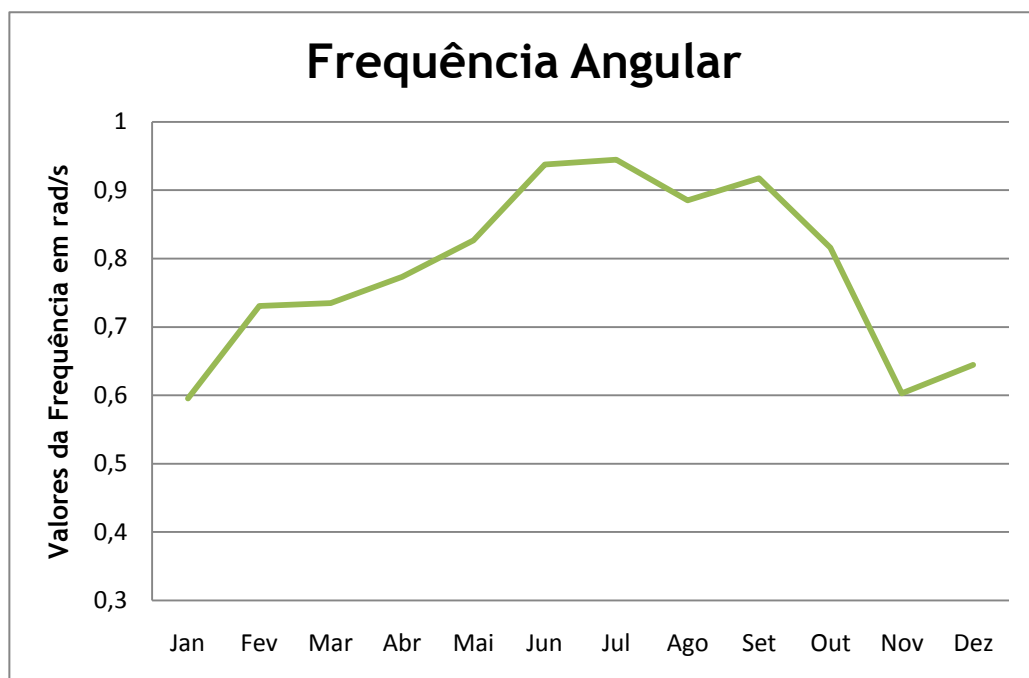


Fig. 2.10 Valores médios mensais da frequência.

Ao compararmos a Fig. 2.7 com a Fig. 2.10 é fácil de perceber que na zona do Baleal os valores médios da frequência são mais elevados do que no Cabo da Roca. Este facto era de todo previsto já que os maiores valores de frequência estão inversamente relacionados com os valores do período, ou seja, para os menores valores de período vamos obter os maiores valores de frequência.

Com todos estes factos pode-se concluir que a zona do Baleal seria o local mais propício para uma futura instalação de dispositivos de geração de energia. Esta escolha deve-se em grande parte ao facto da frequência ser mais elevada no Baleal, o que implica directamente maiores velocidades de trabalho para os geradores.

CAPÍTULO

3

Tecnologias existentes e tendências

Neste capítulo é feita uma descrição da caracterização das tecnologias de extracção da energia das ondas, fazendo-se uma breve descrição das mais “importantes”.

Estas descrições são acompanhadas por algumas imagens para uma melhor apreensão e conhecimento dos sistemas descritos.

Neste capítulo são também descritos os princípios básicos dos sistemas para a conversão da energia das ondas e os princípios da formação das ondas do mar.

3.1 Conceitos básicos sobre as tecnologias de extracção de energia das ondas

As ondas são geradas pelo vento que passa sobre a superfície do mar. Enquanto as ondas se propagam mais lentamente do que a velocidade do vento, mesmo por cima das ondas há uma transferência de energia do vento para estas. As duas diferenças de pressão de ar entre o barlavento e sotavento da crista da onda, assim como a fricção provocada na superfície da água pelo vento, causam assim o crescimento das ondas [14].

A altura das ondas é determinada pela velocidade do vento, o tempo que este sopra e também pela profundidade e topografia do fundo do mar (que pode concentrar ou dispersar a energia das ondas).

No geral, as ondas maiores são mais poderosas, mas o poder das ondas também é determinado pela sua velocidade, comprimento e densidade da água.

De uma forma muito simples as ondas podem ser representadas aproximadamente como ondas sinusoidais, expressas por uma amplitude A e um período T , sendo a superfície livre η dada por:

$$\eta = A \cos(\omega t - kx) \quad (3.1)$$

Em que $\omega = 2\pi/T$ é a frequência da onda, t é o tempo, x o ponto do espaço na direcção de propagação da onda e $k = 2\pi/L$ o número de onda (L é o comprimento de onda), relacionado com a frequência e a profundidade da água no local, h . Assim:

$$k = \frac{\omega^2}{g} \cotg(kh) \quad (3.2)$$

Em que g é a aceleração da gravidade. Ao dobro da amplitude é chamada a altura da onda, $H = 2h$. Ao propagar-se, a onda transporta consigo um fluxo de energia que é proporcional ao período da onda e ao quadrado da sua amplitude [13]. Como se pode verificar pela equação 3.2 existe uma relação entre a frequência e o comprimento de onda, e deste modo existe também uma relação entre o comprimento da onda e a dimensão do mecanismo de absorção, para que o mecanismo seja eficiente.

3.2 Classificação das tecnologias

Desde o início do desenvolvimento de possibilidades para extracção da energia das ondas até à actualidade foram surgindo várias tecnologias capazes de fazer frente a este grande desafio. Actualmente não existe concorrência entre as várias empresas que estão envolvidas nos projectos relacionados com esta energia, mas esta situação poderá mudar num futuro muito próximo, visto que existe um crescente interesse em explorar este recurso, que certamente irá fazer aparecer um conjunto de soluções para a exploração da energia das ondas.

Visto que existe uma grande quantidade de dispositivos, é importante fazer uma distinção entre os diferentes tipos de tecnologias. Esta classificação pode ser feita tendo em consideração a potência dos dispositivos, a distância à costa e o modo de conversão da energia das ondas. O critério de classificação maioritariamente utilizado pelos investigadores prende-se com a distância à costa, podendo-se agrupar os dispositivos da seguinte forma [9]:

- i. Dispositivos costeiros (nomenclatura inglesa: shoreline);
- ii. Dispositivos próximos da costa (near-shore);
- iii. Dispositivos afastados da costa (offshore).

Os sistemas near-shore e offshore apesar de serem bastante equiparáveis, existe uma diferença crucial entre eles que é a profundidade da água onde são utilizados. Os sistemas near-shore são normalmente instalados em locais onde a profundidade é inferior a 20 m, e os dispositivos são assentes no fundo do mar. Por sua vez os sistemas off-shore são instalados em locais com profundidades na ordem dos 50 m, e neste caso os dispositivos são normalmente flutuantes. Não se pode esquecer que a uma profundidade de 50 m o fluxo energético das ondas é superior ao das zonas com profundidades que rondem os 20 m.

Em relação aos dispositivos costeiros estes apresentam vantagens significativas em relação aos outros dois tipos, nomeadamente em termos de facilidade de acesso e ausência de amarrações, contudo apresentam alguns inconvenientes relativamente às restrições a nível da localização, exigindo locais com boa exposição e profundidade, implicam maior impacto ambiental a nível visual, e os níveis de energia obtidos são relativamente reduzidos, devido aos efeitos dissipativos da energia por rebentação e atrito com o fundo do mar [13].

Um outro tipo de classificação, já referido anteriormente, tem em consideração a forma como o dispositivo converte a energia das ondas. Assim podem-se considerar três tipos de dispositivos [9]:

- i. Coluna de água oscilante, CAO (nomenclatura Inglesa: OWC - Oscilating Water Column);
- ii. Corpos flutuantes, podendo ser de absorção pontual (Point absorbers) ou progressivos (Surging devices);
- iii. Galgamento (Overtopping devices).

Ambas as classificações são coerentes, sendo assim indiferente o uso de uma ou outra. Contudo, neste trabalho optou-se por adoptar a primeira que é a mais comumente utilizada.

3.3 Dispositivos costeiros

Os dispositivos costeiros são normalmente instalados directamente na costa ou são apenas fixos nela, pelo que apresentam a vantagem de uma manutenção e instalação mais fáceis. Em adição, estes sistemas não necessitam de ancoradouros de águas profundas e grandes extensões de cabos eléctricos subaquáticos. Apesar destas vantagens, o regime energético das ondas nestas zonas é muito reduzido comparado com o das zonas mais profundas. Esta redução de energia está associada às forças de atrito existentes entre as ondas e o fundo do mar e também devido à dissipação da energia na rebentação das ondas. Parte deste problema pode ser resolvido com uma boa escolha do local, isto porque, existem pontos onde a energia é concentrada naturalmente; estes pontos são referenciados na literatura Inglesa como “hot spots” [16]. Além disso, a implantação desses sistemas poderia ser limitado por requisitos referentes à geologia costeira, intervalo das marés, preservação da paisagem costeira, etc.

3.3.1 Dispositivo de Coluna de água Oscilante (CAO)

O dispositivo de coluna de água oscilante consiste basicamente de uma estrutura oca de betão ou aço, que está parcialmente submersa e está aberta para o mar abaixo da

superfície livre da água do mar, o que faz com que o ar fique preso entre a superfície do mar e a estrutura do dispositivo (Fig. 3.1). A geração de energia eléctrica neste dispositivo é feita em duas fases, primeiro a onda entra na estrutura e obriga o ar aprisionado a passar por uma turbina, em segundo, quando a onda se retira, o nível da água baixa provocando uma depressão que faz com que o ar circule na direcção contrária à anterior. O movimento do ar é usado para accionar uma turbina de ar acoplada a um gerador eléctrico. A turbina pode ser direccional sendo neste caso necessário recorrer a válvulas para fazer a rectificação do ar, de modo a que a turbina rode sempre no mesmo sentido, quer a onda se aproxime quer a onda se afaste. Para evitar estas válvulas é comumente utilizada a turbina Wells que sendo autorectificadora dispensa o sistema de válvulas. Embora não atinja rendimentos tão altos, tem a vantagem de permitir uma velocidade de rotação elevada com velocidades de escoamento do ar relativamente baixas. Isto torna possível o seu acoplamento directo ao gerador sem o recurso a engrenagens que encareceriam o sistema e o tornariam menos fiável.

Esta tecnologia foi uma das mais investigadas até aos dias de hoje, e têm vindo a ser construídos vários protótipos ao longo dos anos, nomeadamente na costa da Noruega, China, Reino Unido (LIMPET) e Portugal (ilha do Pico), sendo estas últimas as mais importantes.

A central LIMPET (Land Installed Marine Power Energy Transmitter) (Fig. 3.2) é um dispositivo de CAO desenvolvido pela Wavegen Ltd na Irlanda

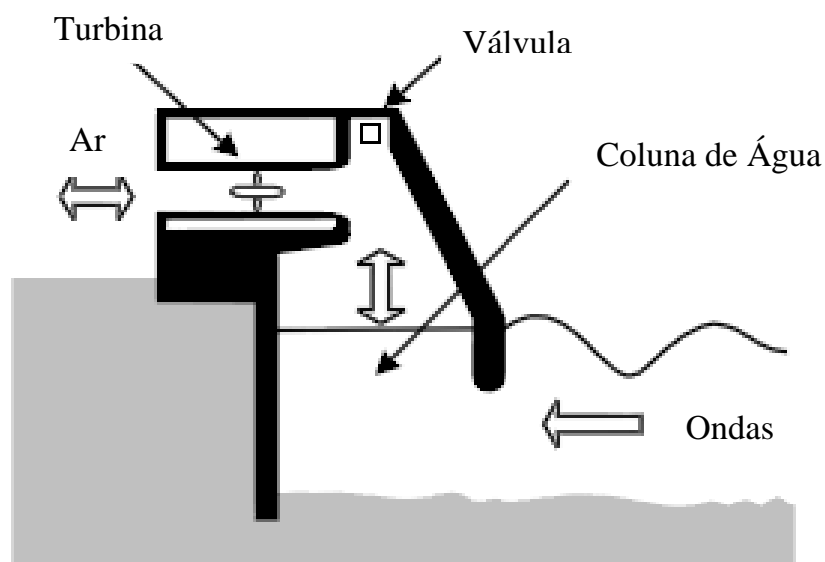


Fig. 3.1 Dispositivo de Coluna de Água Oscilante.[1]



Fig. 3.2 Limpet CAO.

[www.wavegen.com]

e pela Universidade de Belfast no Reino Unido. Este dispositivo está instalado na Escócia, e tem uma potência de 500 kW. Este é constituído por duas câmaras e duas turbinas de Well's, cada uma delas acoplada a um gerador de indução de 250 kW, e está ligada à rede eléctrica.

A central piloto europeia da Ilha do Pico (Fig. 3.3) é um bom exemplo de uma central costeira de CAO. A concepção desta central de 400 kW foi inteiramente portuguesa, assim como o fornecimento das componentes, à excepção do equipamento mecânico. Estiveram envolvidos no projecto e construção desta central o Instituto Superior Técnico (responsável científico do projecto comunitário associado), a EDP, a EDA, a Profabril (projecto, coordenação e fiscalização da obra de engenharia civil), a PROET (coordenação e fiscalização do equipamento), a EFACEC (fornecimento do equipamento eléctrico e electrónico), a Marques Lda (construção civil) e o INETI (caracterização do clima de ondas e sistema de aquisição de dados). O fornecimento do equipamento mecânico esteve a cargo da empresa britânica ART [13].

A central encontra-se assente no fundo do mar, em águas com aproximadamente 8 m de profundidade, com uma secção em planta de dimensões interiores de 12 x 12 m², ao nível médio das águas do mar [19]. A parede frontal apresenta uma inclinação de 30° em relação à vertical. A central foi inserida numa reentrância da costa, apoiada num rochedo do lado poente, tendo sido construída no local ao abrigo de uma protecção provisória [20].

Os testes na central iniciaram-se no verão de 1999 e prolongaram-se até 2001 com muitas interrupções pelo meio devido em grande parte a defeitos do equipamento mecânico auxiliar. Actualmente a central não se encontra em funcionamento devido à necessidade de realização de reparações, devido aos estragos provocados pelo mar.



Fig. 3.3 Central piloto europeia da Ilha do Pico [http://1.bp.blogspot.com/_HCI8G38mQgs/SMg_-No-ohl/AAAAAAAAAbg/fd09kIVbTYE/s1600-h/central.jpg]

3.3.2 Dispositivo de Pêndulo

O dispositivo de pêndulo (Fig. 3.4) consiste numa caixa rectangular, que está aberta para o mar ao longo de uma face. É fixada uma placa nas sua extremidades de modo a que esta balance como um pêndulo, para que quando as ondas embaterem na placa provoquem um movimento oscilatório, para a frente e para trás. Este movimento é depois usado para accionar uma bomba hidráulica que por sua vez vai accionar um gerador. O primeiro protótipo de 15 kW foi testado em Muroran, Japão.

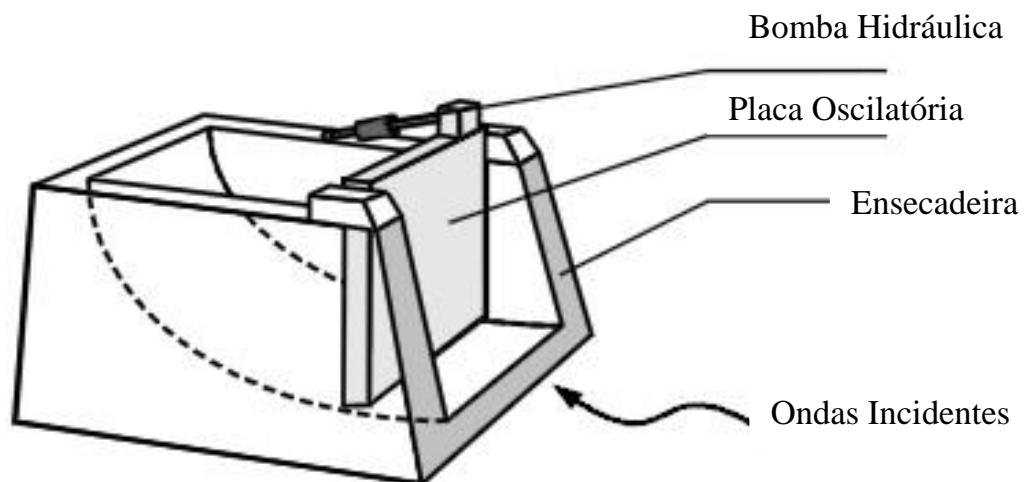


Fig. 3.4 Dispositivo de Pêndulo.[3]

3.3.3 Energetech OWC

A empresa Energetech tem vindo a desenvolver nestes últimos anos uma nova tecnologia relacionada com o sistema de coluna de água oscilante. Este novo dispositivo representa uma evolução no design do sistema de coluna de água oscilante fundamentalmente em duas áreas [9]:

- A perda gradual da energia das ondas com o aproximar da costa é neste design compensada com utilização de um grande reflector parabólico de 40 m, que reflecte as ondas para a câmara do sistema de CAO com apenas 10 metros de largura, situada no foco da parábola (Fig. 3.5). Esta evolução representa um aumento do custo da tecnologia na ordem dos 30%, que no entanto são compensados com um aumento de rendimento superior a 300% [3].
- A Energetech desenvolveu um novo tipo de turbina, que usa um mecanismo de passo variável para fazer face à mudança de direcção do fluxo de ar (Fig. 3.6). Os testes iniciais realizados indicaram que este tipo de turbina tem uma maior potência de pico e uma maior potência média do que a turbina de Wells.

O primeiro protótipo com este tipo de tecnologia está a ser actualmente construído no porto Kembla, a sul de Sydney, Austrália. Está prevista para esta central uma potência

de 300 kW [9]. Está também a ser planeada a instalação de mais dois dispositivos para a Espanha e Colômbia Britânica, cada um com mais de 2 MW de potência.



Fig. 3.5 Desenho virtual do sistema de coluna de água oscilante da Energetech.
[<http://www.energetech.com/>]

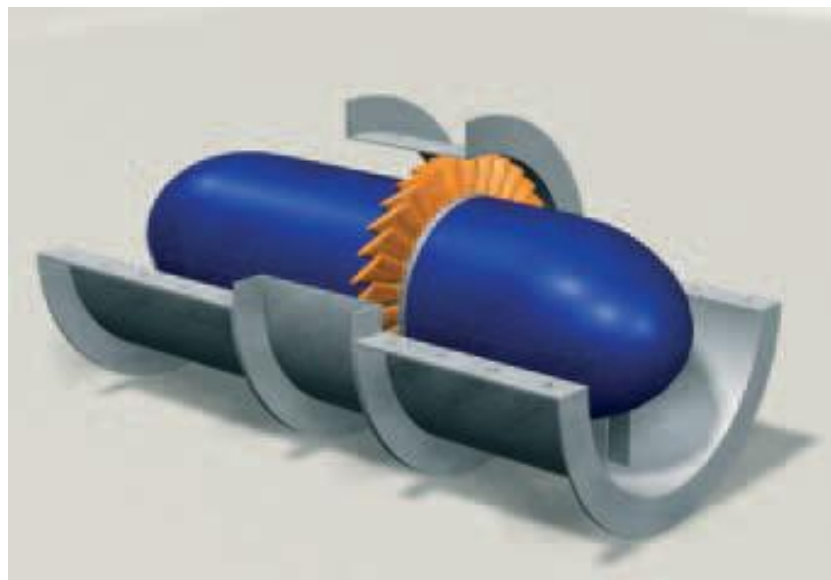


Fig. 3.6 Esboço da turbina de passo variável desenvolvida pela Energetech
[<http://www.energetech.com/>]

3.4 Dispositivos próximos da Costa

Os dispositivos próximos da costa podem ser inseridos no grupo dos dispositivos costeiros, tendo em conta que esta distinção é feita com base na faixa de profundidades onde o dispositivo é instalado. Estes dispositivos podem até vir a reforçar o seu objectivo inicial, podendo também desempenhar um papel importante na protecção da costa. O dispositivo OSPREY (Ocean Swell Powered Renewable Energy) e o CEO Douro (Central de Energia das Ondas) apesar de serem tecnologias de coluna de água oscilante podem ser englobados nesta categoria [9].

3.4.1 OSPREY

A empresa Wavegen tem vindo a desenvolver vários designs para um sistema de CAO chamado OSPREY, que incorpora uma turbina eólica (Fig. 3.7). O trabalho inicial foi realizado pela Applied Research and Technology (ART- agora Wavegen), em conjunção com o grupo escocês PLC Hydro-Electric e a Universidade Queen's de Belfast.

O primeiro protótipo (OSPREY1) (Fig. 3.8) foi lançado, rebocado e instalado perto de Dounreay na Escócia. Contudo, o dispositivo entrou em falha estrutural antes de ser instalado em segurança. Um novo projecto foi desenvolvido (OSPREY2), no qual grande parte da estrutura de aço foi substituída por betão. Esta mudança vai permitir avaliar perspectivas técnicas tanto para o uso do betão como do aço, antes de serem avaliadas as perspectivas económicas. O uso do betão é preferido porque oferece maior potencial para a redução de custos, através de técnicas de construção alternativas [21].

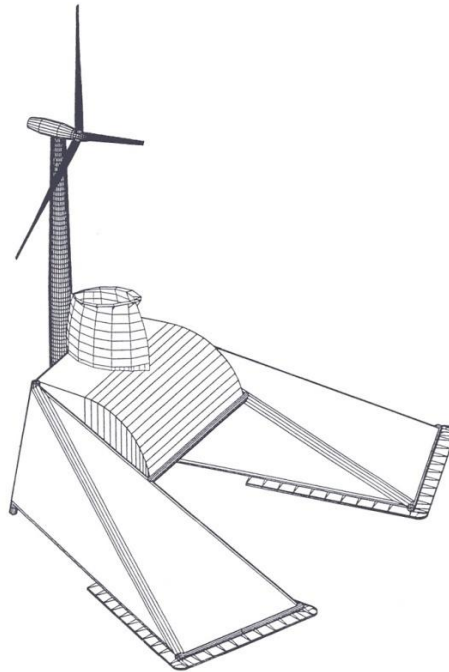


Fig. 3.7 Modelo do OSPREY com a introdução do gerador eólico.

[<http://www.wavegen.co.uk/index.html>]

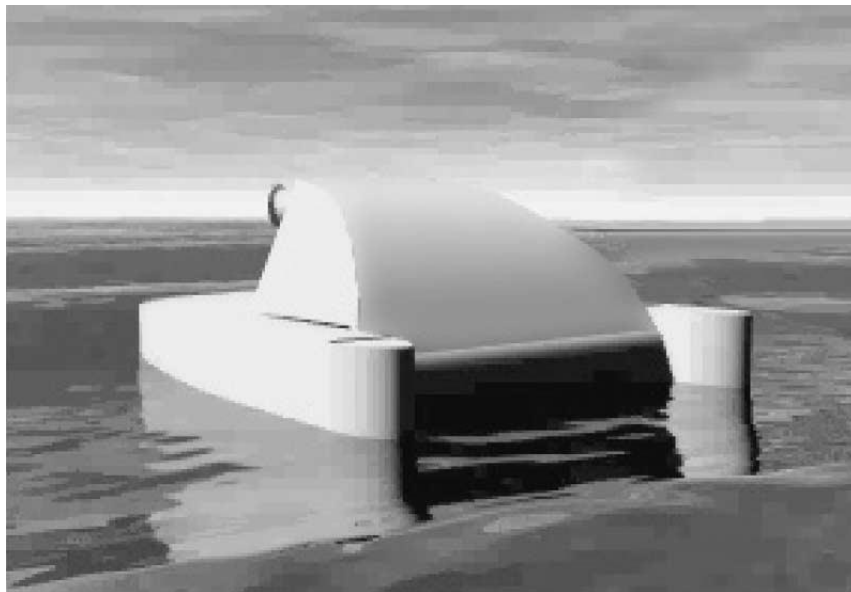


Fig. 3.8 Ilustração do primeiro protótipo da OSPREY1.

[<http://www.wavegen.co.uk/index.html>]

3.4.2 CEO Douro

O centro de energia das ondas do douro é fruto da iniciativa da Consulmar, em conjunto com o IST e a EDP. Este projecto tem em vista a implementação de uma central (Fig. 3.9 e Fig. 3.10) a integrar na cabeça do molhe norte da foz do rio Douro.

Este projecto foi apoiado pela AdI - Agência de Inovação e pelo Ministério dos Transportes, através do IPTM - Instituto Portuário e dos Transportes Marítimos.

A central da foz do douro terá uma potência instalada de cerca de 1 MW e prevê-se que possa produzir no final do primeiro ano de funcionamento 1,2 milhões de kWh de energia, o equivalente ao consumo de 500 a 600 famílias.

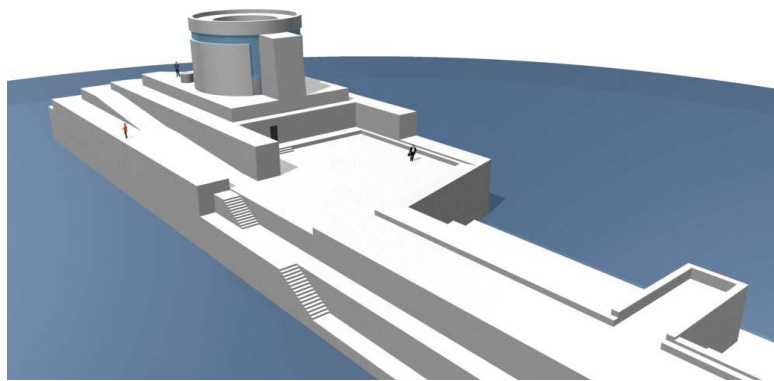


Fig. 3.7 Imagem virtual da futura central de energia das ondas do Douro

[António F. O. Falcão, Seminário sobre a Física e a Energia, Lisboa, 21 de Novembro de 2005]

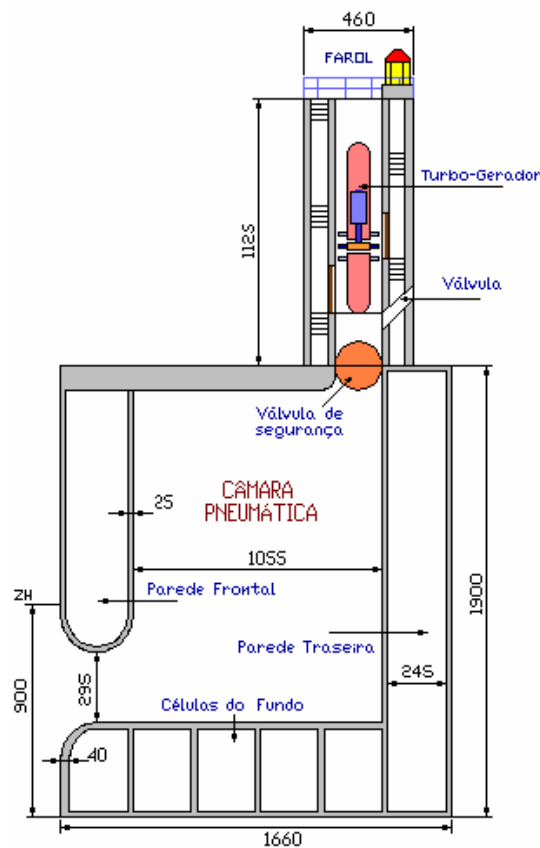


Fig. 3.8 Esquema do sistema a ser utilizado na central do Douro.[1]

3.5 Dispositivos afastados da costa

Esta categoria de dispositivos explora as ondas com maior regime energético, em profundidades superiores a 40 m [3]; estes são também mencionados como dispositivos de terceira geração. Têm sido estudados dispositivos muito variados, sem que pareça ter surgido um tipo que domine os restantes como o mais vantajoso e promissor. No geral, o principal órgão destes sistemas é um corpo oscilante flutuante localizado à superfície ou perto dela, para que seja extraído o máximo de energia possível, e mais raramente utilizando o corpo totalmente submerso. Estes dispositivos de extracção podem ainda ser compostos por turbinas a ar, ou equipamentos mais caros e sofisticados (sistemas óleo - hidráulicos, motores eléctricos lineares, etc.) [22]. O sistema AWS (Archimedes Wave Swing), com tecnologia essencialmente holandesa, é um dos raros que atingiram a fase de construção de protótipo. Outro exemplo já em fase avançada é o Pelamis, sistema semi-submerso com uma estrutura composta por segmentos cilíndricos flutuantes com

articulações onde se faz o aproveitamento da energia produzida pela oscilação dos cilindros com o passar das ondas. Existem outros sistemas ainda em fase de estudo como o McCabe Wave Pump, o Floting Wave Power Vessel, o Wave Dragon, o Salter Duck, entre outros. Serão descritos com detalhe alguns destes sistemas.

3.5.1 Archimedes Wave Swing

AWS Teamwork Technology consiste numa câmara cilíndrica cheia de ar (o "Flutuador"), que pode mover-se verticalmente em relação ao cilíndrico 'base', que é fixado ao fundo do mar, a uma profundidade de água suficiente para garantir que o flutuador está abaixo das ondas (Fig. 3.11). O interior dos dois corpos é preenchido por ar sob pressão, para que na ausência de ondas, a pressão do ar no interior produz uma força ascendente sobre o flutuador que equilibra o seu peso e a força resultante da pressão hidrostática produzida pela água exterior [13].

A passagem de uma onda vai fazer com que a pressão exterior varie, sendo mais elevada nas cristas e menor nas cavas, esta alternância de pressões vai provocar o movimento oscilatório vertical do flutuador em relação à base. O ar pressurizado no interior do flutuador tem o efeito de uma mola, levando o flutuador à posição inicial [21].

O movimento provocado pela passagem das ondas é utilizado para accionar um gerador de indução linear que liga as duas partes do AWS; assim a energia mecânica é directamente convertida em energia eléctrica, podendo assim ser injectada na rede eléctrica. Com um diâmetro de 10 a 15 m, muito inferior ao comprimento de onda (cerca de 150 m), o AWS pode pois ser considerado um dispositivo de absorção pontual [9].

O AWS está submerso a pelo menos 6 metros de profundidade e, por conseguinte, evita as elevadas pressões das tempestades a que outros dispositivos estão sujeitos. Isso reduz os custos de ancoragem e os riscos de danos. Outra vantagem da submersão é a eliminação do impacto visual. O AWS não contém equipamento rotativo de alta velocidade ruidoso. Assim, o seu impacto ambiental é bastante reduzido. O impacto visual também é nulo.

Em 2004 uma central piloto com uma potência de 2 MW à escala de 1:2 (Fig. 3.12), foi submersa ao largo da costa portuguesa, nomeadamente na Póvoa de Varzim (a 6 km da costa e 43 m de profundidade). A estrutura foi construída na Roménia sendo posteriormente rebocada para montagem final em Viana do Castelo.

