

Universidade do Algarve

Sistema de Aproveitamento da Energia das Ondas Oceânicas

Fábio Jorge Cabeleira Branco

**Projeto para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Elétrica e Eletrónica
(Especialização em Sistemas de Energia e Controlo)**

**Trabalho efetuado sob a orientação de:
Prof. Doutor Isménio Lourenço Eusébio Martins**

Ano: 2013

Universidade do Algarve

Sistema de Aproveitamento da Energia das Ondas Oceânicas

Fábio Jorge Cabeleira Branco

**Projeto para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Elétrica e Eletrónica
(Especialização em Sistemas de Energia e Controlo)**

**Trabalho efetuado sob a orientação de:
Prof. Doutor Isménio Lourenço Eusébio Martins**

Ano: 2013

Sistema de Aproveitamento da Energia das Ondas Oceânicas

Declaração de autoria e direitos de cópia

Declaro ser o(a) autor(a) deste trabalho, que é original e inédito. Autores e trabalhos consultados estão devidamente citados no texto e constam da listagem de referências incluída.

Copyright©2013, por _____

(Fábio Jorge Cabeleira Branco)

A Universidade do Algarve tem o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicitar este trabalho através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, de o divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

*À memória do meu tio,
Fernando Cabeleira (1948-2012)*

Agradecimentos

Agradeço à minha família pela compreensão da privação da merecida atenção e pela contribuição para a minha educação ao longo de 26 anos.

Ao Orientador Académico, Professor Doutor Isménio Martins, pela ajuda prestada e pelos conhecimentos transmitidos.

Aos meus amigos e colegas pela colaboração prestada durante o presente projeto.

Ao Sr. David Meeker, pela disponibilização gratuita da ferramenta femm, sem a qual este projeto não teria sido possível.

Resumo

Tendo em conta as crescentes preocupações da sustentabilidade energética torna-se fulcral a investigação de outros meios de obtenção de energia para além dos atualmente existentes. No presente projeto propõe-se uma tipologia para um dispositivo de aproveitamento da energia das ondas. Efetua-se o dimensionamento de um gerador tubular linear síncrono, com recurso a uma ferramenta de análise por elementos finitos, o femm e ao MATLAB. Para efeitos de simulações converte-se o gerador ao seu modelo mecânico, e o sistema elétrico ao seu equivalente de corrente contínua.

Desenvolve-se o modelo dinâmico de todo conjunto flutuador-gerador em ambiente Simulink, por forma a tornar as simulações mais apelativas ao utilizador e permitir futuras simulações sem alterações de maior ao modelo do sistema. Analisou-se a resposta do sistema quando submetido a uma onda linear.

Com o presente projeto e como resultado da totalidade do trabalho desenvolveu-se também uma ferramenta que permite simular para várias situações um qualquer gerador que siga a tipologia do proposto.

Palavras-chave: Análise por elementos finitos, Sistema de Aproveitamento da Energia das Ondas, Gerador linear Síncrono, Circuito Equivalente de Corrente Contínua, Modelo Dinâmico.

Abstract

Given the growing concerns with the energy sustainability becomes pivotal to research other means of obtaining energy in addition to the ones currently existing. In this project it's proposed a typology of a device for wave energy harnessing. Was made a design of a synchronous tubular linear generator, using a tool of finite element analysis, the femm and the MATLAB. In order to simulate de generator it was converted to its equivalent mechanical model, and the electrical system was converted to its continuous current equivalent.

Was developed the dynamic model of the whole system in Simulink environment, in order to make the simulation more attractive to the user and allow for future simulations without major changes to the system model. Was analyzed the response of the system when subjected to a linear wave.

With this project and as a result of all the work has also been developed a tool that allows to simulate various situations with any generator that follows the same typology of the proposed one.

Key-Words: Finite Element Analysis, Device for wave energy harnessing, Linear Synchronous Generator, Continuous Current Equivalent Circuit, Dynamic Model.

Índice

Capítulo 1: Introdução.....	1
1.1 Objetivos	2
1.2 Estrutura do projeto	3
1.3 Situação Energética.....	4
1.4 Ondas oceânicas.....	12
1.5 Ondas em Portugal.....	13
1.7 Enquadramento histórico	16
1.8 Sistemas de aproveitamento da energia das ondas oceânicas	17
1.8.1 Coluna de água oscilante (CAO).....	17
1.8.2 Archimedes Wave Swing (AWS).....	18
1.8.3 Pelamis	19
1.8.4 Wave Dragon.....	20
1.8.5 Mighty wale.....	21
1.8.6 Outros dispositivos e perspectivas futuras	21
1.9 Descrição matemática das ondas do mar	22
Capítulo 2: Sistema de aproveitamento da energia das ondas oceânicas.....	26
2.1 Configuração do sistema.....	28
2.2 Tipologia da máquina	30
2.3 Circuito magnético equivalente	34
2.3 Dimensionamento do Sistema de aproveitamento da energia das ondas oceânicas	37
2.4 Verificação do dimensionamento da máquina com elementos finitos.....	45
Capítulo 3: Modelo dinâmico do sistema de aproveitamento das ondas.....	51
3.1 Modelo linear dinâmico do gerador	52
3.2 Equações de estado	52
3.3 Dimensionamento da boia	56

3.4 Modelo dinâmico do sistema	63
3.5 Implementação do modelo dinâmico do sistema	73
Capítulo 4: Simulação do Sistema de aproveitamento da energia das ondas oceânicas	75
4.1 Simulação com resistência de carga igual à resistência interna equivalente do gerador.	77
4.2 Simulação com resistência de carga superior à resistência interna equivalente do gerador	81
4.3. Análise e comparação dos resultados das simulações	90
Capítulo 5: Conclusões	92
5.1 Conclusões Finais	93
5.2 Perspetivas para trabalho futuro	94
Bibliografia.....	95
Anexos.....	97
A1 – Modelo dinâmico do sistema de aproveitamento da energia das ondas oceânicas	98

Listas de símbolos

<i>Símbolo</i>	- <i>Descrição</i>	<i>Unidades</i>
A	- Secção de uma superfície	m^2
A_m	- Secção normal ao fluxo magnético do conjunto de magnetos	m^2
\bar{A}	- Razão entre deslocamento vertical da onda e deslocamento vertical da boia	
	Comprimento frente de onda	m
b	- Ou	
	Coefficiente hidrodinâmico da boia	$Nm^{-1}s^{-1}$
B	- Densidade de fluxo magnético	T
B_m	- Densidade de fluxo magnético num magneto	T
B_s	- Máxima densidade de fluxo no ferro	T
B_r	- Densidade de fluxo magnético remanescente de um magneto permanente de NdFeB	T
c	- Velocidade de fase de uma onda	m/s
c_g	- Velocidade de grupo de uma onda	m/s
D	- Diâmetro da boia	m
D_{ext}	- Diâmetro externo da boia	m
D_{int}	- Diâmetro interno da boia	m
e	- Força eletromotriz	V
e_a	- Força eletromotriz da máquina eléctrica	V
e_{dc}	- Força eletromotriz em equivalente de corrente contínua	V
E	- Energia total de uma onda do mar	j
E_{ac}	- Energia dissipada pelas resistências à entrada da ponte retificadora	j
E_{dc}	- Energia dissipada pela resistência à saída da ponte retificadora	j
E_p	- Energia potencial de uma onda do mar	j
E_{pb}	- Espessura da parede da boia	m
E_k	-- Energia cinética de uma onda do mar	j
$f_{natboia}$	- Frequência natural da boia	Hz
F_b	- Força hidrodinâmica entre a boia e a água	N

F_{boia}	- Força exercida sobre a boia	N
F_e	- Força eletromagnética	N
F_g	- Força eletromagnética do gerador	N
F_I	- Força de impulsão	N
F_{mola}	- Força de uma mola	N
g	- Aceleração gravítica	m/s ²
h	Profundidade da água do mar	m
h_0	- Deslocamento vertical da superfície da água	m
h_1	- Deslocamento vertical da boia	m
\dot{h}_1	- Velocidade da boia	m/s
\ddot{h}_1	- Aceleração da boia	m/s ²
h_{boia}	- Altura da boia	m
h_{mag}	- Altura do magneto	m
$h_{mag\ max}$	- Altura máxima dos magnetos	m
$h_{subboia}$	- Altura submersa da boia	m
H	- Altura de uma onda do mar	m
H_c	- Intensidade de campo coercivo de um magneto permanente	A/m
H_m	- Intensidade de campo magnético num magneto permanente	A/m
i_a	- Corrente instantânea da máquina elétrica	A
i_{dc}	- Corrente instantânea no circuito equivalente em corrente contínua	A
i_k	- Corrente instantânea no circuito k	A
k	- Coeficiente de rigidez devido à força de impulsão da água do mar	N/m
	- Ou	
	Número da onda	-
K_e	- Coeficiente de enchimento dos enrolamentos	-
$K\phi$	- Coeficiente de força da máquina de corrente contínua	N/A
$K\phi_{dc}$	- Coeficiente de força da máquina de corrente contínua	N/A
	Comprimento de um circuito magnético	
l	- Ou	m
	Comprimento de condutor de uma fase da máquina	

$l_{enrolamento}$	- Espessura do espaço físico do enrolamento	m
$l_{magneto}$	- Espessura do magneto	m
L	- Indutância de um circuito magnético	H
L_a	- Indutância do circuito da máquina elétrica	H
L_{ac}	- Indutância por fase à entrada da ponte retificadora	H
	Indutância do gerador de corrente contínua	
L_{dc}	- Ou	H
	Indutância à saída da ponte certificadora	
$L_{j,k}$	- Indutância do circuito j devido à influência do circuito k	H
m	- Massa da boia e gerador	m
m_{add}	- Massa de água adicional deslocada devida à velocidade da boia	Kg
m_{boia}	- Massa da boia (flutuador)	Kg
m_{cal}	- Massa de calibração do sistema de extração de energia das ondas	Kg
m_{disp}	- Massa de água deslocada devido ao peso do sistema de extração de energia das ondas	Kg
m_{fe}	- Massa do anel de ferro do gerador	Kg
m_{gen}	- Massa do gerador (magnetos e anel de ferro)	Kg
m_{mag}	- Massa dos magnetos permanentes	Kg
N_e	- Número de espiras de cada enrolamento	-
N_{onda}	- Número de ondas em contacto com a boia	-
P	- Potência de uma onda do mar	W
P_{ac}	- Potência instantânea dissipada pelas resistências elétricas à entrada da ponte retificadora	W
	Potência da boia	W
P_{boia}	- Ou	
	Peso da boia	N
P_{dc}	- Potência instantânea dissipada pelas resistências elétricas à saída da ponte retificadora	W
P_{emf}	- Potência devido à força eletromotriz da máquina	W
P_{ferro}	- Peso do anel de ferro	N
P_j	- Perdas de joule	W
P_m	- Peso correspondente à massa m	N

P_{mag}	-	Peso dos magnetos	N
P_{mcal}	-	Peso da massa de calibração	N
P_{med}	-	Perímetro médio dos enrolamentos	m
r_1	-	Raio exterior do núcleo de ferro	m
r_2	-	Raio exterior dos enrolamentos	m
r_3	-	Raio interior dos magnetos	m
r_4	-	Raio exterior dos magnetos	m
r_5	-	Raio exterior da máquina (anel de ferro)	m
r_a	-	Resistência da máquina elétrica	Ω
r_{dc}	-	Resistência da máquina de corrente contínua	Ω
r_{loadDC}	-	Resistência da carga aplicada à máquina de corrente contínua	Ω
R_{ac}	-	Resistência por fase alimentada à entrada da ponte retificadora	Ω
R_{bob}	-	Resistência total de uma bobina (enrolamento)	Ω
R_{dc}	-	Resistência equivalente alimentada no lado de corrente contínua da ponte retificadora	Ω
\mathfrak{R}	-	Relutância magnética de um circuito magnético	H^{-1}
\mathfrak{R}_{bob}	-	Relutância magnética do enrolamento	H^{-1}
\mathfrak{R}_{feext}	-	Relutância magnética do anel de ferro exterior	H^{-1}
\mathfrak{R}_g	-	Relutância magnética do entreferro mecânico	H^{-1}
\mathfrak{R}_{mag}	-	Relutância magnética do magneto permanente	H^{-1}
\mathfrak{R}_{nucfe}	-	Relutância magnética do núcleo de ferro	H^{-1}
		Secção do condutor aplicado no enrolamento	mm^2
S	-	Ou Secção do flutuador	m^2
t	-	Tempo	s
T	-	Período da onda	s
u	-	Componente horizontal da velocidade das partículas de água	V
u_a	-	Queda de tensão aos terminais da máquina	V
u_r	-	Queda de tensão aos terminais da carga aplicada na máquina de corrente contínua	V
v	-	Velocidade	m/s

v_{an}	- Queda de tensão simples na fase a	V
v_{bn}	- Queda de tensão simples na fase b	V
v_{boia}	- Velocidade da boia	m/s
v_{cn}	- Queda de tensão simples na fase c	V
v_d	- Queda de tensão retificada	V
v_{gen}	- Velocidade da máquina elétrica	m/s
v_m	- Queda de tensão magnética equivalente do magneto permanente	A
v_{Nn}	- Queda de tensão no ramo inferior da ponte retificadora	V
v_{onda}	- Velocidade da onda	m/s
v_{pn}	- Queda de tensão no ramo superior da ponte retificadora	V
V_p	- Queda de tensão de pico	V
w	- Componente vertical da velocidade das partículas de água	m/s
x	- Posição	
X_{ac}	- Reactância por fase à entrada da ponte retificadora	Ω
X_{dc}	- Reactância por fase à saída da ponte retificadora	Ω
Δh	- Variação do nível da água	m
Δl	- Variação do comprimento (distensão) de uma mola	m
Δz_{boia}	- Variação do deslocamento vertical da boia	m
Δz_{onda}	- Variação do deslocamento vertical da onda de excitação da boia	m
ΔV_{sub}	- Variação do volume submerso da boia	m ³
λ	- Comprimento de onda	m
η	- Rendimento	%
η	- Ou	
	Deslocamento da superfície livre da água numa onda	m
$\eta_{gerador}$	- Rendimento do gerador	%
$\eta_{sistema}$	- Rendimento do sistema de aproveitamento da energia das ondas	%
μ	- Permeabilidade magnética de um meio	H/m
μ_0	- Permeabilidade magnética do vácuo	H/m
μ_{ar}	- Permeabilidade magnética relativa do ar	-
μ_{cu}	- Permeabilidade magnética relativa do cobre	-

μ_{fe}	- Permeabilidade magnética relativa do ferro	-
	Densidade de um material	Kg/m^3
ρ	- Ou	
	Resistividade elétrica de um condutor	$\Omega\text{m}^2/\text{m}$
ρ_{am}	- Densidade da água do mar	kg/m^2
ρ_{boia}	- Densidade do material de que é constituída a boia	kg/m^2
ρ_{cu}	- Resistividade elétrica do cobre	$\Omega\text{mm}^2/\text{m}$
ρ_{fe}	- Densidade do ferro	kg/m^2
ρ_{mag}	- Densidade dos magnetos permanentes	Kg/m^2
ϕ_m	- Fluxo magnético no magneto permanente	wb
Ψ_j	- Fluxo magnético de ligação no circuito j	wb
ω	- Frequência angular	Rad/s

Capítulo 1: Introdução

1.1 Objetivos

A crescente investigação na área das energias renováveis, conjuntamente com o despertar para a utilização das mesmas, tem conduzido à investigação de uma variedade de dispositivos. A crescente preocupação mundial no que respeita à extinção das fontes de energia fósseis leva também à necessidade urgente do surgimento de outras formas de produção de energia. Este projeto tem, assim, por objetivo comprovar que não só existem outros métodos de obtenção de energia, como os mesmos podem vir a ser profundamente viáveis, desde que sejam suportados com investigação científica adicional e envolvimento político.

Com este projeto pretende-se desenvolver um dispositivo de aproveitamento da energia das ondas, bem como o seu modelo dinâmico. Avalia-se a energia elétrica que poderá vir a ser produzida pelo respetivo sistema. O presente projeto visa também desenvolver uma ferramenta que possibilite simular e devolver os resultados para as mais variadas dimensões do gerador bem como para diferentes tipos de boia.

1.2 Estrutura do projeto

No Capítulo 1 é caracterizada a situação energética na Europa e particularizada a situação energética em Portugal. Descrevem-se fatores que levam as ondas oceânicas a serem fontes de energia promissoras. É feito um estudo das ondas existentes na zona de possível implantação do sistema de aproveitamento da energia das ondas. São descritos outros dispositivos existentes de aproveitamento da energia das ondas. É feita uma descrição matemática das ondas oceânicas.

No Capítulo 2 são estudadas as tipologias dos geradores lineares de magnetos permanentes. É proposto um circuito magnético equivalente do gerador. É efetuado o dimensionamento do sistema de aproveitamento da energia das ondas. São verificados os cálculos efetuados utilizando a uma simulação com recurso a elementos finitos.

No Capítulo 3 é desenvolvido e apresentado o modelo dinâmico que descreve o comportamento do sistema mecânico boia-gerador. É dimensionada uma boia (elemento flutuador). Por fim é desenvolvido o modelo de um gerador de corrente contínua equivalente à máquina projetada.

No Capítulo 4 é analisada a resposta dinâmica do sistema (boia e gerador), quando excitado por uma onda linear.

No Capítulo 5 são sumarizadas as conclusões mais relevantes dos capítulos anteriores e são retiradas conclusões finais. É efetuado um conjunto de propostas para trabalhos futuros.

1.3 Situação Energética

Com as crescentes dificuldades financeiras atravessadas pelos países europeus, em parte devido à dependência energética existente, torna-se interessante efetuar uma análise do consumo interno bruto de energia por forma a tirar algumas conclusões.

Ainda que exista a ilusão de que a europa beneficia de alguma abundância energética, muito devido aos programas nucleares de alguns países europeus, tais como a França, a Espanha e a Bélgica, ou até mesmo devido à incursão do gás natural em mercados importantes, as perspectivas futuras não são animadoras. Ainda que metade do consumo interno de energia seja satisfeito à custa de recursos internos, com o crescimento do consumo a manter-se na ordem dos 2% anuais, é previsível que a europa a médio prazo possa vir a enfrentar uma dependência energética externa muito acentuada. Cerca de 70% relativamente ao consumo total de energia [1].

O consumo interno bruto de energia na europa no ano de 2007 foi de 1806,4 Mtep, e tudo aponta para que este consumo continua a aumentar.

Na Figura 1.1 apresenta-se a divisão no consumo de energia por fonte de energia em 2007 [2].

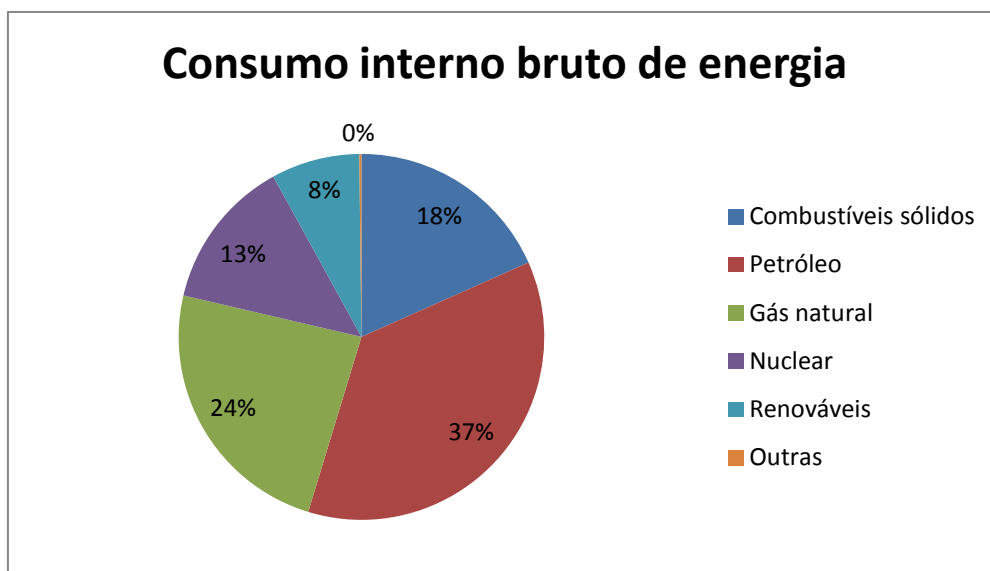


Figura 1.1 - Consumo interno bruto de energia na União Europeia em 2007.