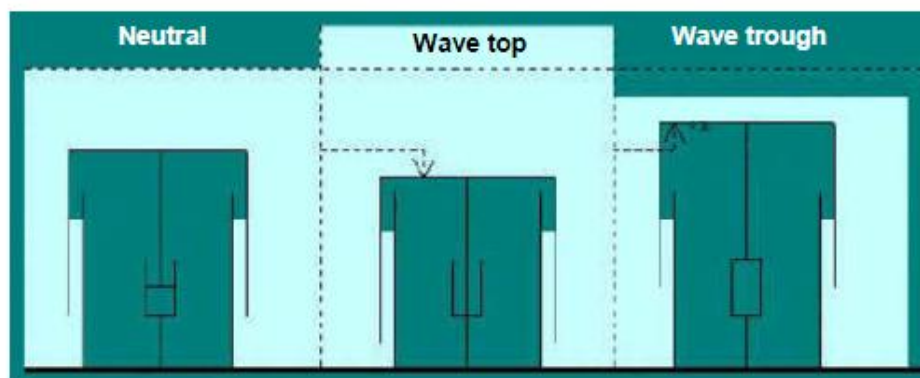


Fig. 3.9 Esquema de funcionamento do sistema AWS

[<http://www.wave-energy.net/>]

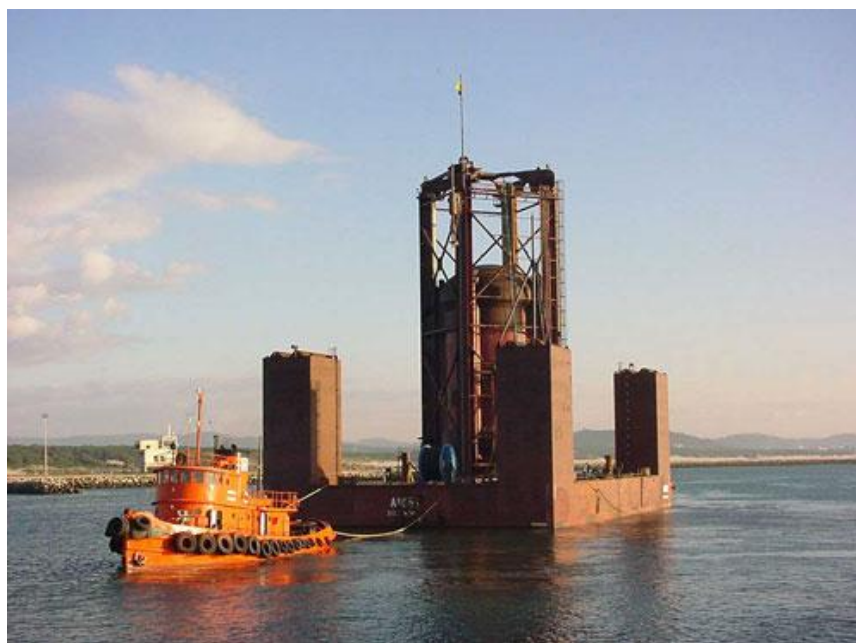


Fig. 3.10 Fotografia da central piloto AWS no porto de Viana do Castelo

[<http://pt.wavec.org/index.php/16/monitorizao/>]

3.5.2 Pelamis

O conversor de energia das ondas Pelamis P-750 é o resultado de um detalhado programa de testes e modelação conduzido pela Pelamis Wave Power Ltd (anteriormente conhecida como Ocean Power Delivery Ltd).

A Pelamis é um sistema de conversão de energia do tipo progressivo [9], isto porque se trata de um sistema alongado com um comprimento proporcional ao comprimento de onda. Este dispositivo é instalado segundo a direcção de propagação da onda, gerando assim energia de um modo progressivo com o passar das ondas. O Pelamis é uma estrutura semi-submersa composta por secções cilíndricas, unidas por juntas articuladas onde se encontra um módulo de conversão de energia.

Os movimentos nas articulações provocados pelas ondas são transmitidos para cilindros hidráulicos que estão ligados às articulações, e estes por sua vez enviam o óleo a alta pressão para motores hidráulicos (Fig. 3.13). Estes motores hidráulicos estão ligados a geradores eléctricos que produzem energia eléctrica. A energia gerada em todas as juntas é depois entregue a um único cabo que está ligado à rede eléctrica [13].

Cada Pelamis tem três módulos de conversão de energia (Fig. 3.14), cada um com uma potência de 250 kW o que perfaz um total de 750 kW, sendo o seu comprimento igual a 120 m à escala real, e com um diâmetro externo de 3,5 m [9].

O Pelamis foi desenhado para ser instalado em regiões com 50-70 m de profundidade (tipicamente 5-10 km da costa) onde os climas de ondas de águas profundas (mais poderosos) podem ser aproveitados.

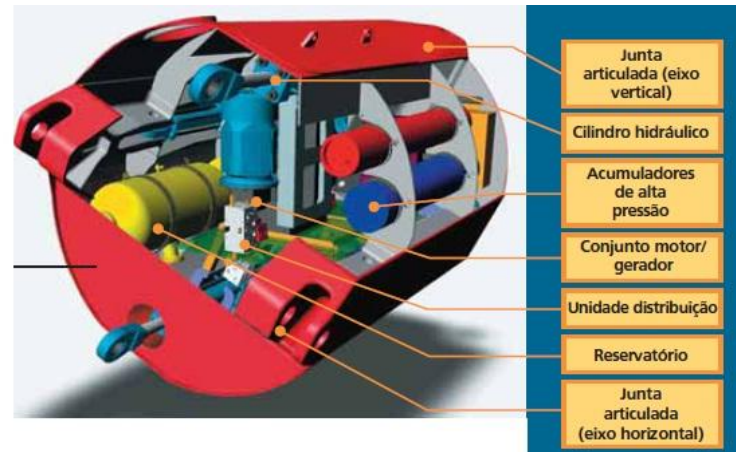


Fig. 3.11 Vista interna do módulo de conversão de energia.

[http://www.pelamiswave.com/media/pelamis_port_for_web.pdf]



Fig. 3.12 Foto da Pelamis ao largo da costa Portuguesa na Aguçadoura.

[www.photo400.com/howto/index.php?key=Aguçadoura]

3.5.3 Wave Dragon

O Wave Dragon é um dispositivo de conversão de energia das ondas, podendo ser considerado como um dispositivo de galgamento offshore [9]. O desenvolvimento deste dispositivo está a ser efectuado pela Wave Dragon ApS14 e um consórcio internacional que engloba empresas e instituições da Dinamarca, Reino Unido, República da Irlanda, Suécia, Áustria e Alemanha. O primeiro protótipo ligado à rede está actualmente instalado em Nissum Bredning, Dinamarca. Desde então têm sido realizados testes para determinar o desempenho, viabilidade e potência produzida com diferentes estados do mar. A ideia básica do Wave Dragon é utilizar os princípios bem apreendidos e provados das centrais hidroeléctricas e aplicá-los numa plataforma flutuante offshore.

Tal como nas centrais hidroeléctricas, o Wave Dragon baseia-se na acumulação de água como o seu princípio de funcionamento (Fig. 3.15). Esta água é acumulada num reservatório sobrelevado relativamente ao nível médio da superfície do mar. A geração de energia do Wave Dragon é baseada na energia potencial da água que galga as rampas e fica temporariamente presa no reservatório. Este reservatório suporta aproximadamente 8000 m³ de água que depois é expulsa através de turbinas. Este dispositivo está equipado com turbinas hidráulicas Kaplan (Fig. 3.16) de baixa queda que individualmente iniciam e terminam a turbinagem, de modo a facilitar uma produção de energia o mais suave possível.

O protótipo instalado na Dinamarca desde 2003 (Fig. 3.17), tem uma potência máxima de 20 kW e encontra-se localizado numa zona protegida do mar do norte, a uma profundidade de 6 m e toda a estrutura pesa no total 260 toneladas, o reservatório tem as dimensões de 26 m x 17 m x 3.6, e à entrada dos concentradores parabólicos a envergadura é de 58 m.

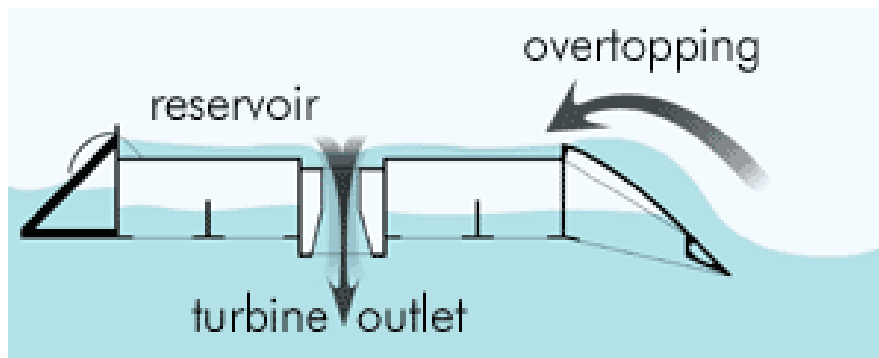


Fig. 3.13 Ilustração do princípio de funcionamento do Wave Dragon. [<http://www.wavedragon.net/>]



Fig. 3.14 Turbina de Kaplan durante os testes na Universidade Técnica de Munique. [<http://www.wavedragon.net/>]



Fig. 3.15 Protótipo do Wave Dragon instalado na Dinamarca.

[<http://www.wavedragon.net/>]

3.5.4 Mighty Whale

A Mighty Whale (Fig. 3.18) é um dispositivo baseado no sistema de coluna de água oscilante, mas para operar como sistema offshore.

Este dispositivo desenvolvido pela JAMSTEC (Japan Marine Science & Technology Center) para operar ao largo da costa tinha como finalidade o fornecimento de energia às pisciculturas instaladas nas águas calmas que ficariam a jusante dos dispositivos. Outro objectivo deste sistema era a purificação da água do mar, e permitir actividades de recreio nas zonas de águas tranquilas criadas pelo dispositivo [13].

O protótipo construído foi ancorado e testado a uma profundidade de 40 m perto da baía de Gokasho, onde esteve a operar entre 1998 e 2003, com uma potência máxima prevista de 110 kW [23].

O sistema de ancoragem do Mighty Whale foi concebido para suportar 50 anos de ventos e tempestades. No entanto, o dispositivo mostrou uma eficiência muito baixa, tendo sido depois desmantelado.



Fig. 3.16 Lançamento do Mighty Whale à água. [<http://www.jamstec.go.jp/jamstec/MTD/Whale/>]

3.5.5 AquaBuOY

O AquaBuOY (Fig. 3.19) é um dispositivo do tipo de absorção pontual que está a ser desenvolvido pela AquaEnergy Group, Ltd. Este é baseado em duas tecnologias já existentes: o dispositivo de absorção pontual desenvolvido pela empresa Interproject Service (IPS) e o dispositivo designado por *Hose-Pump* desenvolvido pela Technocean, ambas empresas suecas [13].

O AquaBuOY é constituído por quatro elementos essenciais:

- Bóia;
- Tubo de aceleração;
- Pistão;
- Hose-Pump.

A hose-Pump é uma mangueira de borracha reforçada com aço, cujo volume interno é reduzido quando o tubo é esticado, agindo assim como uma bomba. A água do mar pressurizada é subsequentemente expelida para um acumulador de alta pressão, que por sua vez alimenta uma turbina que acciona um gerador.

O tubo de aceleração é um cilindro oco vertical rigidamente montado sob o corpo da bóia. O tubo é aberto em ambas as extremidades para água do mar poder transitar livremente para trás e para frente, forçando o pistão a mover-se, e por sua vez, alargar ou comprimir as mangueiras [21]. Posicionado no ponto médio do tubo de aceleração está o pistão, e um amplo disco de flutuação neutro. Quando a bóia está em repouso, o pistão é seguro no

ponto médio pela tensão equilibrada das duas mangueiras que estão ligadas em lados opostos do pistão, e se estendem até ao topo e fundo do tubo de aceleração (Fig. 3.20).

O AquaBuOY foi um dos oito dispositivos aos quais foram atribuídos contratos no âmbito do programa do Carbon Trust “Marine Energy Challenge” [13].



Fig. 3.17 AquaBuOY em funcionamento em alto mar.
[<http://www.finavera.com/en/wavetech/configuration>]

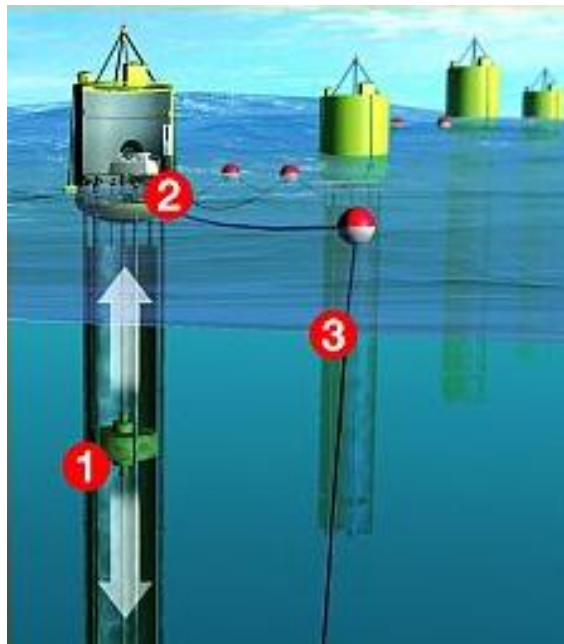


Fig. 3.18 Imagem ilustrativa do sistema AquaBuOY (1-hose-pump;2-bomba;3-cabo de transmissão de energia eléctrica). [www.conti-online.com/]

3.6 Tecnologias de geração linear nos sistemas de conversão de energia das ondas

3.6.1 Conversão da energia mecânica em energia eléctrica

Como já foi visto anteriormente existem diferentes maneiras de classificar os sistemas de conversão da energia das ondas. Uma das maneiras possíveis de classificação é baseada no princípio da sua operação, tal como foi referido em 3.2.

Estes diferentes princípios de operação requerem diferentes sistemas de transformação da energia mecânica em energia eléctrica [25], que são agora identificados:

- Os sistemas de coluna de água oscilante (OWC), como por exemplo a Osprey, têm na sua constituição turbinas a ar que accionam geradores rotativos;
- Os sistemas de galgamento (Wave Dragon) são normalmente constituídos por turbinas hidráulicas que accionam geradores rotativos;

- Os dispositivos articulados de contorno das ondas como a Pelamis, transferem a energia do movimento para cilindros hidráulicos que enviam o óleo a alta pressão para o motor hidráulico que por sua vez acciona um gerador;
- Os sistemas flutuantes ancorados utilizam comumente geradores eléctricos lineares.

Os sistemas com geradores eléctricos lineares só são úteis em aplicações onde o movimento é linear, já que quando existe um movimento de rotação, não fará sentido convertê-lo em movimento linear. Nos sistemas de contorno articulados como a Pelamis também existe uma conversão de energia através de um dispositivo linear (cilindro hidráulico), contudo neste sistema as forças são muito elevadas, enquanto o movimento é bastante baixo (na ordem dos 0,1 m/s) [26]. Para estes sistemas em que predominam elevadas forças e velocidades reduzidas, o uso da energia hidráulica é mais conveniente que o uso de geradores lineares. Nos dispositivos flutuantes ancorados, em que também está presente o movimento linear e velocidades é da ordem dos 1 m/s, existem várias possibilidades para o sistema de conversão de energia como os que são apresentados a seguir:

- Geradores Lineares;
- Caixas de Velocidade que convertem o movimento linear lento, num movimento rotativo com grandes velocidades;
- Sistemas Hidráulicos.

Na maioria das vezes opta-se pelo emprego de geradores lineares já que estes têm vantagens a nível de eficiência e robustez relativamente às outras alternativas.

3.6.2 Características dos Geradores Lineares utilizados nos sistemas de conversão da energia das ondas

Aos geradores lineares são inerentes elevadas forças (dependendo do tamanho do sistema de conversão) e baixas velocidades. O grande entrave à aplicação dos geradores lineares nos sistemas de conversão da energia das ondas é sem dúvida a irregularidade intrínseca ao movimento das ondas.

Em suma, os geradores lineares utilizados nos sistemas de conversão de energia das ondas são dotados de certas características que se tornam muito importantes quanto se procede ao seu dimensionamento e construção, e que são agora referidas:

- Existe uma grande força de atracção entre o estator e o translató que, de certa forma, dificulta o dimensionamento dos rolamentos e das partes mecânicas;
- O entreferro entre o estator e o translató é relativamente elevado porque é muito difícil e dispendioso construir uma estrutura mecânica com distâncias de entreferro bastante reduzidas, isto devido à existência de tolerâncias de construção e maquinação das peças e também devido à dilatação das peças resultante das variações de temperatura, entre outras;
- Devido à irregularidade do movimento das ondas, a variação de velocidade do dispositivo exige a utilização de conversores electrónicos, que permitam a conexão à rede de energia eléctrica, convertendo a tensão de amplitude e frequência variáveis do gerador numa tensão com amplitude e frequência fixas.

Existem vários tipos de geradores lineares que podem ser utilizados nos sistemas de conversão de energia das ondas, de entre eles estão [27]:

- Os geradores lineares de indução;
- Geradores lineares síncronos com excitação;
- Geradores lineares de relutância variável;
- Geradores lineares síncronos de magnetos permanentes.

Apesar de todos estes tipos de geradores poderem ser aplicados nestes sistemas, os geradores de magnetos permanentes são os mais utilizados, visto que são de fácil construção, com uma robustez razoável e com grandes eficiências. Este tipo de gerador é o adoptado no sistema AWS (Fig. 3.21).

Neste trabalho, e tendo como objectivo desenvolvimento de um sistema gerador, direccionam-se as atenções para os geradores lineares de relutância variável comutado. As muitas vantagens da máquina de relutância variável comutada, como sejam a construção robusta, o baixo custo, a robustez em duras condições de exploração, a operação tolerante a falhas do conversor, entre outras, torna este gerador muito atraente para aplicação em sistemas de geração de velocidade variável.

Este tipo de gerador, ainda não utilizado nos sistemas de geração de energia eléctrica a partir das ondas, poderá ser um forte candidato a substituir os geradores de magnetos permanentes. Também, os sistemas electrónicos exigidos para o controlo da operação são cada vez mais estudados e consistentes, viabilizando a sua adopção.



Fig. 3.19 Gerador linear de magnetos permanentes do sistema AWS [26].

3.7 Perspectivas futuras

Passados que foram aproximadamente 40 anos de investigação e desenvolvimento em torno das tecnologias de extracção da energia das ondas, apresentam-se actualmente 8 tecnologias em testes no mar. Além destas, existem ainda mais tecnologias em fase de desenvolvimento, e ainda faltará algum tempo até que estas entrem em fase de testes. Apesar da existência de todas estas tecnologias de conversão da energia das ondas, ainda é muito difícil afirmar que estas poderão ser as ideais para uma produção de energia eficiente, sem que custos elevados lhe sejam inerentes.

A situação atrás referida veio despoletar o interesse do universo empresarial na área das energias renováveis, mais concretamente na energia das ondas do mar. Tem-se verificado o aparecimento de programas e estratégias nacionais para esta área, com o Reino Unido, e em particular a Escócia, a liderar esta incursão, com um conjunto estruturado de medidas dispostas a desenvolverem a tecnologia e a criarem condições para o desenvolvimento de uma nova indústria, que se espera ser responsável por 7000 novos postos de trabalho na Escócia até ao final de 2010 [13].

No Reino Unido foi realizada uma conferência da British Wind Energy Association (BWEA) em 2004, acerca da energia das ondas e marés, onde foi emitido um comunicado da Carbon Trust³, referindo a sua intenção de trabalhar com oito empresas (Clearpower Technologies

³ EMPRESA FUNDADA PELO GOVERNO DO REINO UNIDO, COM O OBJECTIVO DE TENTAR REDUZIR AS EMISSÕES DE CO₂ E INCENTIVAR AS EMPRESAS QUE DESENVOLVEM OS SISTEMAS DE EXTRAÇÃO.

(WaveBob), a Ocean Power Delivery (Pelamis), a SeaVolt Technologies (Wave Rider), a AquaEnergy (AquaBuOY), a Lancaster University (PS Frog), a Evelop (Wave Rotor), a Embley Energy (Sperboy) e a Wave Dragon ApS (Wave Dragon)), com a objectivo de tornar o Reino Unido o líder nas tecnologias de conversão de energia das ondas. O Carbon Trust iria ainda desenvolver estudos complementares, procurando estabelecer "códigos de boa engenharia" para estas e outras tecnologias da mesma natureza [9].

Tal como no resto da Europa, também as empresas portuguesas estão atentas e interessadas neste tipo de energia. Prova disso foi a constituição do Wave Energy Centre - Centro de Energia das Ondas (WEC) em Março de 2003 [13]. O centro de energia das ondas trabalha actualmente com 15 associados, incluindo companhias energéticas, indústria, serviços e três instituições de I&D, de onde se salientam, pela sua importância, a Martifer, a EDP, a Enersis e a EFACEC, o IST e o INETI. No ano de 2009 o centro de energia das ondas esteve ligado a 3 projectos europeus financiados entre eles [24]:

- EquiMar - Equitable Testing and Evaluation of Marine Energy Extraction Devices in Terms of Performance, Cost and Environmental Impact (FP7-RTD); a WavEC liderou a component ambiental;
- Wavetrain2 - People Initial Training Network Programme of the European Union; projecto coordenado pelo WavEC;
- CORES - Components for Ocean Renewable Energy Systems (FP7-RTD) - a WavEC foi responsável pelo desenvolvimento do modelo numérico do sistema de coluna de água oscilante

Tanto Portugal como Inglaterra e Escócia são bons exemplos para o que deve ser feito no resto do mundo a nível do desenvolvimento destas tecnologias.

Há que estar cautelosamente optimista quanto à possibilidade desta tecnologia poder vir um dia a fornecer grandes quantidades de energia.

Este optimismo pode ser suportado com o número de dispositivos que estão perto dos testes de mar ou mesmo aqueles que já estão a ser construídos à escala real. Apesar de haver um conjunto de dispositivos pioneiros nestas tecnologias, apenas os que provarem que são tecnicamente e praticamente viáveis devem ser finalmente instalados a uma grande escala.

CAPÍTULO

4

A Máquina de Relutância Variável Comutada

Neste capítulo apresentam-se alguns conceitos que regem o funcionamento dos motores de relutância variável comutados rotativos, que constituem a futura abordagem aos seus homólogos geradores lineares de relutância variável comutados, respectivamente no que diz respeito aos seus princípios de conversão de energia e à geração do seu binário. Por serem evidentes as lacunas na literatura, relativamente a geradores lineares de relutância variável comutados, referem-se neste capítulo os geradores lineares diversos destes, no que diz respeito à sua concepção e à produção das forças de tracção, tendo como principal objectivo fazer uma introdução aos sistemas de geração lineares.

4.1 Introdução

O gerador linear de relutância variável comutado (GLRVC) produz, tal como o seu homólogo rotativo (GRVC), uma força, resultante da tendência do seu secundário em ocupar as sucessivas posições de relutância mínima, de forma sequencial, e onde a indutância do enrolamento primário é máxima. Para o caso do GLRVC, o movimento resultante dessa tendência é linear.

A construção destes geradores apresenta saliências quer no estator, quer no translato. Os enrolamentos do estator são do tipo concentrado e conseguidos de uma forma simples, onde a configuração padrão normalmente adoptada consiste em dois enrolamentos por fase, colocados em pólos diametralmente opostos, e ligados em série. Estas máquinas apresentam características altamente não-lineares, pois operam numa ampla gama de valores de densidade de fluxo, até à região de saturação das curvas de magnetização, que variam com as posições de excitação e de não excitação. Como resultado, seu funcionamento não pode ser adequadamente representado analítica por modelos linearizados tão comumente utilizado para máquinas síncronas e máquinas de indução. Na literatura, vários modelos não-lineares baseados na estrutura da máquina estrutura ou em expressões analíticas têm sido estudadas e testadas [28, 29, 30].

Como desvantagens da aplicação deste gerador, podemos apontar alguns problemas de oscilações no binário e instabilidade, principalmente para velocidades maiores.

As características do GRVC dependem de diversos factores, como a estrutura da máquina (número de fases, número de pólos do estator, número de saliências do translato, largura das cavas), a sua curva de magnetização, a configuração do conversor e a estratégia de controlo.

É principal objecto deste trabalho o dimensionamento do gerador.

A literatura acerca do gerador linear de relutância variável comutado, e mesmo do actuador linear de relutância variável comutado (plano ou tubular) é muitíssimo rara, e somente algumas páginas deste assunto foram escritas até hoje, podendo referir-se o trabalho de Boldea e Nasar [31].

Em termos dos princípios de funcionamento que regem os accionamentos, bem como das suas características magnéticas, o problema poderá ser encarado em termos do accionamento rotativo, este, sim, bastante mais debatido, e posteriormente adoptar esses princípios e adaptá-los ao accionamento linear.

De facto, os geradores lineares de relutância variável comutados são “sósias” dos motores de relutância variável comutados rotativos, no que diz respeito aos seus princípios de

funcionamento, e, somente a determinação das forças transversais ou de tracção dos primeiros, difere da teoria desenvolvida para os segundos. Esta afirmação não considera contudo o efeito da saturação, que é manifestamente diferente para as duas máquinas, nem a não existência de simetria geométrica e electromagnética, que os geradores lineares apresentam.

Neste capítulo faz-se então uma abordagem teórica simplificada do motor de relutância variável comutado e estabelece-se uma correspondência entre esta máquina e as máquinas de movimento linear.

4.2 Princípios de conversão de energia de MRVC

Considere-se um motor de relutância variável comutado com seis pólos no estator e com quatro pólos no rotor, cujas posições relativas entre o primário e o secundário se mostram nas Fig. 4.1, Fig. 4.2 e Fig. 4.3 [32]. É suposto este motor ter três fases, sendo cada fase constituída por duas bobinas colocadas em pólos diametralmente opostos do primário e ligadas electricamente em série, sendo percorridas por corrente contínua. O método de excitação das fases da máquina baseia-se na sua alimentação sucessiva, uma de cada vez, tornando-as por isso independentes entre si.

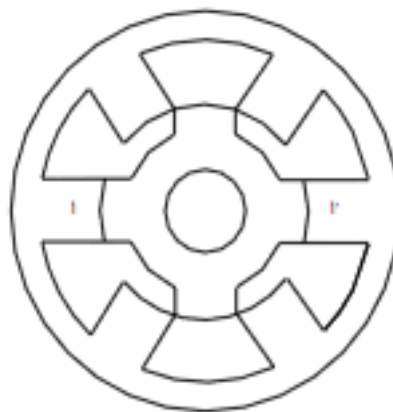


Fig. 4.1 Representação do funcionamento do motor de relutância variável comutado. Posição de alinhamento 1-1'.

Nas figuras referidas, são assinaladas as bobinas 1-1', que, ligadas em série, constituem a fase 1. As posições representadas na Fig. 4.1, na Fig. 4.2 e na Fig. 4.3 são, respectivamente, as posições de alinhamento, de não alinhamento e intermédia.

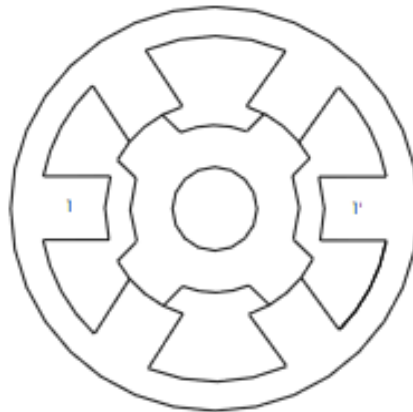


Fig. 4.2 Representação do funcionamento do motor de relutância variável comutado. Posição de não-alinhamento.

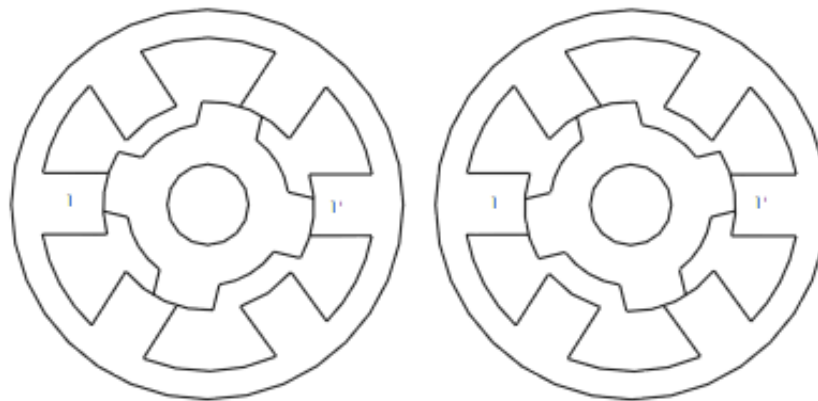


Fig. 4.3 Representação do funcionamento do motor de relutância variável comutado. Posições. Posições intermédias de aproximação e de afastamento da posição de alinhamento.

4.2.1 Posição de alinhamento

Na posição de alinhamento, representada na Fig. 4.1, a fase 1 encontra-se excitada, estando um qualquer par de pólos do rotor alinhado com os dois pólos, diametralmente opostos, do estator, que correspondem à fase 1. Neste caso, o rotor adopta a posição, relativamente ao estator, que corresponde ao valor máximo da indutância do circuito magnético, por ser mínima a respectiva relutância nessa posição. Um deslocamento do rotor num sentido ou no outro, afastando-se do alinhamento, Fig. 4.3, provocará o

desenvolvimento de uma força, traduzida fisicamente através de um binário mecânico no veio, que permite ao rotor regressar à posição de alinhamento.

4.2.2 Posição de não alinhamento

Na posição de não alinhamento, representada na Fig. 4.2, os pólos do estator, que correspondem à fase 1, estão alinhados com o eixo interpolar dos pólos do rotor, sendo mínima a indutância da fase, uma vez que a relutância magnética é máxima, como resultado do elevado trajecto das linhas de força do campo no entreferro, entre o estator e o rotor. Pode considerar-se que, neste caso, a máquina está numa situação de equilíbrio instável, atendendo a que, um pequeno desvio do rotor, relativamente a essa posição, provocará o desenvolvimento de um binário que tenderá a aumentar esse desvio, e a “empurrar” o rotor para a posição de alinhamento com o par de pólos do primário que for excitado.

4.2.3 Posições intermédias

Nas posições intermédias, entre a posição de alinhamento e a posição de não-alinhamento, representadas na Fig. 4.3, o rotor tenderá a deslocar-se para uma posição de alinhamento com o par de pólos do estator correspondente à fase excitada. É, por isso, a sequência de excitação das fases a condicionar o sentido do movimento do rotor. As posições assumidas pelo rotor corresponderão, por sua vez, a posições de indutância magnética crescente com o movimento, se o deslocamento se der da posição de não-alinhamento para a posição de alinhamento, ou a indutâncias magnéticas decrescentes se o deslocamento for em sentido contrário. Estas tendências de variação na indutância correspondem à tendência, em sentido contrário, da variação da relutância do circuito magnético, para as diferentes posições relativas. Esta constatação resulta do facto da indutância variar inversamente com a relutância magnética, como é sabido.

4.3 Características magnéticas do MRVC

Como se referiu anteriormente, na posição de alinhamento de um qualquer par de pólos do rotor com o par de pólos do estator que corresponde à fase excitada, a indutância de fase é máxima, já que a relutância do circuito magnético equivalente é mínima. Se considerarmos

níveis de intensidade da corrente de excitação reduzidos, a maior parte da relutância do circuito magnético encontra-se concentrada no entreferro, podendo, contudo, o percurso ao longo do estator ser sede de perdas magnéticas consideráveis, reduzindo por isso apreciavelmente a indutância correspondente à posição de alinhamento. Esta posição é, mesmo para intensidades de corrente relativamente reduzidas, propícia à ocorrência de saturação do seu circuito magnético. A tendência de saturação do circuito magnético da máquina de relutância variável é, contudo, muito reduzida para a posição de não alinhamento, onde a indutância é mínima, sendo a relutância do circuito magnético máxima. A relutância é máxima devido ao grande trajecto de entreferro entre o estator e o rotor, sendo, por isso, o fluxo de dispersão considerável. Na análise destas máquinas supõe-se a não existência de saturação nestas posições e admite-se que a saturação só é possível para valores de intensidade de corrente elevados.

Assim, as curvas de magnetização da máquina, que representam, qualitativamente, a variação do fluxo ligado ψ em função da corrente de excitação das bobinas do estator i , para um determinado valor do ângulo θ de deslocamento relativo entre o estator e o rotor, têm o andamento, aproximado, que se representa na Fig. 4.4 [31].

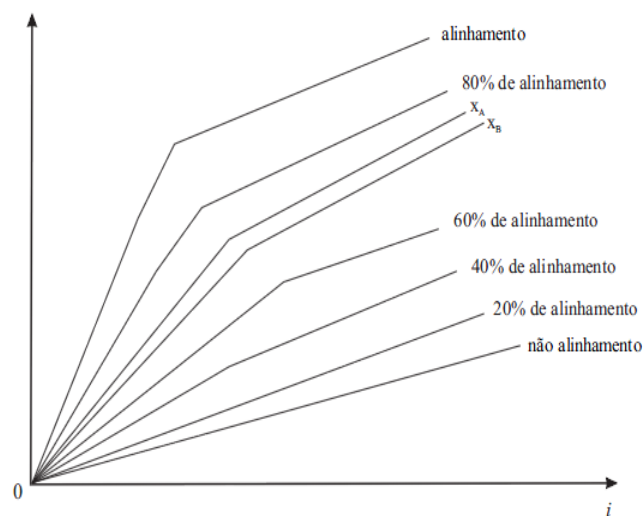


Fig. 4.4 Representação das características magnéticas, em termos qualitativos, da máquina.

Nesta figura, a característica inferior corresponde à posição de não-alinhamento, correspondendo a característica superior, por sua vez, à posição de alinhamento.

As posições de alinhamento parcial apresentam curvas de magnetização intermédias, entre as curvas limite, da posição de não-alinhamento e da posição de alinhamento. O carácter

não linear do comportamento magnético da máquina é, nestas características, suposto ser linear por troços, e é este o comportamento adoptado na grande maioria das análises destas máquinas.

A análise destas características é importante, já que, sendo determinantes na variação da indutância magnética com a posição relativa do rotor e com a corrente de excitação, permitem avaliar o binário desenvolvido pela máquina. A obtenção de características de magnetização quantitativas pode ser feita através de uma análise numérica da máquina, onde se pode verificar a influência da posição relativa entre as duas partes constituintes, e da intensidade da corrente de excitação das bobinas. Essas características assim obtidas permitem quantificar o comportamento magnético da máquina na presença de saturação. Como se afirmou previamente, a posição de não-alinhamento é praticamente livre do efeito da saturação, ao contrário da posição de alinhamento, que apresenta uma grande apetência para a ocorrência de saturação. As posições intermédias, situadas entre estas duas posições limite referidas, conduzem a curvas de magnetização de natureza diversa, dependendo da percentagem do alinhamento parcial, entre secções dos pólos do primário e do secundário, por serem, nestas posições, os efeitos de saturação local, nas extremidades das saliências, igualmente dependentes da percentagem de alinhamento.

Nas máquinas de relutância variável comutadas, são as duas características limite, mostradas na Fig. 4.4, as que apresentam maior importância, por serem determinantes dos dois valores, também limite, que a indutância magnética pode assumir, isto é, respectivamente a indutância não saturada no alinhamento

L_{an} e a indutância no não-alinhamento L_{na} . De facto, estes dois valores de indutância são os que intervêm, de forma directa, no dimensionamento da máquina e condicionam, conjuntamente com a variação entre eles, o binário mecânico desenvolvido pelo motor.

4.4 Binário

Sendo a máquina em análise baseada no princípio da relutância variável, o binário electromagnético desenvolvido tem origem na tendência apresentada pelo circuito magnético em adoptar uma configuração de relutância mínima, isto é, na tendência que os pólos do rotor têm de se alinhar com os pólos do estator, maximizando a indutância das bobinas excitadas. Este binário, que é independente do sentido da corrente, permite que a excitação dos enrolamentos do primário se processe através de correntes unidireccionais, o que é manifestamente vantajoso sob o ponto de vista do conversor electrónico que alimenta a máquina. O binário desenvolvido pelo actuador manifesta-se, por sua vez, no sentido da

próxima posição de alinhamento, relativamente à posição em que o rotor se encontra, e considera-se positivo, ou motor, se o sentido do movimento se verificar na tendência de crescimento do valor da indutância, e negativo, ou gerador, em caso contrário. Devido ao carácter não linear do circuito magnético, o binário electromagnético T depende da posição relativa do rotor e da corrente, sendo usualmente calculado recorrendo à determinação da variação da co-energia magnética armazenada no circuito magnético, variação essa que é devida, por sua vez, à variação da posição rotórica relativa θ . Como é sabido, a co-energia magnética W_c armazenada num circuito magnético de geometria variável, é definida através da seguinte expressão:

$$W_c(i, \theta) = \int_0^i \psi(i, \theta) di \quad (4.1)$$

sendo a co-energia função do fluxo ligado ψ , gerado pela corrente i de excitação da fase, e da relutância do circuito magnético dependente igualmente da posição relativa θ . Relativamente à Fig. 4.4, a co-energia magnética representa a área situada abaixo da curva de magnetização, para uma determinada posição, e para uma determinada corrente de excitação. O binário desenvolvido pela máquina, T , é assim calculado através da variação da co-energia definida em (4.1), por variação da posição do rotor, desprezando as perdas mecânicas e magnéticas, sendo, por conseguinte:

$$T(\theta, i) = \frac{\partial W_c(\theta, i)}{\partial \theta} \quad (4.2)$$

em que θ representa o ângulo de posição do rotor e i a corrente de excitação das bobinas. A expressão (4.2) permite calcular o binário desenvolvido pela máquina, mediante o conhecimento da variação da característica magnética, considerando a influência da saturação do circuito magnético. Contudo, e para a maioria das aplicações, é comum a adopção de um modelo linear para a máquina, no qual a característica magnética se considera uma recta, sendo o fluxo ligado ψ directamente proporcional à corrente i que lhe dá origem, sendo, por isso, a indutância independente da corrente, passando a ser função apenas da posição angular do rotor, podendo assim rescrever-se (4.2) na seguinte forma:

$$T(\theta, i) = \frac{1}{2} \frac{dL(\theta)}{d\theta} i^2 \quad (4.3)$$

Neste caso, a indutância L só depende do ângulo θ , e pode ser representada qualitativamente, como se mostra na Fig. 4.5 [33].

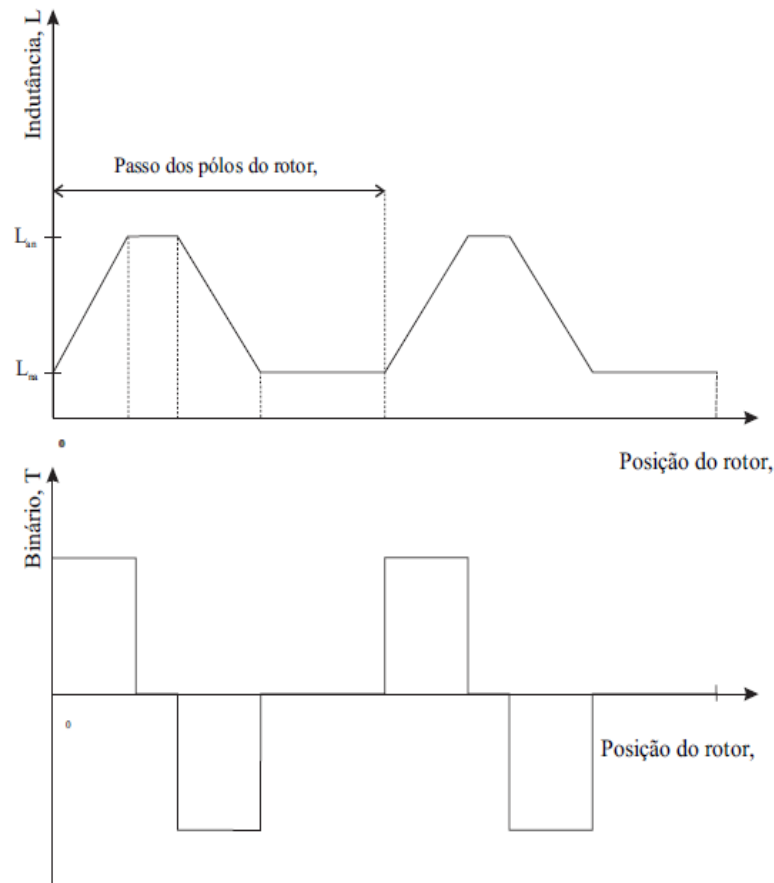


Fig. 4.5 Representação da variação teórica da indutância e do binário do MRVC.

A Fig. 4.5 mostra ainda a variação do binário em função do andamento linear da indutância, e considerando a intensidade da corrente de excitação da fase constante. A simples excitação das fases, em posições adequadas do ciclo da indutância, permite controlar o binário desenvolvido pela máquina.

A região R_{01} , entre as posições θ_0 e θ_1 , corresponde a uma zona de crescimento linear da indutância com a posição, sendo θ_0 a posição de início da sobreposição dos pólos do rotor e do estator, e θ_1 a posição de sobreposição completa, posição de alinhamento, ou seja, a posição que corresponde à indutância máxima L_{an} , à qual corresponde um binário nulo. Nesta região, o binário desenvolvido pela máquina é positivo ou motor.

Na região R_{12} , entre as posições θ_1 e θ_2 , posições de sobreposição completa, posições de alinhamento, o binário é nulo, na medida em que a indutância se mantém constante e igual ao seu valor máximo.

A região R_{23} , entre as posições θ_2 e θ_3 , corresponde à “queda” linear do valor da indutância com a posição, e resulta da diminuição da sobreposição entre os pólos do rotor e do estator, até à posição de não-alinhamento, que é atingida em θ_3 , onde o valor da indutância é mínimo L_{na} , e onde o binário é nulo. Em R_{23} , o binário desenvolvido pela máquina é negativo ou gerador.

Na região R_{34} , entre as posições θ_3 e θ_4 , a indutância é, mais uma vez, constante, e agora igual ao seu valor mínimo, sendo, por isso, o binário igualmente nulo.

Relativamente ao binário que a máquina consegue desenvolver, e com base ainda na Fig. 4.5, onde se considera linearizada a função indutância, desprezando os efeitos da saturação global, bem como os efeitos de saturação local e os efeitos de alastramento lateral do fluxo na vizinhança das saliências, a abordagem de controlo da máquina resume-se à excitação das bobinas das suas fases, em instantes escolhidos, de forma a obter-se regimes de motor ou de gerador. Os valores da intensidade da corrente deverão ser adequados ao nível do valor da força pretendida, tendo em atenção que, para cada posição, o binário varia de forma quadrática com a intensidade da corrente.

4.5 Introdução aos geradores lineares

Tendo em atenção que a geometria do gerador a desenvolver neste trabalho é uma geometria linear, entendemos ser importante que, para uma melhor compreensão, se faça uma abordagem, mesmo com carácter sucinto, aos geradores com topologia electromagnética linear.

Os geradores eléctricos lineares são conversores de energia electromecânicos movidos por forças alternadas primárias, que convertem energia mecânica em corrente alternada de uma só fase. É de notar que os geradores eléctricos lineares não são usados para gerar corrente trifásica, desde que a sequência de fase da tensão gerada, reverta o seu sentido assim que a força primaria também inverta o seu sentido [31]. Assim como as máquinas electromagnéticas rotativas, os geradores e actuadores lineares são afectados pela reversibilidade, isto é, a mesma máquina pode funcionar como actuador ou gerador.

Os geradores lineares desenvolvem assim forças electromagnéticas de tracção entre a sua parte fixa, o estator, e a sua parte móvel, o translato, sem que existam transmissões mecânicas entre as duas partes. Note-se que o termo rotor, na nossa opinião, não é o mais adequado para designar a parte móvel de uma máquina com estrutura electromagnética

linear, na medida em que esse termo se refere especificamente a máquinas rotativas. Todavia, referimo-lo na medida em que, da literatura especializada anglo-saxónica, a parte móvel das máquinas lineares é designada por “translator” e por “mover”, consoante os autores. Em relação a estes termos, não se conseguem definir vocábulos equivalentes e tecnicamente coerentes em língua portuguesa. Quando muito, traduzindo e tentando manter simultaneamente o sentido físico daqueles termos, a parte móvel poderia ser designada por “translato” (aquele que fica sujeito a um movimento de translação, do latim *translátu*), ou por “deslocador”. Atendendo a que não concordamos com estas designações, optámos, como tem sido norma corrente na literatura técnica de expressão portuguesa, por designar a parte que contém o enrolamento de excitação por “primário” e a outra parte, por “secundário”, independentemente de se saber quais são as partes fixa e móvel da máquina.

A forma mais simples de se conceber um gerador linear, e que é normalmente referida para melhor entendimento das máquinas lineares, consiste em considerar-se uma máquina rotativa, em relação à qual se imagina a sua planificação, procedendo-se ao seu “desenrolar” como se pode ver na figura 4.6. Neste caso, a máquina linear que se obtém é uma máquina com configuração plana, constituída por duas partes: uma parte fixa e uma parte móvel.

Se, por outro lado, se imaginar o corte da máquina rotativa ao longo de um seu eixo de simetria, obtendo-se desta forma duas partes iguais, e se se submeter cada parte da máquina a uma força que a obrigue a “alongar-se”, obter-se-á uma máquina linear plana com uma configuração de duplo estator, isto é, com o seu estator constituído por duas faces, como se mostra na sucessão de imagens da Fig. 4.7.

Atendendo a esta transformação, pode-se afirmar que todo o motor rotativo convencional representa um conjunto físico com dimensões finitas, tendo o ponto de aplicação do esforço motor uma forma geométrica fechada, simples, em geral uma superfície cilíndrica, que é o seu veio. Em contrapartida, as máquinas lineares são máquinas infinitas, na medida em que o ponto de aplicação do seu esforço motor se desloca linearmente não passando mais que uma vez sobre o mesmo local, o que é o mesmo que dizer-se que uma das suas dimensões é infinita [34].

Para além das máquinas lineares planas, onde a parte fixa, para o caso da máquina de simples estator, ou as partes fixas, para o caso da máquina de duplo estator, se encontram todas elas planificadas, sendo paralelas à parte móvel, também planificada, pode ainda considerar-se o actuador linear tubular, que é uma máquina de fluxo longitudinal.

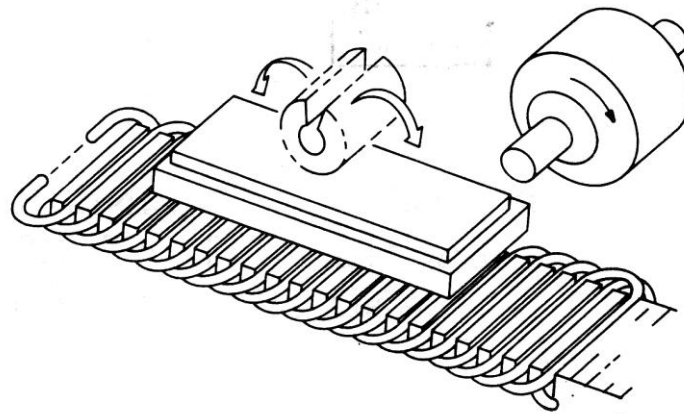


Fig. 4.6 Desenrolando uma máquina eléctrica rotativa. [15]

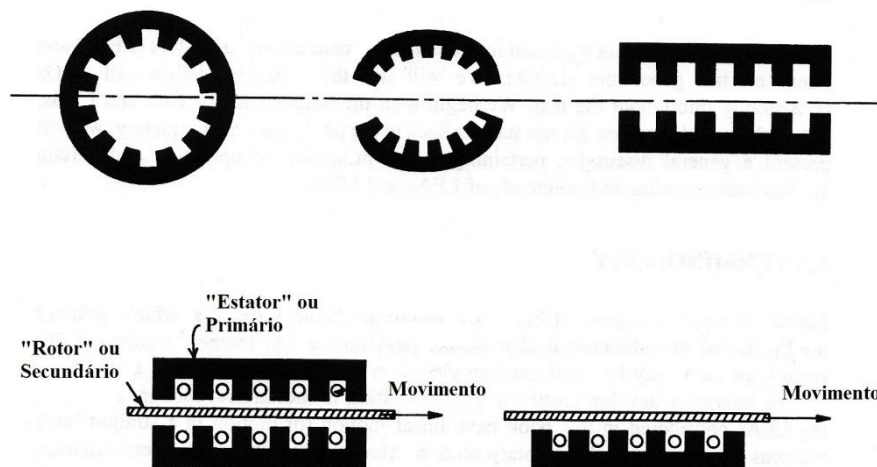


Fig. 4.7 Ilustração da obtenção de uma máquina linear com duplo estator, a partir de uma máquina rotativa.

O seu princípio de funcionamento pode ser ilustrado de uma forma elementar, mas concisa, utilizando-se uma tira de cartão onde se representam alternadamente os pólos N e S do campo viajante, conforme se mostra na Fig. 4.8 (b).

Esta tira poderá ser enrolada de dois modos diferenciados; segundo um deles, obtém-se a topologia da máquina rotativa convencional, Fig. 4.8 (a), e segundo o outro, enrolando-a como se esquematiza na Fig. 4.8 (c), resultará uma máquina tubular.

Esta abordagem das máquinas lineares, plana e tubular, obtida através da manipulação geométrica da máquina rotativa, exige uma referência ao facto de que, não só a configuração, completamente distinta da máquina original, bem como a bobinagem dos

enrolamentos e a distribuição dos campos magnéticos, apresentam especificidades bastante particulares. Assim, os geradores lineares são estruturas abertas no que diz respeito às distribuições das linhas de fluxo magnético, no plano que contém a direcção do movimento, não apresentam simetrias geométricas ou magnéticas, e desenvolvem forças de atracção consideráveis.

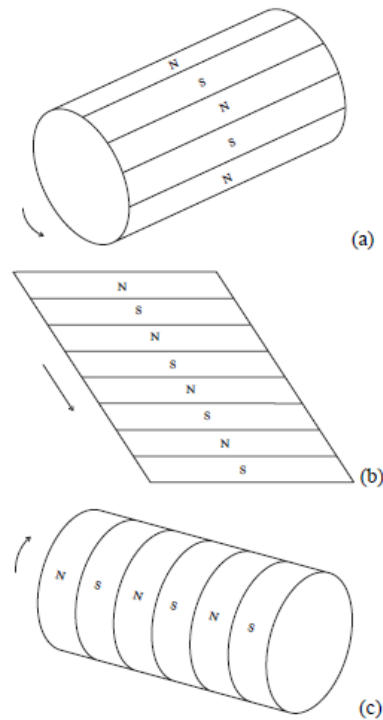


Fig. 4. 8 Representação da obtenção de um actuador linear tubular a partir de uma máquina rotativa.

Os geradores lineares são raramente utilizados. Quando pensamos em converter energia mecânica em energia eléctrica, o mais usado são as máquinas rotativas. Os geradores convencionalmente usados nas centrais eléctricas (carvão, gás, fuel oil, nuclear), centrais hidroeléctricas, aerogeradores e veículos são os geradores rotativos.

Os motores e geradores lineares são usados por exemplo em sistemas de transporte (incluindo os comboios Maglev), sistemas robotizados e sistemas de posicionamento. Em muitos destes sistemas o actuador linear funciona como gerador, mas nestes casos o objectivo não é obter energia do movimento, mas sim abrandar o movimento da parte móvel.

A este propósito, e quando comparadas com as máquinas rotativas convencionais, poder-se-á afirmar que as máquinas lineares, genericamente, apresentam as seguintes vantagens:

- Transformam directamente a energia mecânica em energia eléctrica, sem qualquer contacto mecânico intermédio.
- A sua construção é bastante mais simples e robusta.
- Os seus custos de produção são bastante mais baixos.
- A dissipação de calor processa-se de uma forma mais eficaz, permitindo assim o seu dimensionamento com densidades de corrente mais elevadas.
- São praticamente isentas de poluição sonora.
- A sua instalação é bastante mais simples.
- A sua manutenção é praticamente nula, e a sua fiabilidade é mais elevada.

Um outro aspecto, que é importante focar, diz respeito à problemática da definição da eficiência do desempenho de uma máquina. Quando pensamos em máquinas eléctricas rotativas convencionais, é pertinente dizer-se que, quanto mais elevado for o seu rendimento, melhor será a qualidade da máquina.

Todavia, há que ter cuidado na utilização do vocábulo “melhor” com um único significado, que é o de “mais elevado” rendimento. Por um lado, nas máquinas rotativas, a definição apresenta-se correcta, uma vez que o objectivo destas máquinas é o de produzir a máxima potência útil possível, sendo o rendimento, ao cabo e ao resto, a potência útil que a máquina desenvolve por unidade de potência consumida.

Os geradores lineares aplicados em sistemas de conversão de energia das ondas são caracterizados pela grande potência (dependendo do tamanho do dispositivo) e pela baixa velocidade. A outra grande aplicação de geradores com grande potência e baixa velocidade, é nas turbinas eólicas de transmissão directa. Existem problemas comuns na utilização destes geradores tanto em aerogeradores como em conversores de energia das ondas, contudo a irregularidade do movimento das ondas dificulta ainda mais a aplicação destes geradores.

4.6 Funcionamento dos geradores lineares

Como o seu homólogo rotativo, a operação de um actuador eléctrico linear é reversível, isto é, um actuador linear pode operar como um gerador linear.

Assim o secundário de um actuador linear pode ser actuado por uma força externa, criando um movimento oscilatório. Uma tensão alternada é induzida pelo movimento através do campo criado pelo estator de magneto permanente (MP), e assim emerge um gerador linear.

Também pode ser concebido um gerador linear com o translato de magneto permanente. Com isto o nível mais energético do MP deve ser repostado através de uma bobina fictícia com uma tensão DC constante, de tal forma que:

$$F_{PM} = H_c \cdot h_m \quad (4.4)$$

Onde H_c é a força coerciva do magneto permanente e h_m é a altura do magneto permanente ao longo do entreferro g (Fig. 4.7).

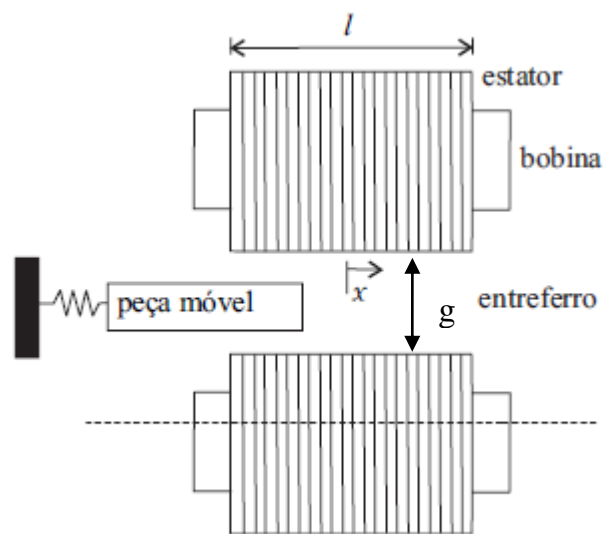


Fig. 4.9 Representação de um gerador linear plano elementar.

Este raciocínio também se aplica quando o MP é móvel. Neste caso é obtida uma força bidireccional se o MP móvel for actuado ao longo do eixo do x por uma força externa. O fluxo na bobina do estator varia com a posição do translato, atingindo um máximo e um mínimo. Uma tensão alternada induzida é produzida na bobina do estator como resultado do movimento oscilatório do estator de MP.

Para inverter o sentido do fluxo na bobina do estator é necessário envolver um maior número de configurações, mas o princípio é basicamente o mesmo.

Em suma, a classificação da força magnética produzida leva-nos a dois tipos básicos de actuadores e geradores eléctricos lineares:

- I. Os que têm na sua composição um translato ferromagnético passivo e um estator bobinado e, eventualmente, magneto permanente no estator;
- II. Os que têm um translato diamagnético activo (com dentes ou MP) e também o estator bobinado.

Esta classificação serve para actuadores lineares que funcionam como vibradores e para actuadores e geradores lineares caracterizados por curtos deslocamentos. Para deslocamentos maiores que podem chegar a alguns metros, são utilizadas configurações multifase como acontece nas máquinas rotativas, com o objectivo de reduzir a oscilação e aumentar a resposta necessária para o propósito.

Podem-se ainda considerar geradores lineares de indução, de MP síncrono, de relutância síncrono, de relutância variável e geradores de passo como homólogos lineares das máquinas rotativas.

CAPÍTULO

5

Dimensionamento Analítico do GLRVC

Neste capítulo é proposto um método de dimensionamento analítico para um gerador de relutância variável de fluxo comutado de fluxo longitudinal. É também descrita a metodologia usada e as considerações a ter em conta durante esta fase de concepção do gerador. Este capítulo contém ainda ilustrações esquemáticas do modelo, assim como o procedimento de dimensionamento proposto para o protótipo de um gerador linear trifásico com 3.3 m de comprimento com estator passivo e transato activo, assinalando também os seus parâmetros dimensionais, e os valores obtidos do dimensionamento, que caracterizam o seu desempenho.

5.1 Introdução

Como foi referido no capítulo anterior, os geradores lineares são ainda muito pouco utilizados, podendo esta realidade pode vir a ser alterada, já que estes geradores estão a ser presentemente aplicados, principalmente em tecnologias de geração de energia a partir de fontes de energia renovável, caso da energia eólica e da energia das ondas do mar. Tanto na indústria como na geração de energia as atenções estão mais viradas para os geradores lineares de indução e de magnetos permanentes que actualmente dominam este tipo de máquina. Apesar de os GLRVC's ainda serem muito pouco aplicados e explorados, mostram-se ser excelentes alternativas, pelo facto de uma das partes constituintes não ter enrolamentos e a outra ter enrolamentos concentrados, característica favorável à construção e à fácil manutenção do gerador, o que implica uma redução de custos tanto na fase de construção como na fase de manutenção, grande fiabilidade e grande capacidade de tolerância a falhas comparado com os outros tipos de máquinas lineares, tal como a máquina DC, de indução e de magnetos permanentes síncrona.

Relativamente ao seu dimensionamento, não existem referências na literatura que façam uma alusão a uma metodologia de dimensionamento analítico destas máquinas. Sendo assim, o método aqui proposto e descrito para o dimensionamento do gerador linear vai de encontro ao método utilizado nos seus homólogos rotativos, convertendo as especificações da máquina linear numa máquina equivalente rotativa, e estabelecendo as devidas correspondências entre as características de desempenho das duas máquinas.

5.2 Estrutura

A Fig. 5.1 mostra, numa representação sintética, a vista do alçado principal de um corte transversal de um GLRVC, que é constituído por uma parte móvel e uma parte estática, em que qualquer uma delas poderá ser o primário ou o secundário [31]. As estruturas do primário e do secundário são constituídas por cavas e saliências ou dentes como se pode verificar na Fig. 5.1. Estas estruturas devem ser dimensionadas de forma a constituírem um conjunto de chapas magnéticas empilhadas.

Para a construção destas estruturas é utilizada preferencialmente uma liga de aço e silício com cristais orientados para que seja reduzida ao máximo as relutâncias nos circuitos magnéticos.

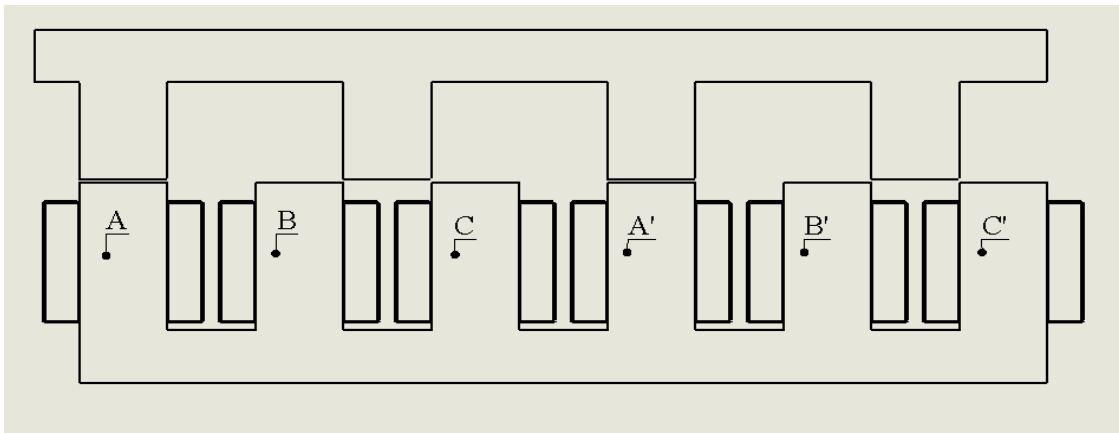


Fig. 5.1 Representação esquemática de um gerador linear.

Ainda relativamente à Fig. 5.1 deverá notar-se que para a posição relativa entre o primário e o secundário, que se verifica na esquematização, e tendo este actuador uma estrutura de 6 pólos no primário e 4 pólos no secundário, onde cada uma das 3 fases (A, B e C) resulta da ligação em série de duas bobinas (A-A', B-B' e C-C'), neste caso a fase A é a única fase que se encontra excitada. Quando o secundário entra em movimento deslocando-se para a esquerda ou para a direita, a excitação deverá ser interrompida na fase A e deve ser excitada a fase B ou C logo de seguida, respectivamente, para que ocorra geração de energia.

Os geradores lineares possuem alguns parâmetros dimensionais característicos, que na Fig. 5.2, onde se mostra um corte do gerador linear mostrado anteriormente na Fig. 5.1, poderão ser identificados.