A evolução do consumo interno bruto de energia da União Europeia é mostrada no gráfico da Figura 1.2. O aumento de consumo energético verificado tem sido, maioritariamente, suportado pelo acréscimo do consumo de petróleo desde a década de 90 até meados de 2004. A partir do ano de 2004, o aumento no consumo energético foi maioritariamente suportado pelo acréscimo no consumo de gás natural. Verifica-se, também, um crescimento do consumo de energia de fontes renováveis. No entanto o seu peso geral mantém-se muito baixo, comparativamente às restantes fontes de energia [2].

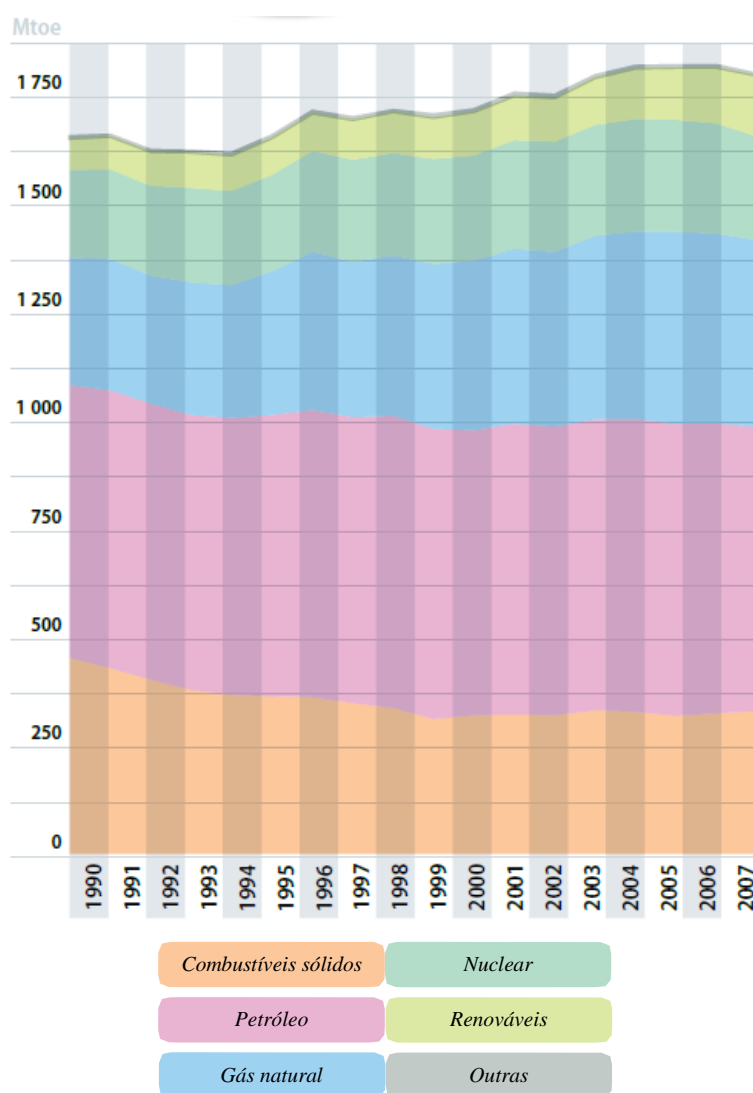


Figura 1.2 - Consumo interno bruto de energia da União europeia [2].

A União Europeia consumiu em 2007 cerca de 1800 Mtep de energia bruta, sendo 53,1% da mesma importada, tal como é apresentado e sectorizado no gráfico da Figura 1.3.

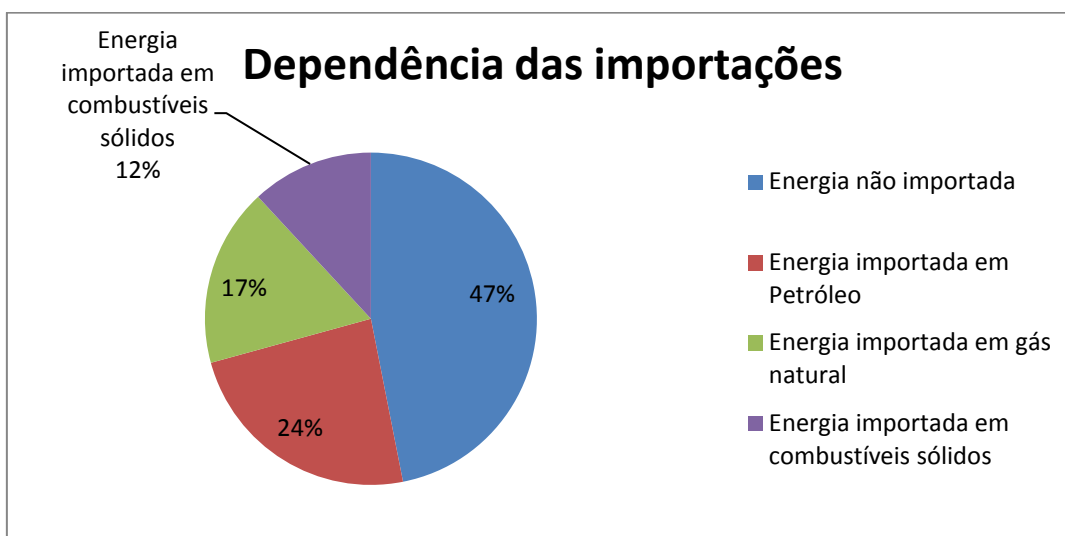


Figura 1.3 - Dependência europeia das importações em 2007.

Na Figura 1.4 é apresentado o gráfico do consumo final de energia por fonte de energia, onde se verifica que o petróleo lidera a lista dos combustíveis consumidos, seguido do gás natural e da eletricidade. A percentagem dos restantes combustíveis consumidos é pouco expressiva relativamente aos três mencionados anteriormente [2].

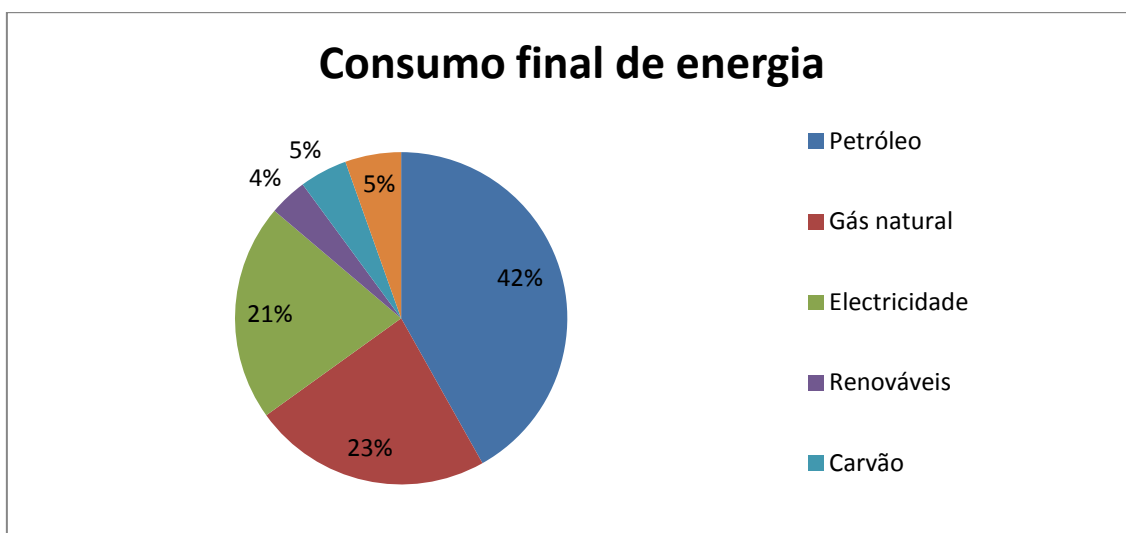


Figura 1.4 – Consumo final de energia na União Europeia em 2007.

No que se refere à evolução do consumo final de energia na União Europeia (Figura 1.5), verifica-se um decréscimo do consumo do carvão. No entanto, verifica-se um acréscimo no consumo de petróleo, gás natural e eletricidade. Verifica-se, também, que a utilização de energias renováveis tem aumentado. Por outro lado, é evidente que, comparativamente ao consumo das restantes fontes de energia, as energias renováveis têm tido pouca expressão [2].

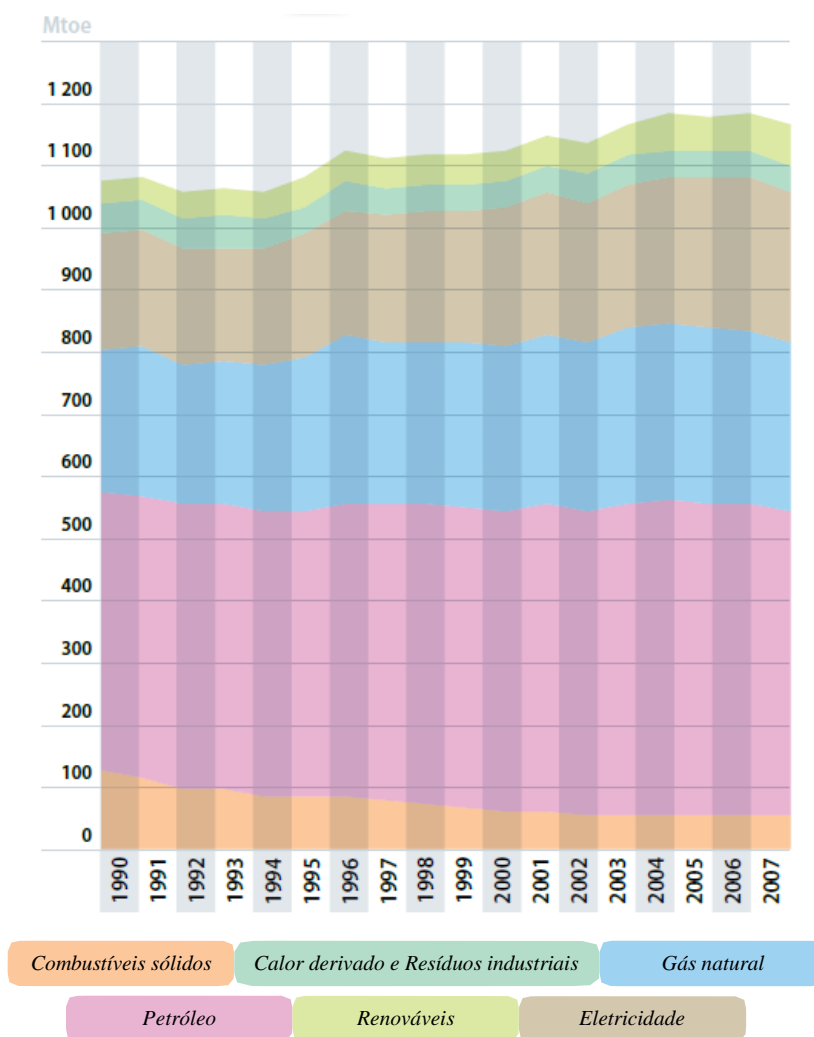


Figura 1.5 – Evolução do consumo final de energia na União Europeia [2].

Na Figura 1.6 está representado o consumo final de energia na União Europeia por sector de atividade, podendo-se verificar que em 2007 o maior consumo energético se deve à habitação e serviços, seguindo-se os transportes, a indústria e, por fim, a agricultura, cujo consumo é minimalista comparativamente aos previamente referidos [2].

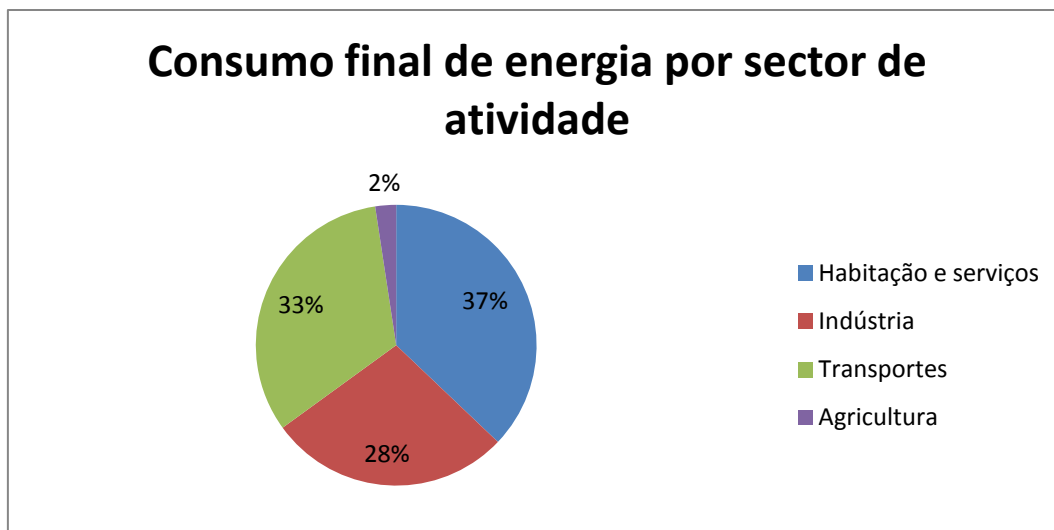


Figura 1.6 Consumo final de energia por sector de atividade na União Europeia em 2007.

Analisando-se, em particular, a produção de energia elétrica na União Europeia, de acordo com o gráfico da Figura 1.7, verifica-se um aumento da produção de energia elétrica, em sensivelmente 25% no período de 1990 a 2007, este aumento deve-se, principalmente, ao aumento da produção de energia elétrica com recurso ao gás natural [2].

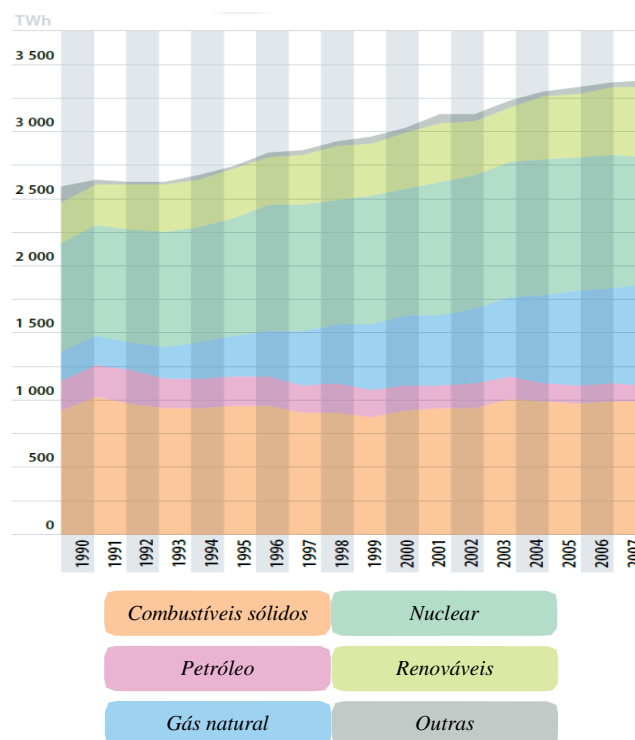


Figura 1.7 - Produção de energia elétrica na União Europeia [2].

Particularizando-se, agora, o panorama nacional refere-se que Portugal é um país onde são muito escassos os combustíveis que asseguram a generalidade das necessidades energéticas (petróleo e gás), o que faz com que a dependência de energia externa seja muitíssimo elevada. Assim, para diminuir a dependência energética, torna-se imperativo que Portugal aumente a contribuição energética com fontes de energias renováveis.

O gráfico da Figura 1.8 apresenta o consumo interno bruto de energia em Portugal, no qual se verifica, tal como na restante Europa um aumento significativo do consumo de energia. A maior parte desse consumo é suportada pelo petróleo. O gás natural assume desde meados de 1997 preponderância, tendo o seu consumo vindo a aumentar até ao presente [2].

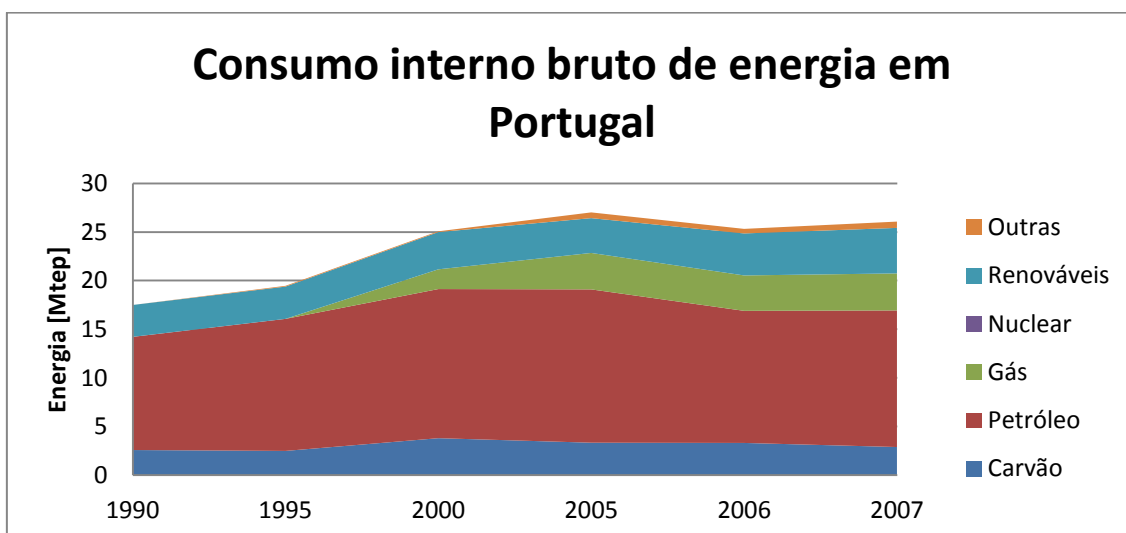


Figura 1.8 - Consumo interno bruto de energia em Portugal.

Em consequência do aumento do consumo de energia, Portugal tem vindo a ficar cada vez mais dependente do mercado externo para satisfazer as suas necessidades energéticas. O gráfico da Figura 1.9 mostra a evolução da dependência energética externa Portuguesa [2].

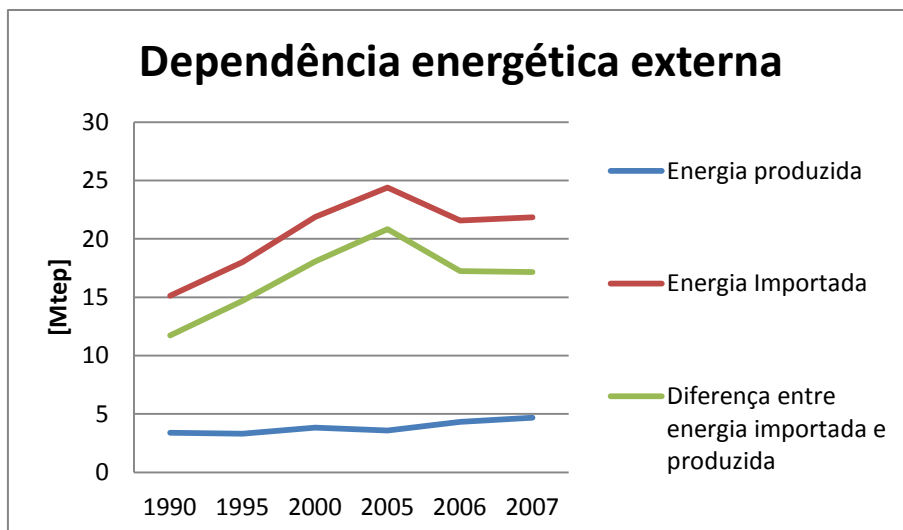


Figura 1.9 - Dependência energética externa Portuguesa.

No que se refere ao consumo final de energia, o seu aumento tem sido significativo. Cabe ao petróleo a maior percentagem, tanto no consumo final de energia como no maior aumento do consumo final de energia. O gás natural e a eletricidade têm vindo a ter cada vez mais significado no consumo final de energia. A evolução do consumo final de energia é apresentada no gráfico da Figura 1.10 [2].