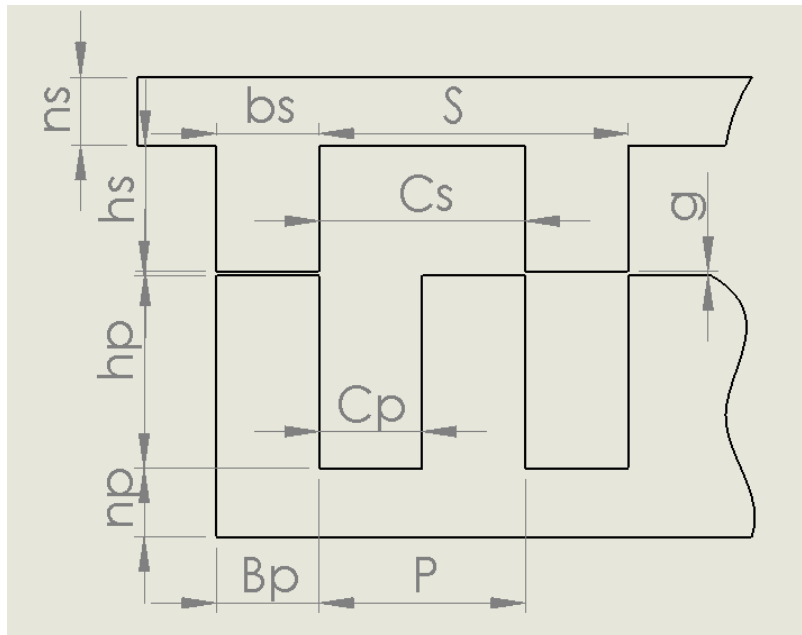


Fig. 5.2 Parâmetros dimensionais característicos do GLRVC

Os dentes do primário e do secundário, e por opção neste dimensionamento, têm praticamente a mesma largura, isto é $b_p \approx b_s$, devendo contudo os respectivos passos de cava τ_p e τ_s obedecer à seguinte relação [31]:

$$m\tau_p = 2\tau_p \quad (5.1)$$

onde m é o número de fases. Por outro lado, a largura das cavas do primário c_p , deverá ser ligeiramente superior à largura dos dentes do secundário b_s , para que a indutância mínima das fases do enrolamento de excitação seja a menor possível [31,35].

5.3 Dimensionamento

Actualmente, e como anteriormente referido, não é possível encontrar na literatura uma metodologia de dimensionamento para os geradores lineares de relutância variável. Assim sendo, procura-se então neste subcapítulo estabelecer um procedimento válido para o dimensionamento de um gerador que seja compatível com estas tecnologias de geração.

Para o dimensionamento destes geradores ter-se-á que definir várias variáveis que possam ser válidas para uma correcta concepção da máquina. Assim, ter-se-á que dar extrema importância à fonte de energia em causa, o mar, e às variáveis que lhe são subjacentes.

No caso em análise neste trabalho, o dimensionamento terá como base os parâmetros apresentados na Tab. 5.1.

Tab. 5.1- Parâmetros de dimensionamento

Potência	KW
Frequência Angular (f)	Rad/s
Altura da onda (H)	m
Período da onda (T)	s
Número de fases (m)	
Tensão no conversor (V_0)	V
Velocidade (v)	m/s

Assumindo que o translator se move na vertical com um movimento aproximadamente sinusoidal como se ilustra na Fig. 5.3, a amplitude associada ao movimento do gerador é definida como h e a frequência angular do movimento do translator é f .

Assim a velocidade do translator (ver Fig. 5.3) é dada por:

$$v = fh \cdot \cos(f \cdot t) \quad (5.2)$$

Assumindo que a máquina terá um rendimento na ordem dos 70%, então a potencia eléctrica será definida por:

$$P_{ele} = \frac{P_{mec}}{\eta} \quad (5.3)$$

Em que P_{mec} designa a potência mecânica do gerador, e η designa o rendimento da máquina. Partindo do princípio de que a potência eléctrica é um parâmetro eléctrico previamente definido, poder-se-á obter a potência mecânica da máquina.

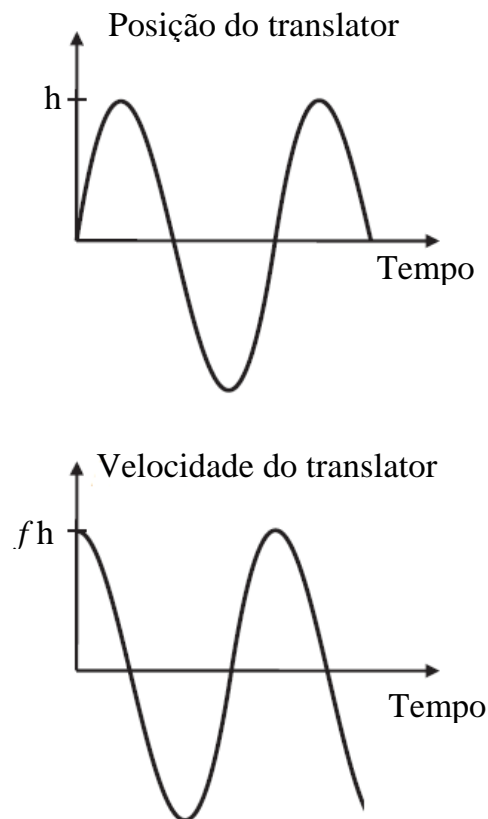


Fig. 5.3 Representação do movimento do translato do gerador

Neste dimensionamento ter-se-á em conta a força vertical, visto que o gerador a dimensionar apresenta um movimento nesta direcção, definindo-se assim a força como sendo:

$$P_{mec} = \vec{F} \times \vec{v} \times \cos \alpha \quad (5.4)$$

Como o vector força e o vector velocidade são paralelos, então $\cos 0 = 1$, e ter-se-á assim:

$$P_{mec} = F \times v \quad (5.5)$$

Ou seja,

$$F = \frac{P_{mec}}{v} \quad (5.6)$$

Pode verificar-se da expressão (5.6) que quanto maior for a velocidade do translato menor será a força necessária para a obtenção da potência eléctrica previamente especificada.

Relativamente à máquina em si, e de acordo com [31], [32] considera-se um bom valor para a força tangencial de superfície (densidade de força), o valor

$$F_x = 20 \text{ [kN/m}^2\text{]} = 2 \text{ [N/cm}^2\text{]}$$

Adoptando-se características $\psi(i)$ simplificadas, como as que se representam na Fig. 5.4, sendo assinalados os coeficientes de indução relativos aos diversos troços dessas características, similares às que se consideram para a máquina rotativa em [36]. Na Fig. 5.4 as características magnéticas da máquina, determinantes do ciclo de geração de energia para cada excitação, são aproximadas, para as diferentes posições relativas x , desde o não alinhamento x_i ao alinhamento $x_i + x_{passo}$, a funções lineares, onde se referenciam os declives das rectas como sendo respectivamente: L_{na} , a indutância na posição de não alinhamento, L_{an} a indutância de não saturação na posição de alinhamento e L_{as} a indutância de saturação na posição de alinhamento. Estes valores de indutância determinam a maior ou menor bondade da geração energética.

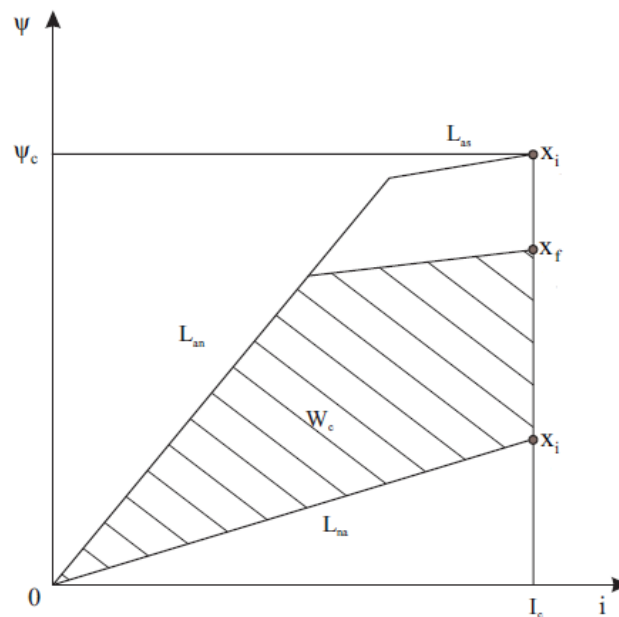


Fig. 5.4 Características $\psi(i)$ simplificadas

Tipicamente, o valor adoptado como razoabilidade para a posição de interrupção da corrente de excitação, é:

$$(x_f - x_i) \approx 0,8b_p \quad (5.7)$$

O valor indicado na equação (5.7) é verdadeiramente aceite para efeitos de dimensionamento da máquina.

Como se trata de um gerador linear em que cada dente do primário é abraçado por uma bobina e cada cava comporta duas bobinas, os valores para a largura dos dentes do primário b_p , para a largura dos dentes do secundário b_s e para a largura da cava do primário c_p , serão arbitrados já que não existe nenhuma regra específica para estes valores; contudo, estes terão que ser arbitrados com algum bom senso, onde por exemplo se terá que considerar a razoabilidade da construção, o equilíbrio dimensional da máquina, o comprimento total a obter, etc. Aqui, neste dimensionamento, opta-se por definir esses parâmetros considerando as seguintes relações:

$$b_p = c_p = x \text{ e } b_s = b_p = x \quad (5.8)$$

Quanto ao comprimento do entreferro, sabe-se que quanto menor for o seu valor maior será a força desenvolvida entre o estator e o translato; é também evidente que, a um valor muito pequeno deste parâmetro, podem corresponder dificuldades técnicas, por exigência de perfeita uniformidade do entreferro, de forma a evitar o ruído acústico e por dificuldades na manutenção do posicionamento relativo entre a parte fixa e a parte móvel do gerador, por influência das elevadas forças de atracção entre estas. Assim, admite-se atribuir o valor para o comprimento do entreferro de $g = 2$ [mm].

Os valores do passo do primário τ_p e secundário τ_s , são, respectivamente,

$$\tau_p = b_p + c_p \quad (5.9)$$

$$\tau_s = b_s + c_s = b_s + 2b_s \quad (5.10)$$

É importante referir que estes valores do passo têm que satisfazer a relação mencionada em (5.2).

Anteriormente, assumiu-se para a densidade de força o valor de 2 [N/cm²]. No entanto, sendo o primário constituído por cavas e dentes, com a mesma largura, e como a força se exerce apenas no ferro, ou seja, nos dentes, que representam metade da superfície total do primário, o valor efectivo daquela densidade de força será 2×2 [N/cm²] = 4 [N/cm²].

Deste modo sabendo que a força total F aplicada no gerador é dada pela seguinte expressão:

$$F = (w \times 2b_p) \times (F_x) \quad (5.11)$$

Assim a largura das laminações w é definida por:

$$w = \frac{F}{2b_p F_x} \quad (5.12)$$

O número de espiras por bobina obtém-se através da relação entre (5.13) e (5.14) e a equação (5.11), sendo:

$$\Psi_c = \frac{V_0}{v} (x_f - x_i) \quad (5.13)$$

e

$$\Psi_c = (2N_1) \times (B_g \pi D_{ip} b_p) = 2\pi b_p B_g D_{ip} N_1 \quad (5.14)$$

Sendo a equação (5.14) referente a um gerador rotativo de relutância variável, vamos obter para o GLVRC a seguinte expressão:

$$\Psi_c = (2N_1) \times (B_g w b_p) = 2b_p w B_g N_1 \quad (5.15)$$

Substituindo (5.15) em (5.13), vem para o número de espiras N_1 :

$$N_1 = \frac{V_0 x_f - x_i}{v} \frac{1}{2} \frac{1}{b_p w B_g} \quad (5.16)$$

Impondo-se para a densidade média de fluxo no entreferro o valor $B_g=1,5$ [T].

A relutância do circuito magnético R_{an} , que supostamente está concentrada no entreferro, é para este gerador:

$$R_{an} = \frac{1}{\mu_0} \frac{2g}{w b_p} \quad (5.17)$$

Sendo, por isso, a indutância não saturada do circuito magnético na posição de alinhamento L_{an} dada pela expressão:

$$L_{an} = \frac{4N_1^2}{R_{an}} = 2\mu_0 \frac{w b_p}{g} N_1^2 \quad (5.18)$$

Considera-se admitir a relação entre a indutância na posição de não-alinhamento L_{na} e a indutância na posição de alinhamento não saturada L_{an} , expressa por:

$$L_{na} = \frac{L_{an}}{10} \quad (5.19)$$

A energia, que corresponde ao ciclo de trabalho representado na Fig. 5.4, pode ser calculada através da expressão

$$w_c = F x_{passo} k_t \quad (5.20)$$

Representando k_t o factor de carga, que por definição toma o valor de 1.

Fazendo mais uma vez referência à Fig. 5.4, a área do ciclo de trabalho w_c calcula-se também através da expressão [28]:

$$W_c = k_c \left[(\Psi_c - L_{na} I_c) I_c - \frac{(\Psi_c - L_{na} I_c)^2}{2L_{an}} \right] \quad (5.21)$$

sendo k_c um coeficiente menor que a unidade, para se considerar a situação $L_{as} \neq L_{na}$, sendo L_{as} a indutância do troço de saturação da característica $\Psi(i)$ no alinhamento. De facto, esta correcção é introduzida porque o acréscimo de corrente por unidade de força é máximo quando $L_{as} = L_{na}$, [32].

Nesta metodologia adopta-se o factor $k_c = 0,7$.

Portanto como existem duas equações que se relacionam, a energia pode ser calculada através da equação (5.19), para posteriormente se obter o valor da corrente por fase I_c , através da resolução da equação (5.20).

Para o cálculo da altura das cavas do primário ter-se-á que considerar k_e como sendo o factor de enchimento das cavas do primário, e que representa a área de cava efectivamente ocupada pelo condutor:

$$k_e = \frac{A_{cu}}{A_p} \quad (5.22)$$

em que A_{cu} representa a área de cava correspondente ao alojamento do cobre, e A_p a área total da cava, que é determinada através dos valores da largura e da altura das cavas, respectivamente c_p e h_p :

$$A_p = c_p h_p \quad (5.23)$$

Desta forma, de (5.22) e de (5.23) poder-se-á determinar a altura da cava como sendo:

$$h_p = \frac{A_{cu}}{c_p k_e} \quad (5.24)$$

Por outro lado, como em cada cava se tem N_1 condutores, e sendo J a densidade de corrente no cobre, pode escrever-se respectivamente:

$$A_{cu} = N_1 S_{cu} \quad (5.25)$$

$$J = \frac{I_c}{S_{cu}} \quad (5.26)$$

onde S_{cu} representa a secção do condutor.

Resolvendo as equações (5.23), (5.24) e (5.25) vamos ter que:

$$h_p = \frac{2N_1 I_c}{c_p k_e J} \quad (5.27)$$

Assumindo que $k_e=0,4$ e $J=3,5$ [A/mm²]

A altura das cavas do secundário é determinante no valor da indutância na posição de não-alinhamento, isto porque o fluxo primário tem tendência a alastrar para as extremidades dos seus dentes, para atingir mais facilmente as extremidades dos dentes do secundário.

O aumento da profundidade das cavas do secundário favorece este efeito de alastramento, reduzindo a relutância do circuito magnético, e aumentando assim a indutância na posição de não-alinhamento. A altura das cavas do secundário deverá ser, para as máquinas rotativas, de acordo com [32], 20 a 30 vezes superior ao entreferro, pelo que será tido em conta este critério para a máquina linear em causa, assim sendo:

$$h_s = (20 \dots 30)g \quad (5.28)$$

Por mera opção considerando o valor mais elevado:

$$h_s = 30.g \quad (5.29)$$

Em relação às espessuras dos núcleos do primário e do secundário, estes devem assumir um valor para que a saturação do circuito magnético seja evitada.

As espessuras dos núcleos primários e secundário, estão relacionadas com as larguras dos respectivos pólos através das expressões:

$$n_p = (0,60 \dots 0,70)b_p \quad (5.30)$$

$$n_s = (0,60 \dots 0,70)b_s \quad (5.31)$$

As alturas do primário H_p e do secundário H_s podem assim ser calculadas, já que são conhecidas as alturas das cavas e dos núcleos do primário e do secundário, pelas seguintes equações:

$$H_p = h_p + n_p \quad (5.32)$$

$$H_s = h_s + n_s \quad (5.33)$$

A secção do condutor das bobinas S_{cu} , é determinada pela expressão:

$$S_{cu} = \frac{\pi d_{cu}^2}{4} \quad (5.34)$$

Tendo em conta a equação (5.24) e (5.25) obtém-se:

$$d_{cu} = 2 \sqrt{\frac{k_e c_p h_p}{\pi N_1}} \quad (5.35)$$

Em que d_{cu} representa o diâmetro do condutor de bobinagem.

O comprimento das bobinas não pode ser calculado de uma forma precisa, isto porque depende da bobinagem, da distância das espiras às laminações, do número de camadas de espiras, e dos arcos das bordas nos topos dos dentes. Contudo, pode-se estimar um comprimento, definido como comprimento médio L_1 , determinado pela equação seguinte [32].

$$L_1 = 2w + 1,2\pi b_p \quad (5.36)$$

A resistência da bobina R_b é calculada através da expressão seguinte que relaciona o comprimento médio dado pela equação (5.36).

$$R_b = \rho_{cu} \frac{L_1}{S_{cu}} N_1 \quad (5.37)$$

As perdas no cobre P_{cu} , podem ser calculadas considerando o número de fases B_1 , e admitindo que a corrente I_c é constante, relacionando depois com a equação (5.37).

$$P_{cu} = \rho_{cu} \frac{L_1}{S_{cu}} N_1 B_1 I_c^2 \quad (5.38)$$

As equações anteriormente apresentadas, foram as utilizadas de forma a obter um dimensionamento coerente para o gerador.

5.4 Resultados obtidos para o dimensionamento dos geradores

Neste subcapítulo mostram-se os resultados obtidos para o dimensionamento dos geradores. Este dimensionamento teve como base os dados analisados referentes à ondulação no Baleal e no Cabo da Roca, e também o procedimento proposto no subcapítulo anterior.

O dimensionamento proposto é referente a um GLRVC com estrutura planar, trifásico, de 6/4, isto é, com 6 pólos no primário e 4 pólos no secundário na medida em que cada dente do primário é abraçado por uma bobina e cada cava contém duas bobinas.

Este gerador foi dimensionado para uma potência nominal de 2 kW. Esta potência é algo reduzida, isto porque na realidade o gerador será constituído por seis destes geradores ligados em série. Por outro lado, cada um dos geradores dimensionados será combinado com um outro, formando uma topologia de dois conjuntos estator-translato. Esta opção foi tomada de forma a simplificar os cálculos, isto porque se tratam se sistemas com grandes dimensões. Estabelece-se assim um dimensionamento parcial do gerador global.

A Tab. 5.2 apresenta os resultados obtidos para o dimensionamento do gerador linear com base nos dados referentes à ondulação no Cabo da Roca. Por sua vez, na Fig. 5.5 mostram-se as dimensões principais do gerador linear.

Tab. 5. 2- Resultados obtidos para o gerador respeitante à zona do Cabo da Roca

Parâmetro	Nomenclatura	Valor	Unidade
Força tangencial	F_x	40	N/m ²
Potência eléctrica	P_{ele}	2	kW
Frequência angular	f	0,57	Rad/s
Altura da onda	H	4	m
Período da onda	T	11	Seg.
Número de fases	m	3	
Tensão no conversor	V_o	200	V
Largura dos pólos do primário	b_p	0,05	m

Largura dos pólos do secundário	b_s	0,05	m
Largura das cavas do primário	c_p	0,05	m
Comprimento do entreferro	G	0,002	m
Densidade média de fluxo	B_g	1,5	T
Permeabilidade magnética	μ_0	1,25664E-06	H/m
Factor de carga	k_t	1	
Factor de conversão	k_c	0,7	
Factor de enchimento	k_e	0,4	
Densidade de corrente no cobre	J	3,5	A/mm ²
Resistividade eléctrica	ρ_{cu}	1,70E-08	Ω /mm
Diâmetro do condutor	d_{cu}	4,1	m
Secção do condutor	S_{cu}	1,32025E-05	m ²
Número de bobinas do primário	B_1	6	
Potência mecânica	P_{mec}	2,86	kW
Força	F	1,25	KN
Velocidade	v	2,28	m/s
Diferença de posições de <i>on</i> e <i>off</i>	$(x_f - x_i)$	0,04	m
Passo do primário	τ_p	0,10	m
Passo do secundário	τ_s	0,15	m
Relação de passo	$m \cdot \tau_p = 2 \cdot \tau_s$	0,3	
Largura das laminações	w	0,31	m
Número de espiras por bobina	N_1	74,67	Espiras
Ind. não saturada	L_{an}	0,11	H
Ind. na posição de não alinham.	L_{na}	0,01	H
Fluxo máximo na conversão	ψ_c	3,51	Wb
Energia do ciclo de trabalho	W_c	62,66	J
Intensidade de corrente	I_c	43,00	A
Altura das cavas do primário	h_p	91,7	mm
Altura das cavas do secundário	h_s	60,0	mm
Espessura do núcleo do primário	n_p	32,5	mm
Espessura do núcleo do secundário	n_s	32,5	mm
Altura do primário	H_p	124,2	mm
Altura do secundário	H_s	92,5	mm
Diâmetro do condutor	d_{cu}	4	mm
Comprimento médio das bobinas	L_1	626,8	mm
Perdas no cobre	P_{cu}	668,6	W

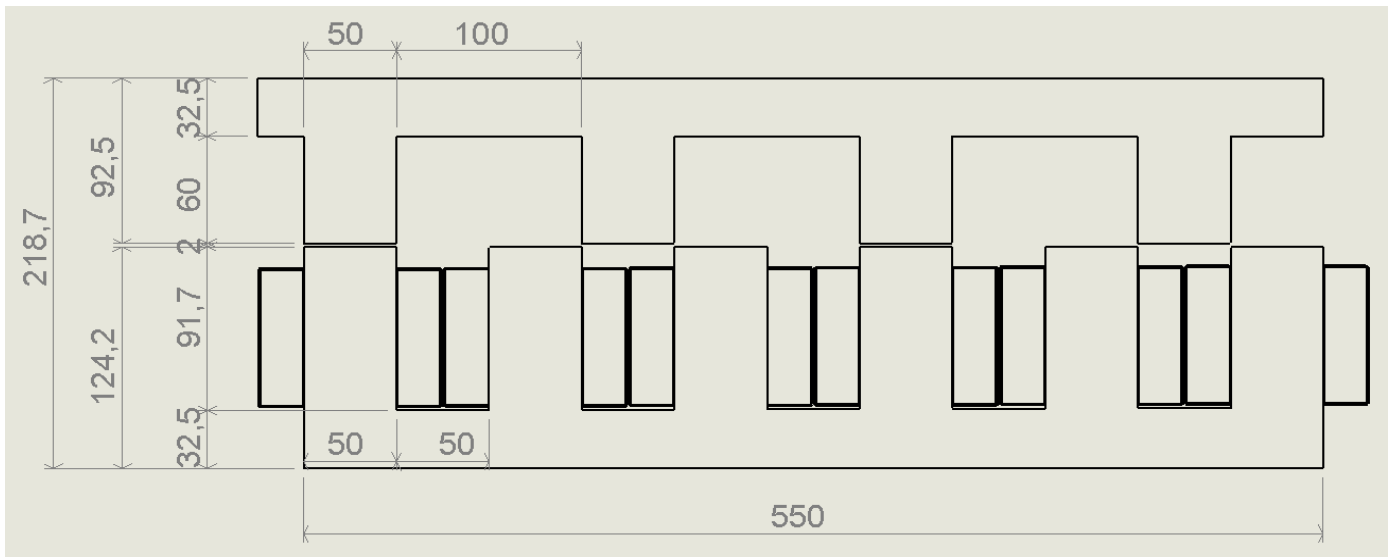


Fig. 5.5 Principais dimensões do gerador linear respeitante ao Cabo da Roca

Por uma questão de comparação e também melhor compreensão, a Tab. 5.3 apresenta os resultados obtidos para o gerador linear com base nos dados referentes à ondulação no Baleal. Por sua vez a Fig. 5.6 mostra as dimensões principais desse gerador linear.

Tab. 5.3- Resultados obtidos para o gerador respeitante à zona do Baleal

Parâmetro	Nomenclatura	Valor	Unidade
Força tangencial	F_x	40	N/m ²
Potência eléctrica	P_{ele}	2	kW
Frequência angular	f	0,79	Rad/s
Altura da onda	H	3,8	m
Período da onda	T	7,9	s
Número de fases	m	3	
Tensão no conversor	V_0	200	V
Largura dos pólos do primário	b_p	0,05	m
Largura dos pólos do secundário	b_s	0,05	m
Largura das cavas do primário	c_p	0,05	m
Comprimento do entreferro	g	0,002	m
Densidade média de fluxo	B_g	1,5	T
Permeabilidade magnética	μ_0	1,25664E-06	H/m

Factor de carga	k_t	1	
Factor de conversão	k_c	0,7	
Factor de enchimento	k_e	0,4	
Densidade de corrente no cobre	J	3,5	A/mm ²
Resistividade eléctrica	ρ_{cu}	1,70E-08	Ω /mm
Diâmetro do condutor	d_{cu}	4,6	mm
Secção do condutor	S_{cu}	1,6619E-05	m ²
Número de bobinas do primário	B_1	6	
Potência mecânica	P_{mec}	2,86	kW
Força	F	0,95	KN
Velocidade	v	3,00	m/s
Diferença de posições de <i>on</i> e <i>off</i>	$(x_f - x_i)$	0,04	m
Passo do primário	τ_p	0,10	m
Passo do secundário	τ_s	0,15	m
Relação de passo	$m \cdot \tau_p = 2 \cdot \tau_s$	0,30	
Largura das laminações	w	0,24	m
Número de espiras por bobina	N_1	74,67	Espiras
Ind. não saturada	L_{an}	0,08	H
Ind. na posição de não alinham.	L_{na}	0,01	H
Fluxo máximo na conversão	ψ_c	2,67	Wb
Energia do ciclo de trabalho	W_c	47,63	J
Intensidade de corrente	I_c	45,0	A
Altura das cavas do primário	h_p	96,0	mm
Altura das cavas do secundário	h_s	60,0	mm
Espessura do núcleo do primário	n_p	32,5	mm
Espessura do núcleo do secundário	n_s	32,5	mm
Altura do primário	H_p	128,5	mm
Altura do secundário	H_s	92,5	mm
Diâmetro do condutor	d_{cu}	4,0	mm
Comprimento médio das bobinas	L_1	476,5	mm
Perdas no cobre	P_{cu}	442,2	W

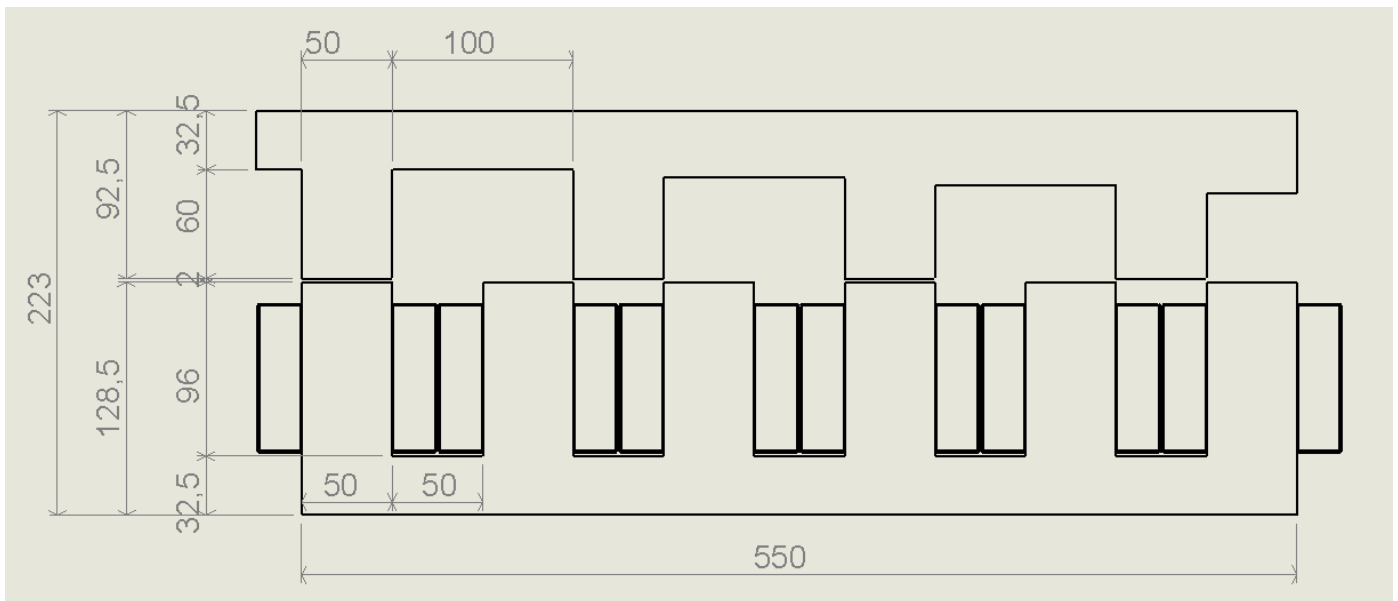


Fig. 5.6 Principais dimensões do gerador linear respeitante ao Baleal

Como se pode observar na Tab. 5. 2 e na Tab. 5.3, bem como na Fig. 5.5 e na Fig. 5.6, não existirão grandes diferenças nos parâmetros dimensionais dos geradores, quando se consideram as duas diferentes localizações geográficas. As diferenças que se verificam entre os dois geradores dimensionados devem-se em grande parte ao facto de a velocidade de funcionamento entre os dois geradores diferir em quase 1 m/s, que é fruto da diferença de período e altura das ondas nos dois locais.

5.5 Dimensões finais do gerador

Tendo em conta todos os cálculos efectuados a nível do dimensionamento no capítulo anterior, e não esquecendo que o corpo final do gerador é constituído pela associação em serie de 6 dos geradores dimensionados anteriormente, a Fig. 5.7 mostra as principais dimensões do protótipo do gerador constituído por dois translato's e dois estator's.