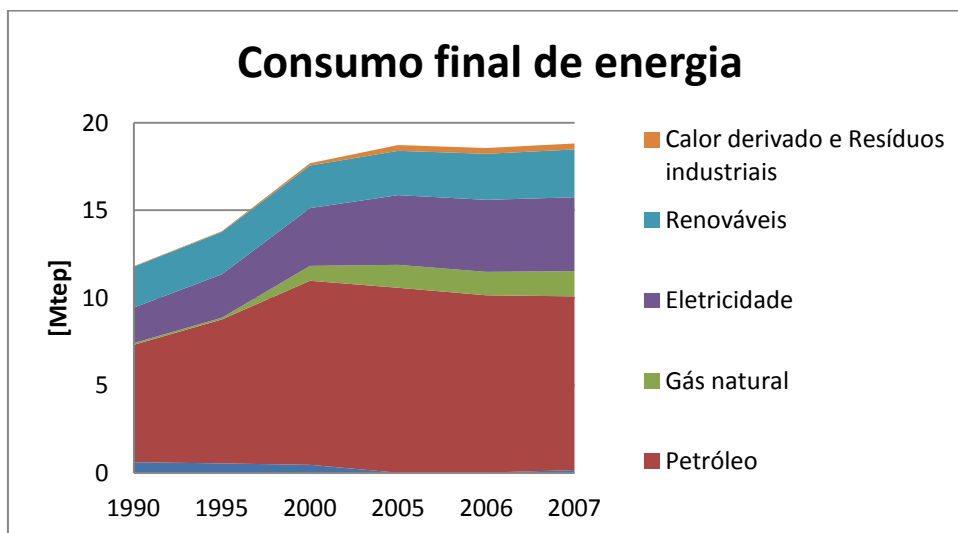


Figura 1.10 - Consumo final de energia em Portugal.

Quanto à produção de energia elétrica, Portugal tem vindo a aumentar a sua produção, como resposta ao aumento da procura. No entanto, em Portugal tal como na restante Europa, esta produção de energia é, principalmente, feita à custa da transformação de outras formas de energia fósseis (cerca de 65%). É de salientar o facto das energias

renováveis ocuparem a maior fatia na produção de energia. O gráfico da Figura 1.11 mostra a relação entre as várias fontes de energia para a produção de energia elétrica no ano de 2007 [2].

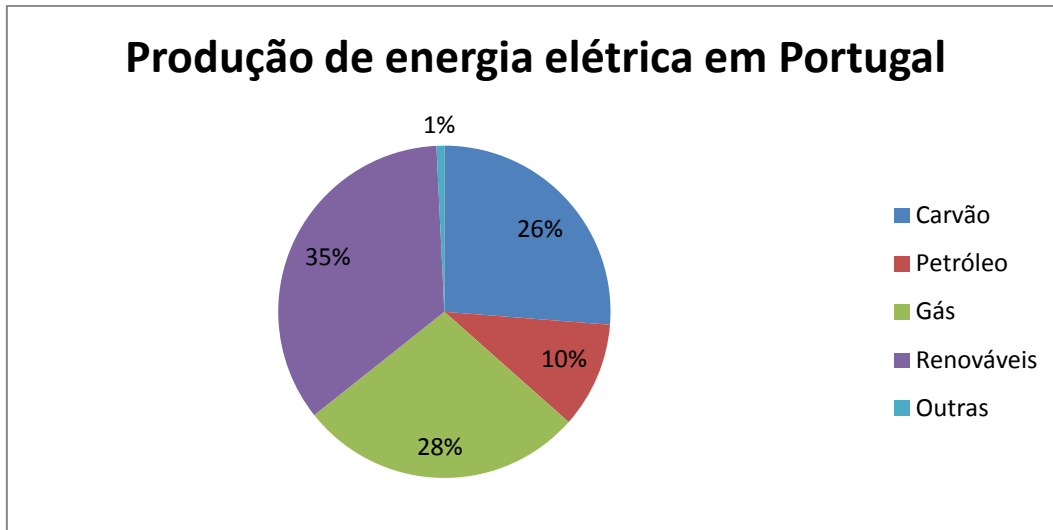


Figura 1.11 - Produção de energia elétrica em Portugal em 2007.

Analisando-se toda a situação energética, é notório que em Portugal se deve diversificar as fontes de energia, por forma a garantir alguma segurança e sustentabilidade do sistema energético.

Portugal, graças à sua condição geográfica, possui um vasto leque de recursos naturais que podem ser ainda utilizados para a produção de energia. Com destaque para: a energia solar; a energia eólica; a energia hídrica; a biomassa; e a energia geotérmica.

Apesar de grande parte destas fontes energéticas estarem atualmente sobre grande exploração em Portugal, ainda se encontra longe de uma exploração a 100%. Assim há espaço para em Portugal se dinamizar e reduzir a dependência externa no que respeita à produção de energia elétrica [3].

1.4 Ondas oceânicas

Aproximadamente 75% do globo terrestre está coberto por oceanos que albergam um potencial energético significativo devido a:

- Ondas
- Correntes
- Gradientes de temperatura
- Gradientes de salinidade
- Marés

Tal como as restantes formas de energia também a energia das ondas não possui uma distribuição igual ao longo do globo. As zonas com maior potência encontram-se entre as latitudes 30° e 60° tanto no hemisfério norte e sul.

Na Figura 1.12 está apresentada a distribuição da potência média da energia das ondas pelas diversas regiões do globo. Os locais de maior potência média intersectam, no hemisfério Norte, a costa do Canadá, Estados Unidos da América e a costa oeste da Europa, bem como, no Hemisfério Sul, a costa sul da América do Sul e a Austrália [4].

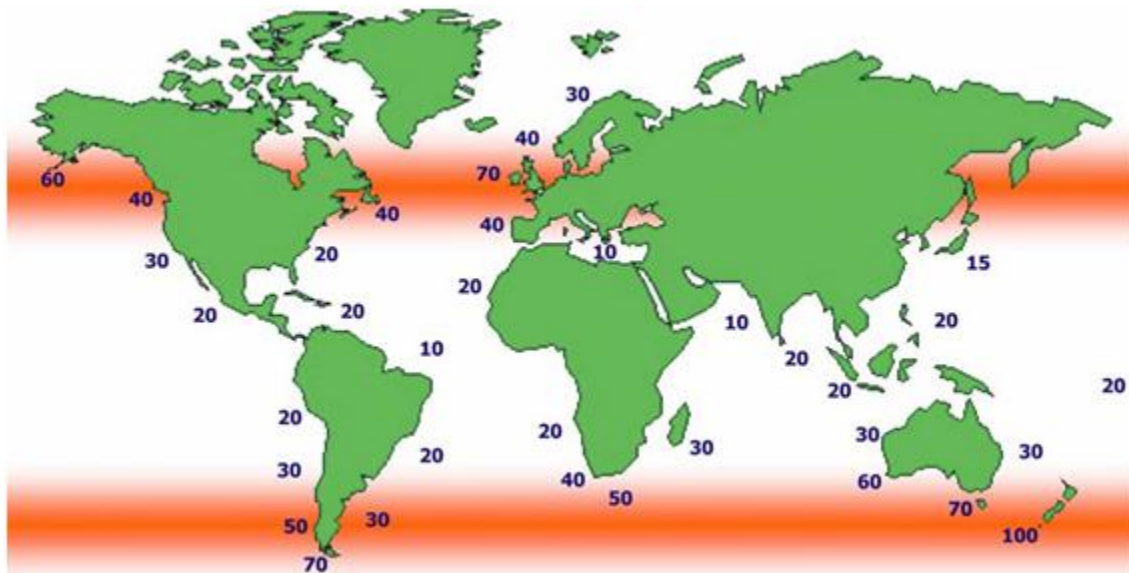


Figura 1.12 - Distribuição da potência média da energia das ondas no globo terrestre (em kW/m) [4].

Particularizando-se a situação de energia das ondas à Europa verifica-se que a costa ocidental apresenta uma elevada potencia média. A Figura 1.13 apresenta a distribuição da potência média das ondas na Europa. Estudos realizados na área nordeste do

Atlântico concluíram que a potência total disponível das ondas é de cerca de 290 GW e que a total potência disponível no mediterrâneo é de 30 GW [4].



Figura 1.13 - Potência média da energia das ondas na Europa (em kW/m) [4].

1.5 Ondas em Portugal

Portugal graças à sua geografia e à densidade energética do mar que o rodeia prefigura-se como um país com extremas potencialidades no domínio do aproveitamento da energia das ondas.

Admitindo-se que existe uma produção potencial de energia elétrica inerente à energia das ondas de 30 kW por km de costa e de que 15% dessa energia poderá ser convertida, se contabilizarmos os 335 km de costa disponível para instalação de equipamentos de aproveitamento de energia das ondas e descontando deste valor os corredores necessários para a passagem de barcos (cerca de 20%) a linha costeira disponível ultrapassa os 250 km. O que perfará um potencial de produção energética total de 10twh anuais (20% do consumo nacional) [5].

Outros aspetos relevantes para a implantação de dispositivos de aproveitamento da energia das ondas são a forte implantação da rede elétrica nacional no litoral do país

onde os consumos são mais intensos, o que contribuirá para uma fácil ligação destes dispositivos com o sistema de energia nacional e os incentivos tarifários para produtores distribuídos utilizando energias renováveis (produtores em regime especial) [6].

No que se refere à tipologia das ondas na região do Algarve, nomeadamente para Faro foram analisados os dados recolhidos pelo Instituto Hidrográfico da Marinha Portuguesa.

Os dados recolhidos referem-se, nomeadamente, à altura significativa de uma onda, que representa a média do terço mais elevado das alturas de onda que foram registadas durante o período de observação/medição, correspondendo, aproximadamente, à avaliação visual da altura das ondas. O período médio indica a média dos períodos observados no registo, representando o período típico das ondas registadas durante o período de observação/medição.

Os gráficos do período e altura significativa das ondas ao largo de Faro são apresentados nas Figuras 1.14 e 1.15, respetivamente. Observando o gráfico do período máximo das ondas ao largo de Faro (Figura 1.14), verifica-se que durante a maior parte do ano, uma oscilação do período, de 3 a 15 segundos, sendo que no inverno, o período máximo das ondas pode atingir os 21 s.

Observando o gráfico da altura significativa das ondas ao largo de Faro na Figura 1.15, verifica-se, durante o período de inverno, uma altura significativa máxima de 5 m e um período máximo de 20 s. Nos restantes períodos do ano, a altura significativas das ondas sofre uma oscilação de 0,2 m a 4 m.

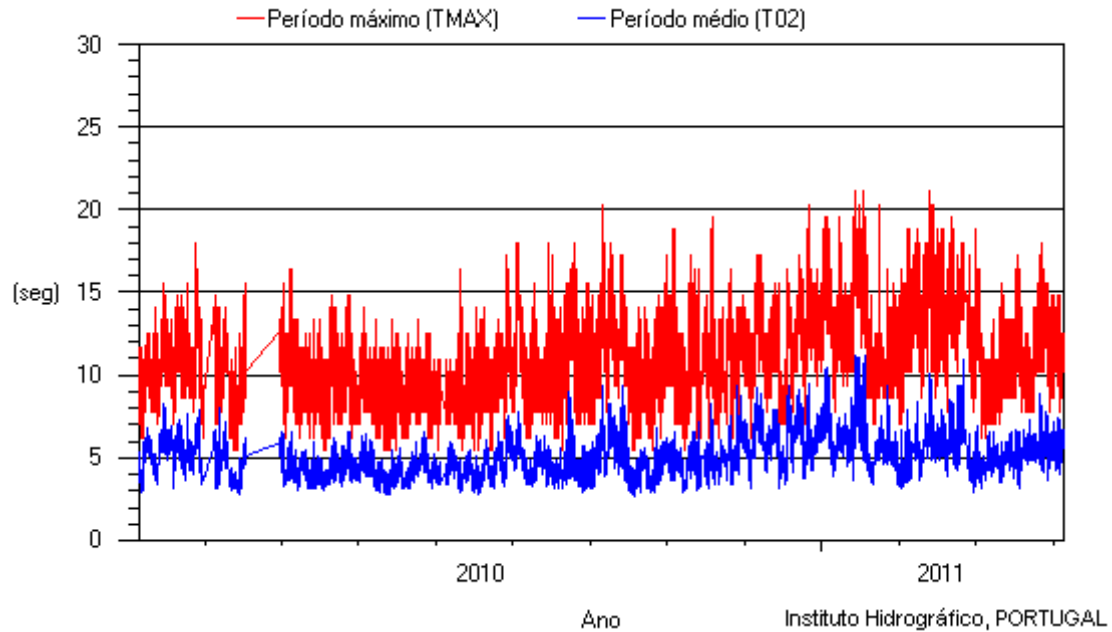


Figura 1.14 – Gráfico do período médio e máximo obtido através dos dados da boia ondógrafo de Faro, recolhidos entre 6/4/2010 a 6/4/2011 [7].

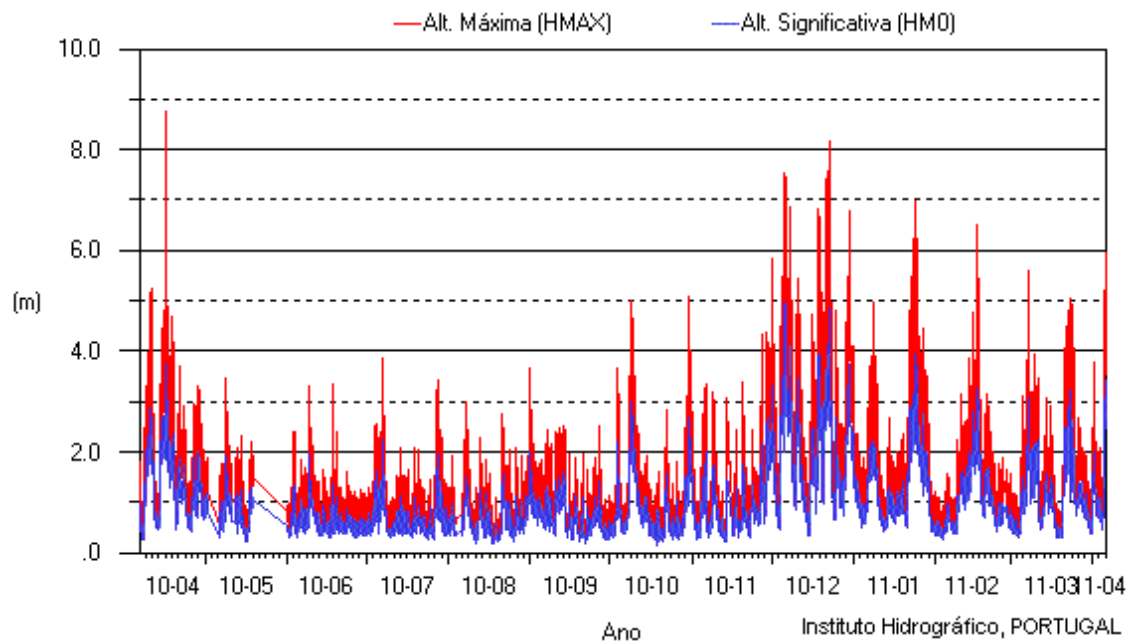


Figura 1.15 - Gráfico da altura significativa e máxima obtido através dos dados da boia ondógrafo de Faro, recolhidos entre 6/4/2010 a 6/4/2011 [7].

1.7 Enquadramento histórico

Desde a antiguidade que é reconhecido o potencial energético da energia das ondas oceânicas. Sabe-se que desde finais do século XVIII estão patenteados dispositivos de aproveitamento da energia das ondas. A tabela 1 esquematiza os factos mais relevantes desde a década de 1960 até à atualidade [8].

Tabela 1 – Cronograma dos factos mais relevantes da energia das ondas			
Década	1960's	Princípios	
		Meados	Boias Comandante Y. Masuda
		Finais	
	1970's	Princípios	Propostas Salter para a produção de energia em larga escala
		Meados	Programa Reino Unido (2 GW)
		Finais	
	1980's	Princípios	Teoria linear no domínio da frequência
		Meados	Primeiras centrais piloto no Japão e na Noruega
		Finais	Modelos lineares no domínio do tempo de WEC's
	1990's	Princípios	Análise linear no domínio da frequência de conjuntos de WEC's
		Meados	Modelos "Wave-to-Wire" de WEC's
		Finais	Análise hidrodinâmica não linear de WEC's
	2000's	Princípios	Teste no mar de diversas centrais piloto
		Meados	Demonstração da tecnologia
		Finais	Demonstração da viabilidade económica da tecnologia

Um dos principais motivos que levou à investigação e implementação de sistemas de aproveitamento da energia das ondas foi o choque petrolífero da década de 70, tendo desde então sido feito um enorme investimento em investigação nesta área por parte das mais variadas entidades mundiais [8].

Devido aos choques petrolíferos na década de 70, Portugal tem recebido diversos incentivos à investigação e tem sido local de diversas experiências no que se refere à extração da energia das ondas. Assinalam-se os estudos efetuados com a central de coluna de água oscilante (400 kW) da ilha do Pico com a central Archimedes Wave Swing (2 MW), instalada na Povoia de Varzim e o projeto com o dispositivo Pelamis (250 kW) ao largo da localidade de Aguçadoura [6].

1.8 Sistemas de aproveitamento da energia das ondas oceânicas

Os dispositivos de aproveitamento da energia das ondas encontram-se ainda numa fase “primitiva” de desenvolvimento. No entanto, têm surgido cada vez mais e melhores dispositivos para o aproveitamento da energia das ondas. O organigrama da Figura 1.16 apresenta os conversores de energia das ondas com maior expressão no panorama mundial atual.

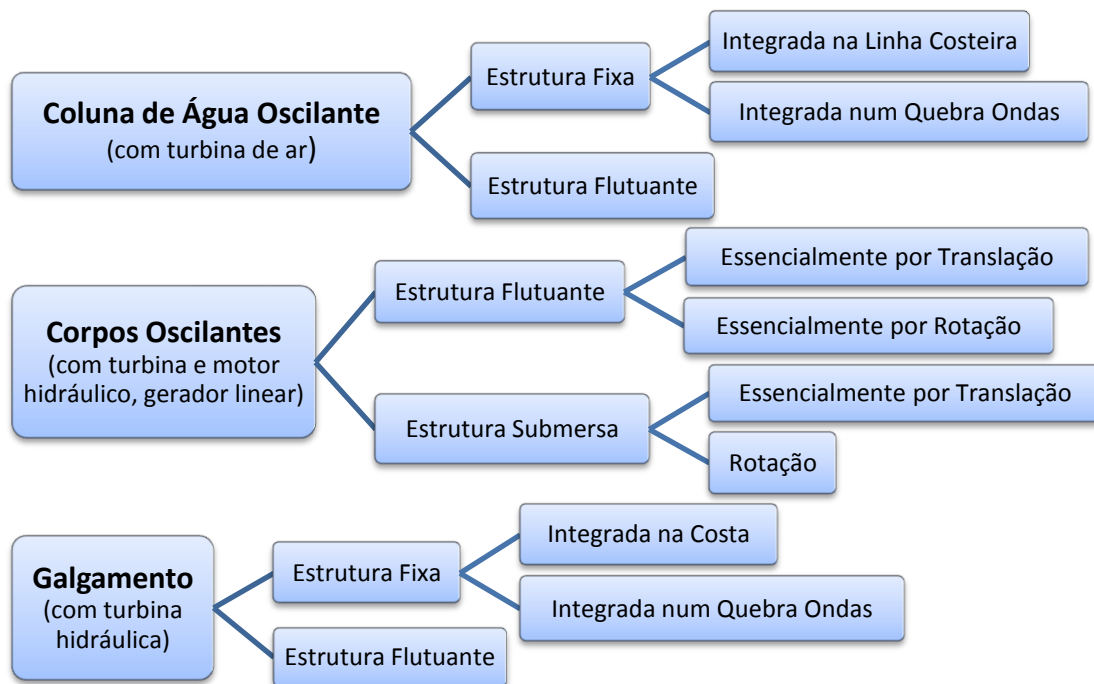


Figura 1.16 - Organigrama das tipologias de conversores de energia das ondas mais relevantes [9].

Apresentam-se seguidamente alguns dispositivos de aproveitamento da energia das ondas implementados na atualidade.

1.8.1 Coluna de água oscilante (CAO)

A central de coluna de água oscilante (CAO) foi dos primeiros dispositivos de produção de energia a ser implementado contando já com protótipos em vários países, nomeadamente na Escócia, no Japão, na Índia, na China e em Portugal. Estas centrais, para além da estrutura de betão ou aço, são constituídas pelo seguinte equipamento [5]:

- Turbina de ar, que deve ser de fluxo reversível;

- Gerador elétrico, normalmente do tipo assíncrono, associado a um sistema que permite colocar na rede, a energia elétrica com frequência e potencial constante;
- Sistema de aquisição de dados e de controlo da central;
- Válvulas de ar, uma de isolamento e outra de acionamento rápido, podendo ser para controlo de caudal na turbina.
- Conduta de ar (diâmetro entre 1,5 e 2,5 m).

A CAO gera energia quando uma onda entra na estrutura e por sua vez o ar que se encontra no seu interior é forçado a deslocar-se por uma turbina, regressando depois a onda ao mar o ar passará na turbina no sentido inverso [8].

Na Figura 1.17 é apresentado o esquema de funcionamento da central CAO na ilha do Pico.