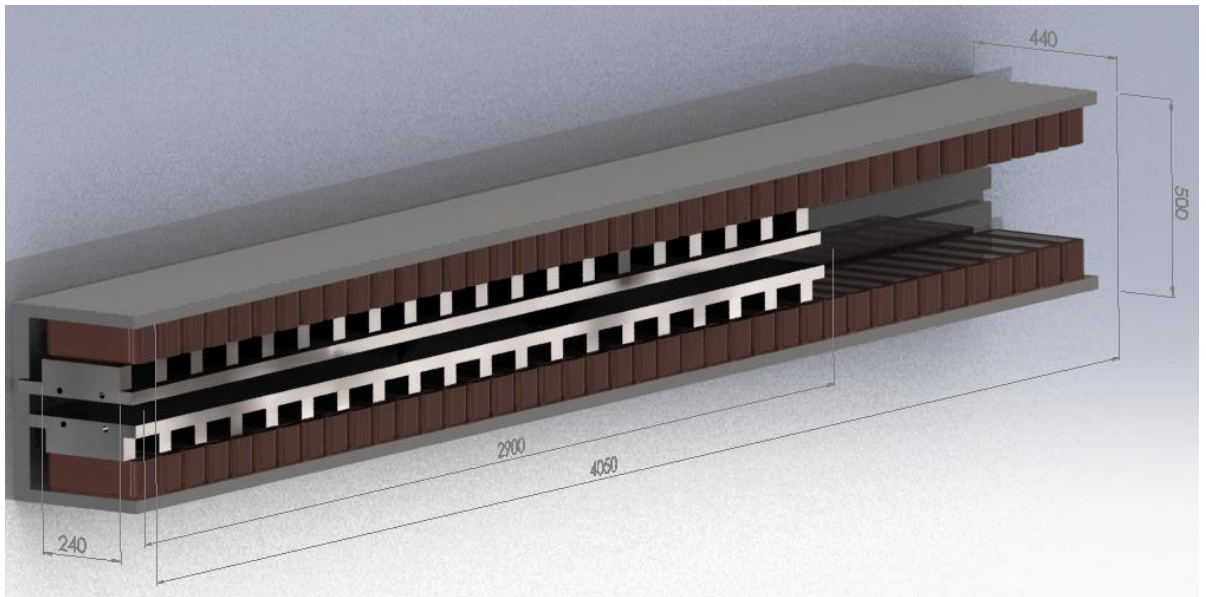


Fig. 5.7 Dimensões do gerador linear

Por sua vez a Fig. 5.8 mostra o protótipo do dispositivo de geração, que incorpora o gerador linear mostrado na Fig. 5.7.

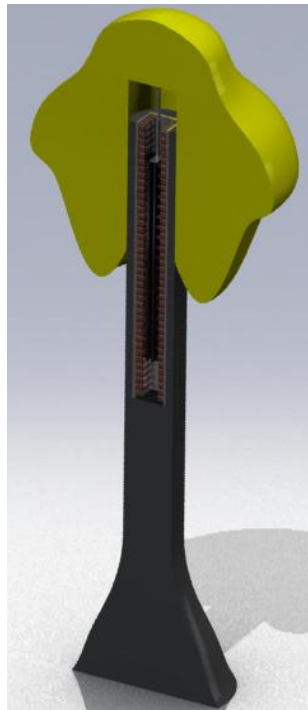


Fig. 5.8 Desenho de conjunto do sistema de geração proposto

5.6 Análise de desempenho do gerador

O desempenho do gerador de relutância variável comutado, para além de depender dos seus parâmetros dimensionais, depende também da bondade do sistema de conversão electrónica e controlo em condições de velocidade variável, por forma a minimizar o ruído e as perdas e a maximizar a potência de saída. O dimensionamento desse controlo, e que não foi objecto deste trabalho, terá que conhecer as características magnéticas precisas da máquina, e que são função dos ângulos de *on* e *off* dos dispositivos de chaveamento electrónico do conversor. As correntes nas fases do gerador são limitadas a um valor máximo admissível, e terão um valor eficaz passível de ser medido, e por sua vez utilizado para a estimação do estado de operação do gerador. O conhecimento do estado de operação do gerador possibilita as condições óptimas para uma determinada situação e para um determinado gerador.

O binário electromagnético depende da variação da co-energia magnética do gerador, à medida que a posição relativa entre o estator e o translato varia. Então a força será função da posição e da corrente nas fases.

A energia eléctrica pode ser produzida e enviada para o barramento de tensão contínua, através da injeção de corrente nos enrolamentos das fases durante o período em que a força produzida é negativa, e que corresponderá a duas posições de *on* e *off* dos dispositivos de chaveamento electrónico do conversor escolhidos nessa zona da característica de co-energia ou de força da máquina.

Relativamente a uma possível configuração para o sistema de conversão e controlo, poder-se-ia considerar um circuito similar ao representado na Fig. 5.9, onde o gerador seria alimentado por um conversor de três fases assimétrico, onde as correntes poderiam ser controladas independentemente umas das outras. Um sensor de posição colocado no translato iria possibilitar o estabelecimento dos ângulos de *on* e *off* dos dispositivos de chaveamento electrónico de uma forma eficaz. A corrente nos enrolamentos das fases poderá ser controlada por três controladores de histeresis independentes. Dependendo da velocidade do gerador, poder-se-ão ainda considerar dois modos diferentes de operação: controlo de corrente e modo de controlo em tensão, onde no último o regulador mantém um determinado valor de tensão aos terminais do condensador, controlando a corrente na carga.

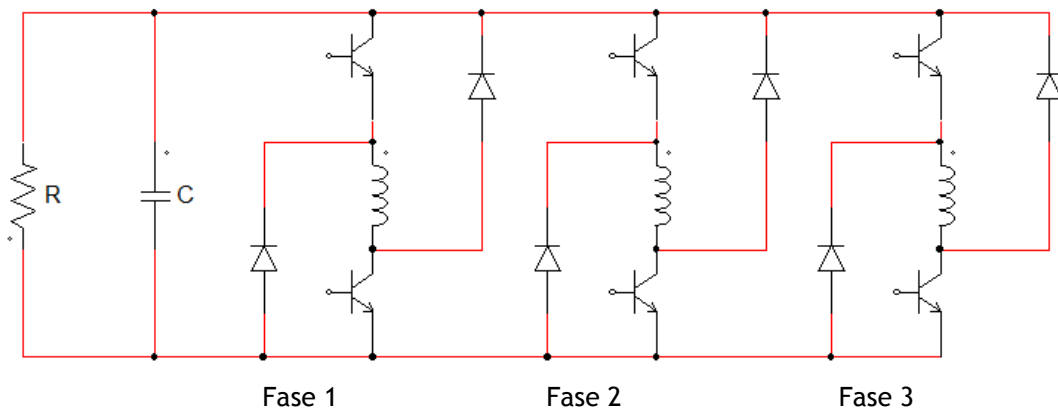


Fig. 5. 9 Sistema de conversão e controlo

CAPÍTULO

6

Análise Numérica dos Geradores Propostos

Neste capítulo é feita a análise numérica, por aplicação do método dos elementos finitos, dos dois geradores lineares propostos para as duas localizações, os quais foram dimensionados no capítulo anterior.

Este método de análise permite fazer uma aproximação muito eficaz do comportamento real das máquinas em estudo, permitindo assim perspectivar e refinar o desempenho das mesmas. A análise dos campos electromagnéticos e distribuições de fluxo conseguida através deste método, permite-nos de uma forma preditiva analisar os valores de desempenho associados aos geradores.

Uma outra questão bastante importante será o facto do comportamento não linear dos geradores, isto porque o seu desempenho varia com as posições relativas entre o estator e o translato, sendo assim necessário fazer uma análise do gerador linear para diferentes posições e também para diferentes larguras de entreferro.

6.1 Introdução

O método de elementos finitos (MEF) é uma técnica de análise numérica para obter soluções aproximadas, para uma grande variedade de problemas relacionados com a engenharia.

Até o surgimento do MEF, a análise dos meios contínuos era afectada pela resolução directa de sistemas de equações de derivadas parciais que regem este fenómeno, tendo sempre em consideração as condições de fronteira necessárias.

Devido à grande complexidade destes problemas, este método de resolução apenas podia ser aplicado a meios contínuos e de geometria simples, o que levou à substituição das derivadas exactas, por derivadas aproximadas que eram calculadas com base em grelhas de pontos.

O método de elementos finitos (MEF) para o estudo de fenómenos electromagnéticos tem trazido grandes vantagens, isto porque as equações de campo permitem uma serie de manipulações em termos de aproximações, que vai de encontro à base numérica deste método.

Assim o MEF é a ferramenta indicada para a resolução do problema aqui em análise, isto porque o gerador linear é constituído por uma geometria irregular e permite ainda o fácil conhecimento dos campos de distribuição de fluxo da máquina. A análise destas características através do MEF é bastante importante pois esta vem complementar os cálculos analíticos efectuados para o dimensionamento dos geradores lineares.

6.2 Análise numérica do problema

Depois de obtidas as dimensões da máquina, o modelo foi desenhado e inserido num programa de simulação baseado na teoria de elementos finitos, o Flux 2D [40].

Este software é uma aplicação de elementos finitos, direccionada para aplicações térmicas e electromagnéticas, tanto em 2D como em 3D. A utilização desta ferramenta permite-nos uma fácil optimização do projecto, e também uma análise mais precisa.

A análise por elementos finitos recorre a um sistema complexo de pontos denominados de nós, que constituem uma malha. Esta malha é concebida de forma a conter os materiais e propriedades que definem a forma como a máquina irá reagir a determinadas situações impostas pelo utilizador. Nessa malha são atribuídos aos nós diversos níveis de densidade, dependendo da precisão necessária ou desejada para uma determinada região.

Um bom exemplo de zona atípica, e por isso alvo de maior cuidado, é a zona de entreferro, na qual se tem grande interesse em analisar o comportamento do fluxo magnético optando

aí por uma maior densidade, ao contrário da zona circundante à máquina em que a densidade tem tendência a ser menor [38,39].

É de notar que o software Flux 2D impõe um limite mínimo para a densidade da malha de $0.314 \text{ e}^{-04} \text{ m}$, estando assim o utilizador limitado a esse valor, que no caso aqui em análise não teve grande relevância devido às dimensões da máquina, mas que em outro tipo de problema pode ser uma grande restrição.

6.3 Geometria e malha solução do gerador

Considere-se como objecto de análise o gerador dimensionado para a zona do Baleal, visto que é o mais favorável. Na Fig. 6.1 é mostrada a geometria do gerador que foi construída através do software de elementos finitos, e que foi imprescindível para a construção da malha de elementos finitos, mostrada na Fig. 6.2.

A malha que aqui se mostra foi obtida apenas para uma parte da máquina por questões de comodidade e percepção de imagem, não se mostrando toda a extensão da máquina. Como se pode verificar, a Fig. 6.2 mostra a malha para um gerador de 6/4, mas como se trata de uma máquina linear esta pode ser generalizada para a restante máquina.

Para que se possa entender melhor o funcionamento da máquina, são agora estabelecidas algumas características relativamente às partes que a constituem:

- Uma parte fixa, a qual será designada por primário. Este é formado basicamente por ferro e dotado de ranhuras (também designadas por cavas), onde no seu interior são alojadas as bobinas, e cada bobina constitui um pólo, num total de 6 pólos;
- Uma parte móvel designada por secundário, também constituída por ranhuras que ao contrário do primário não aloja bobinas;
- Seis enrolamentos, bobinados em cada pólo, formando cada ligação em série de dois deles uma fase (fluxos concordantes), sendo a fase designada por A-A' constituída pelos enrolamentos 1 e 4, a fase B-B' pelos enrolamentos 2 e 5 e a fase C-C' pelos enrolamentos 3 e 6.

Na Fig. 6.2 é mostrada a malha do gerador, considerando a posição de alinhamento, e onde a excitação se faz na fase A-A'.

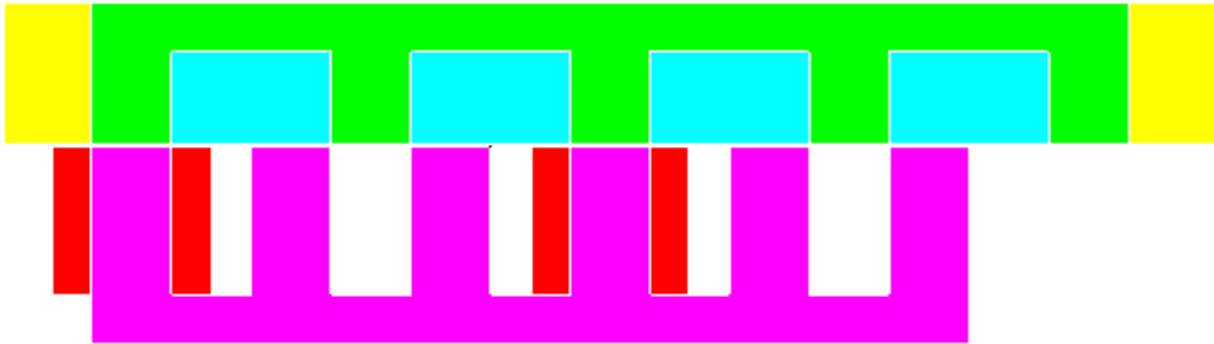


Fig. 6.1 Geometria do gerador linear construída no software de elementos finitos.

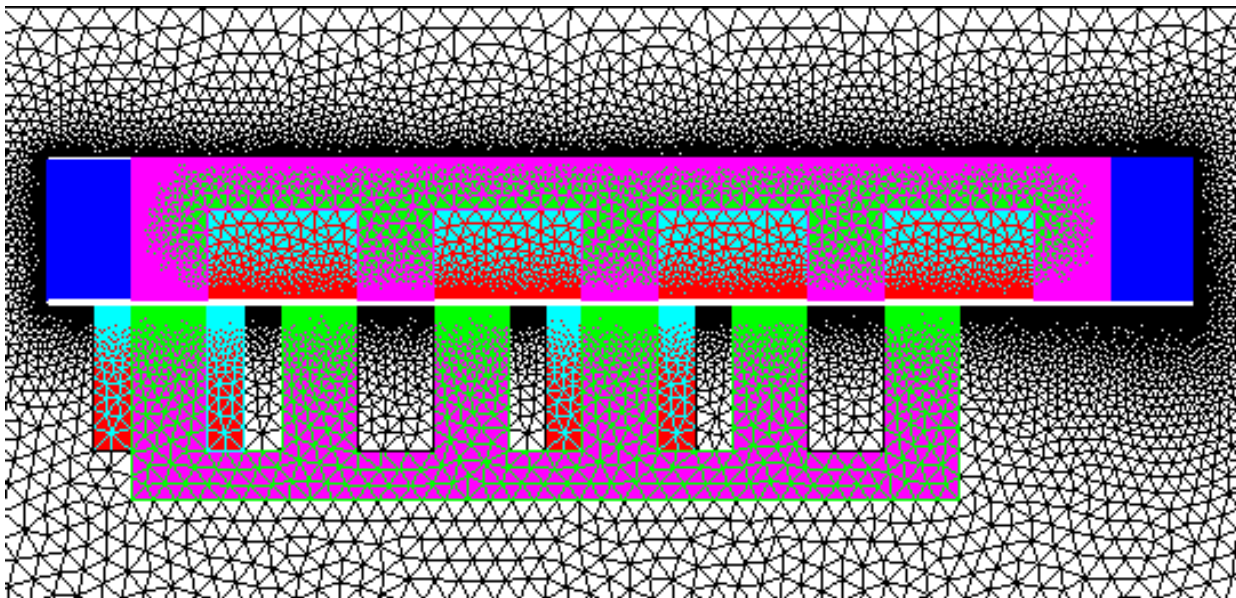


Fig. 6.2 Malha solução de elementos finitos.

Devido às dimensões da máquina, na Fig. 6.2 não se percebe com grande pormenor a constituição da malha solução, pelo que se efectuou um corte da máquina, possibilitando a ampliação e a conseqüente melhor visualização da malha, e que se mostra na Fig.6.3.

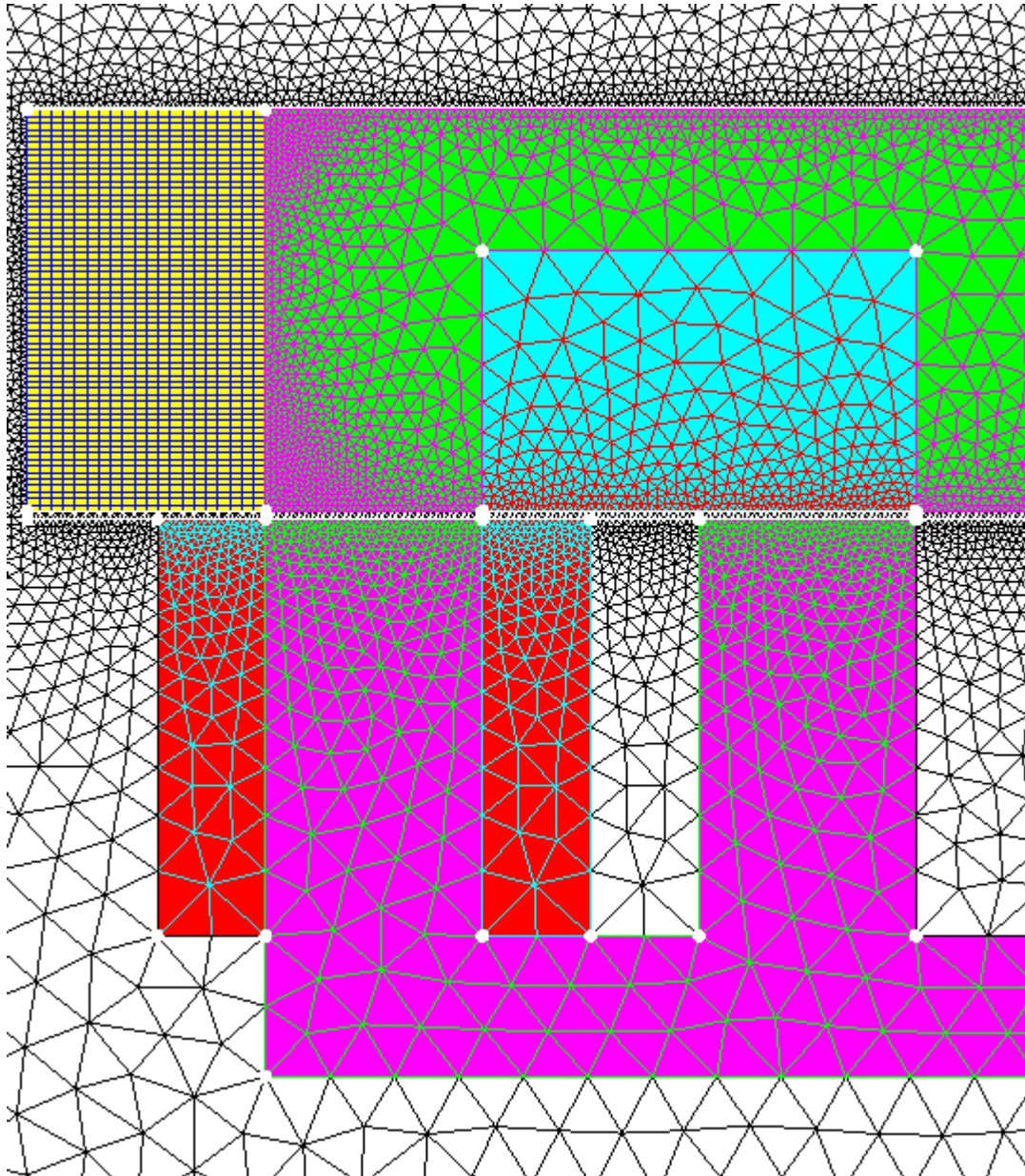


Fig. 6.3 Corte da máquina com a malha solução de elementos finitos.

6.4 Análise do comportamento electromagnético do gerador

Neste subcapítulo realiza-se uma análise ao comportamento do gerador linear recorrendo aos resultados obtido por simulação no programa Flux 2D. A simulação foi realizada de modo a se obterem as diferentes características magnéticas para seis posições relativas entre o primário e o secundário diferentes, desde a posição de alinhamento até à posição de não-alinhamento.

6.4.1 Curvas Equipotenciais

As Figuras 6.4 a 6.9 ilustram o princípio de funcionamento do gerador linear de relutância variável comutado, mostrando diferentes posições relativas do primário e do secundário, desde a posição de alinhamento até à posição de não alinhamento, passando por posições com deslocamento de 10 mm, 20 mm, 30 mm e 40 mm, e as respectivas distribuições de fluxo, para a excitação da fase A-A', mostrando as linhas equipotenciais. Para a posição da Fig. 6.4, quando a corrente percorre a fase A-A', o secundário encontra-se na posição de máxima indutância, ou seja no mínimo da relutância magnética. Esta é uma posição onde mais se faz notar a concentração de linhas de fluxo, principalmente nas regiões de proximidade entre pólos do secundário e do primário. Se o secundário for deslocado para uma posição diferente da posição de alinhamento, existe a possibilidade de saturação localizada nos cantos dos pólos. Para a posição que se mostra na Fig. 5.9 verifica-se o alinhamento da cava do primário com o dente do secundário, e para este caso, a força é nula, sendo a indutância mínima e a relutância máxima. Esta é uma posição de equilíbrio instável, já que um pequeno desvio relativamente a ela, força o secundário a ser atraído para a próxima posição de alinhamento. Alguns parâmetros, cuja influência importa averiguar, são a largura do dente do secundário e a largura do pólo do primário, bem como a relação entre elas. Quanto maior a largura do pólo maior o valor do fluxo, maior a indutância de alinhamento. Contudo, a uma maior largura do pólo corresponde um maior volume de laminação, bem como um maior comprimento equivalente de bobina, com os correspondentes aumentos de material necessário, de peso da máquina e de perdas por efeito de Joule.

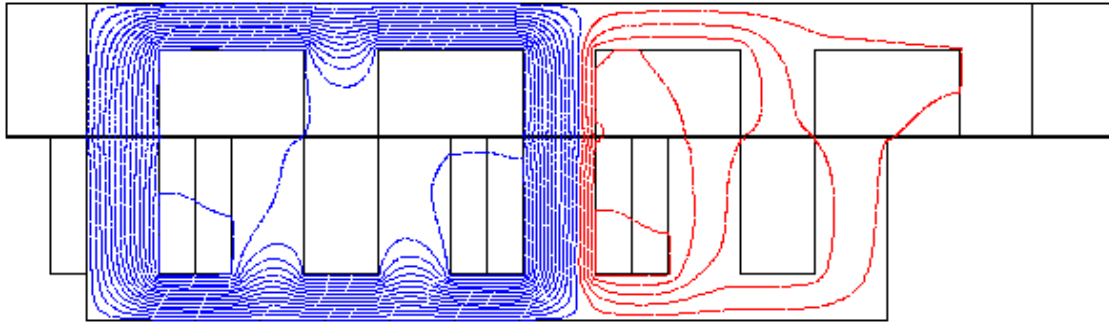


Fig. 6.4 Ilustração da curvas equipotenciais do gerador linear para a posição de alinhamento.

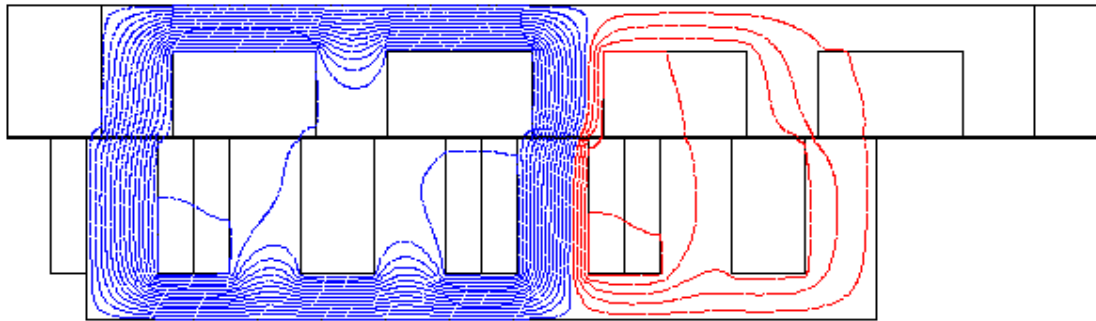


Fig. 6.5 Ilustração da curvas equipotenciais do gerador linear para um deslocamento de 10 mm.

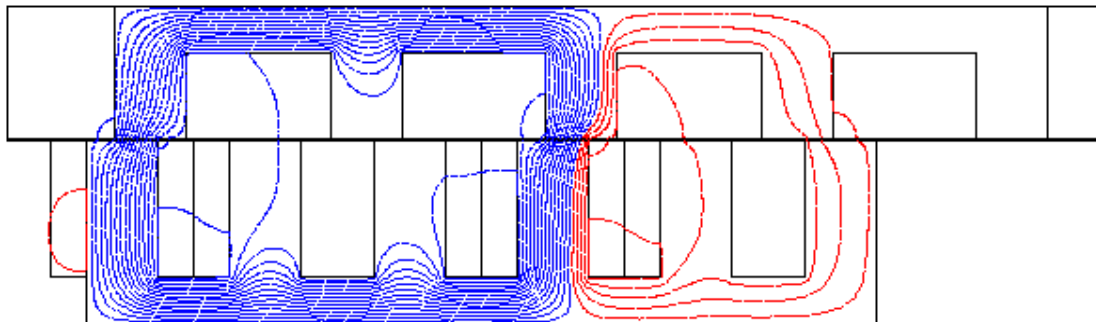


Fig. 6.6 Ilustração da curvas equipotenciais do gerador linear para um deslocamento de 20 mm.

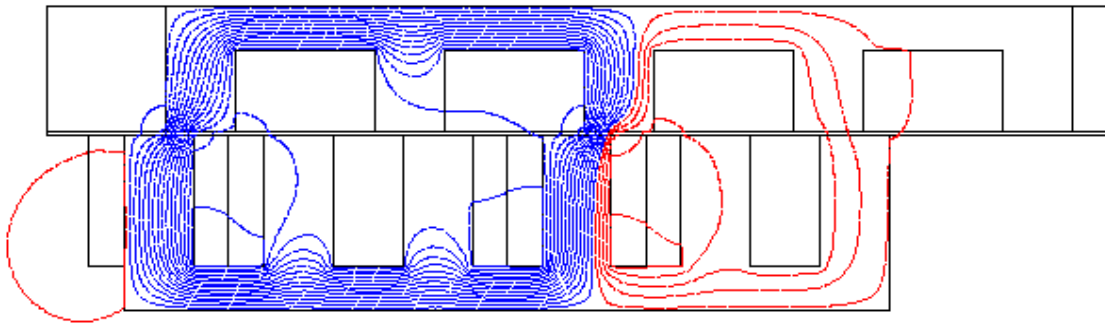


Fig. 6.7 Ilustração da curvas equipotenciais do gerador linear para um deslocamento de 30 mm.

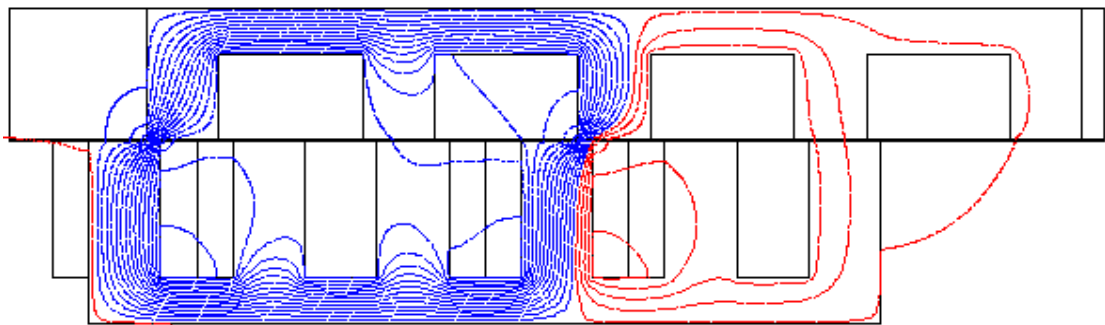


Fig. 6.8 Ilustração da curvas equipotenciais do gerador linear para um deslocamento de 40 mm.

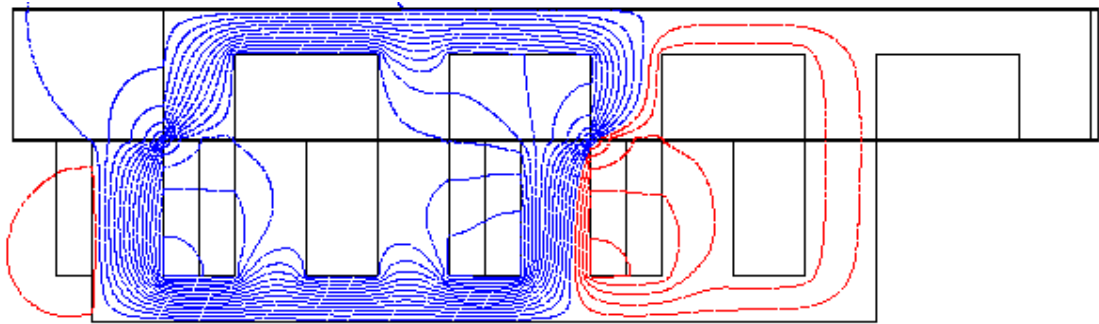


Fig. 6.9 Ilustração da curvas equipotenciais do gerador linear para a posição de não-alinhamento.

6.4.2 Densidade de fluxo

As Figuras 6.10 a 6.15 mostram os mapas coloridos representativos da variação da densidade de fluxo magnético na máquina para as posições de alinhamento, intermédias e de não alinhamento, correspondendo às mesmas posições consideradas na análise apresentada no ponto anterior. (as figuras para as diferentes posições foram obtidas estabelecendo os mesmos valores para os limites inferiores e superiores das densidades de fluxo magnético, de tal forma que se possa, através da observação das tonalidades, analisar o comportamento magnético do modelo). Sendo o GLRVC um dispositivo de geometria variável, estes mapas de cor permitem averiguar acerca das regiões de maior saturação, bem como do comportamento da distribuição das linhas de fluxo para qualquer ponto do ferro ou do entreferro. Desta forma, é possível prever, durante a fase de projecto, o desempenho futuro de uma máquina, aferindo quer os valores dos seus parâmetros construtivos, quer as condições de operação. Este é um procedimento que, actualmente, graças ao desenvolvimento de bons programas baseados no MEF e às capacidades dos suportes informáticos ao dispor, é de grande importância na redução dos custos inerentes ao desenvolvimento de um sistema gerador, e que se apresenta bastante atractivo do ponto de vista do projectista.

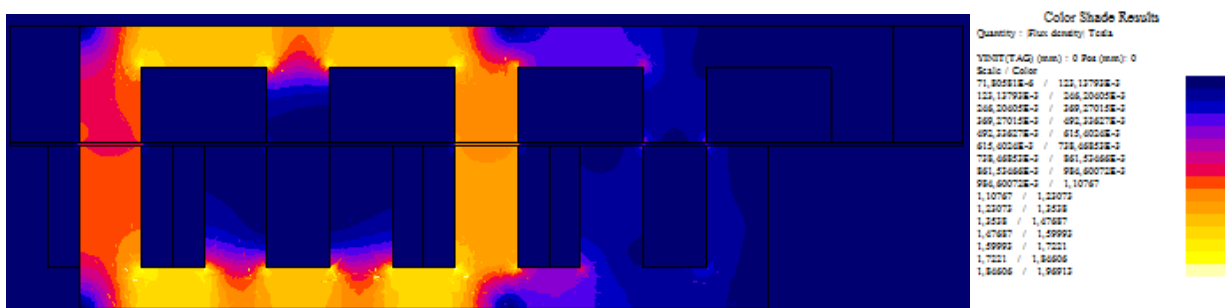


Fig. 6.10 Ilustração da densidade de fluxo na posição de alinhamento.