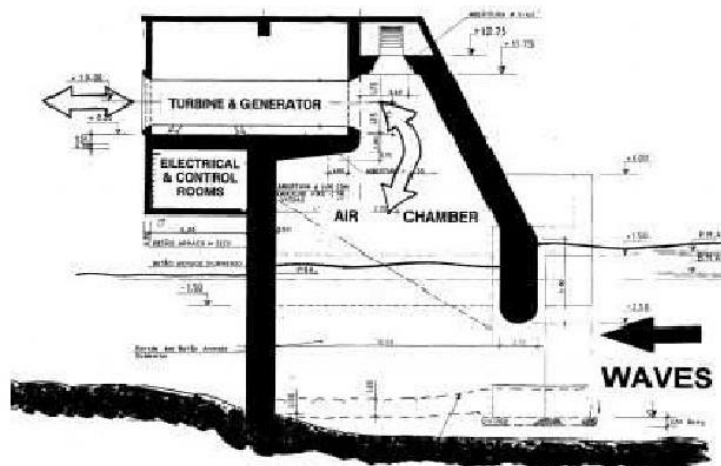


Figura 1.17 - Esquema de funcionamento da central de CAO do Pico [10].

1.8.2 Archimedes Wave Swing (AWS)

A central Archimedes Wave Swing (AWS) é constituída por dois cilindros ocios, sobrepostos, no interior dos quais se encontra ar pressurizado como se esquematiza na Figura 1.18. A pressão no interior dos cilindros equilibra o flutuador relativamente ao seu peso e a pressão hidrostática nele exercido. As diferenças de pressão causadas pelas passagens das ondas, movem o flutuador provocando um movimento oscilatório vertical, funcionando o conjunto como uma espécie êmbolo ou mola pneumática [8].

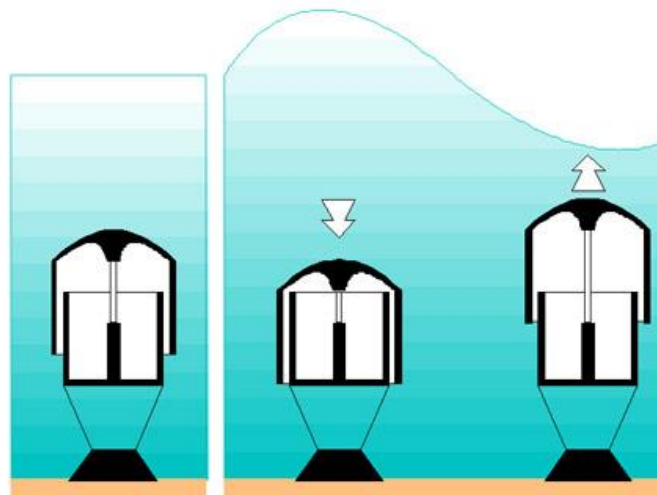


Figura 1.18 - Esquema de funcionamento do AWS [11].

O movimento entre o flutuador e a base é aproveitado para acionar um gerador linear síncrono, de magnetos permanentes. A energia mecânica é portanto convertida diretamente para elétrica, sendo enviada por um cabo para a costa (se se tratar de um gerador isolado), onde será tratada antes de ser injetada na rede [8].

1.8.3 Pelamis

A central Pelamis é um conversor do tipo progressivo com uma dimensão longitudinal (150 m) da ordem de grandeza do comprimento das ondas. Fisicamente, o Pelamis é constituído por quatro módulos cilíndricos semi-submersos, tal como apresentado na Figura 1.19 e por três módulos de conversão de energia. Com a ondulação marítima, os módulos oscilam em torno das juntas que os unem, pressurizando óleo que é forçado a passar por motores hidráulicos que, por sua vez, acionarão geradores que produzem eletricidade. A potência nominal de um destes conversores está fixada em 750 kW [8].



Figura 1.19 – Fotografia de um Pelamis [12].

O Pelamis foi concebido, principalmente, com o objetivo da sua implementação em parques pelo que não será de estranhar que a energia extraída do conjunto de todos os módulos seja retirada e enviada para terra através de um único cabo. O sistema de fixação do Pelamis ao fundo do mar é bastante simples e flexível, independentemente da profundidade e morfologia do fundo oceânico o Pelamis dispor-se-á, dinamicamente, sempre ao longo da movimentação da onda [8].

1.8.4 Wave Dragon

O Wave Dragon trata-se de um dispositivo de galgamento oceânico. É constituído por dois refletores que concentram as ondas incidentes numa rampa que, sendo transposta, desemboca num reservatório. Este armazena a água a um nível médio superior ao da superfície livre do mar, ao qual é devolvida através de turbinas, produzindo eletricidade, num processo como o esquematizado na Figura 1.20.

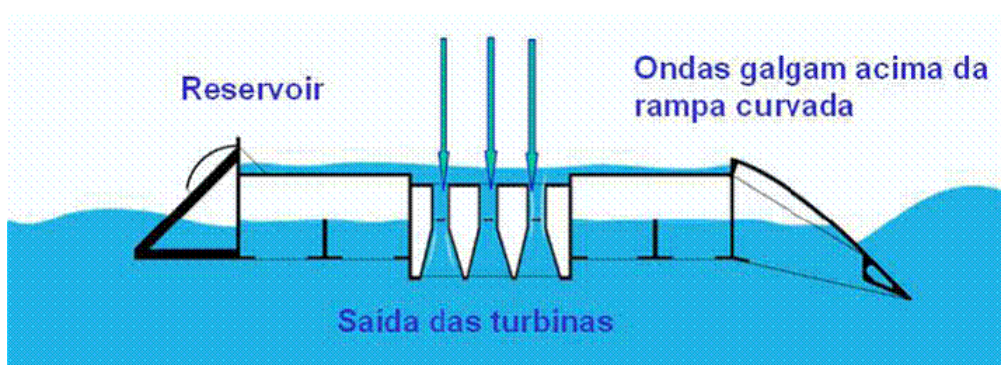


Figura 1.20 - Desenho esquemático do Wave Dragon [13].

O armazenamento da água permite regular a produção de eletricidade de forma similar ao de uma central mini-hídrica. Em função do regime de ondas prevê-se uma potência nominal dos 4 aos 11 MW para este dispositivo, que, refira-se, foi o primeiro dispositivo oceânico a introduzir eletricidade numa rede elétrica (na Dinamarca, concretamente) [8].

Em Portugal, está em fase inicial de desenvolvimento um sistema de galgamento fixo a ser instalado junto à costa, patenteado pela empresa portuguesa ENERWAVE [8].

1.8.5 Mighty wale

O Mighty Wale é um dispositivo de aproveitamento da energia das ondas que graças ao seu carácter flutuante, permite uma ancoragem a diversas profundidades. O Might Wale não é mais que um dispositivo de CAO (Coluna de Água Oscilante), pelo que todo o seu funcionamento é em tudo semelhante. No entanto, a sua possibilidade de instalação em zonas de maior profundidade permite-lhe beneficiar de ondas mais poderosas [8].

Na Figura 1.21 é apresentada uma antevisão artística de um dispositivo do tipo Mighty Wale.

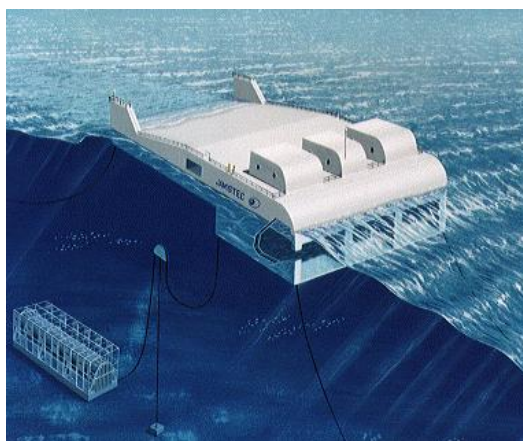


Figura 1.21 – Exemplo de uma antevisão do mighty wale [14].

1.8.6 Outros dispositivos e perspectivas futuras

A natureza da tecnologia da conversão da energia das ondas não permite que as atuais soluções serão as únicas num futuro próximo. Encontram-se em desenvolvimento vários

dispositivos de aproveitamento da anergia das ondas tais com, o WaveBob, a AquaBuoy e o Wave Rotor [8].

1.9 Descrição matemática das ondas do mar

As ondas oceânicas são provocadas pelo movimento dos corpos celestes, perturbações sísmicas e ventos. Sabe-se que o tipo de onda de maior incidência nos oceanos é designado por “swell”, e é caracterizada por possuir um longo comprimento de onda e baixa amplitude [3].

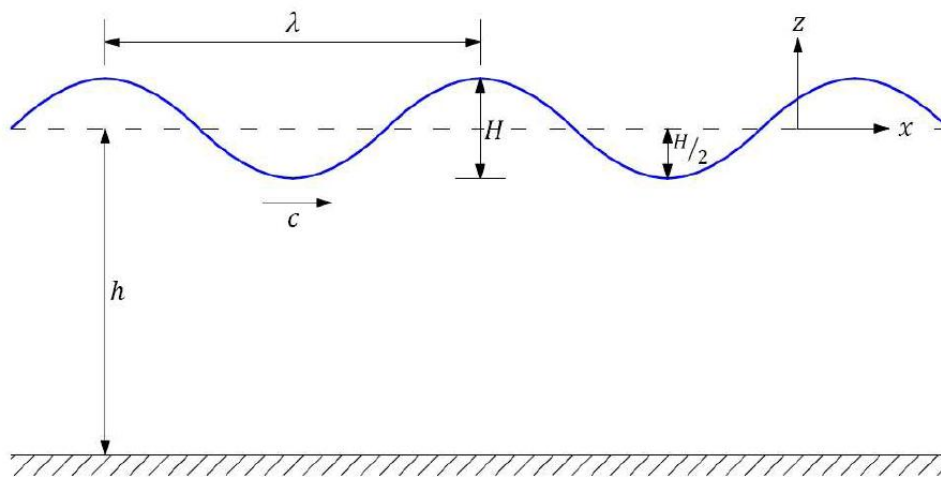


Figura 1.22 – Onda linear sinusoidal [3].

Para simplificar o tratamento matemático das ondas oceânicas, torna-se vantajoso aproxima-las à sua teorização linear, podendo-se então simular sistemas com recurso a formas de onda exclusivamente sinusoidais. No entanto, esta aproximação é apenas valida para grandes profundidades.

Considerando-se a onda representada na Figura 1.22, e de acordo com [15] o deslocamento livre da onda, η , pode ser dado pela expressão:

$$\eta = \frac{H}{2} \cos(k(x - ct)) \quad (1.1)$$

onde:

H - Altura da onda [m]

c - Velocidade da onda [m/s]

k - Número da onda

x - Posição

t - Tempo [s].

Sabendo-se também que as expressões para o número de onda e para a velocidade da onda são [15], respetivamente,

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (1.2)$$

e

$$c = \frac{\lambda}{T} \quad (1.3)$$

onde:

T - Período da onda [s]

λ - Comprimento de onda [m].

Substituindo (1.2) e (1.3) em (1.1) Tem-se o deslocamento livre da onda [15], dado pela expressão

$$\eta = \frac{H}{2} \cos\left(\frac{2\pi x}{\lambda} - \frac{2\pi t}{T}\right) \quad (1.4).$$

A velocidade de onda depende da frequência e do período da onda e também da profundidade da água, como tal, tem-se a seguinte expressão [15] para o comprimento de onda.

$$\lambda = \frac{2\pi}{k} = \frac{2\pi g}{\omega^2} \tanh(kh) = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{\lambda}\right) \quad (1.5)$$

onde:

ω - Velocidade angular da onda [rad/s]

g - Aceleração gravítica [m/s]

h - Profundidade da água [m].

Considerando que a extração de energia irá ocorrer em águas profundas, a expressão do comprimento de onda [15]

$$\lambda = \frac{gT^2}{2\pi} \quad (1.6).$$

A relação entre velocidade e a posição das partículas de água é obtida através das equações de Cauchy-Riemann que, de acordo com [15], essa relação vem dada pelas expressões (1.7) e (1.8), onde u e w são respectivamente as componentes horizontal e vertical da velocidade das partículas de água.

$$u = \frac{H\omega \cosh[k(z+h)]}{2 \sinh(kh)} \cos(kx - \omega t) \quad (1.7)$$

$$w = \frac{H\omega \cosh[k(z+h)]}{2 \sinh(kh)} \sin(kx - \omega t) \quad (1.8)$$

No que se refere à energia total da onda, esta é decomposta em duas partes: uma devida à energia potencial; e outra devida à energia cinética [15]

$$E_p = E_k = \frac{\rho_{am} g H^2 \lambda b}{16} \quad (1.9)$$

$$E = E_p + E_k = \frac{\rho_{am} g H^2 \lambda b}{8} \quad (1.10)$$

onde:

E_p - Energia potencial da onda

E_k - Energia cinética da onda

ρ_{am} - Densidade da água do mar

b - Comprimento da frente de onda [m]

E - Energia total da onda.

A potência de uma onda P , é a transferência de energia da onda de um ponto para outro ponto, no sentido do movimento da onda, podendo ser calculada com a expressão

$$P = \frac{\rho_{am} g H^2 c_g b}{8} \quad (1.11)$$

onde:

c_g - Velocidade grupo [m/s]

ρ_{am} - Densidade da água do mar [kg/m³].

A velocidade de grupo, c_g vem dada por

$$c_g = \frac{c}{2} \left(1 + \frac{\frac{4\pi}{\lambda} h}{\sinh\left(\frac{4\pi}{\lambda} h\right)} \right) \quad (1.12).$$

Capítulo 2: Sistema de aproveitamento da energia das ondas oceânicas

O funcionamento dos geradores lineares de magnetos permanentes baseia-se num sistema de excitação onde os magnetos criam um fluxo magnético que passa através do entreferro excitando os enrolamentos. O fluxo magnético, produzido por cada par de polos, completa uma volta através dos enrolamentos. Para que este circuito magnético seja o mais eficiente possível, o fluxo que atravessa os enrolamentos deve ser maximizado. Isto pode ser conseguido, por exemplo recorrendo ao uso de materiais de baixa permeabilidade magnética na construção dos enrolamentos, servindo de barreira ao fluxo.

Um exemplo, simples, desta configuração, consiste na utilização de vários magnetos movendo-se no interior de um estator. Esta configuração está exemplificada na figura 2.01.

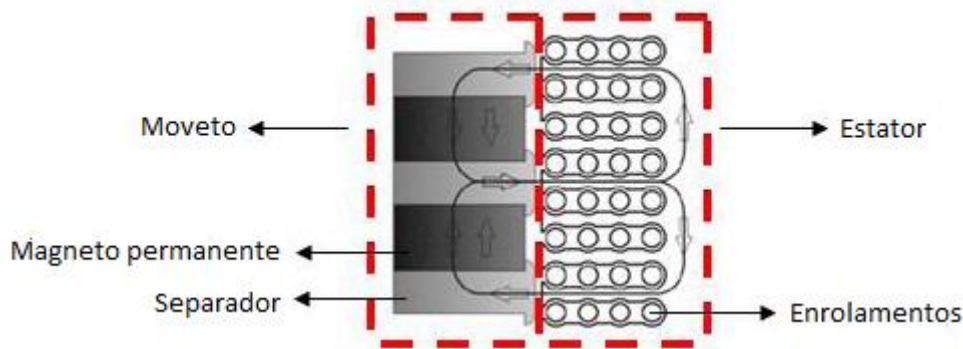


Figura 2.01 - Gerador Linear para Aproveitamento da Energia das Ondas [16].

Na construção de um gerador de magnetos permanentes é relevante a escolha do tipo de configuração dos mesmos podendo esta mesma configuração ser radial ou axial, tal como apresentado na figura 2.02.

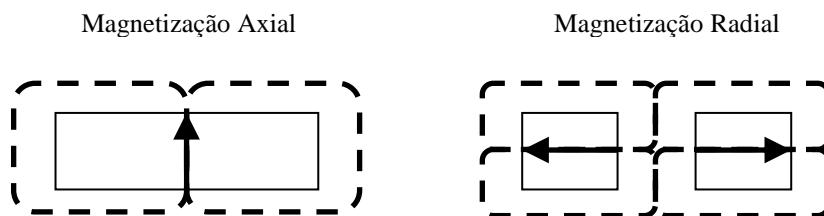


Figura 2.02 – Exemplo de magnetização axial e magnetização radial.

O uso de magnetos permanentes de fluxo axial permite a obtenção de uma maior força, no entanto limita a máquina em termos da localização destes mesmos magnetos [17].

2.1 Configuração do sistema

Pretende-se, com o presente projeto, o desenvolvimento de um dispositivo de aproveitamento da energia das ondas do mar para ser utilizado ao largo da costa. O dispositivo é constituído por dois elementos; um móvel que será o flutuador (boia) e um fixo que será um tubo que vai da superfície do mar até ao fundo oceânico (Figura 2.03). A boia será de forma anelar cilíndrica e oscilará em torno do tubo central.

É possível implementar o dispositivo de aproveitamento de energia das ondas em estudo com duas configurações: sistema de excitação no interior do tubo central e enrolamentos no interior da boia; ou sistema de excitação no interior da boia e enrolamentos no interior do tubo. Na tabela 2.01 são apresentadas as vantagens e desvantagens de cada uma das configurações.

Tabela 2.01 – Vantagens e desvantagens das configurações possíveis		
Configuração	Vantagens	Desvantagens
Sistema de excitação no interior do tubo central e enrolamentos no interior da boia.	Permite o uso de magnetos permanentes configurados em magnetização axial, o que permite uma maior força.	A boia terá cablagem suspensa. Atracção de matérias com propriedades magnéticas para o tubo central.
Sistema de excitação no interior da boia e enrolamentos no interior do tubo.	Ausência de cablagem a sair para o exterior da boia permite uma melhor movimentação da mesma. Ausência de atracção de matérias com propriedades magnéticas de encontro ao tubo central.	Obriga ao uso de magnetos permanentes configurados em magnetização radial.

Tendo em conta a vantagens e desvantagens apresentadas na tabela anterior, no interior do tubo central estarão colocados os elementos a serem excitados, isto é os enrolamentos. Na boia é colocado o sistema de excitação constituído por magnetos permanentes. Por ação do movimento da superfície marítima a boia deslocar-se-á, fazendo com que o campo magnético se desloque ao longo dos enrolamentos, produzindo energia elétrica.

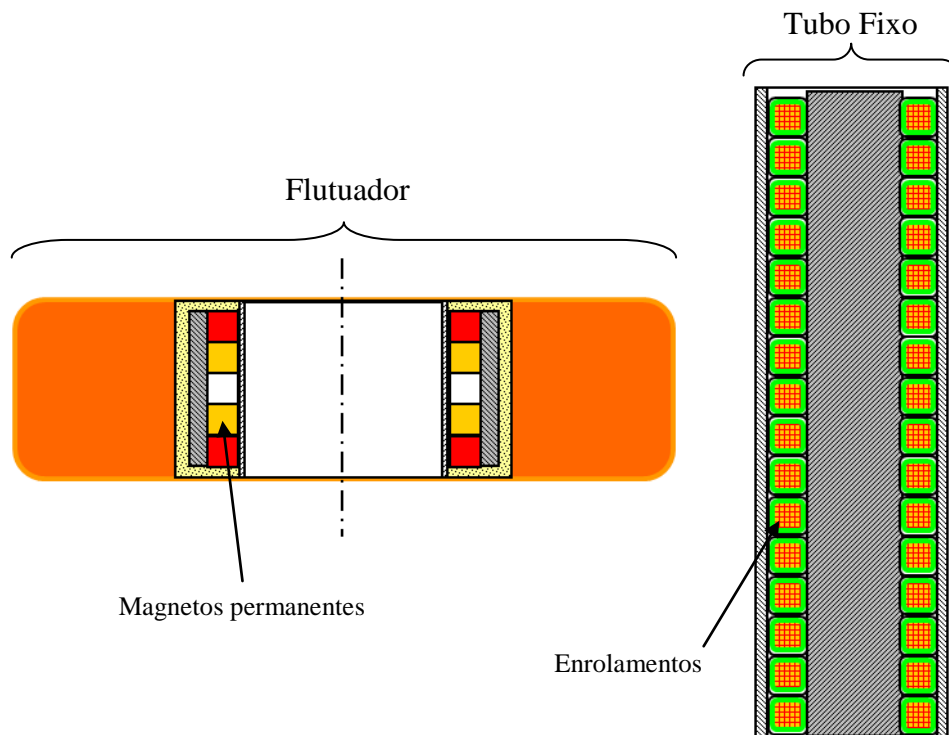


Figura 2.03 – Modelo do gerador.

O dispositivo deve ser fixado ao fundo oceânico preferencialmente em zonas que façam uma elevação, tal como é apresentado na Figura 2.04 por forma a se utilizar o menor comprimento possível de tubo central.