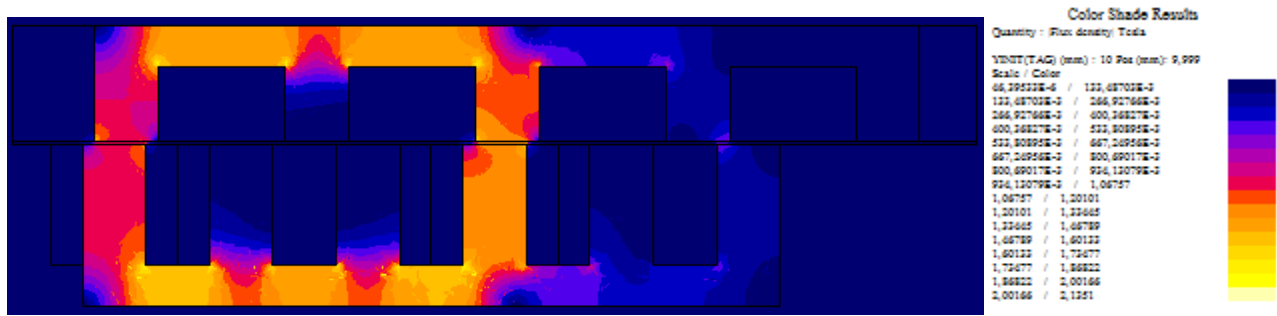


Fig. 6.11 Ilustração da densidade de fluxo para um deslocamento de 10 mm.

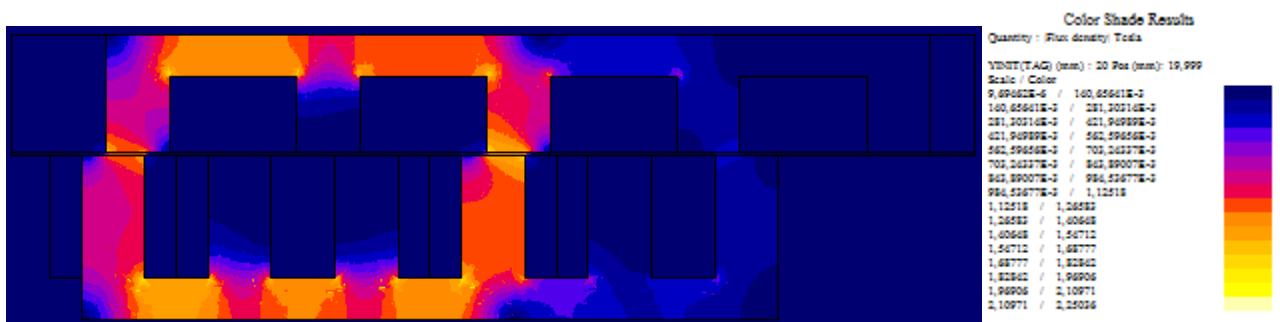


Fig. 6.12 Ilustração da densidade de fluxo para um deslocamento de 20 mm.

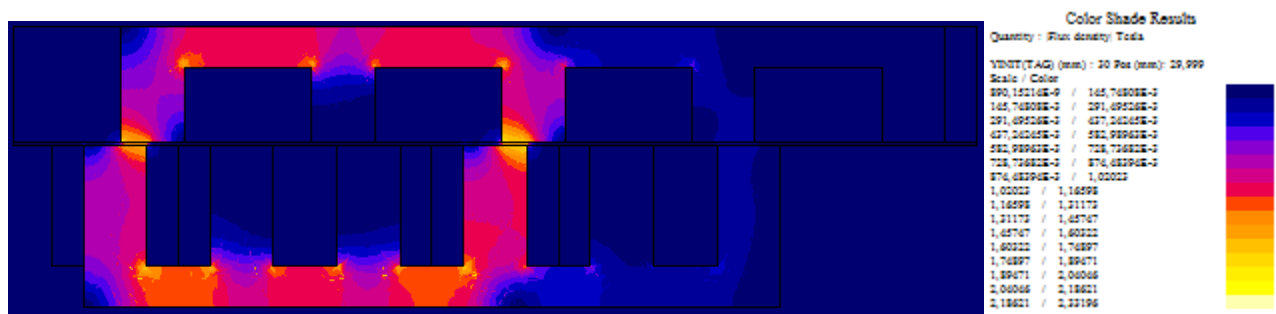


Fig. 6.13 Ilustração da densidade de fluxo para um deslocamento de 30 mm.

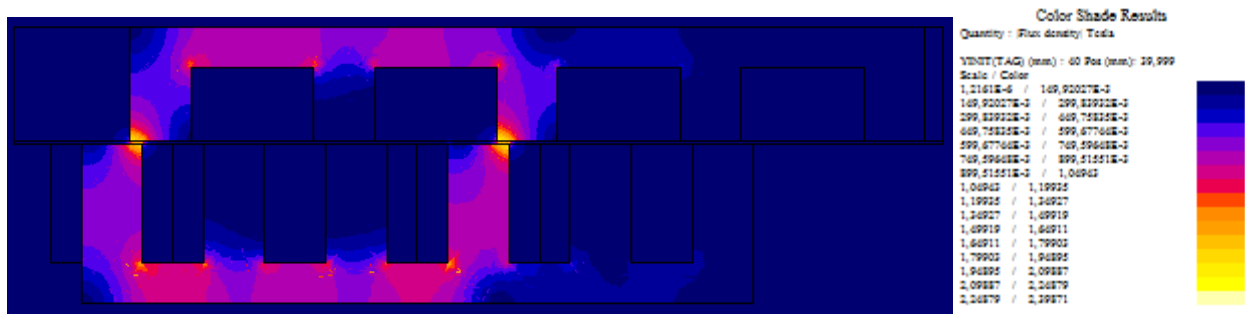


Fig. 6.14 Ilustração da densidade de fluxo para um deslocamento de 40 mm.

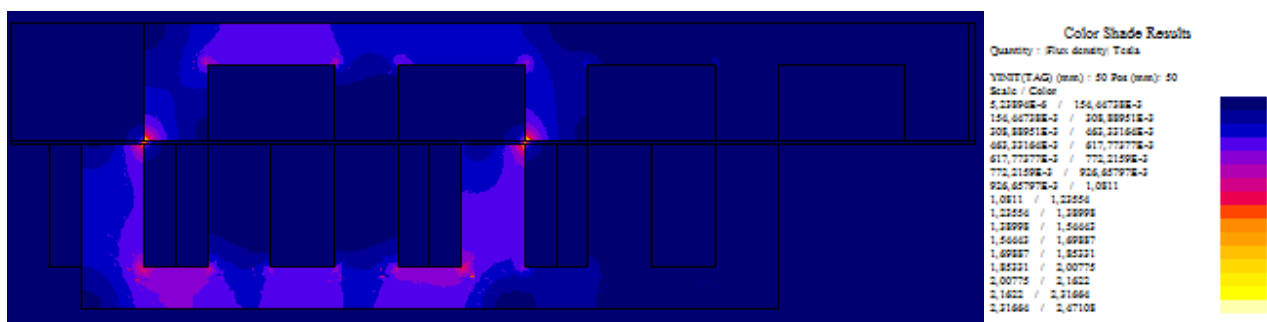


Fig. 6.15 Ilustração da densidade de fluxo na posição de não-alinhamento.

6.4.3 Densidade de corrente

Neste subcapítulo ilustra-se mais uma possibilidade de análise permitida pelo software FLUX2D, e que é neste caso, perceber, através do mapa de cor da densidade de corrente, o sentido da densidade de corrente em cada bobina e em cada corte de cada bobina. Permite-se assim perceber se as bobinas de cada fase estarão ligadas de tal forma que os fluxos sejam concordantes, ou por outro lado discordantes. A Fig. 6.16 mostra a densidade de corrente para uma situação de excitação da fase A-A' com a corrente de 45 A, na posição de alinhamento entre o estator e o translato.

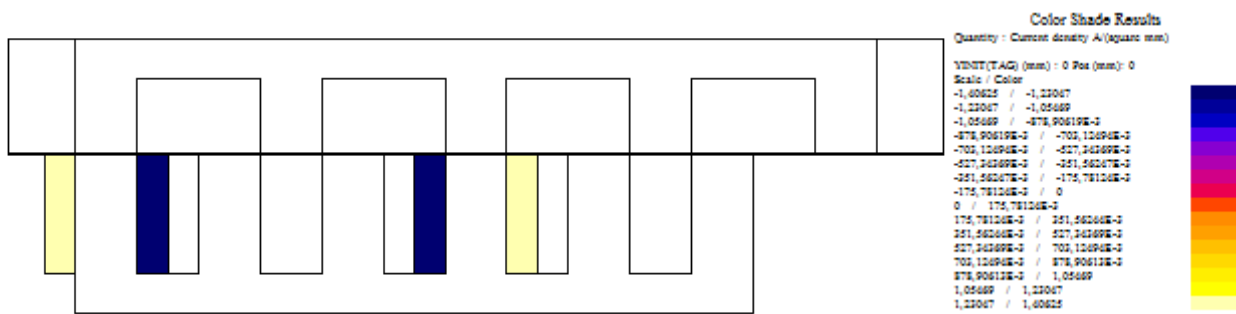


Fig. 6.16 Ilustração da densidade de corrente na posição de alinhamento.

6.5 Componentes da densidade de fluxo magnético na região do entreferro

As Figuras 6.17 a 6.22 mostram a evolução da densidade de fluxo magnético no entreferro em função da posição, considerando a situação de excitação da fase A-A' e para a posição relativa de alinhamento entre o estator e o translato (Fig. 6.17 e Fig. 6.19), para a posição relativa de quase não-alinhamento entre estator e o translato (Fig. 6.20 e Fig. 6.21), e para a posição relativa de não alinhamento entre estator e o translato (Fig. 6.22 e Fig. 6.23). As figuras consideram ainda a evolução da densidade de fluxo segundo a direcção normal (Fig. 6.17, Fig. 6.19 e Fig. 6.21) e segundo a direcção tangencial (Fig. 6.18, Fig. 6.20 e Fig. 6.22).

Destas figuras comprova-se a forte densidade da componente normal do fluxo magnético na posição de alinhamento e na zona equivalente às dimensões do dente, que se vai reduzindo à medida que a posição relativa da máquina de desloca para o não alinhamento.

A informação relativa à densidade de fluxo magnético, no que diz respeito à sua componente tangencial, tem interesse na medida em que mostra a dispersão das linhas de fluxo para fora da zona útil que contribuirá para o alto desempenho da máquina, comprovado pelos reduzidos valores desta componente.

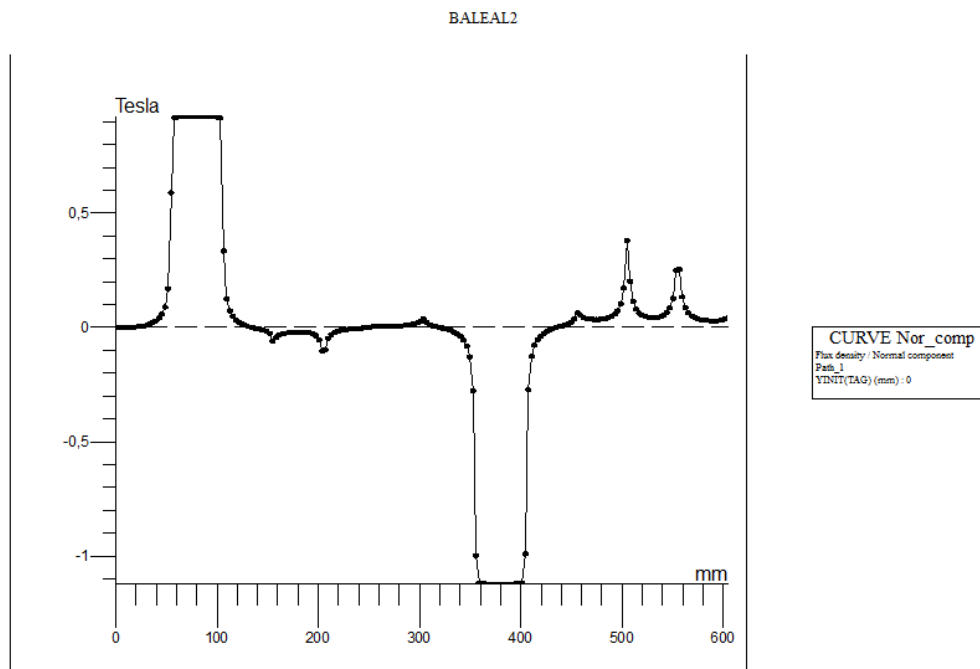


Fig. 6.17 Gráfico da componente normal da densidade de fluxo ao longo do entreferro, na posição de alinhamento.

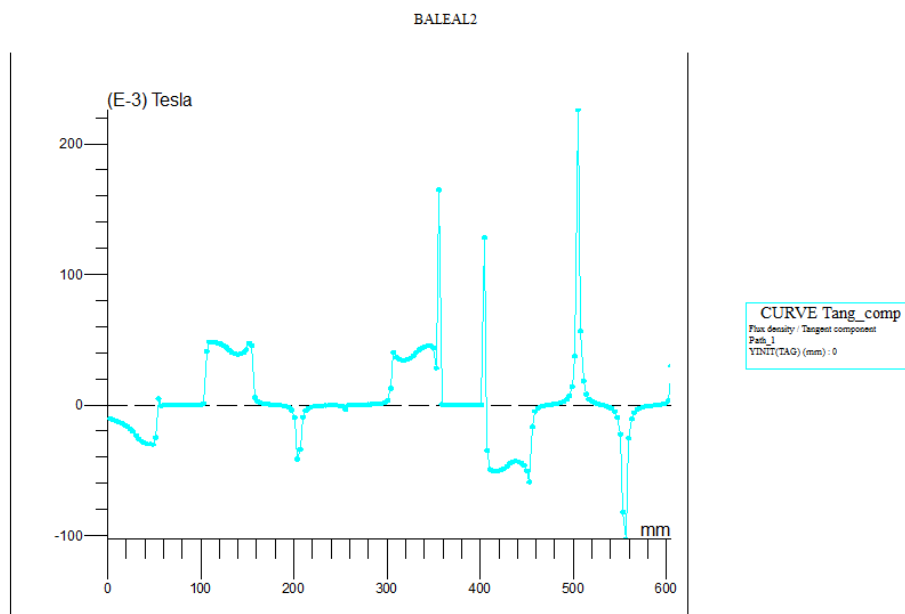


Fig. 6.18 Gráfico da componente tangencial da densidade de fluxo ao longo do entreferro, na posição de alinhamento.

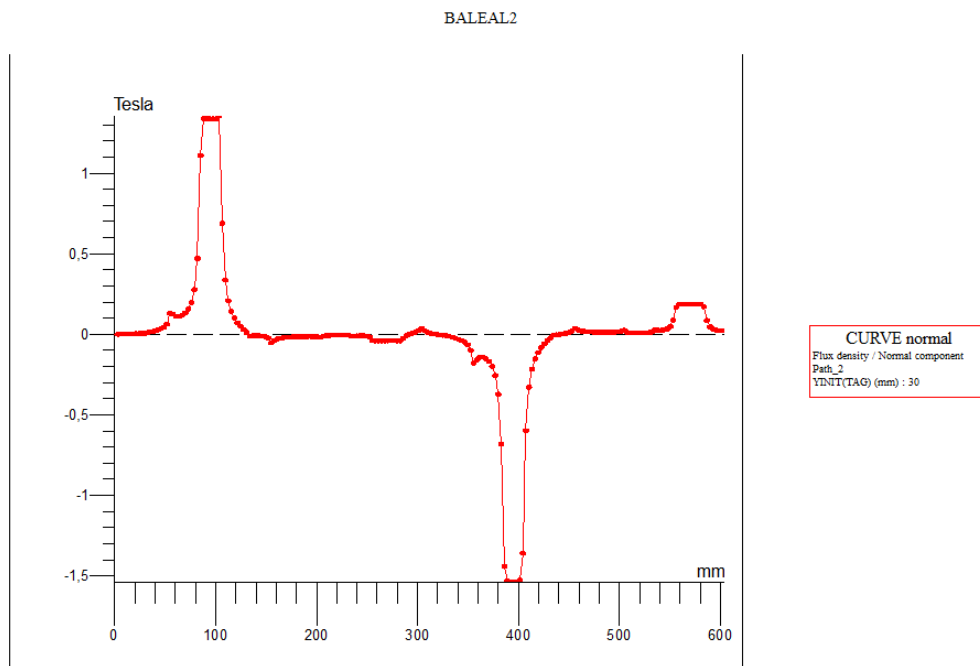


Fig. 6.19 Gráfico da componente normal da densidade de fluxo ao longo do entreferro, na posição de quase não-alinhamento.

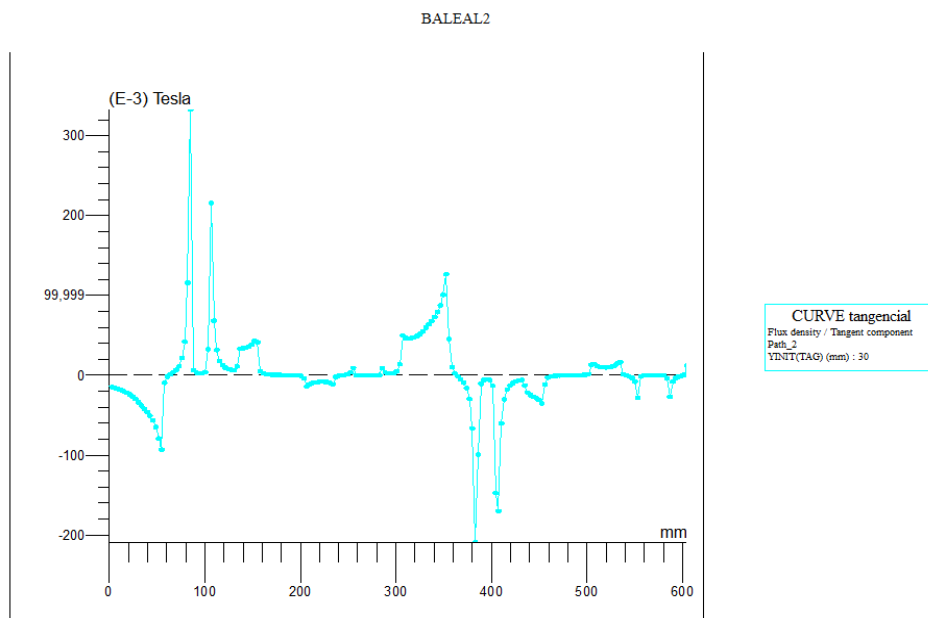


Fig. 6.20 Gráfico da componente tangencial da densidade de fluxo ao longo do entreferro, na posição de quase não-alinhamento.

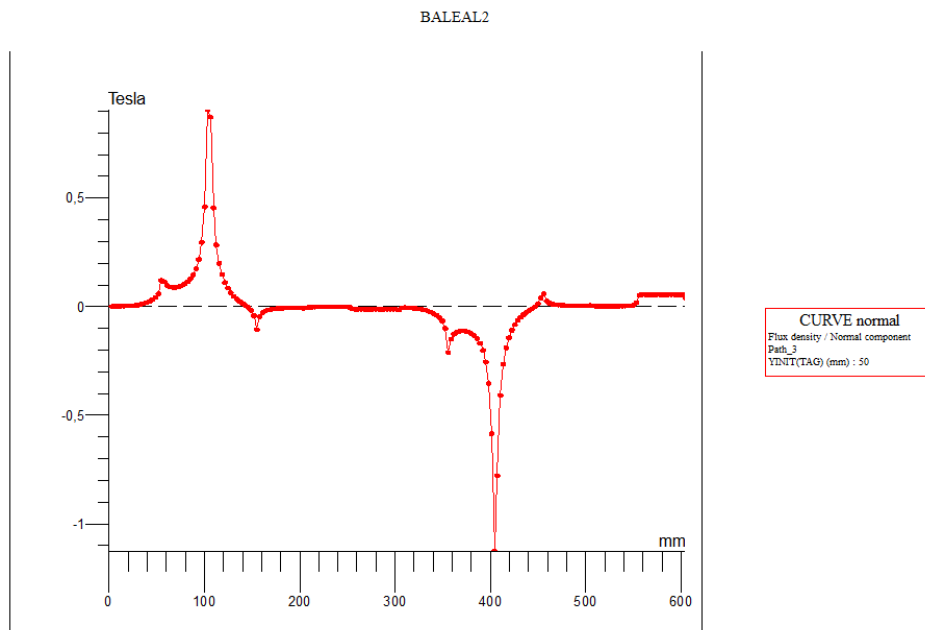


Fig. 6.21 Gráfico da componente normal da densidade de fluxo ao longo do entreferro, na posição de não-alinhamento.

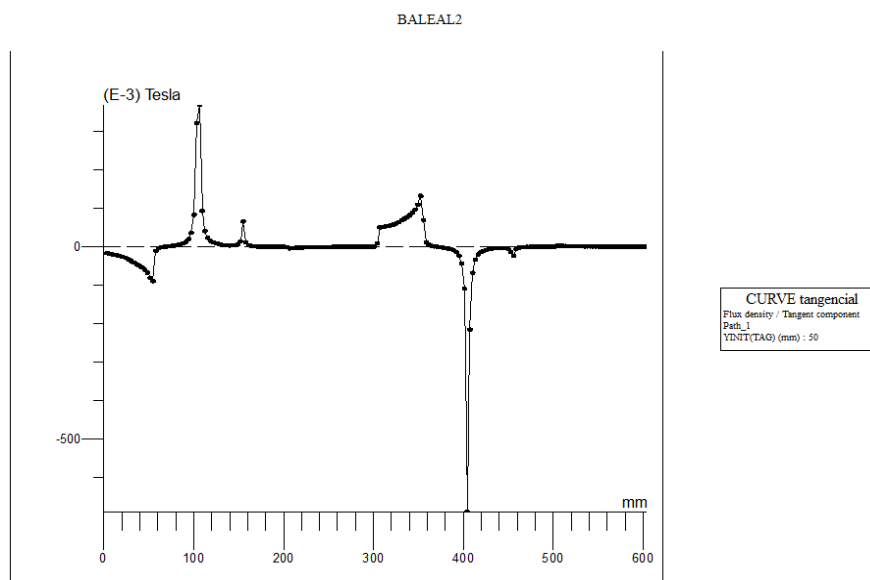


Fig. 6.22 Gráfico da componente tangencial da densidade de fluxo ao longo do entreferro, na posição de não-alinhamento.

6.6 Análise do gerador para uma variação do comprimento de entreferro

A análise efectuada ao gerador tem considerado um comprimento de entreferro de 2 mm. No entanto entende-se ser importante realizar uma análise em tudo idêntica à anterior, mas considerando agora um comprimento de entreferro de 4 mm. Este tipo de análise é pertinente, já que o comprimento do entreferro é um parâmetro importante no desempenho da máquina, sendo o seu aumento influenciador da redução substancial a densidade de fluxo magnético. Porém, quanto menores forem os valores de espaçamento entre as superfícies em movimento da máquina, mais elevados serão os custos de fabricação, montagem e manutenção.

6.6.1 Malha solução para um entreferro de 4 mm

Na Fig. 6.23 mostra-se a malha solução para o gerador, considerando a posição de alinhamento, e onde a excitação se faz na fase A-A', e com um comprimento de entreferro de 4 mm. A Fig. 6.24 mostra um pormenor da malha mostrada na Fig. 6.23, com o objectivo de melhor observação.

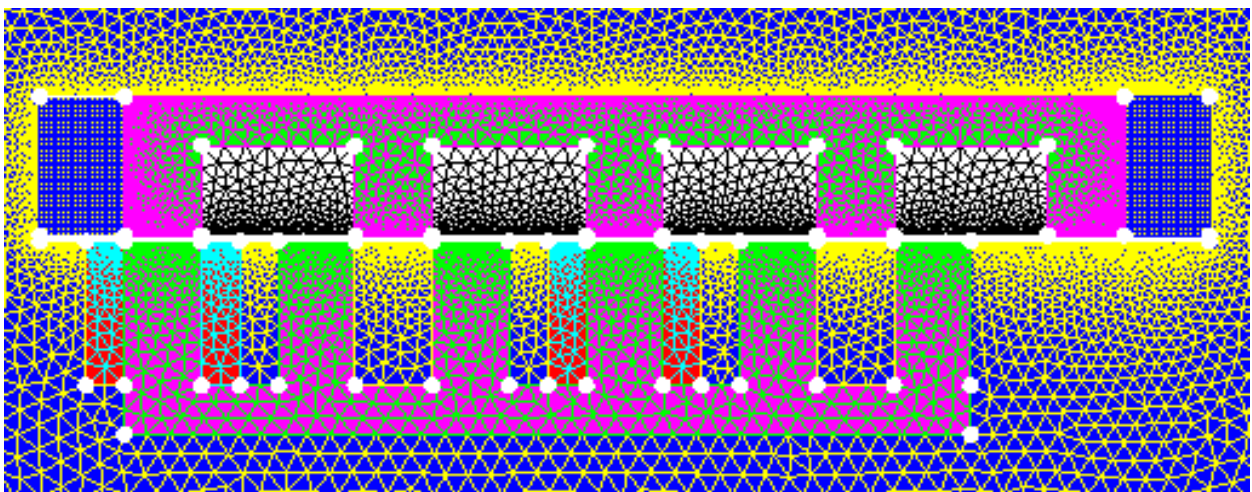


Fig. 6.23 Malha solução de elementos finitos do gerador com um entreferro igual a 4 mm.

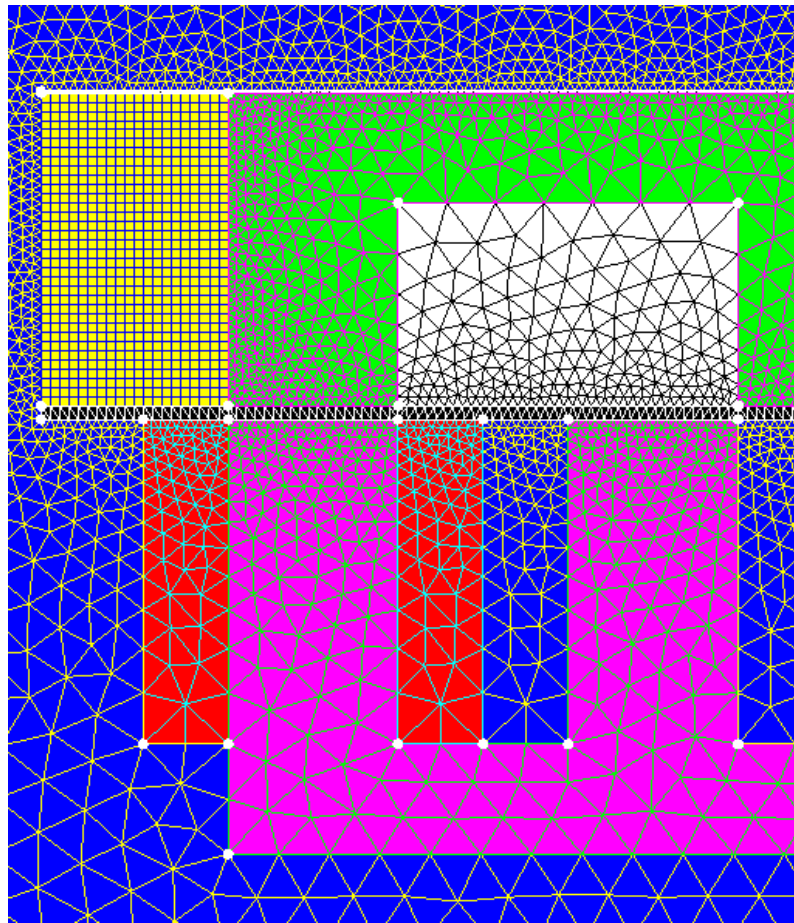


Fig. 6.24 Corte representativo da malha solução.

6.6.2 Curvas Equipotenciais

As Figuras 6.25 a 6.30 ilustram o princípio de funcionamento do gerador linear de relutância variável comutado, mostrando diferentes posições relativas do primário e do secundário, desde a posição de alinhamento até à posição de não alinhamento, passando por posições com deslocamento de 10 mm, 20 mm, 30 mm e 40 mm, e as respectivas distribuições de fluxo, para a excitação da fase A-A', mostrando as linhas equipotenciais, agora para o caso do comprimento de entreferro ser de 4 mm.

Da análise destas figuras, e comparando com o caso em que se considerou o comprimento do entreferro do gerador de 2 mm, conclui-se que se verifica uma maior dispersão das linhas de fluxo magnético, sendo notório um maior número de linhas que se afastam do caminho principal entre o estator e o translato para o aumento do comprimento de entreferro.

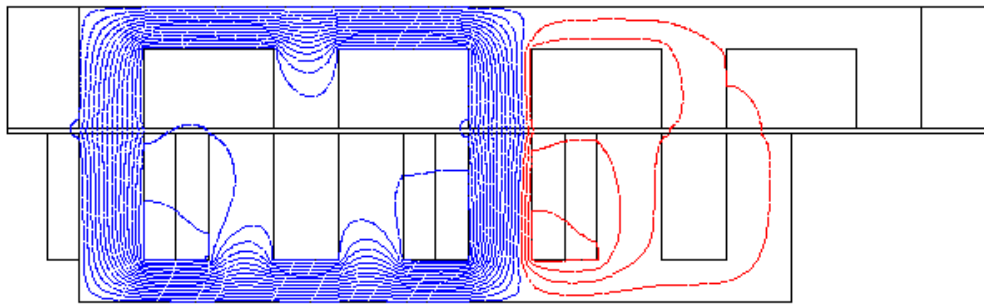


Fig. 6.25 Ilustração da curvas equipotenciais do gerador linear para a posição de alinhamento.

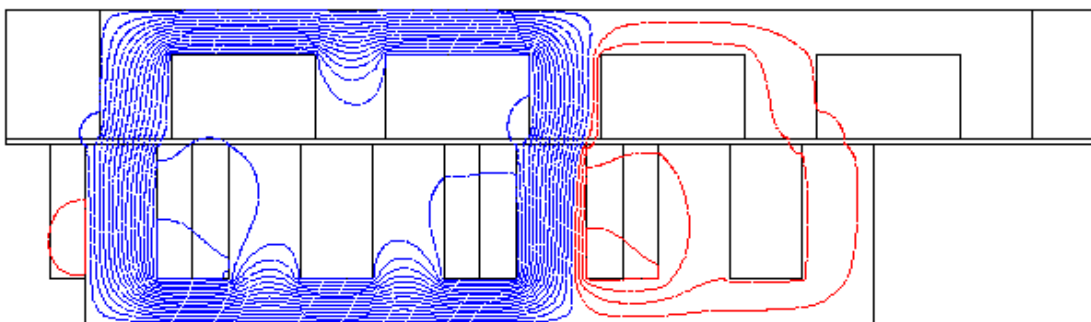


Fig. 6.26 Ilustração da curvas equipotenciais do gerador linear para um deslocamento de 10 mm.

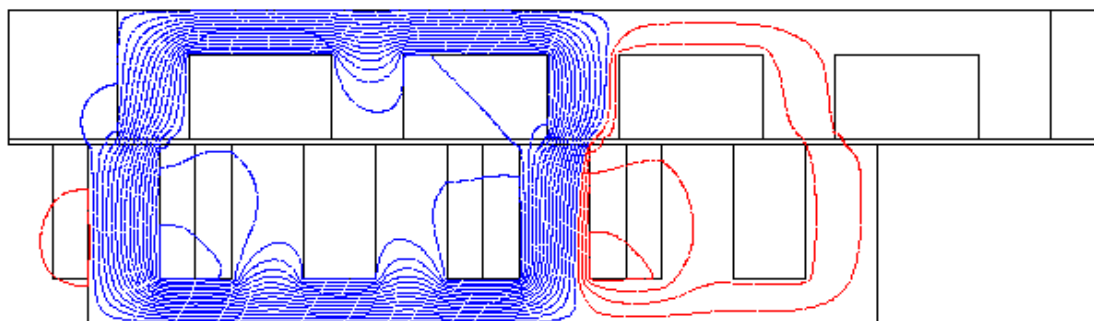


Fig. 6.27 Ilustração da curvas equipotenciais do gerador linear para um deslocamento de 20 mm.

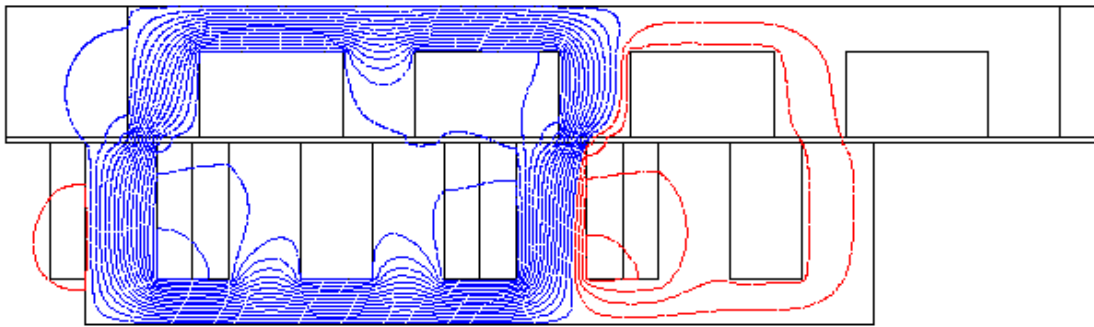


Fig. 6.28 Ilustração da curvas equipotenciais do gerador linear para um deslocamento de 30 mm.

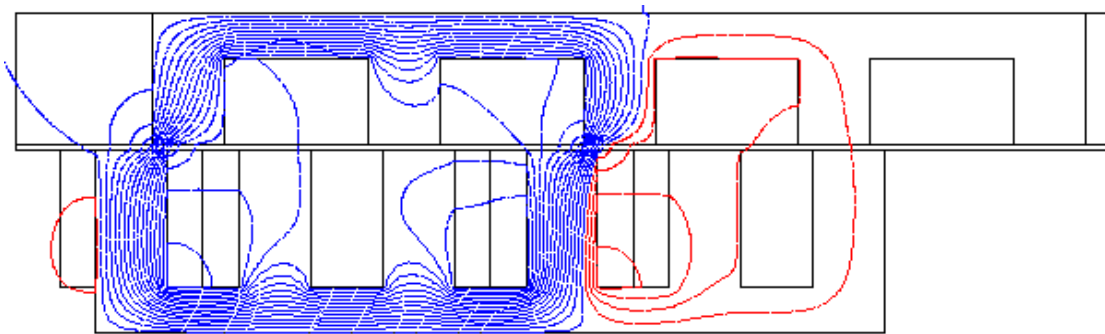


Fig. 6.29 Ilustração da curvas equipotenciais do gerador linear para um deslocamento de 40 mm.

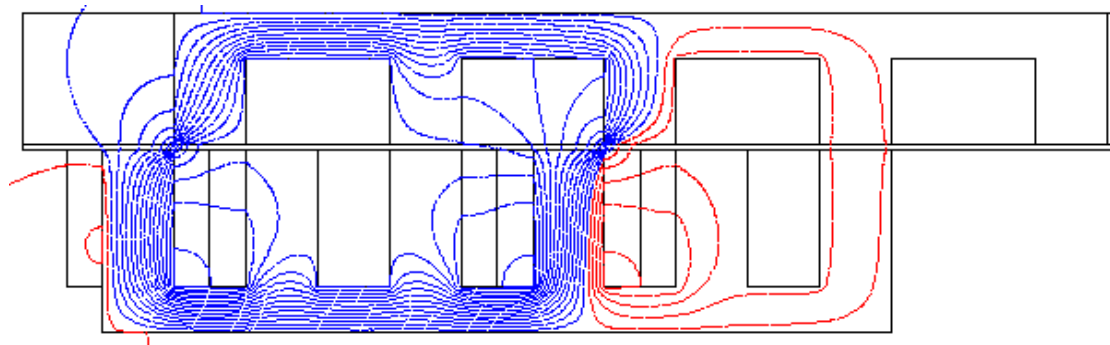


Fig. 6.30 Ilustração da curvas equipotenciais do gerador linear para a posição de não-alinhamento.

6.6.3 Densidade de fluxo

As Figuras 6.31 a 6.36 mostram os mapas coloridos representativos da variação da densidade de fluxo magnético na máquina para as posições de alinhamento, intermédias e de não alinhamento, correspondendo às mesmas posições consideradas na análise apresentada no ponto anterior, agora para o gerador com um comprimento de entreferro de 4 mm. Desta forma, durante a fase de projecto, podemos averiguar do desempenho máquina, comparando para os diferentes valores de comprimento de entreferro. Conclui-se da análise aqui efectuada, e para um comprimento de entreferro de 4 mm, que comparando com o caso em que se considerou o comprimento do entreferro do gerador de 2 mm, e tal como já referido no subcapítulo anterior, que se verifica uma maior dispersão das linhas de fluxo magnético, sendo notória uma menor densidade de fluxo magnético, comprovada pelos valores a que cada cor corresponde nos mapas.

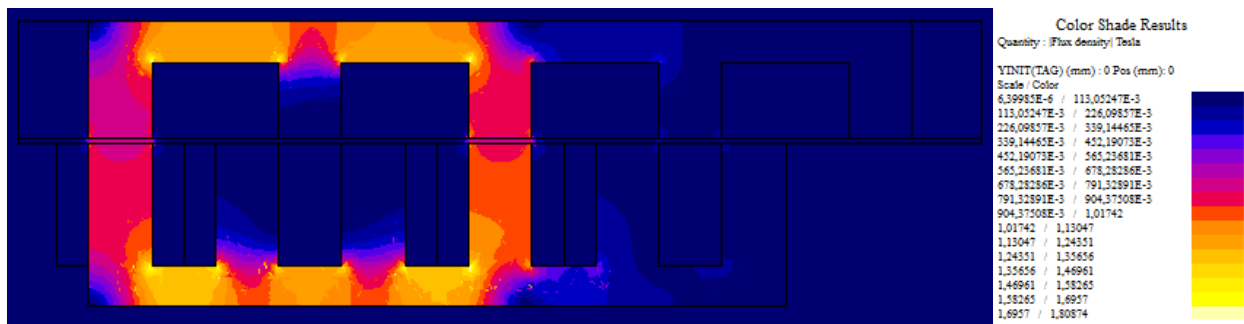


Fig. 6.31 Ilustração da densidade de fluxo na posição de alinhamento.

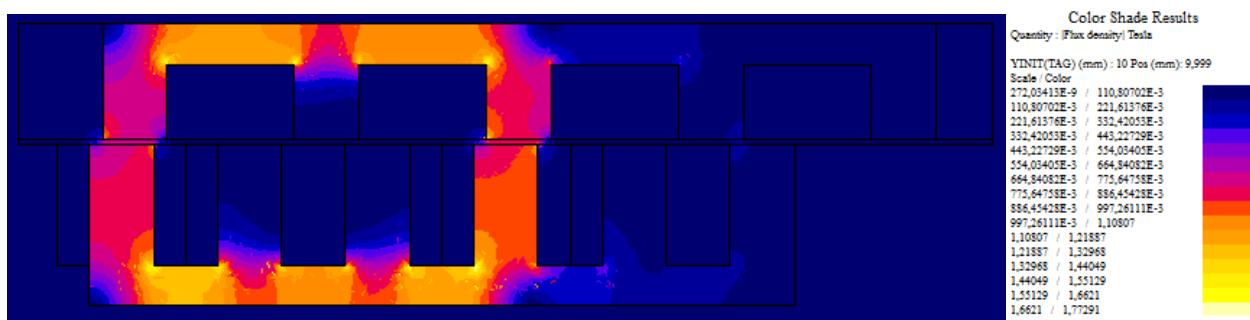


Fig. 6.32 Ilustração da densidade de fluxo para um deslocamento de 10 mm.

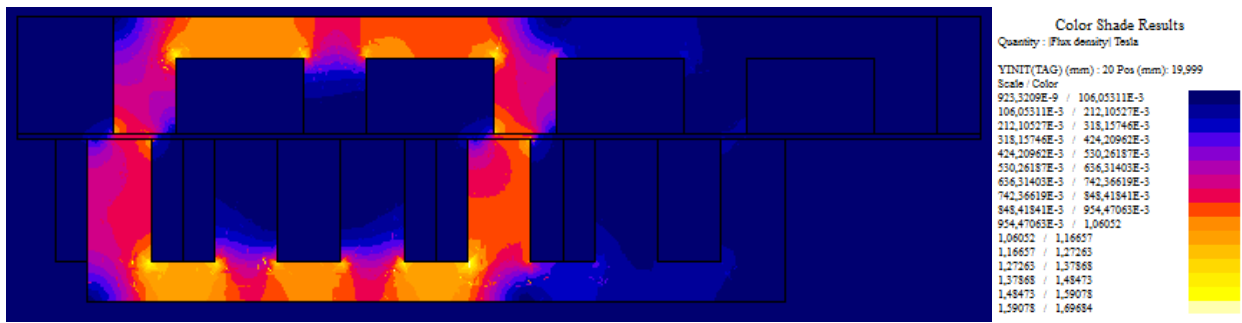


Fig. 6.33 Ilustração da densidade de fluxo para um deslocamento de 20 mm.

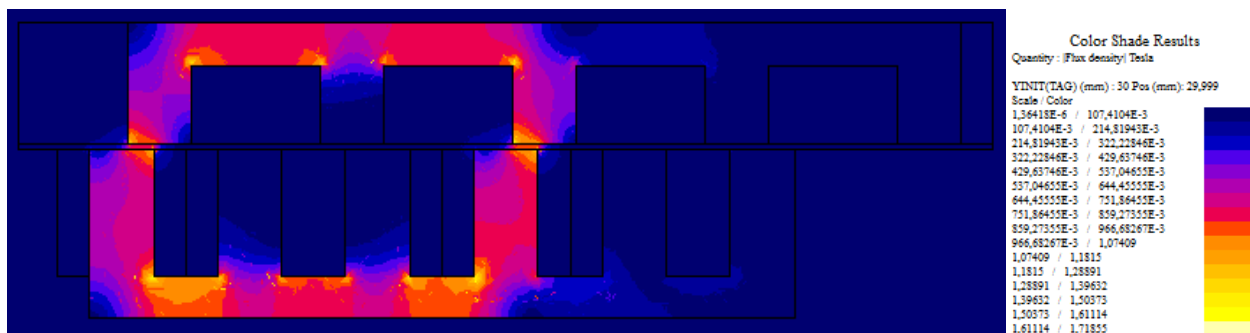


Fig. 6.34 Ilustração da densidade de fluxo para um deslocamento de 30 mm.

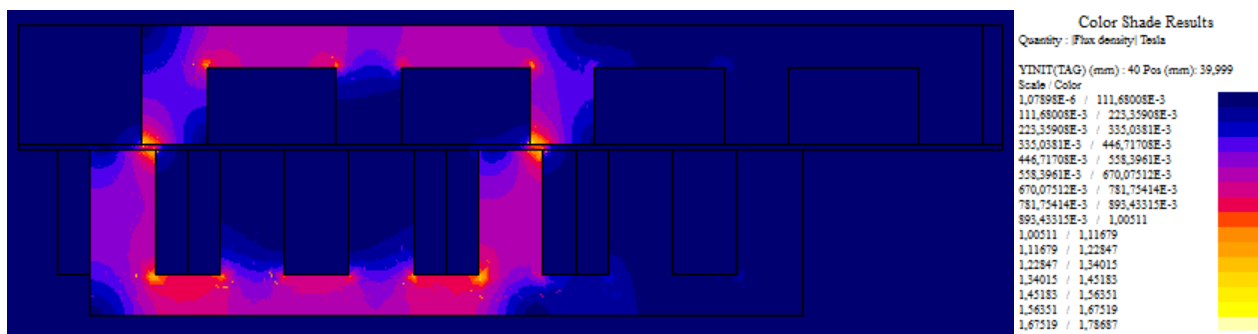


Fig. 6.35 Ilustração da densidade de fluxo para um deslocamento de 40 mm.

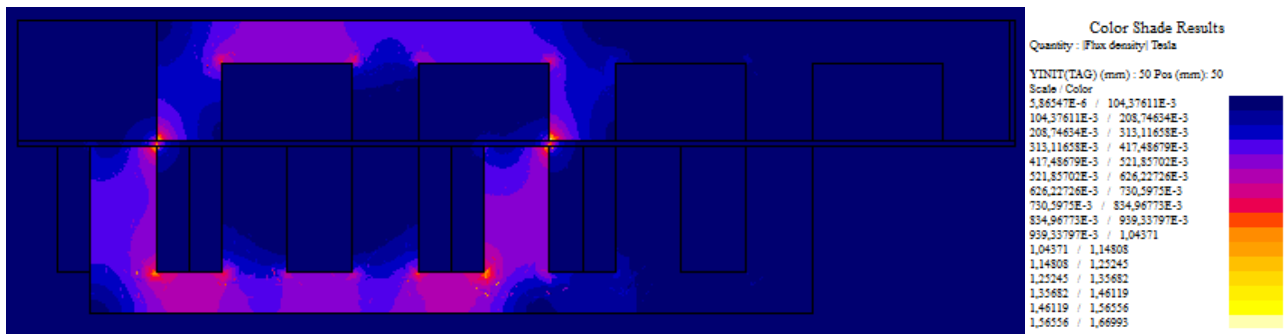


Fig. 6.36 Ilustração da densidade de fluxo para um deslocamento de 50 mm.

6.6.4 Densidade de corrente

Como foi visto anteriormente para um entreferro de 2mm, é também fácil de perceber, através do mapa de cor da densidade de corrente, o sentido da densidade de corrente em cada bobina e em cada corte de cada bobina, para um entreferro de 4mm. Permite-se assim perceber se as bobinas de cada fase estarão ligadas de tal forma que os fluxos sejam concordantes, ou por outro lado discordantes. A Fig. 6.37 mostra a densidade de corrente para uma situação de excitação da fase A-A' com a corrente de 45 A, na posição de alinhamento entre o estator e o translato.

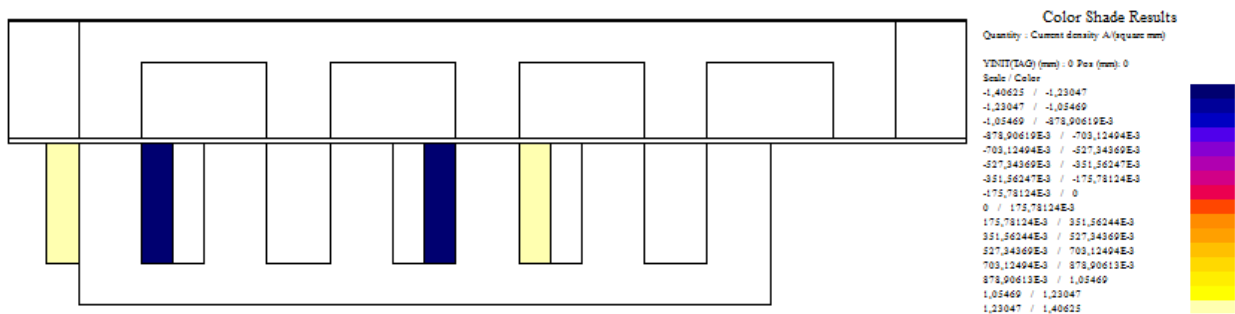


Fig. 6.37 Ilustração da densidade de corrente na posição de alinhamento.

6.6.5 Componentes da densidade de fluxo magnético na região do entreferro

As Figuras 6.38 a 6.43 mostram a evolução da densidade de fluxo magnético no entreferro, agora com o comprimento de 4 mm, em função da posição, considerando a situação de excitação da fase A-A' e para a posição relativa de alinhamento entre o estator e o translato (Fig. 6.38 e Fig. 6.40), para a posição relativa de quase não-alinhamento entre estator e o translato (Fig. 6.41 e Fig. 6.42), e para a posição relativa de não alinhamento entre estator e o translato (Fig. 6.43). As figuras consideram ainda a evolução da densidade de fluxo segundo a direcção normal (Fig. 6.38, Fig. 6.40 e Fig. 6.42) e segundo a direcção tangencial (Fig. 6.39, Fig. 6.41 e Fig. 6.43). Destas figuras, e comparando com as figuras correspondentes para o comprimento de entreferro de 2 mm, conclui-se que ocorre uma considerável redução da densidade de fluxo; por exemplo para a posição de alinhamento, passa-se de uma densidade de fluxo de 0.9 T no caso do entreferro ter um comprimento de 2 mm, para uma densidade de fluxo magnético de 0.7 T para o caso aqui em análise. Também, e por causa do aumento da distância de ar entre o estator e o translato, verifica-se um esbatimento nas diferenças de densidade de fluxo magnético entre as duas posições relativas limite consideradas. Por outro lado, a dispersão da densidade de fluxo, na sua componente tangencial mostra-se mais evidente do que para o caso do menor comprimento de entreferro, precisamente pela menor eficácia de ligação magnética entre as duas partes constituintes do gerador.

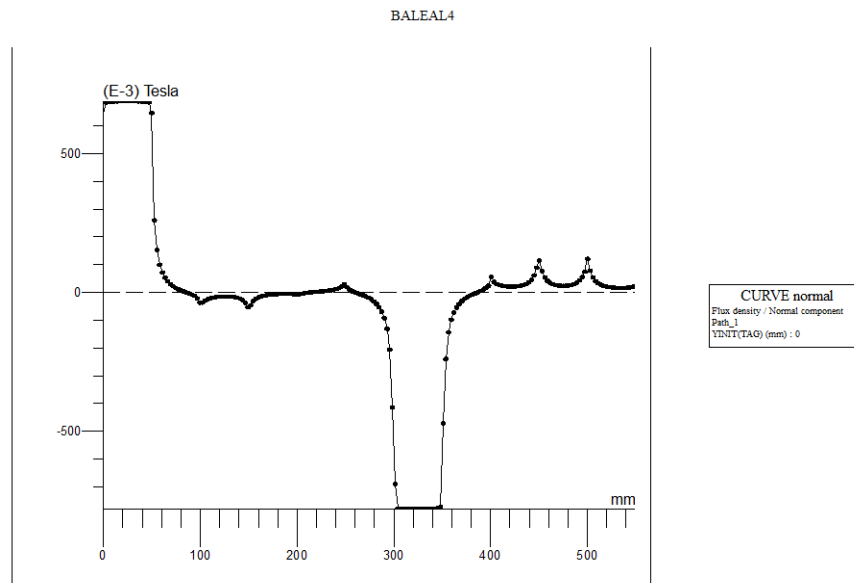


Fig. 6.38 Gráfico da componente normal da densidade de fluxo ao longo do entreferro, na posição de alinhamento.

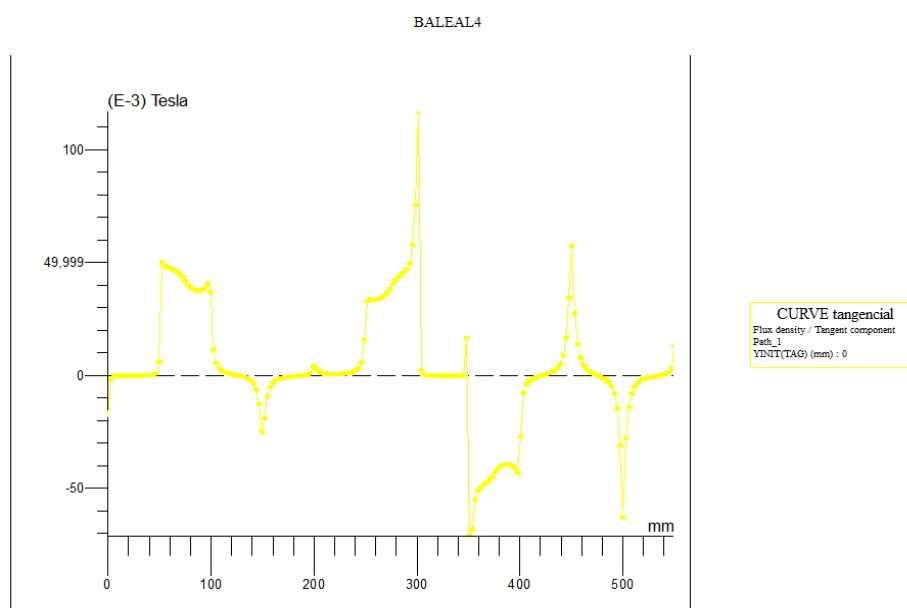


Fig. 6.39 Gráfico da componente tangencial da densidade de fluxo ao longo do entreferro, na posição de alinhamento.

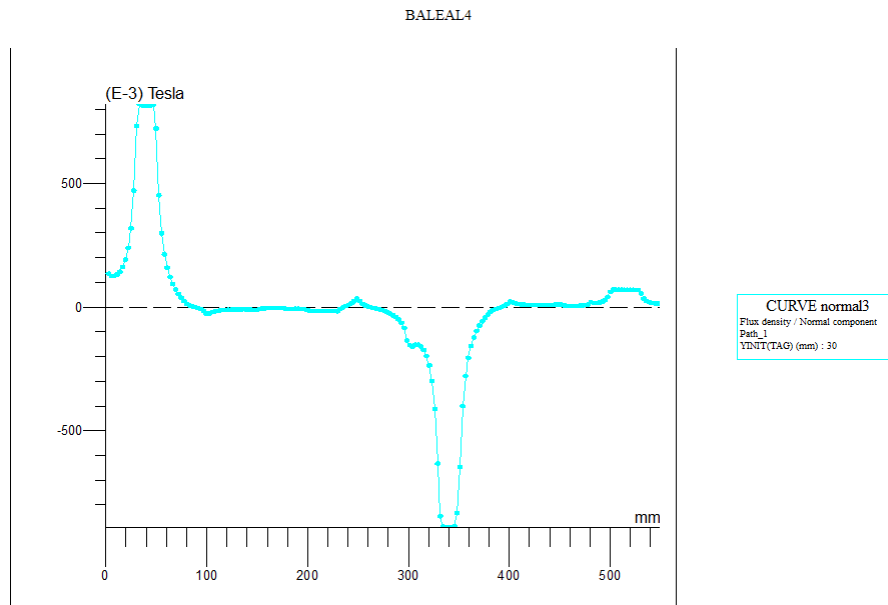


Fig. 6.40 Gráfico da componente normal da densidade de fluxo ao longo do entreferro, na posição de quase não-alinhamento.

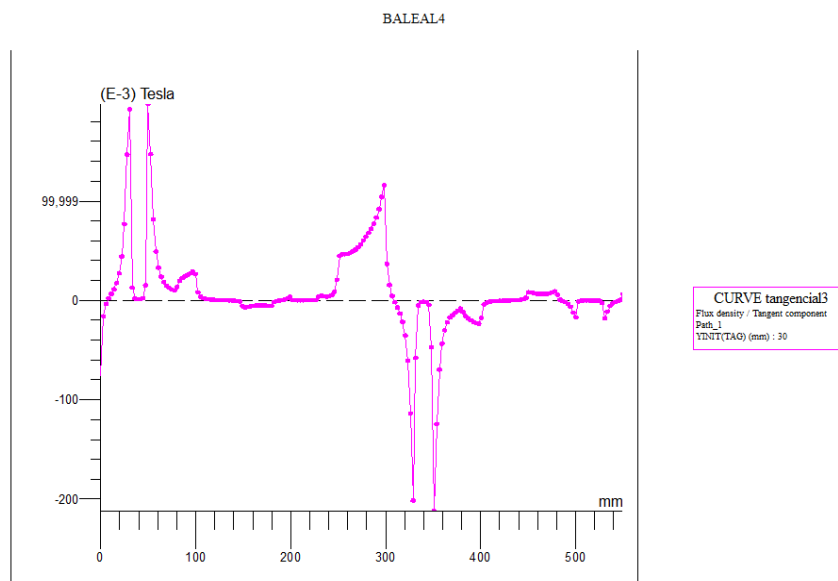


Fig. 6.41 Gráfico da componente tangencial da densidade de fluxo ao longo do entreferro, na posição de quase não-alinhamento.

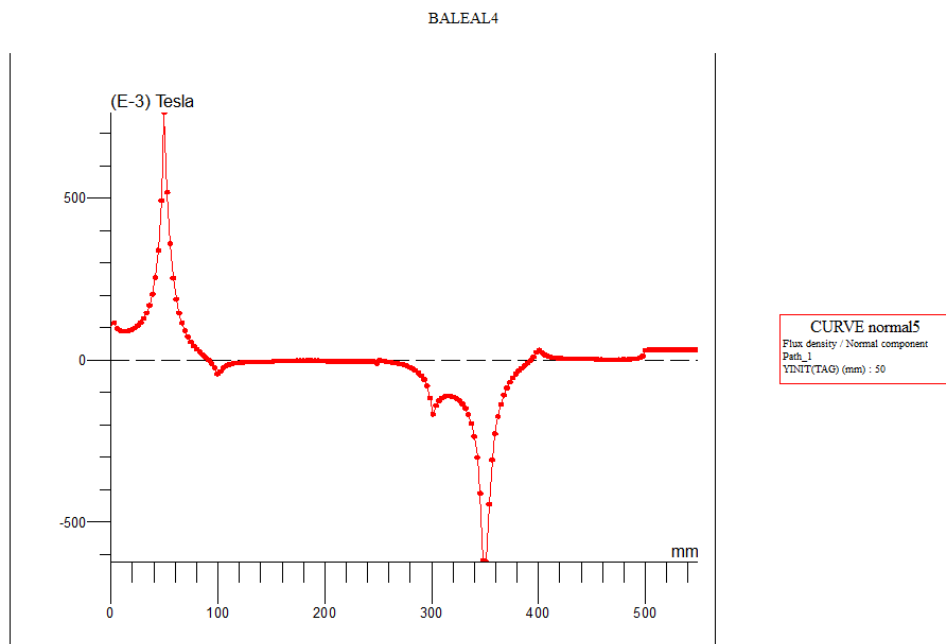


Fig. 6.42 Gráfico da componente normal da densidade de fluxo ao longo do entreferro, na posição de não-alinhamento.

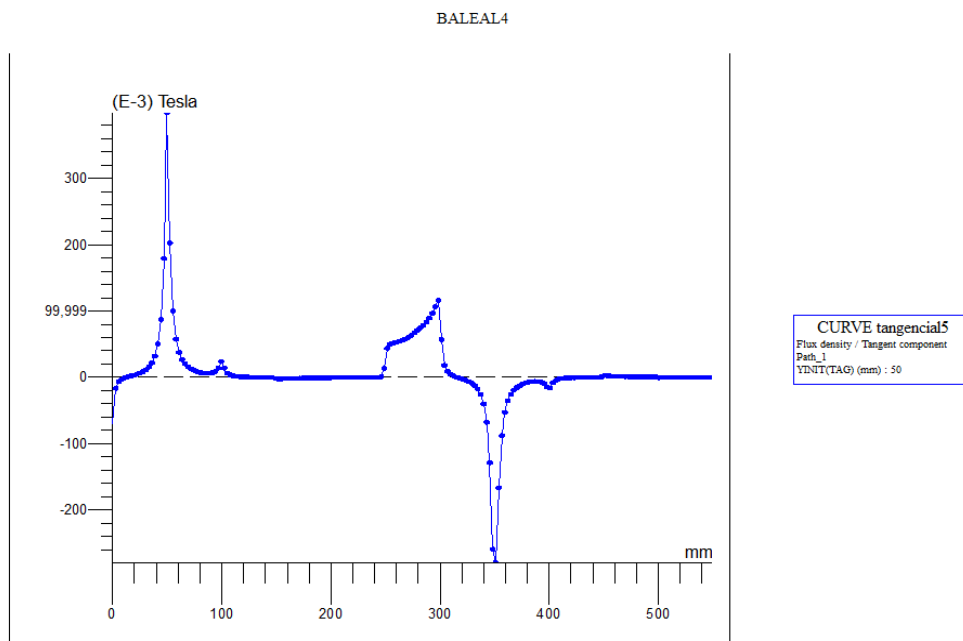


Fig. 6.43 Gráfico da componente tangencial da densidade de fluxo ao longo do entreferro, na posição de não-alinhamento.

6.7 Características mecânicas e magnéticas da máquina

Na tabela 6.1 são mostrados os valores obtidos no Flux 2D, para as forças existentes entre o estator e o translato tanto mecânicas como magnéticas, assim como a energia associada a cada posição do translato relativamente ao estator.

Estes dados são todos representados em gráficos de modo a ser mais perceptível de analisar. Como se pode observar na Fig. 6.44 a força de atracção (segundo x) entre o estator e o translato é maior na posição de alinhamento e decresce de uma forma suave até ocorrer um desalinhamento de 20 mm, e a partir daí decresce de forma abrupta como é de esperar. Relativamente à força paralela ao movimento do translato (segundo y), também é mais elevada na posição de alinhamento e vai decrescendo gradualmente com a deslocação do translato.

A Fig. 6.45 mostra as curvas de energia acumulada e co-energia; como se pode verificar estas têm o pico de energia na posição de alinhamento, tomando um valor mais elevado a co-energia. A energia decresce do seu ponto máximo nas duas curvas de uma forma quase linear até um ponto de energia quase nula na posição de não alinhamento.