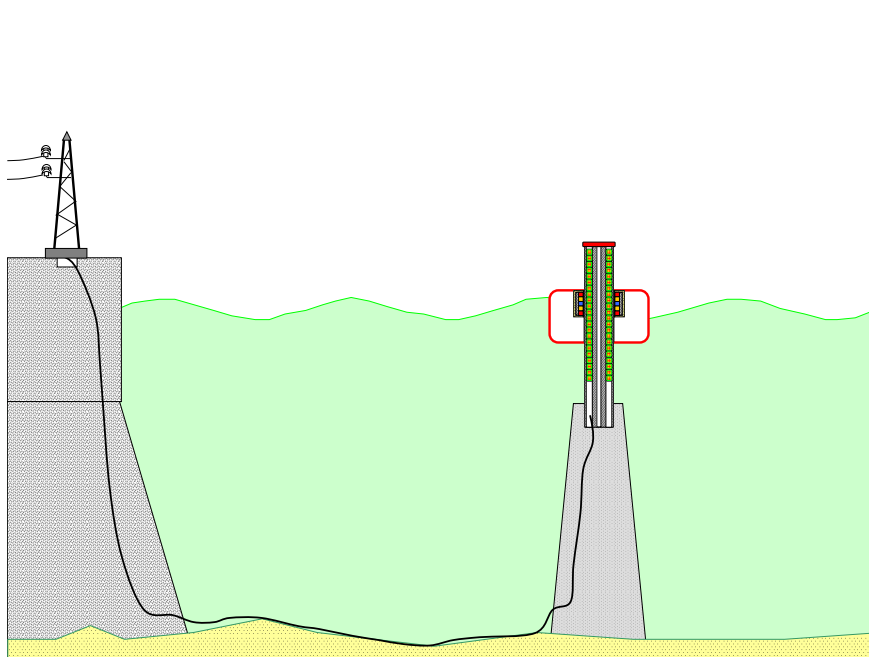


Figura 2.04 – Configuração do sistema e respetiva instalação.

O transporte da energia será feito através de um cabo elétrico desde a zona de fixação até à zona costeira onde deverá estar uma central de controlo que garanta a monitorização do dispositivo. Prevê-se que a central venha a controlar um maior número de dispositivos, uma vez que podem ser instalados mais que um paralelamente à linha costeira.

2.2 Tipologia da máquina

Optou-se pelo desenvolvimento de um gerador tubular, síncrono, trifásico de magnetos permanentes com magnetização radial. A Figura 2.05 apresenta um corte longitudinal deste gerador. A figura não representa a totalidade dos enrolamentos previstos no interior da máquina, mas apenas os enrolamentos que estarão sob efeito do campo magnético induzido pelos magnetos permanentes.

Os magnetos permanentes dispostos em magnetização radial e o anel de ferro que os confina constituem o sistema de excitação do gerador, que se encontra no interior da boia.

A parte fixa do gerador é constituída por um núcleo de ferro cilíndrico e por enrolamentos de cobre envolvendo o núcleo de ferro. Toda a parte fixa do gerado está

confinada por um tubo constituído por material não ferromagnético cuja funcionalidade é de suporte, assegurando também a estanquicidade dos enrolamentos.

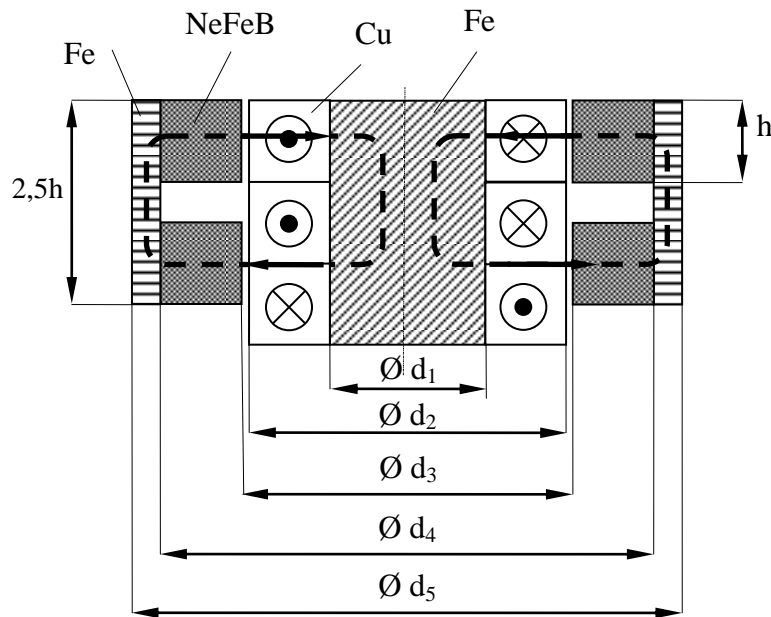


Figura 2.05 – Corte longitudinal do gerador proposto.

Ainda que do ponto de vista do princípio de funcionamento o gerador seja uma máquina trifásica, cada um dos enrolamentos constituintes da máquina está ligada a uma ponte retificadora tal como apresentado na Figura 2.06 a). Este sistema é designado por geratriz de retificação e pode ser analisado como se tratasse de uma máquina de corrente contínua. Deste modo ao afirmar-se que a máquina é trifásica indica-se, apenas que existe um desfasamento elétrico de 120° entre cada um dos enrolamentos. Os enrolamentos são dispostos no interior do tubo de modo a garantir o seu funcionamento com qualquer altura de maré. A ligação de cada um dos enrolamentos com a ponte retificadora é feita em paralelo.

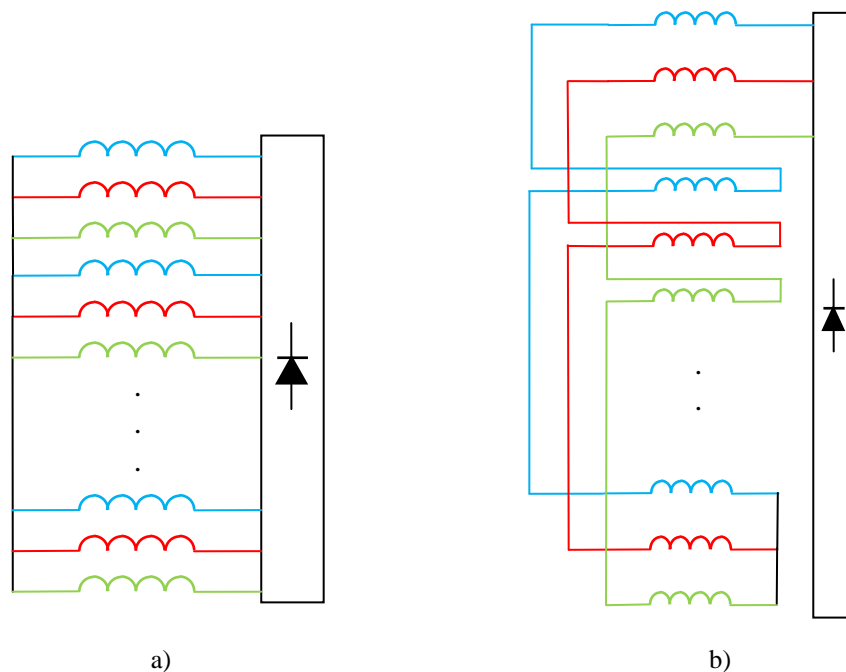


Figura 2.06 – a)Esquema ligação das diversas fases em paralelo b)Esquema ligação das fases em serie.

Em lugar do sistema proposto, poder-se-ia adotar um modelo de ponte retificadora mais simples, com os enrolamentos da máquina em serie, figura 2.06 b). Este sistema obrigaria à existência de um mecanismo de deslocação dos enrolamentos da máquina para que a mesma funcionasse com qualquer altura de maré.

Na Tabela 2.02 são apresentadas as principais vantagens de um sistema face ao outro.

Tabela 2.02 – Vantagens e desvantagens dos sistemas propostos		
Sistema:	Vantagens	Desvantagens
Ponte retificadora com enrolamentos fixos e em paralelo.	<p>Ausência de acionamento mecânico de movimentação dos enrolamentos.</p> <p>Permanentemente ajustada a qualquer altura de maré.</p>	<p>Dispositivo de eletrónica de potência complexo.</p> <p>Elevado número de enrolamentos inativos.</p> <p>Grande dispêndio de material para fazer um elevado número de enrolamentos.</p> <p>Existência de momentos de transição em que a onda trifásica é imperfeita.</p>
Ponte retificadora com enrolamentos móveis e em série.	<p>Numero reduzido de enrolamentos.</p> <p>Dispositivo de eletrónica de potência simples.</p> <p>Ausência de enrolamentos inativos.</p> <p>Onda trifásica perfeita.</p>	<p>Dependência de um dispositivo de controlo da altura da maré, bem como de um dispositivo que permita deslocar os enrolamentos.</p> <p>Existência de movimentação mecânica para ajuste às diferentes alturas de maré.</p>

2.3 Circuito magnético equivalente

Para o desenvolvimento do presente gerador, admitiu-se que o fluxo magnético circula apenas por dois caminhos possíveis e desprezou-se todas as fugas de fluxo. Na figura 2.08 é possível observar o equivalente elétrico do circuito magnético do gerador em estudo, onde \mathfrak{R}_{feext} é a relutância magnética do anel de ferro exterior, v_m é a queda de tensão magnética equivalentes dos magnetos, \mathfrak{R}_{mag} é a relutância magnética equivalente do magneto permanente, \mathfrak{R}_g é a relutância magnética equivalente do entreferro mecânico, \mathfrak{R}_{bob} é a relutância magnética equivalente da bobina e \mathfrak{R}_{nucfe} é a relutância magnética equivalente do núcleo central de ferro.

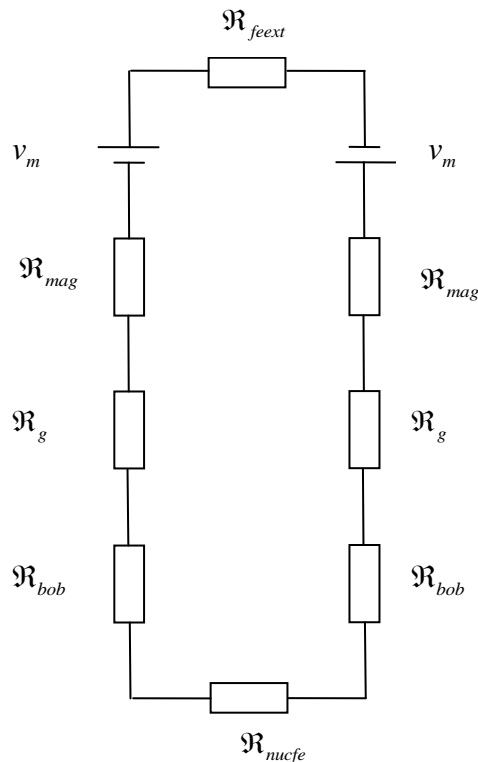


Figura 2.08 – Circuito magnético equivalente.

A relutância magnética de um dado determinado circuito magnético vem dada pela expressão (2.1)

$$\mathfrak{R} = \frac{l}{\mu A} \quad (2.1)$$

onde:

l - Comprimento do circuito [m]

μ - Permeabilidade do circuito [H/m]

A - Secção normal ao fluxo magnético [m²].

Sabendo que o comprimento do circuito magnético é igual a $2,5h$, que a secção normal ao fluxo é πr_1^2 e que a permeabilidade do circuito é $\mu_0 \mu_{fe}$. A relutância do veio central de ferro virá dada pela expressão

$$\mathfrak{R}_{nucfe} = \frac{2,5h_{mag}}{\mu_0 \mu_{fe} \pi r_1^2} \quad (2.2)$$

onde:

μ_0 - Permeabilidade magnética do vácuo [H/m]

μ_{fe} - Permeabilidade relativa do ferro

h_{mag} - Altura de cada polo (altura do magneto) [m].

Quanto à relutância do anel de ferro exterior pode ser expressa por

$$\mathfrak{R}_{feext} = \frac{2,5h_{mag}}{\mu_0 \mu_{fe} (r_5^2 - r_4^2)} \quad (2.3).$$

A relutância do entreferro mecânico é uma relutância cuja secção normal ao fluxo magnético varia ao longo do caminho do fluxo, assim pode ser descrita pela expressão

$$\mathfrak{R} = \int \frac{l}{\mu A} dA \quad (2.4).$$

Substituindo em (2.4) os dados relativos ao entreferro mecânico, nomeadamente o comprimento do circuito, a secção normal ao fluxo e a permeabilidade do circuito tem-se

$$\mathfrak{R}_g = \int_{r_2}^{r_3} \frac{1}{\mu_0 \mu_{ar} 2\pi r h_{mag}} dr = \frac{1}{\mu_0 \mu_{ar} 2\pi h_{mag}} \ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right) \quad (2.5)$$

onde:

μ_{ar} - Permeabilidade relativa do ar.

Tal como a relutância do entreferro mecânico também a relutância da bobina pode ser descrita pela expressão (2.5). Logo por analogia a expressão da relutância nas bobinas será

$$\mathfrak{R}_{bob} = \int_{r_1}^{r_2} \frac{1}{\mu_0 \mu_{cu} 2\pi r h_{mag}} dr = \frac{1}{\mu_0 \mu_{cu} 2\pi h_{mag}} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \quad (2.6)$$

onde:

μ_{cu} - Permeabilidade relativa do cobre.

No que respeita a relutância do magneto permanente a mesma pode ser calculada pela expressão (2.7).

$$\mathfrak{R}_{mag} = \int_{r_3}^{r_4} \frac{1}{\frac{B_r}{H_c} 2\pi r h_{mag}} dr = \frac{1}{\frac{B_r}{H_c} 2\pi h_{mag}} \ln\left(\frac{r_4}{r_3}\right) \quad (2.7)$$

onde:

B_r - Densidade de fluxo remanescente [T]

H_c - Intensidade de campo coercivo [A/m].

O potencial de fonte de tensão v_m será dado pela expressão (2.8), uma vez que é sabido que são utilizados magnetos de NeFeB e que a sua curva de desmagnetização é linear [18].

$$v_m = H_c h_{mag} \quad (2.8)$$

2.3 Dimensionamento do Sistema de aproveitamento da energia das ondas oceânicas

O gerador foi desenvolvido admitindo a utilização de um tubo de suporte com um raio interno de **1 m**. Assim, sabe-se também que o raio exterior dos enrolamentos r_2 será também de **1 m**. Na figura 2.09 é apresentada um esquema das espessuras de alguns componentes do gerador proposto.

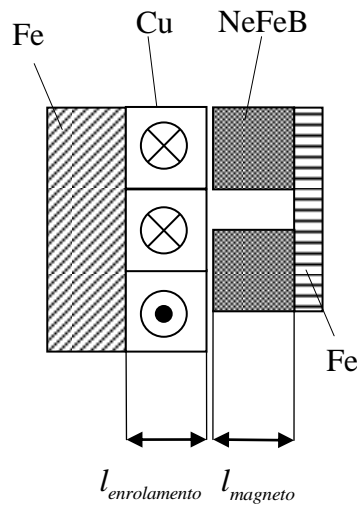


Figura 2.09 – Esquemática das espessuras dos componentes constituintes do gerador.

Pretende-se preencher o interior do tubo por ferro maciço e por enrolamentos. Assim a expressão (2.09) permite determinar o raio do núcleo de ferro, sendo $l_{enrolamento}$ a espessura do enrolamento em metros.

$$r_1 = 1 - l_{enrolamento} \quad (2.9)$$

Para o gerador em estudo admitiu-se um entreferro mecânico igual a 10% da espessura do enrolamento, logo a expressão do raio interior dos magnetos pode ser dada por

$$r_3 = l_{enrolamento} \times 0,1 + r_2 \quad (2.10).$$

Para o dimensionamento dos magnetos permanentes de acordo com [19] tem-se que para o gerador em causa a situação aproximadamente ótima coincide, quando o volume

de magnetos sob o pólo é aproximadamente igual ao volume da bobina e do entreferro mecânico, $V_{mag} \approx V_{ent+bob}$. Uma vez que é considerada a mesma altura do magneto e da bobina pode-se considerar que a secção do magneto é igual à secção da bobina e do entreferro mecânico obtendo-se a expressão

$$\pi(r_4^2 - r_3^2) = \pi(r_3^2 - r_1^2) \quad (2.11).$$

Reescrevendo a expressão (2.11) tem-se (2.12).

$$r_4 = \sqrt{2r_3^2 - r_1^2} \quad (2.12)$$

Propõe-se, para este projeto, a utilização de magnetos de Neodímio Ferro Boro (NdFeB), cuja curva de desmagnetização linear é descrita pela expressão

$$B_m = -\frac{B_r}{H_c} H_m + B_r \quad (2.13)$$

onde:

B_m - Densidade de fluxo num magneto permanente [T]

H_m - Intensidade de campo magnético num magneto permanente [A/m].

Calculando-se o produto energético do magneto ($B_m \times H_m$) no domínio da função (2.13), conclui-se que o máximo produto energético $(B_m \times H_m)_{\max}$ para este tipo de magneto ocorre no ponto **(0.6650 T, -463000 A/m)**.

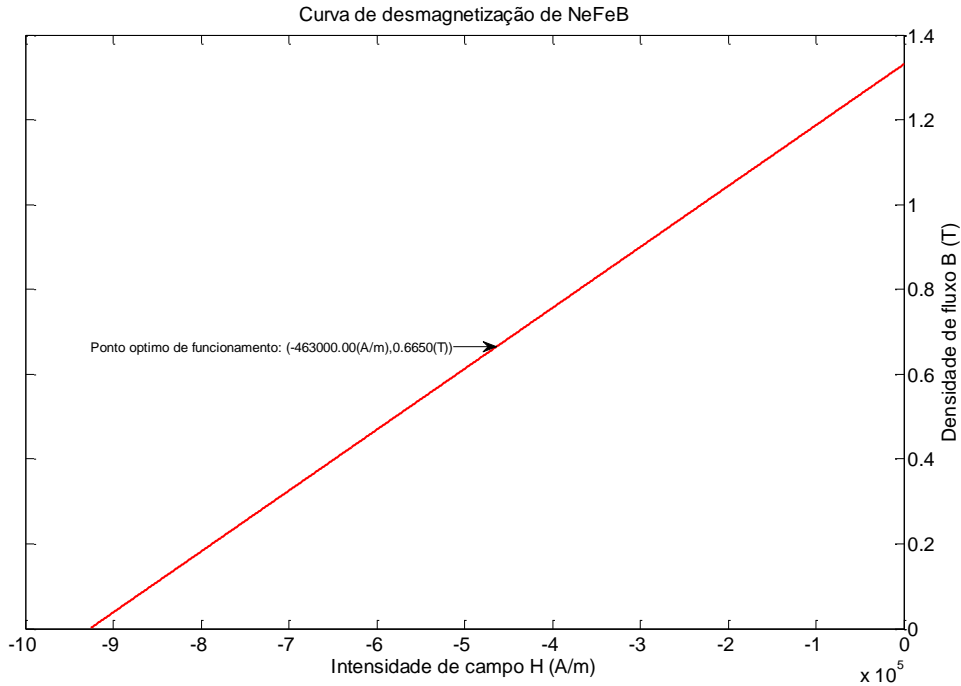


Figura 2.10 – Curva de desmagnetização de NeFeB.

Considerando que os núcleos de ferro usados na máquina são de ferro maciço não laminado tem-se que a densidade de fluxo magnético de saturação é $B_s = 1,3 \text{ T}$. Pretende-se que a espessura do anel exterior de ferro da máquina seja a estritamente necessária para garantir a não saturação do ferro. Foi efetuado um conjunto de iterações manuais através do programa de elementos finitos femm, onde se verificou que para uma espessura do anel de ferro exterior de sensivelmente metade da espessura dos magnetos não existirá saturação magnética e que está garantida uma ligeira margem de tolerância. No ponto 2.4 do presente capítulo encontra-se a verificação e validação gráfica do resultado da presente simulação. Tem-se então a equação que descreve o raio exterior da máquina dada por

$$r_5 = r_4 + \frac{1}{2}(r_4 - r_3) \quad (2.14).$$

A altura dos enrolamentos foi escolhida a partir do conhecimento da altura das ondas do mar. Para este caso considerou-se uma das alturas predominante das ondas na costa ao largo de Faro, que é de cerca de **0,6 m**. Assim, como é elucidado na figura 2.10 a altura máxima do magneto corresponde à altura de magneto que garante que a totalidade do

fluxo irá abraçar cada um dos enrolamentos com o deslocamento da boia (partindo do pressuposto que a boia acompanha o deslocamento da onda) é uma altura de **0,2 m**, ou seja o conjunto de magnetos percorre pelo menos todos os enrolamentos e regressa ao ponto de origem.

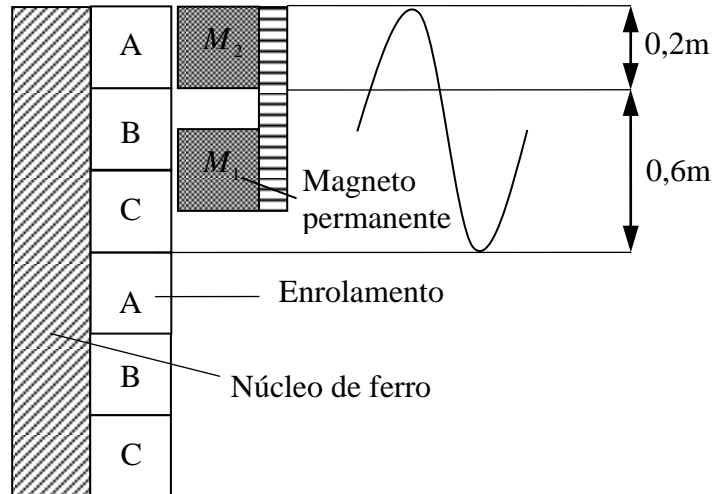


Figura 2.11 – Esquemática do tamanho do magneto em função da amplitude da onda.

O *software* de simulação disponível para este projeto tem muitas limitações. Nomeadamente, não permite simulações como gerador. Assim para otimizar o gerador maximiza-se a força produzida pela máquina em regime de motor com uma corrente constante. Deste modo a máquina também fica otimizada como gerador. A otimização foi efetuada, variando o raio exterior dos enrolamentos r_4 e mantendo-se constantes as restantes relações entre as dimensões da máquina. Tendo sido calculada a força produzida pela máquina para os diversos valores de raio do enrolamento, foi então obtido o gráfico (figura 2.12) que expressa a força em função da espessura do enrolamento. Foi considerado um enrolamento único de cobre maciço com uma densidade de corrente de **1,5 A/mm²**.

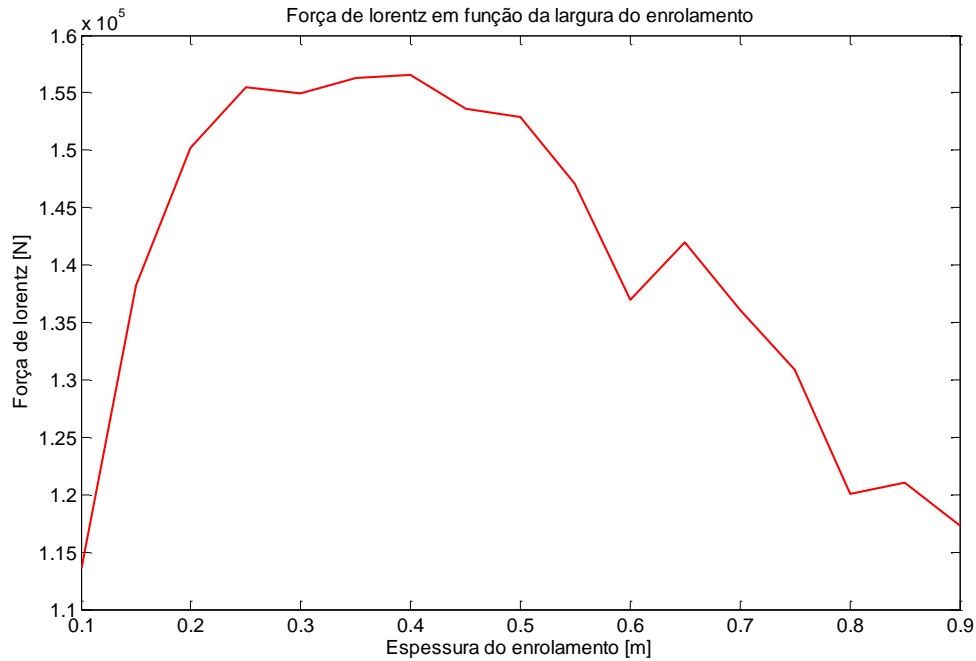


Figura 2.12 – Força do gerador em função da espessura do enrolamento.

O gráfico da Figura 2.12 mostra que a força é máxima para uma bobina com uma espessura de 0,4m, ou seja 40% do espaço disponível no interior do tubo que confina a parte fixa, verifica-se também que a força aumenta com o tamanho do raio do enrolamento até este mesmo ponto a partir do qual a força entra em decréscimo.

Foram também calculados com recurso ao MATLAB e ao programa de análise por elementos finitos (femm) os gráficos da densidade de fluxo no centro dos magnetos em função do tamanho dos enrolamentos da máquina (figuras 2.12 e 2.13).

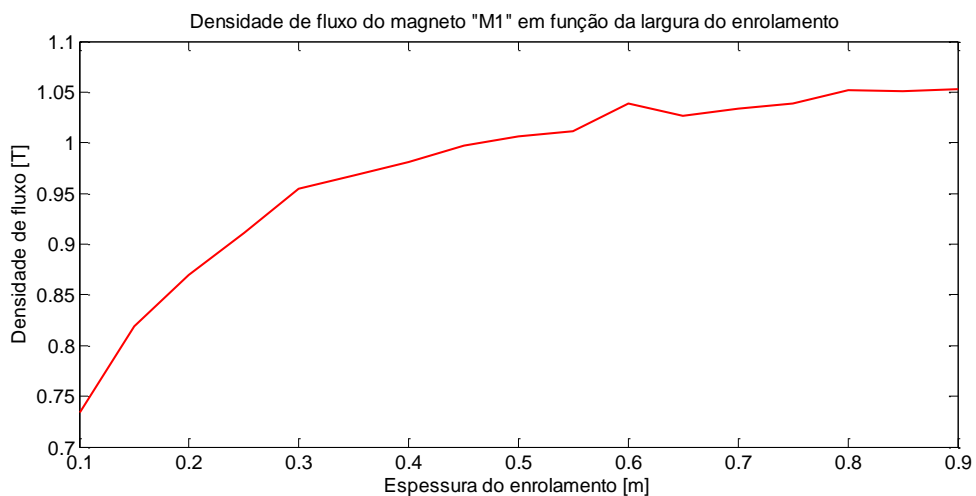


Figura 2.13 – Densidade de fluxo no magneto M₁ da máquina.

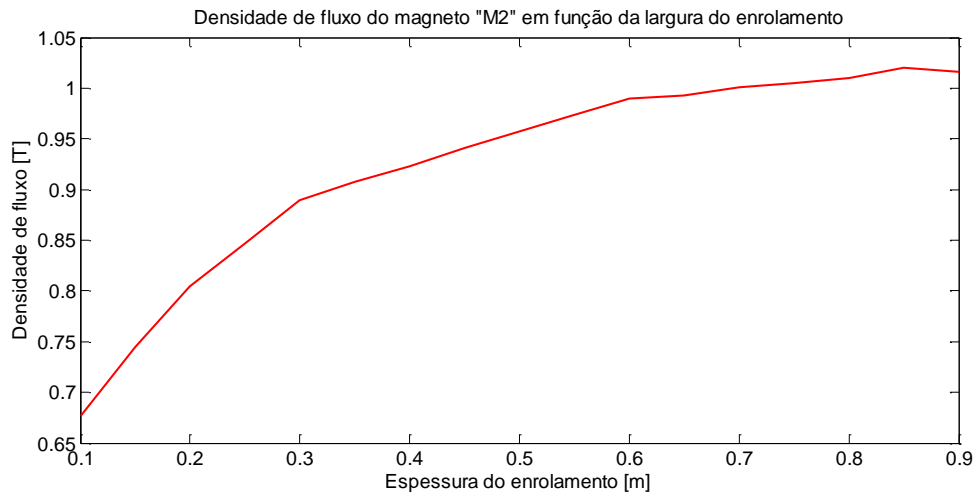


Figura 2.14 – Densidade de fluxo no magneto M_2 da máquina.

Na Figura 2.15 é apresentado o fluxograma que esquematiza, simplificadamente, o programa utilizado para calcular os resultados obtidos.

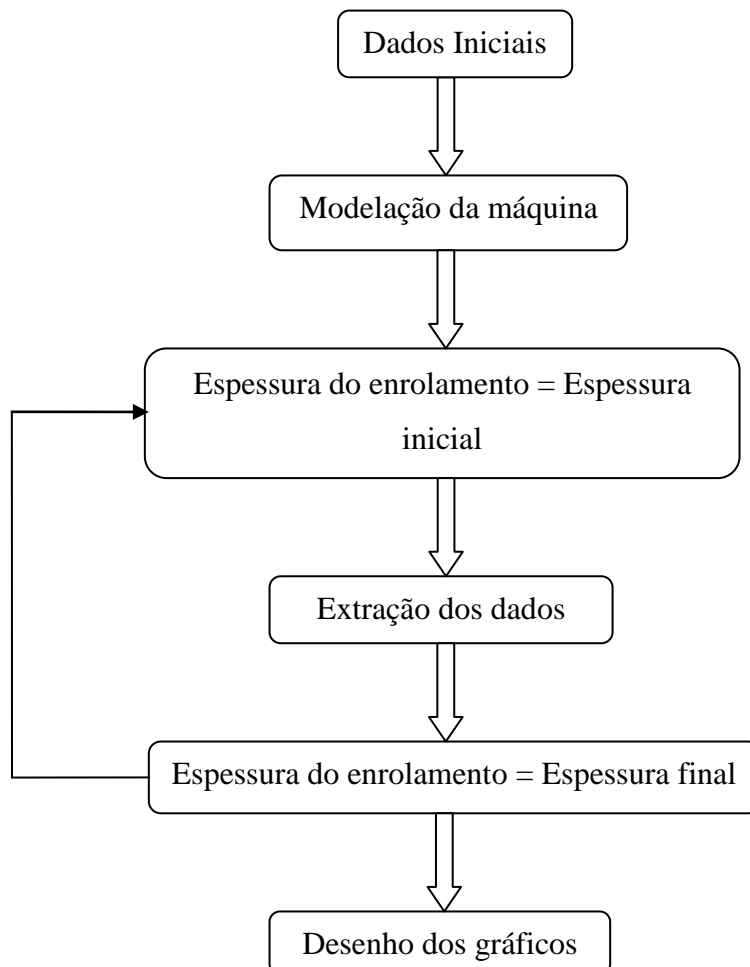


Figura 2.15 – Fluxograma do programa de extração de dados.

Tendo sido escolhido para os enrolamentos condutor de cobre com 16mm^2 de secção e um coeficiente de enchimento $K_e = 0,7$, foi calculado o número de espiras necessário para preencher todo o enrolamento através da expressão

$$N_e = \frac{A}{K_e S} \quad (2.15)$$

onde:

A - Área lateral total dos enrolamentos [m^2]

K_e - Coeficiente de enchimento dos enrolamentos

S - Secção do condutor do enrolamento [m^2]

N_e - Número de espiras do enrolamento.

Com a expressão (2.16), calculou-se o comprimento total de cabo necessário, l para preencher cada enrolamento

$$l = N_e P_{med} \quad (2.16)$$

onde:

P_{med} - Perímetro médio do enrolamento [m].

Para determinação da força eletromotriz, e em cada enrolamento utilizou-se a equação (2.17).

$$e = B \cdot l \cdot v \quad (2.17)$$

onde:

B - Densidade de fluxo magnético [T]

v - Velocidade a que se deslocamento da parte móvel do gerador [m/s].

Pode-se também calcular a resistência das bobinas através da expressão

$$R_{bob} = \rho_{cu} \frac{l}{S} \quad (2.18)$$

onde:

ρ_{cu} - Resistividade elétrica do cobre [$\Omega\text{mm}^2/\text{m}$].

Para uma correta simulação do gerador é também necessário conhecer a matriz de indutâncias do gerador em estudo, que agrega a todas as indutâncias próprias e mutuas, em que j e k representam o número do circuito referente ao fluxo de ligação e o número do circuito referente à corrente, respetivamente.

$$L = \begin{bmatrix} L_{1,1} & L_{1,2} & \dots & L_{1,k} \\ L_{2,1} & L_{2,2} & \dots & L_{2,k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ L_{j,1} & L_{j,2} & \dots & L_{j,k} \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

Sabendo-se que a indutância varia com a posição do sistema de excitação do gerador, foi elaborado em ambiente MATLAB um programa que com recurso à equação (2.20), permite obter o valor da indutância total do gerador através da análise por elementos finitos para um ponto posicional médio.

$$L_{j,k} = \frac{\psi_j}{i_k} \quad (2.20)$$

onde:

ψ_j - Fluxo magnético de ligação do circuito j [wb]

i_k - Corrente do circuito k [A].

Dos cálculos efetuados com recurso às equações (2.09) a (2.14) obteve-se as dimensões dos magnetos e do anel de ferro que os confina. É agora possível calcular as respetivas massas através das equações (2.21) e (2.22), respetivamente,

$$m_{fe} = 2,5h_{mag}\rho_{fe}\left(r_5^2 - r_4^2\right)\pi g \quad (2.21)$$

$$m_{mag} = 2h_{mag}\rho_{mag}\left(r_4^2 - r_3^2\right)\pi g \quad (2.22)$$

onde:

ρ_{fe} - Densidade do ferro [kg/m³]

ρ_{mag} - Densidade dos magnetos [kg/m³]

h_{mag} - Altura do magneto [m].

Na tabela 2.03 são apresentados alguns dos resultados mais relevantes do dimensionamento do gerador proposto.

Tabela 2.03 - Tabela das Dimensões e principais características do gerador		
Símbolo	Descrição	Valor
r_1	Raio exterior do núcleo de ferro	0,6 m
r_2	Raio exterior dos enrolamentos	1 m
r_3	Raio interior dos magnetos	1,04 m
r_4	Raio exterior dos magnetos	1,3428 m
r_5	Raio exterior da máquina (anel de ferro)	1,4942 m
h_{mag}	Altura do magneto	0,2 m
N_e	Número de espiras de cada enrolamento	3500
l	Comprimento de condutor de cada enrolamento	17593 m
R_{bob}	Resistência de uma fase do gerador	17,8128 Ω
L	Indutância média de uma fase do gerador	71,67 H

2.4 Verificação do dimensionamento da máquina com elementos finitos

Uma vez dimensionada a parte elétrica do sistema e respetivo circuito magnético, torna-se importante efetuar uma simulação da máquina a fim de validar alguns resultados, a simulação foi efetuada com recurso ao um programa de análise por elementos finitos, o femm e ao MATLAB.

A verificação do circuito magnético foi efetuada com recurso a uma simulação com corrente nula nos enrolamentos do gerador. Com esta simulação pretendeu-se observar a densidade de fluxo ao longo da espessura axial e radial dos magnetos, a densidade de fluxo ao longo da espessura axial e radial do núcleo ferromagnético e as linhas de fluxo e respetiva densidade para toda a máquina. Na figura 2.16 é a apresentado um esquema

que exemplifica o sentido e as distancias adotadas para a extração das densidades de fluxo nos diversos constituintes do gerador.

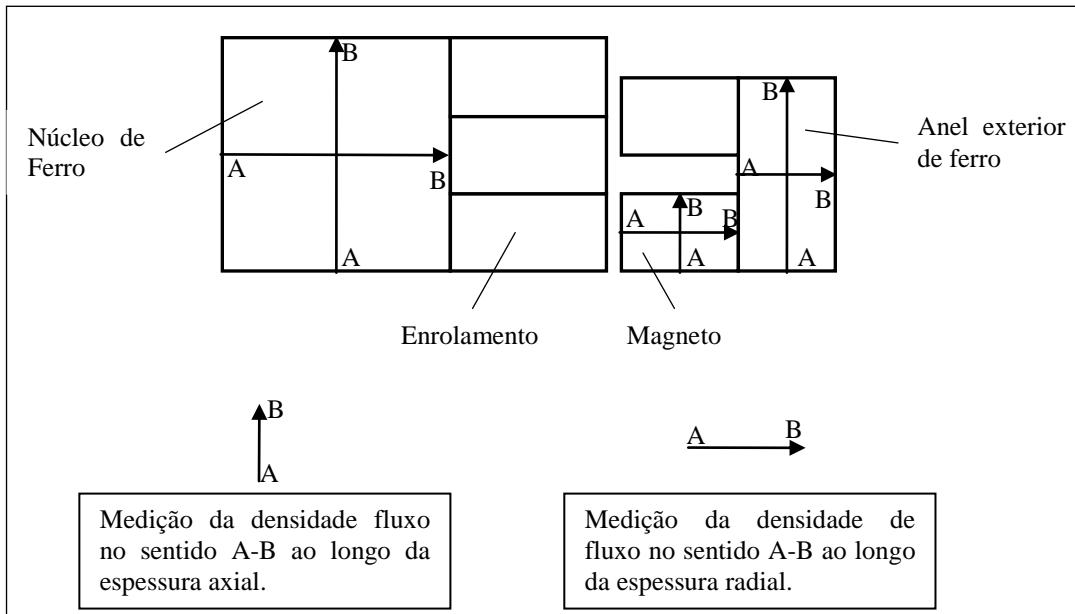


Figura 2.16 – Esquema exemplo do sentido e das distâncias adotadas para a extração das densidades de fluxo.

Na figura 2.17 pormenoriza-se a malha criada pelo femm na máquina elétrica. Verifica-se uma maior densidade da malha na zona do entreferro.

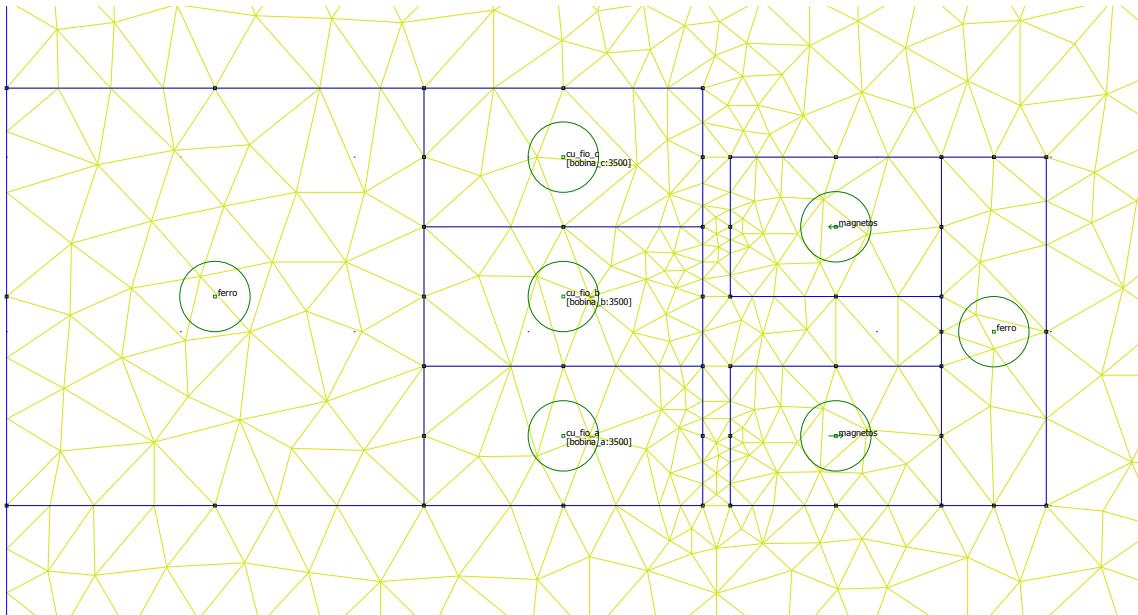


Figura 2.17 – Pormenor da malha criada pelo femm para efetuar a análise.

O gráfico da Figura 2.18 apresenta a densidade de fluxo no núcleo central de ferro ao longo da sua espessura radial. Verifica-se que quanto mais perto da zona exterior do cilindro central de ferro maior é a densidade de fluxo, tal como seria a expectável uma vez que essa mesma zona se encontra mais próxima dos magnetos permanentes.