Na Fig. 6.46 é representada a curva da indutância electromagnética na bobina. Como acontece nas situações anteriores o seu valor mais elevado é observado na posição de alinhamento, decrescendo gradualmente até um valor muito próximo de zero.

Tab. 6.1- Valores obtidos para o gerador com um entreferro de 2 mm

	Gerador com entreferro g=2 mm					
	Alinhamento	10	20	30	40	Não Alinhamento
Força perpendicular ao estator x (N)	1,34 e ⁺⁰⁴	1,34 e ⁺⁰⁴	1,31 e ⁺⁰⁴	1,13 e ⁺⁰⁴	7,42 e ⁺⁰³	1,84 e ⁺⁰³
Força paralela ao estator y (N)	-3,05 e ⁺⁰¹	-5,51 e ⁺⁰²	-7,84 e ⁺⁰²	-1,06 e ⁺⁰³	-1,35 e ⁺⁰³	-1,37 e ⁺⁰³
Energia acumulada (J)	8,56 e ⁺⁰⁰	7,75 e ⁺⁰⁰	6,36 e ⁺⁰⁰	4,54 e ⁺⁰⁰	2,46 e ⁺⁰⁰	7,28 e ⁻⁰¹
Co-energia (J)	1,51 e ⁺⁰¹	1,29 e ⁺⁰¹	9,78 e ⁺⁰⁰	6,66 e ⁺⁰⁰	3,97 e ⁺⁰⁰	1,04 e ⁺⁰⁰
Indutância (Wb)	-3,69 e ⁻⁰³	-3,54 e ⁻⁰³	-3,27 e ⁻⁰³	-2,85 e ⁻⁰³	-2,17 e ⁻⁰³	-1,27 e ⁻⁰³

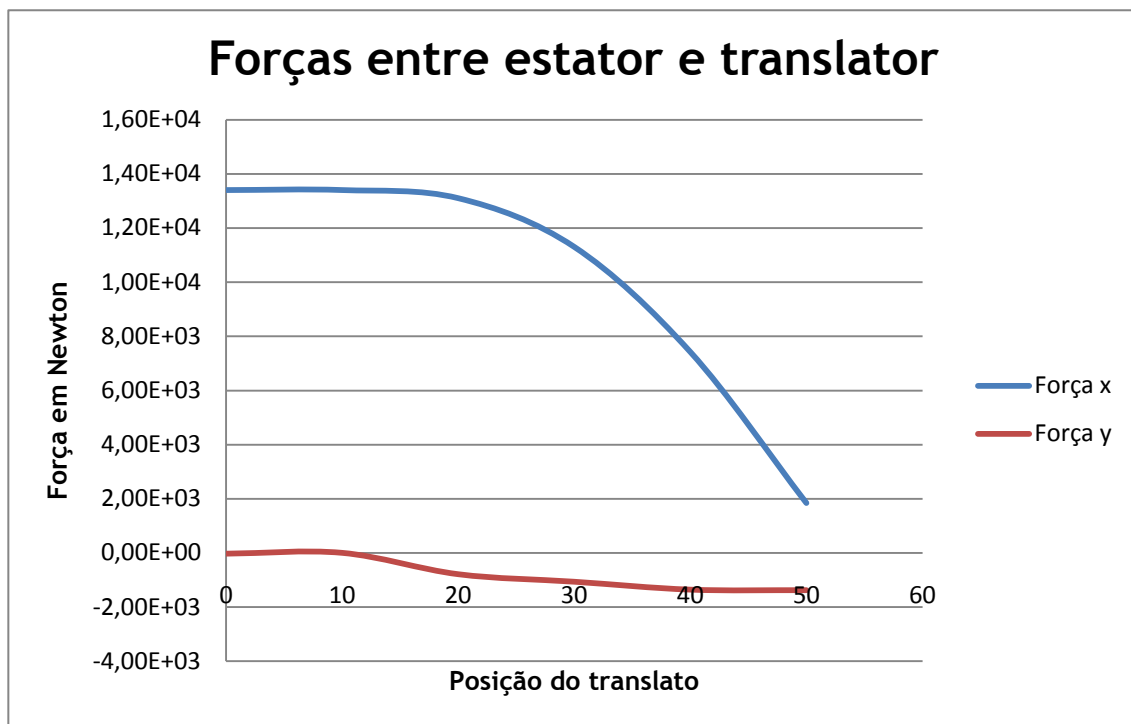


Fig. 6.44 Gráfico das forças entre o estator e translato.

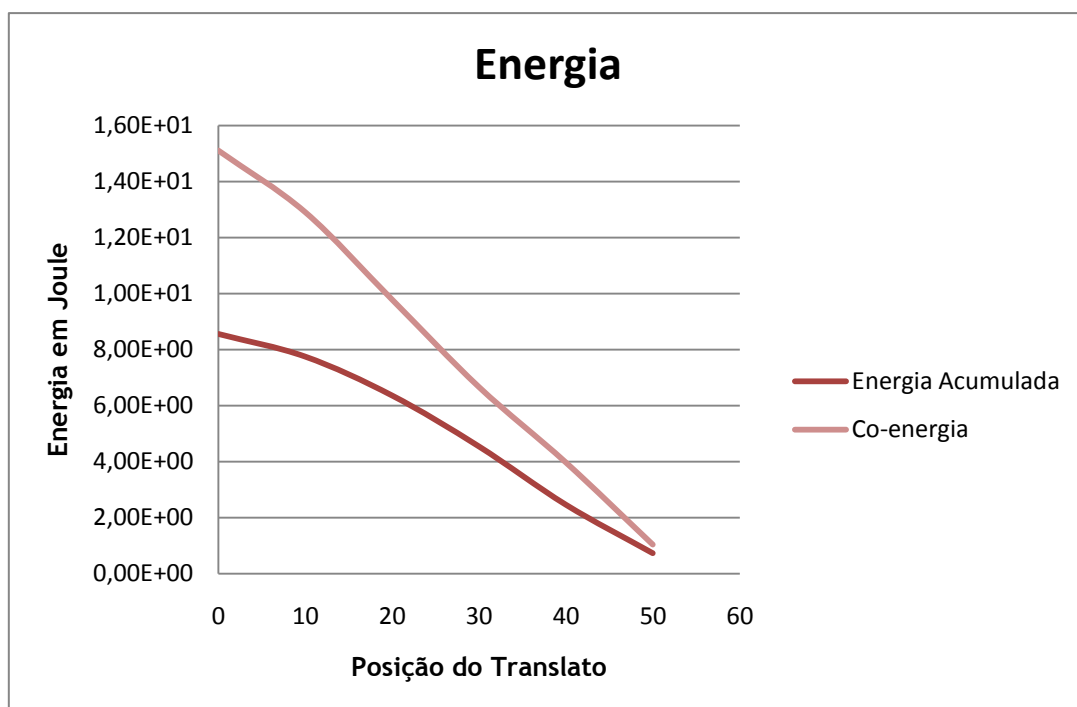


Fig. 6.45 Gráfico do ciclo de energia no gerador.

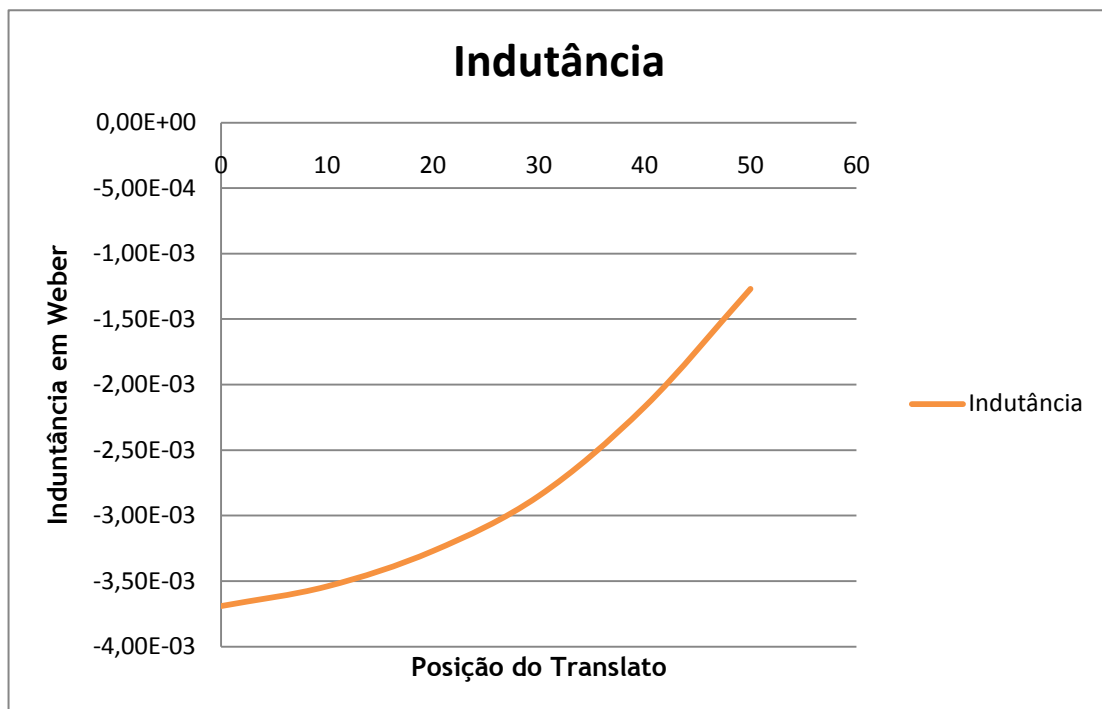


Fig. 6.46 Gráfico da indutância durante a deslocação do translato.

Relativamente aos valores obtidos para o gerador com um entreferro de 4 mm representados na Tab. 6.2, percebe-se facilmente que estamos a tratar de valores menos elevados. Na Fig. 6.47 o valor da força segundo x decresce de uma forma constante, enquanto que na Fig. 6.44 a curva forma um patamar até aos 20 mm de desalinhamento, já a força segundo y , apesar de ser menor não tem uma diferença muito relevante.

As curvas de energia e indutância representadas nas figuras 6.48 e 6.49 respectivamente são em tudo muito equivalentes às das figuras 6.45 e 6.46, diferindo apenas na grandeza do valor, tomando estas últimas um valor mais reduzido.

Estas diferenças devem-se maioritariamente ao facto de o entreferro ter sofrido uma variação. Como se pode verificar, para entreferros mais reduzidos conseguem-se obter forças maiores e valores de energia e indutância também mais elevados. Apesar da redução do entreferro melhorar o desempenho da máquina, mas podemos esquecer que daí advêm custos acrescidos nomeadamente a nível da concepção e construção.

Tab. 6.2- Valores obtidos para o gerador com um entreferro de 4 mm

	Gerador com entreferro g=4 mm					
	Alinhamento	10	20	30	40	Não Alinhamento
Força perpendicular ao estator x (N)	6,93 e ⁺⁰³	6,39 e ⁺⁰³	5,57 e ⁺⁰³	4,43 e ⁺⁰³	2,93 e ⁺⁰³	1,04 e ⁺⁰³
Força paralela ao estator y (N)	-2,18 e ⁻⁰¹	-4,54 e ⁺⁰²	-5,80 e ⁺⁰²	-6,73 e ⁺⁰²	-7,58 e ⁺⁰²	-7,50 e ⁺⁰²
Energia acumulada (J)	4,66 e ⁺⁰⁰	4,10 e ⁺⁰⁰	3,17 e ⁺⁰⁰	2,19 e ⁺⁰⁰	1,27 e ⁺⁰⁰	5,19 e ⁻⁰¹
Co-energia (J)	6,38 e ⁺⁰⁰	5,39 e ⁺⁰⁰	3,92 e ⁺⁰⁰	2,54 e ⁺⁰⁰	1,40 e ⁺⁰⁰	5,44 e ⁻⁰¹
Indutância (Wb)	-3,13 e ⁻⁰³	-2,97 e ⁻⁰³	-2,65 e ⁻⁰³	-2,24 e ⁻⁰³	-1,74 e ⁻⁰³	-1,16 e ⁻⁰³

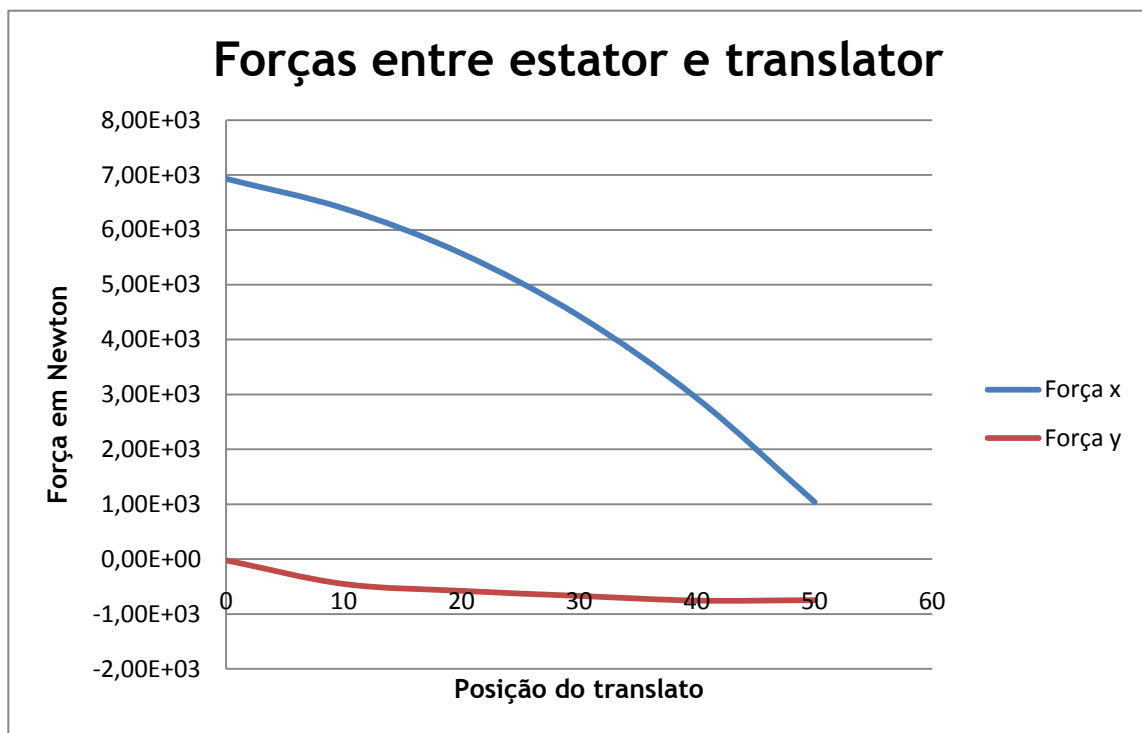


Fig. 6.47 Gráfico das forças entre o estator e translato

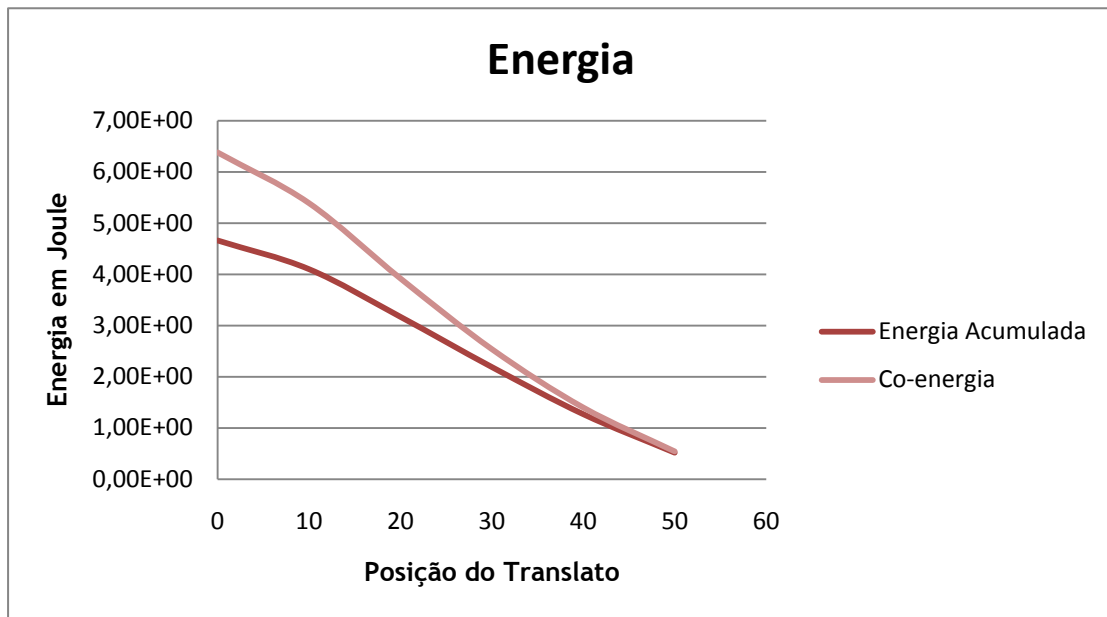


Fig. 6. 48 Gráfico do ciclo de energia no gerador

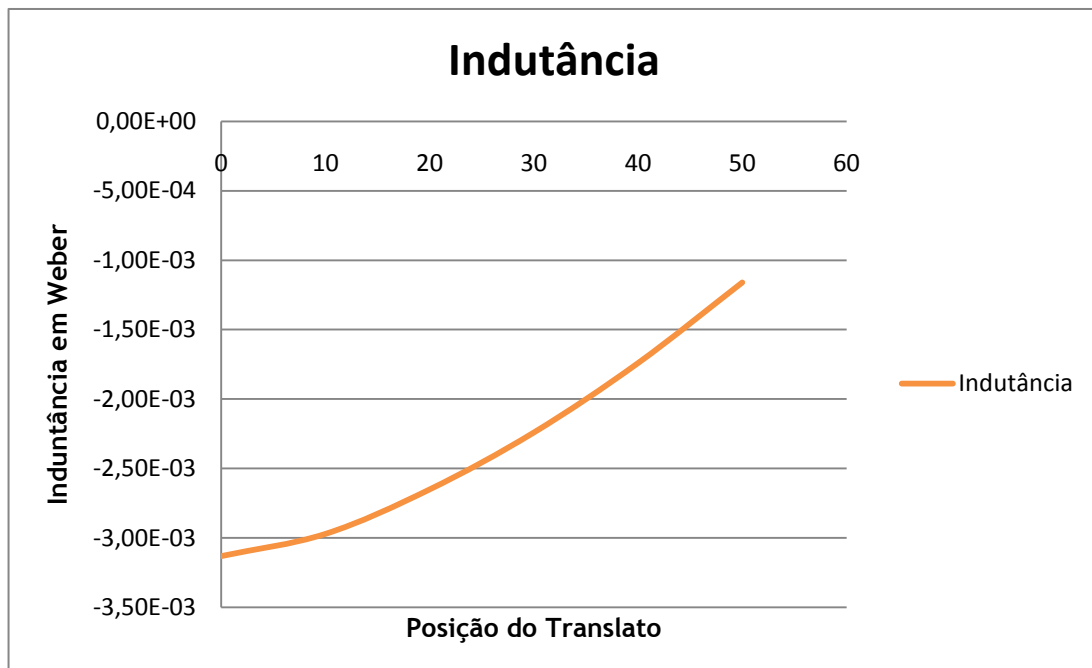


Fig. 6. 49 Gráfico da indutância durante a deslocação do translato

CAPÍTULO

7

Conclusões

Neste capítulo final da dissertação, e como suplemento a todas as conclusões apresentadas detalhadamente nos capítulos anteriores, expõem-se, de forma igualmente detalhada, quais as contribuições originais, bem como as linhas orientadoras para trabalho de investigação a desenvolver no futuro, concluindo-se com algumas considerações, julgadas pertinentes, relativas a alguns dos resultados obtidos neste trabalho.

Este trabalho teve como objectivo o desenvolvimento de uma tecnologia de geração de energia a partir das ondas do mar. Essa tecnologia, e atendendo ao carácter da aplicação em causa, foi baseada num movimento linear, que em tudo se adequa ao tipo de força de accionamento que se pretende aproveitar. A elaboração deste trabalho contribuiu para um maior conhecimento das possibilidades de geração de energia a partir das ondas do mar, que se revelou ser de grande potencialidade na costa portuguesa.

Face às vantagens construtivas e de desempenho que a máquina de relutância variável oferece, torna-se pertinente o desenvolvimento de um gerador que se baseie nesse princípio.

Foi proposto e desenvolvido um método de dimensionamento analítico do gerador, estabelecendo alguns parâmetros dimensionais e de desempenho, e que foi aplicado para projectar dois geradores de 2 KW, para duas localizações geográficas distintas, e para as quais se conheciam a altura e a frequência das ondas. O gerador dimensionado fará parte de um conjunto de seis destes geradores ligados em série, que serão por sua vez combinados dois a dois formando uma topologia de dois conjuntos estator-translato, num total de potência de 24 KW.

Mostrou-se como é possível, de uma forma exclusivamente analítica, efectuar o dimensionamento de geradores lineares de relutância variável comutados. Todavia, e como é sabido da prática, a optimização do cálculo de máquinas eléctricas, com a finalidade de se obterem as melhores características possíveis, à custa do volume mínimo de material, mais não é que um compromisso, que o projectista tem que assumir, entre as diversas variáveis em jogo. Parâmetros como o comprimento polar influenciam quer o fluxo quer a indutância. Por outro lado, o desempenho da máquina tende a ser melhor com um número pequeno de pólos, já que, apesar de o número de saltos por comprimento do primário aumentar com o número de pólos, a conversão de energia por salto decresce mais rapidamente, pela redução da razão entre os valores das indutâncias de alinhamento e de não alinhamento. O problema de projectar máquinas de relutância variável encontra-se no facto de estas não serem compatíveis com os métodos de dimensionamento clássicos das máquinas de corrente contínua e de corrente alternada. Se, por um lado, estamos em presença de estruturas simples, do ponto de vista construtivo, por outro lado enfrentamos máquinas que não têm regimes estacionários (somente pontos de equilíbrio temporário), que têm saturação extremamente localizada, que requerem sistemas de alimentação elaborados e que apresentam geometria variável durante a sua operação. De tudo o que foi exposto, a utilização de métodos numéricos, mais especificamente do método de elementos finitos bidimensional, permitiu completar o método analítico, optimizando o dimensionamento do gerador.

Na proposta apresentada abordou-se o potencial de aproveitamento de energia das ondas em Portugal, e recolheu-se informação para duas localizações na costa, dentro da área piloto definida pelo Centro de Energia das Ondas (CEO).

Visando o aperfeiçoamento do gerador proposto, surgiram algumas questões que poderiam servir de sugestões para trabalho futuro. Uma delas é determinar o potencial de Portugal, em toda a extensão da sua costa, permitindo assim estabelecer um mapa de potencial de ondas, onde as características de altura e de frequência pudessem ser conhecidas. Outra sugestão tem a ver com a adopção de uma nova topologia de gerador, que baseado no mesmo princípio de funcionamento, proporcionasse uma maior densidade de potência e uma maior facilidade construtiva face à natureza da aplicação, por exemplo do tipo tubular.

No futuro o sistema aqui desenvolvido pode ainda vir a incorporar um topologia rectangular, ou seja o gerador seria composto por quatro pares estator-translato.

Ainda, sugere-se que o gerador proposto fosse construído, possibilitando por um lado a verificação experimental do dimensionamento teórico, podendo estabelecer-se o nível de desempenho conseguido, e por outro lado, potenciando o interesse didáctico e científico em torno deste tipo de tecnologia.

Referências Bibliográficas

- [1] Sarmiento, A.J.N.A & Cruz, J.M.B.P. (2003), "Wave Energy Absorption by a Submerged Sphere of Variable Radius in Sway Surge and Heave", 5th European Wave Energy Conference, Cork, Irlanda.
- [2] Pontes, M.T, Falcão, A.F. (2001), "Ocean Energies: Resources and Utilisation", 18th World Energy Conference, Buenos Aires, Argentina.
- [3] CRES (2002), "Wave energy Utilization in Europe: Current Status and Perspectives", Centre of Renewable Energy Sources, Grécia.
- [4] Pontes, M.T., Athanassoulis, G.A., Barstow, S., Bertotti, L., Cavaleri, L., Holmes, B., Molisson, D. & Oliveira-Pires, H. (1998), "The European Wave Energy Resource", 3rd European Wave Energy Conference, Patras, Greece.
- [5] Thorpe, T.W., (1999), "An Overview of Wave Energy Technologies: Status, Performance and Costs", "Wave Power - Moving Towards Commercial Viability", IMECHE Seminar, London, UK.
- [6] Thorpe, T.W., (1999), "A brief review of wave energy", Report ETSU-R-120 for the DTI, AEA Technology.
- [7] COMUNICAÇÃO DA COMISSÃO AO CONSELHO E AO PARLAMENTO EUROPEU- "Roteiro das Energias Renováveis Energias Renováveis no Século XXI: construir um futuro mais sustentável", Bruxelas, 10.1.2007-COM (2006) 848 final.

- [8] COMISSÃO DAS COMUNIDADES EUROPEIAS - Comunicação da Comissão ENERGIA PARA O FUTURO: FONTES RENOVÁVEIS DE ENERGIA, “Livro Verde para uma Estratégia Comum”,
Bruxelas, 20.11 19% -COM (%) 576 final.
- [9] “Energia das ondas introdução aos aspectos tecnológicos, económicos e ambientais”
João m. b. p. cruz, António j. n. a. Sarmento Instituto do Ambiente, Alfragide 2004.
- [10] Mollison D, Pontes MT. Assessing the Portuguese wave-power resource. Energy, 17. Pergamon Press, 1992 pp. 255-268.
- [11] “Manual Para Jornalistas”, Serviço de Informação e Relações Públicas (SIRP),
Marinha Portuguesa 2005.
- [12] “Potencial e estratégia de desenvolvimento da energia das ondas em Portugal”,
Sumário executivo versão 0.1, WAVE ENERGY CENTRE 2004.
- [13] “Potencial e Estratégia de desenvolvimento da energia das ondas em Portugal”,
Relatório elaborado pelo WAVE ENERGY CENTRE - CENTRO DE ENERGIA DAS ONDAS,
2004.
- [14] Phillips, O.M. (1977). *The dynamics of the upper ocean* (2nd ed.). Cambridge University Press.
- [15] Wavenet, “Energy, Environment and Sustainable Development”, European Community, 2003.
- [16] Thorpe, T.W., (2001) "Wave Energy - Current Status and Developments".
- [17] Thorpe, T W, and Picken, M J, (1993). “Wave Energy Devices and the Marine Environment”, IEE Proceedings-A, Vol. 140, Number 1, January 1993.
- [18] Thorpe, T.W. (1999), "Economic Analysis of Wave Power Devices", IMECHE Seminar, Londres, Reino Unido.

- [19]Falcão, A.F. de O. (2000), "The shoreline OWC wave power plant at the Azores", 4th European Wave Energy Conference, Aalborg, Dinamarca.
- [20]Brito e Melo, A.M.C.F., (2000), "Modelação e Pré-dimensionamento de Centrais de Coluna de Água Oscilante: Aplicação à Central de Energia das Ondas do Pico, Açores", Tese de Doutoramento, Instituto Superior Técnico.
- [21]Jahangir Khan and Gouri S. Bhuyan Powertech Labs Inc. Ocean Energy: Global Technology Development Status, March 2009.
- [22]Thorpe, T. W., (1999) "A Brief Review of Wave Energy", A report produced for The UK Department of Trade and Industry.
- [23]Wavenet, "Energy, Environment and Sustainable Development", European Community, 2003.
- [24]Pizer, J.D., Korde, U. (1998), "*Recent Studies on Mighty Whale Hydrodynamic Efficiency*", Proc. of the European Wave Energy Symposium, Patras, Grécia.
- [25]H. Polinder, M. Scutto, 'Wave energy converters and their impact on power systems'. In *Proceedings of the International conference on future power systems*, Amsterdam, 17-18 November 2005.
- [26]M.A. Mueller, "*Linear generator systems for wave energy conversion*"; Institute for Energy Systems, The University of Edinburgh Kings Buildings, Mayfield Road, Edinburgh, EH9 3JL, United Kingdom.
- [27]H. Polinder, B.C. Mecrow, A.G. Jack, P. Dickinson, M.A. Mueller, 'Linear generators for direct drive wave energy conversion'. In *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2005 (vol. 20).
- [28] D.A. Torrey, X.M. Niu, E.J. Unkauf, "Analytical modeling of variable-reluctance machine magnetization characteristics," IEE Proceedings, Electrical Power Applications, Vol. 142, No. 1, January 1995, pp. 14-22.

- [29]R. Cardenas, W.F. Ray, G.M. Asher, “Switched reluctance generators for wind energy applications,” in PESC '95 IEEE Power Electronics Specialists Conference Record, Volume 1, June 1995, pp. 559-564.
- [30]D.A. Torrey, “Switched reluctance generators and their control,” IEEE Transactions on Industrial Electronics, Volume 49, No. 1, Feb. 2002, pp. 3-14.
- [31]I. Boldea, S. A. Nasar, “Linear Electric Actuators and Generators”, Cambridge University Press, 1997.
- [32]T. J. E. Miller, “Switched Reluctance Motors and Their Control”, Magna Physics Publishing and Clarendon Press, Oxford, 1993.
- [33]P. J. Lawrenson, J. M. Stephenson, P. T. Blenkinsop, J. Corda, N. N. Fulton, “*Variable-speed Switched Reluctance Motors*”, IEEE Proc., Vol. 127, Pt. B, No. 4, Julho de 1980.
- [34]C. Pereira Cabrita, “*Motor Linear de Indução - Análise Teórica, Projecto e Ensaio*”, Dissertação de Doutoramento, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 1988.
- [35]P. Gonçalves Baiona, C. Pereira Cabrita, “Dimensionamento de Motores de Relutância Variável Comutados”, Revista Electricidade, N.º 343, Abril de 1997, p. 96-105.
- [36]R. Krishnan and al., “Design Procedure for Switched-Reluctance Motors”, Transactions of IEEE Industrial Applications, Vol. 24, 1998, p. 456-461.
- [37]Huebner, K.N., Dewhurst D.L., Smith E.D., Byrom B.G. (2001). “The Finite Element Method for Engineers”, Fourth Edition, New York, United States of America.
- [38]M. R. Calado, C. Pereira Cabrita, “Finite-Element Analysis of a Linear Switched Reluctance Actuator”, Proceedings of the 9th International Conference of Power Electronics and Motion Control, EPE-PEMC 2000, Kosice, Eslováquia, 5-7 de Setembro de 2000.
- [39]M. R. Calado, C. Pereira Cabrita, “Aspectos Complementares de Análise e Dimensionamento de Motores e Actuadores de Relutância Variável Comutados”, Revista Electricidade, a ser publicado em 2002.

[40]CEDRAT Group

15 Chemin de Malacher - Inovallée

38246 Meylan Cedex - France

www.cedrat.com

software@cedrat.com