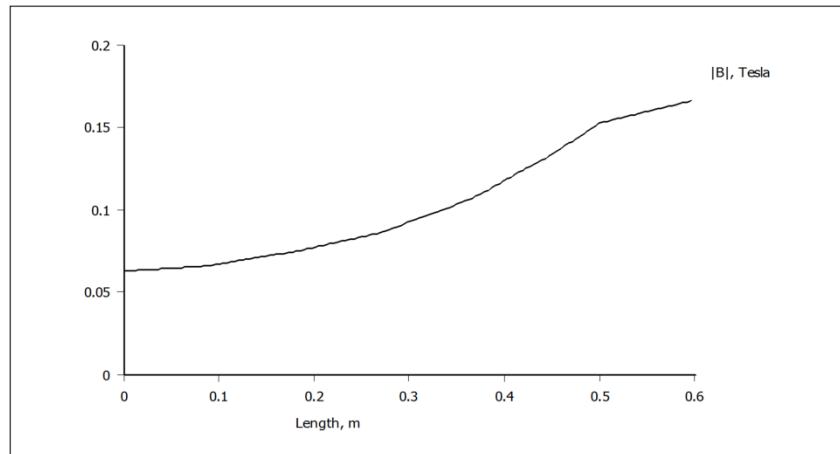


Figura 2.18 – Densidade de fluxo ao longo da espessura radial do núcleo central de ferro.

Na Figura 2.19 é apresentado o gráfico da densidade de fluxo no cilindro central de ferro ao longo da sua altura, é notória a presença de uma maior densidade de fluxo na zona central do núcleo relativamente ao posicionamento dos magnetos.

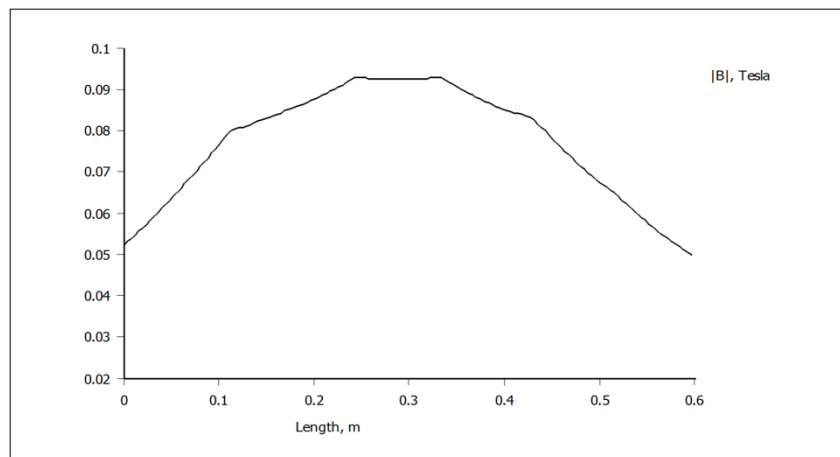


Figura 2.19 – Densidade de fluxo ao longo da espessura axial do núcleo central de ferro.

Na figura 2.20 apresentam-se os gráficos da densidade de fluxo magnético, no ponto central ao longo da altura dos magnetos M_1 e M_2 respetivamente. Da Figura 2.20 é notória uma maior densidade de fluxo na extremidade dos magnetos mais próxima do centro posicional da máquina.

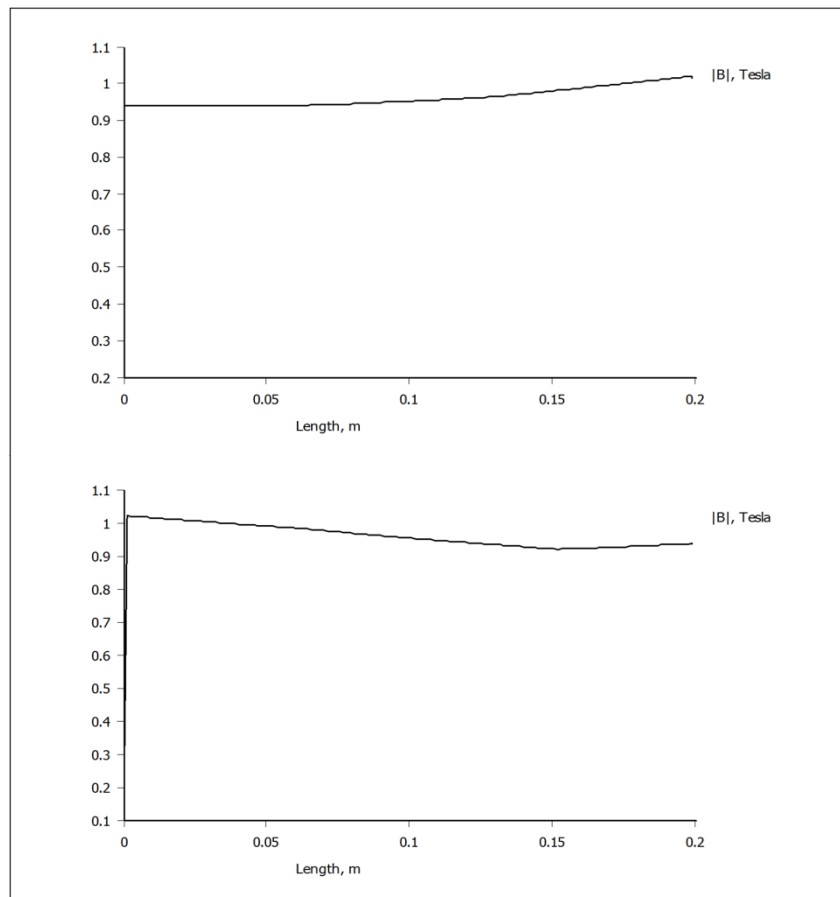


Figura 2.20 – Densidade de fluxo ao longo da espessura axial dos magnetos M_1 e M_2 , respetivamente.

Na figura 2.21 apresentam-se os gráficos da densidade de fluxo magnético ao longo da espessura radial dos magnetos M_1 e M_2 respetivamente. Como é visível a densidade de fluxo aumenta tanto mais quanto mais próxima do raio exterior dos magnetos.

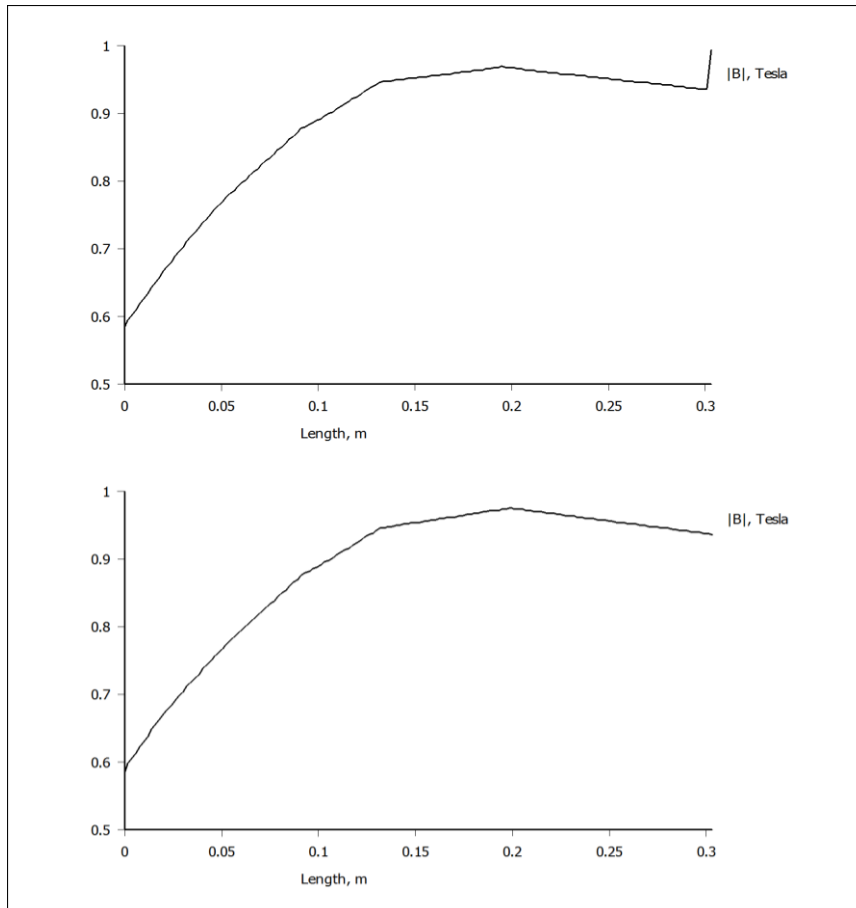


Figura 2.21 – Densidade de Fluxo ao longo da espessura radial dos magnetos M_1 e M_2 , respetivamente.

No que respeita à densidade de fluxo no anel de ferro exterior é notório pela figura 2.22 que a densidade é tanto maior quanto mais próximo do ponto médio (axialmente) do anel de ferro e quanto mais próximo da superfície lateral interior (radialmente) uma vez que é nesse ponto que o anel de exterior de ferro se encontra mais próximo dos magnetos.

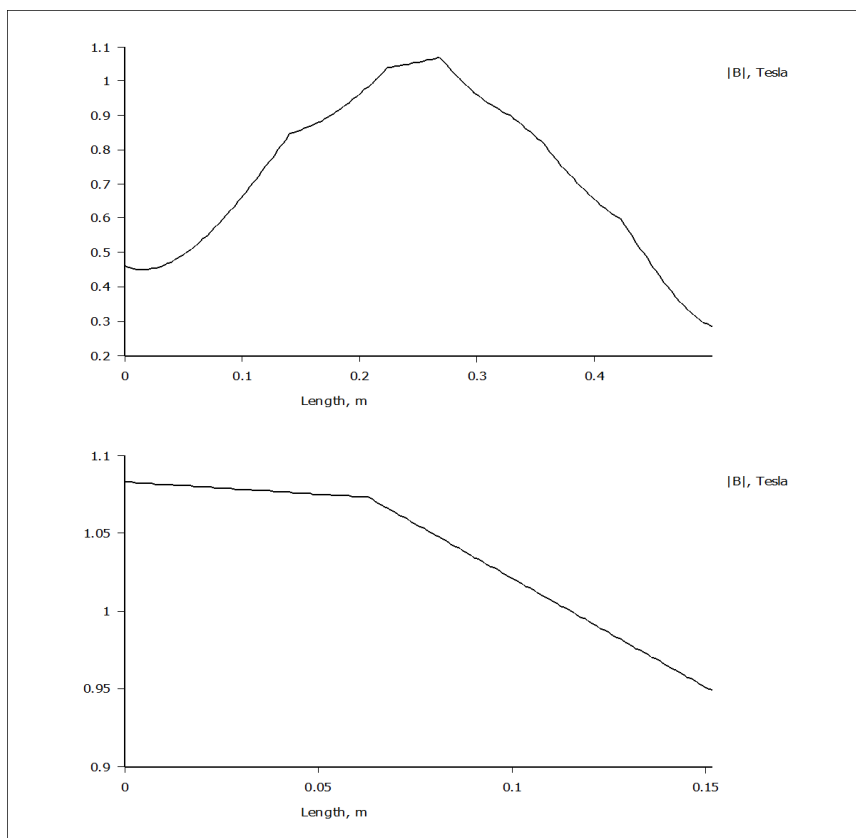


Figura 2.22 – Densidade de fluxo no anel exterior de ferro ao longo da sua espessura axial e radial, respetivamente.

Na Figura 2.23 é apresentado em pormenor a distribuição da densidade de fluxo magnético por toda a máquina, considerando apenas um conjunto trifásico de enrolamentos.

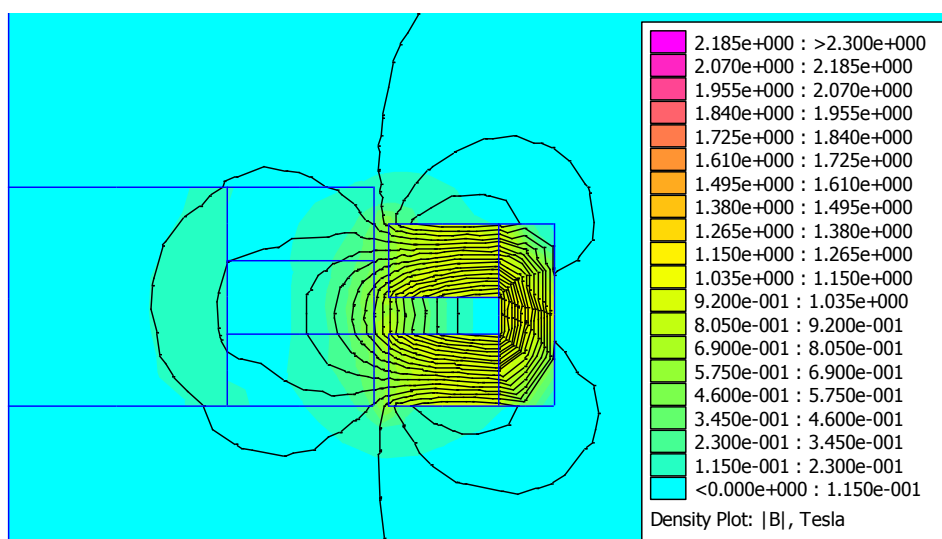


Figura 2.23 – Pormenor da distribuição de densidade de fluxo em toda a máquina.

Capitulo 3: Modelo dinâmico do sistema de aproveitamento das ondas

Neste capítulo são apresentados todos os passos dados para obter o modelo dinâmico do sistema, procede-se inicialmente à conversão do sistema no seu equivalente mecânico e posteriormente converte-se o gerador no seu equivalente de corrente contínua. Uma vez criado, o modelo é depois implementado em ambiente Simulink do MATLAB.

3.1 Modelo linear dinâmico do gerador

O modelo do Sistema em desenvolvimento é constituído, por um elemento fixo, que contem os enrolamentos do dispositivo, e um elemento móvel, o flutuador, que contem no seu interior um conjunto de magnetos permanentes e respetivas armaduras.

O flutuador colocado em torno do elemento fixo desliza verticalmente ao longo do mesmo, por ação da movimentação da superfície marítima, como é exemplificado na Figura 3.1.

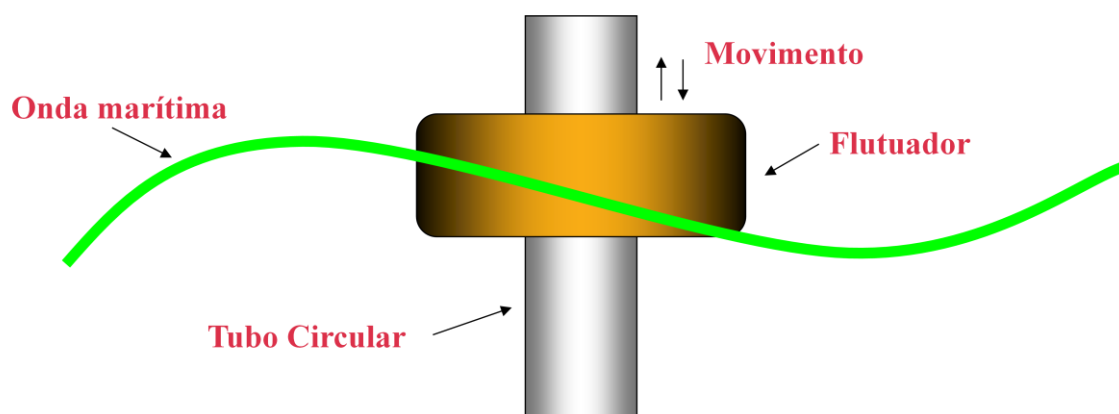


Figura 3.1 – Esquemática do sistema.

3.2 Equações de estado

Por forma a possibilitar a simulação do sistema proposto é necessário criar o seu modelo dinâmico. Para tal, procedeu-se à decomposição do gerador no seu sistema mecânico constituído por massas, amortecedores e molas, como é apresentado na Figura 3.2. No modelo proposto é tida em consideração a força de impulsão da água do mar F_I transmitida ao gerador representada por uma mola de coeficiente de rigidez k , a força

eletromagnética do gerador F_g e o coeficiente de amortecimento hidrodinâmico b , devido ao arrastamento da boia pelo movimento da água do mar.

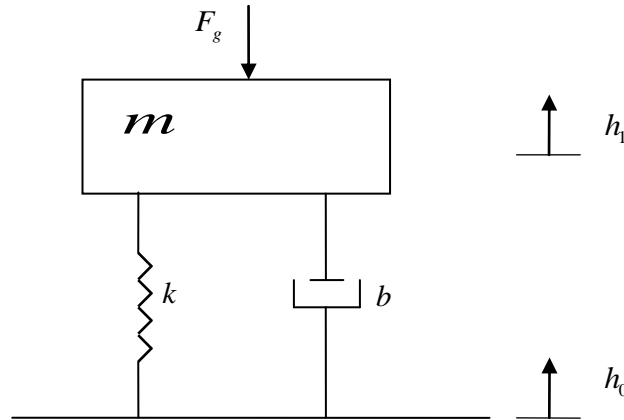


Figura 3.2 – Modelo mecânico do sistema.

Admitindo que o flutuador se encontra em estado de equilíbrio, a força de impulsão F_f é igual ao peso do flutuador P_m . Neste caso, pode considerar-se que $h_0 = h_1 = 0$.

Na ocorrência de um desequilíbrio Δh , devido a uma alteração do nível da água, $\Delta h = h_0 - h_1$. Corresponde a uma variação de volume da parte submersa, $\Delta V_{sub} = \Delta h S$.

Considerando apenas o movimento vertical da boia, e que a secção transversal da mesma é constante, a variação do volume submerso da boia cilíndrica pode ser dada pela expressão

$$\Delta V_{sub} = \Delta h \pi \frac{(D_{ext}^2 - D_{int}^2)}{4} \quad (3.1)$$

onde:

D_{ext} - Diâmetro externo da boia [m]

D_{int} - Diâmetro interno da boia [m]

Δh - Variação do nível da água [m].

A força de impulsão resultante da variação do volume submerso da boia pode ser traduzida pela expressão

$$F_I = \Delta V_{sub} \rho_{am} g = \rho_{am} g \pi \frac{(D_{ext}^2 - D_{int}^2)}{4} \Delta h \quad (3.2)$$

onde:

ΔV_{sub} - Volume de boia submerso [m³].

Sabendo-se que a força de uma qualquer mola é dada pela expressão

$$F_{mola} = k \Delta l \quad (3.3)$$

onde:

k - Coeficiente de rigidez da mola [N/m]

Δl - Variação na distensão de uma mola [m].

Pode, então, retirar-se a expressão do coeficiente de rigidez k , devido à força de impulsão da água do mar,

$$k = \rho_{am} \times g \times \pi \frac{(D_{ext}^2 - D_{int}^2)}{4} \quad (3.4).$$

Do modelo proposto, considerando também inexistência de forças e deslocamentos horizontais, retira-se a seguinte equação diferencial

$$m \ddot{h}_1 + k(h_1 - h_0) + b(\dot{h}_1 - \dot{h}_0) + F_g = 0 \quad (3.5)$$

onde:

m - Massa da boia e do equipamento nela contido [kg]

b - Coeficiente de amortecimento hidrodinâmico [Nm⁻¹s⁻¹]

\ddot{h}_1 - Aceleração da boia [m/s²].

Reescrevendo a equação em ordem a \ddot{h}_1 , obtém-se

$$\ddot{h}_1 = \frac{k}{m}(h_0 - h_1) + \frac{b}{m}(\dot{h}_0 - \dot{h}_1) - \frac{1}{m} F_g \quad (3.6).$$

Considerando como variáveis de estado:

$$x_1 = h_1 \quad (3.7)$$

$$x_2 = \dot{h}_1 - \frac{b}{m} h_0 \quad (3.8)$$

E admitindo como entradas do sistema o deslocamento vertical h_0 e a força do gerador F_g . O vetor de entradas do sistema virá:

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_0 \\ F_g \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

Podem então ser escritas as equações do sistema no espaço de estados

$$\dot{x}_1 = \dot{h}_1 = x_2 + \frac{b}{m} h_0 \quad (3.10)$$

$$\dot{x}_2 = -\frac{k}{m} x_1 - \frac{b}{m} x_2 + \left(\frac{k}{m} - \left(\frac{b}{m} \right)^2 \right) h_0 - \frac{1}{m} u_2 \quad (3.11).$$

As equações do sistema no espaço de estados podem ser escritas na forma matricial

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{k}{m} & -\frac{b}{m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{b}{m} & 0 \\ \left(\frac{k}{m} - \frac{b^2}{m^2} \right) & -\frac{1}{m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \quad (3.12).$$

Pretendendo-se conhecer a posição e a velocidade da boia escolheu-se, para o efeito, as seguintes variáveis de saída

$$y_1 = h_1 = x_1 \quad (3.13)$$

$$y_2 = \dot{h}_1 = x_2 + \frac{b}{m} u_1 \quad (3.14).$$

Rescrevendo as equações na forma matricial tem-se:

$$Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{b}{m} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

3.3 Dimensionamento da boia

Sabendo que a boia extrai a máxima energia das ondas quando a sua frequência natural é igual à frequência da onda de água, para o modelo dinâmico em causa essa frequência é dada pela expressão [3]

$$f_{natboia} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (3.16).$$

É necessário agora determinar a massa m da boia, que deve refletir toda a massa fixa relativamente à mesma. Todos os objetos colocados numa dada massa de água deslocam um volume de água igual ao volume submerso do objeto. No caso particular de um objeto flutuante, a massa de água será igual à massa do objeto, uma vez que o peso do objeto e a força de impulsão se irão anular. Sabendo que a massa de água deslocada movimenta-se com a boia. Assim é necessário contabilizá-la nas equações mecânicas do sistema. [3].

Considerando uma boia cilíndrica de acordo com Hooft [20] e [3] existe uma massa adicional de água excitada devido ao deslocamento vertical da boia cuja expressão é dada por

$$m_{add} = \rho_{am} \frac{D^3}{6} \quad (3.17).$$

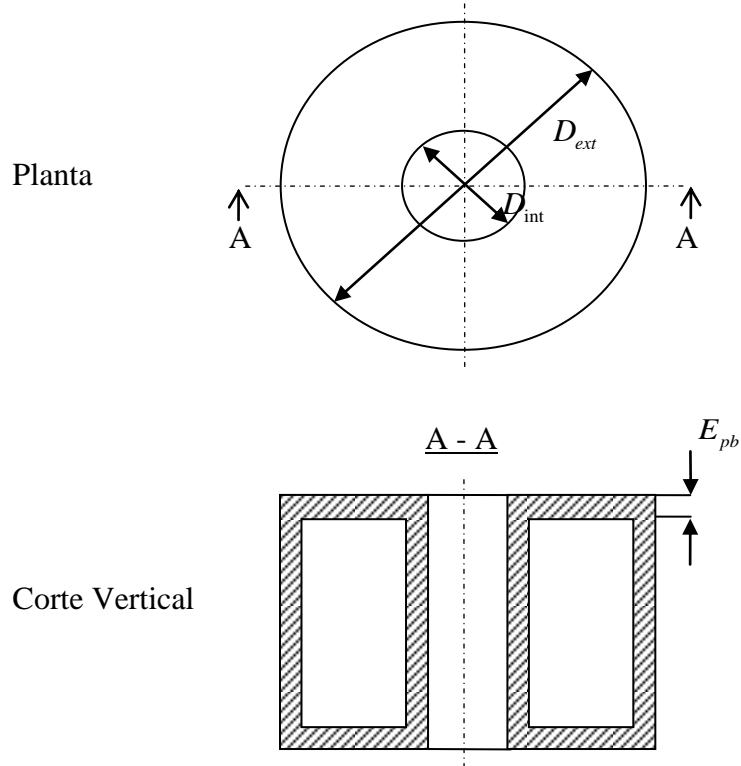


Figura 3.3 – Esquematização das zonas volumétricas da boia.

A massa da boia, m_{boia} consiste apenas na massa total do flutuador que com recurso à figura (3.3) pode ser obtida através da expressão

$$\begin{aligned}
 m_{boia} = & 2\pi\rho_{boia}E_{pb}\left(\frac{D_{ext}^2}{4} - \frac{D_{int}^2}{4}\right) + \\
 & +\pi\left(\frac{D_{ext}^2}{4} - \frac{(D_{ext}^2 - E_{pb}^2)}{4}\right)(h_{boia} - 2E_{pb})\rho_{boia} + \\
 & +\pi\left(\frac{(D_{int}^2 + E_{pb}^2)}{4} - \frac{D_{int}^2}{4}\right)(h_{boia} - 2E_{pb})\rho_{boia}
 \end{aligned} \tag{3.18}$$

onde:

ρ_{boia} - Densidade do material pelo qual é constituído a boia [kg/m³]

E_{pb} - Espessura da parede da boia [m].

Sabe-se que a expressão que nos dará o valor da massa total do sistema, m é [3]

$$m = m_{boia} + m_{gen} + m_{disp} + m_{add} + m_{cal} \tag{3.19}$$

onde:

m_{boia} - Massa de todo material que constitui o flutuador cilíndrico

m_{gen} - Massa fixa do gerador

m_{cal} - Massa de calibração

m_{disp} - Massa deslocada pela boia

m_{add} - Massa de água excitada pelo movimento vertical da boia.

A massa de água deslocada pela boia m_{disp} consiste na soma das massas que em repouso atuam sobre a água. Sendo a mesma expressa por [3]

$$m_{disp} = m_{boia} + m_{gen} + m_{cal} \quad (3.20).$$

O calculo da massa de calibração, m_{cal} , é feito em função da frequência natural da boia cujo valor deve ser igual ao da frequência natural da onda. Tendo-se a frequência natural da onda dada pela expressão (3.16) e a expressão de m dada pela expressão (3.19) pode-se rescrever (3.16) em (3.21).

$$m_{cal} = \frac{1}{2} \frac{k}{4\pi^2 f_{natonda}^2} - 2m_{boia} - 2m_{gen} - m_{add} \quad (3.21)$$

Tem-se, como condicionante para o dimensionamento da boia, a limitação do seu diâmetro máximo. Considerando uma boia de diâmetro D sob ação duma onda sinusoidal de comprimento de onda λ , tal como apresentado na Figura (3.4), verifica-se, idealmente, que não existe movimento vertical da boia, uma vez que as forças exercidas sobre a boia se anulam.

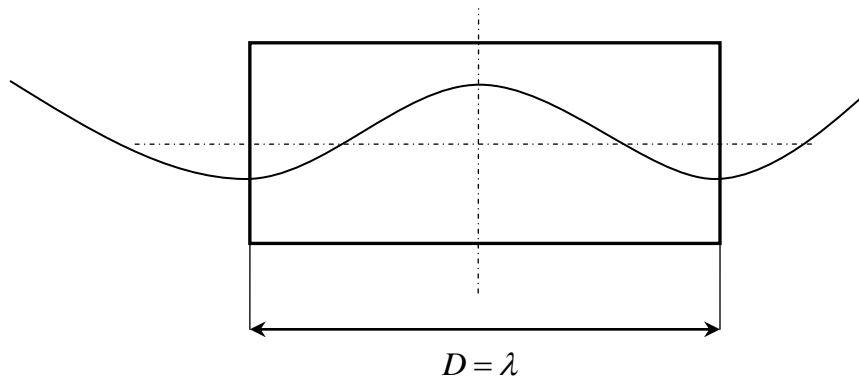


Figura 3.4 – Relação entre o diâmetro de uma boia e comprimento da onda oceânica.

Assim para que ocorra movimento vertical da boia, a relação entre o seu diâmetro e o comprimento da onda do mar deve respeitar a equação [3]

$$D = \frac{N_{onda} \lambda}{2}, N = 1, 3, 5 \dots \quad (3.22)$$

onde:

N_{onda} - Número de Ondas totais em contacto com a boia

λ - Comprimento de onda oceânica.

Segundo dados do Instituto hidrográfico da Marinha Portuguesa o período médio mínimo das ondas para a costa de faro é de cerca de **3 s**. O comprimento de onda mínimo pode ser calculado pela expressão (1.6)

$$\lambda = \frac{gT^2}{2\pi} = \frac{9,8 \times 3^2}{2\pi} = 14,037 \cong \mathbf{14 \text{ m}}$$

Sendo o comprimento de onda mínimo é de aproximadamente **14 m** é necessário que a boia não exceda os **7 m** de diâmetro por forma a garantir que existe uma boa deslocação da mesma assim, arbitrou-se para o diâmetro da boia o valor de 6 m.

Na definição do formato de boia não foi considerado uma otimização do seu coeficiente hidrodinâmico b . No entanto o, saber o seu valor é essencial para uma correta simulação do sistema. De acordo com Rhinefrank *et al.* [21] para uma boia cilíndrica o coeficiente hidrodinâmico é dado pela expressão

$$b = \frac{\pi^2 \times \rho_{am} \times g^2}{8 \times (2\pi f_{natboia})^3} \bar{A}^2 D \quad (3.23)$$

em que

$$\bar{A} = \frac{\Delta z_{onda}}{\Delta z_{boia}}$$

\bar{A} - Razão entre deslocamento da onda e deslocamento da boia

D - Diâmetro da boia [m].

Considerando que todas as forças que atuam sobre a boia constituem um sistema em equilíbrio a força de impulsão é igual ao somatório do peso da boia P_{boia} , peso dos magnetos $P_{magnetos}$, peso do anel exterior de ferro P_{ferro} e peso da massa de calibração P_{mcal}

$$F_i = P_{boia} + P_{magnetos} + P_{ferro} + P_{mcal} \quad (3.24).$$

O Peso P_{cal} é devido à massa de calibração que é introduzida na boia para submergir a boia num valor pretendido.

Sabendo que a Força de impulsão exercida na boia é dada pela expressão

$$F_i = \pi(r_{ext}^2 - r_{int}^2)h_{subboia}\rho_{am}g \quad (3.25)$$

onde:

$h_{subboia}$ - Altura submersa da boia

e que as forças devidas às massas da boia, do gerador e de calibração são dadas pelas expressões (3.26) a (3.28), respetivamente.

$$P_{boia} = m_{boia} g \quad (3.26)$$

$$P_{gen} = P_{fe} + P_{mag} = \rho_{fe} 2,5 h_{mag} (r_5^2 - r_4^2) g \pi + \rho_{mag} 2 h_{mag} (r_4^2 - r_3^2) g \pi \quad (3.27)$$

$$P_{mcal} = m_{cal} g \quad (3.28)$$

Substituindo-se (3.26) a (3.28) em (3.25) e pondo em evidência a altura do magneto, h_{mag} vem

$$h_{mag} = \frac{\pi (r_{ext}^2 - r_{int}^2) h_{sub} \rho_{am} - m_{cal} - m_{boia}}{2\pi \rho_{mag} (r_4^2 - r_3^2) + 2,5\pi \rho_{fe} (r_5^2 - r_4^2) \pi} \quad (3.29).$$

Admitindo que se pretende que a altura submersa da boia nunca ultrapasse 80% da altura total da boia, $h_{sub} = 0,8 h_{boia}$ tem-se a altura máxima admitida para o magneto da pela expressão

$$h_{mag \max} = \frac{\pi (r_{ext}^2 - r_{int}^2) 0,8 h_{boia} \rho_{am} - m_{cal} - m_{boia}}{2\pi \rho_{mag} (r_4^2 - r_3^2) + 2,5\pi \rho_{fe} (r_5^2 - r_4^2) \pi} \quad (3.30).$$

Tendo em consideração que a altura significativa das ondas mais predominantes na costa de Faro é de **0,6 m** a altura máxima dos magnetos e dos enrolamentos terá um valor de **0,2 m**.

Numa primeira aproximação considerou-se uma boia com menor diâmetro possível traduzido pela expressão (3.31) e a altura estritamente necessária para comportar um conjunto de magnetos e a sua fixação arbitrou-se para altura da boia **1 m**.

$$D = 2 \times (r_5 + E_{pb}) \quad (3.31)$$

De (3.31) obteve-se como diâmetro da boia **3,048 m**. Verificou-se, então, a condição imposta pela equação (3.27), e tendo-se verificado que a altura máxima do magneto para as dimensões mínimas da boia era bastante inferior aos **0,2 m** pretendidos. Assim foi necessário executar um redimensionamento da boia para que a mesma pudesse comportar o conjunto de magnetos que gera a maior energia possível. Sabendo que, para garantir o bom funcionamento do gerador é necessário que o mesmo funcione à frequência natural da onda foi efetuado um estudo com três tipos de ondas mais predominantes existentes na costa algarvia, cujos parâmetros característicos são mostrados na tabela 3.01.

Tabela 3.01 – Parâmetros característicos das ondas consideradas na costa de Faro			
	Onda 1	Onda 2	Onda 3
Altura de onda (m)	0,6	2	10
Período (s)	5	7	9
Velocidade horizontal média (m/s)	0,24	0,57	2,22
Frequência (Hz)	0,2	0,1428	0,111
Predominância	Comum	Relativamente comum	Rara

Aplicando os dados calculados para a boia às três ondas descritas anteriormente verificou-se que para nenhuma delas seria possível garantir o correto funcionamento do gerador uma vez que não seria possível obter as frequências de ressonância necessárias. Assim torna-se necessário redimensionar a boia para um tamanho superior cuja sua capacidade de flutuabilidade garanta também a inserção de uma massa de calibração para que a boia funcione no caso da onda 3.

Sabendo-se que o diâmetro máximo da boia não deve exceder os **7 m**, sob risco de não existir movimento vertical dado o curto comprimento de onda disponível, foi imposto

um diâmetro exterior da boia de **6 m**. Com estes dados, foi efetuado um estudo, apresentado na tabela 3.02, contendo as massas de calibração, altura da boia e percentagem de boia submersa, para as três ondas referidas anteriormente.

Tabela 3.02 – Resumo das dimensões da boia, massa da boia e massa de calibração					
	Diâmetro exterior [m]	Altura [m]	Massa boia [kg]	Massa de calibração [kg]	Percentagem de boia submersa
Onda 1	6	3	$3,6048 \times 10^3$	$4,5840 \times 10^4$	79,56%
Onda 2	6	7	$5,6780 \times 10^3$	$1,12063 \times 10^5$	76,72%
Onda 3	6	12	$8,2695 \times 10^3$	$2,2024 \times 10^5$	77,81%

3.4 Modelo dinâmico do sistema

A de simulação e cálculo torna-se mais fácil com a conversão da máquina síncrona trifásica no seu equivalente de máquina de corrente contínua com magnetos permanentes.

Um gerador de corrente contínua de magnetos permanentes pode ser descrito pelo circuito elétrico equivalente apresentado na Figura 3.5, onde e_a representa a força eletromotriz da máquina, L_a a indutância própria dos enrolamentos da máquina e r_a a resistência dos enrolamentos.

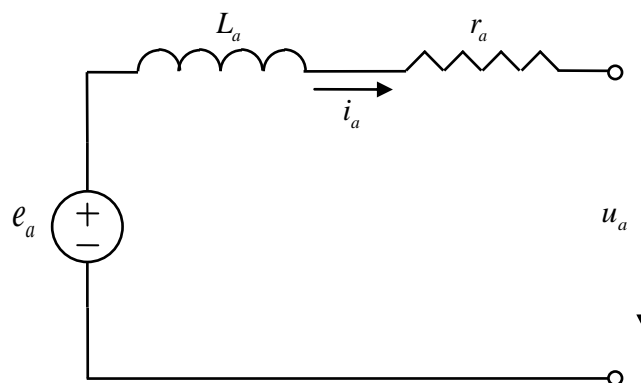


Figura 3.5-circuito elétrico equivalente.

A força eletromotriz do gerador, é proporcional à constante $K\Phi$ e à velocidade linear do gerador

$$e_a = K\Phi \times v_{gen} \quad (3.32)$$

onde:

K - Constante devida aos elementos construtivos do gerador

Φ - Fluxo magnético [T]

v_{gen} - Velocidade vertical do gerador [m/s].

Escrevendo o circuito da Figura (3.32) na forma de equação diferencial tem-se

$$e_a(t) = \frac{di_a(t)}{dt} L_a + r_a i_a(t) + u_a(t) \quad (3.33)$$

onde:

e_a - Força eletromotriz da máquina [V]

L_a - Indutância própria dos enrolamentos da máquina [H]

i_a - Corrente nos enrolamentos da máquina [A]

r_a - Resistência dos enrolamentos da máquina [Ω]

u_a - Queda de tensão aos terminais da máquina [V].

A força eletromagnética produzida pelo gerador, F_e obtém-se da expressão

$$F_e = K\Phi \times i_a \quad (3.34).$$

Aplicando ao gerador projetado uma ponte retificadora trifásica tal como a apresentada na figura 3.6, o sistema passará a comportar-se como um gerador de corrente contínua. A ponte de retificação trifásica atua como um coletor eletrónico. Este sistema é também designado por geratriz de retificação.

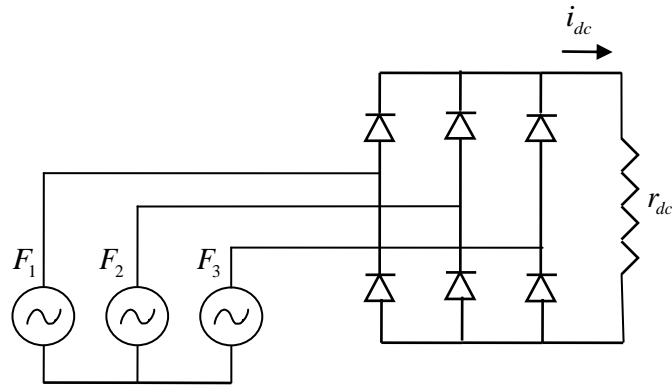


Figura 3.6 – Ponte de retificação trifásica.

Os parâmetros do circuito equivalente do sistema referidos à saída da ponte retificadora, são mostrados no esquema equivalente da Figura 3.7.

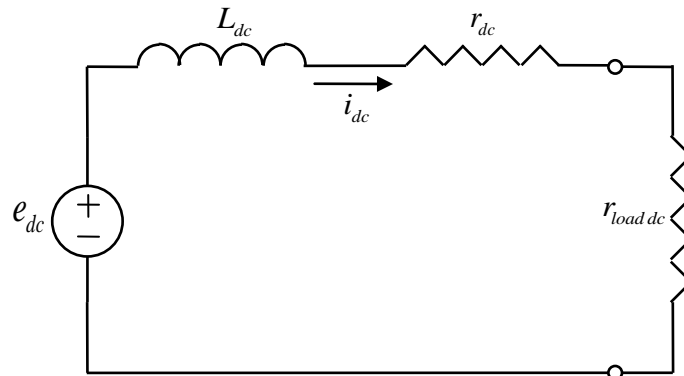


Figura 3.7 - circuito equivalente do gerador de corrente contínua com carga resistiva.

Considerando a carga aplicada ao gerador puramente resistiva, sabe-se que a queda de tensão aos terminais da carga é dada pela expressão

$$u_r = r_{loadDC} \cdot i_{dc} \quad (3.35)$$

onde:

r_{loadDC} - Resistência de carga [Ω]

i_{dc} - Corrente do circuito equivalente do gerador em corrente contínua [A].

Rescrevendo as equações (3.33) e (3.34) em função dos parâmetros do gerador à saída da ponte retificadora e respectiva carga aplicada tem-se

$$e_{dc} = \frac{di_{dc}}{dt} L_{dc} + r_{dc} i_{dc} + r_{loadDC} i_{dc} \quad (3.36)$$

$$F_{edc} = K\Phi_{dc} \cdot i_{dc} \quad (3.37)$$

onde:

e_{dc} - Força eletromotriz da máquina de corrente contínua [V]

L_{dc} - Indutância própria dos enrolamentos da máquina de corrente contínua [H]

i_{dc} - Corrente instantânea nos enrolamentos da máquina de corrente contínua [A]

r_{dc} - Resistência dos enrolamentos da máquina de corrente contínua [Ω].

Aplicando-se a transformada de Laplace à equação (3.36), obtém-se a mesma equação no domínio da frequência

$$e_{dc} = L_{dc} i_{dc} s + r_{dc} i_{dc} + r_{loadDC} i_{dc} \quad (3.38).$$

Fazendo $R = r_{dc} + r_{loadDC}$ e sabendo que $\tau = L/R$ e que $e_{dc} = K\Phi_{dc} \cdot v_{gen}$ pode rescrever-se a equação (3.38) em (3.39)

$$i_{dc} = K\Phi_{dc} \frac{1/R}{\tau s + 1} v_{gen} \quad (3.39).$$

Utilizando as expressões (3.37) e (3.39) obtém-se o diagrama de blocos do modelo dinâmico do gerador, tal como apresentado na Figura 3.8.

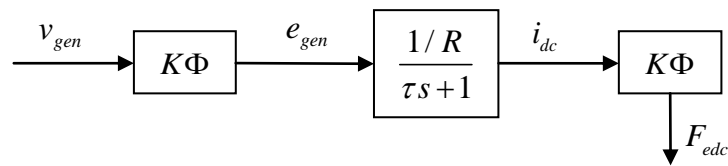


Figura 3.8 – Diagrama de blocos do modelo elétrico dinâmico do gerador de corrente contínua.

No sistema apresentado na Figura 3.8 tem-se como saída a força eletromagnética do gerador, F_{edc} que entrará no modelo dinâmico da boia.

A entrada é a velocidade de deslocação da boia, que depende da onda que faz movimentar o conjunto.

Com o objetivo de implementar o modelo dinâmico do gerador em ambiente Simulink do MATLAB foi necessário calcular os parâmetros da máquina à saída da ponte retificadora, nomeadamente a indutância e a resistência equivalentes. Ainda que o dispositivo de eletrónica de potência possa na realidade não vir a retificar a corrente e a tensão de modo perfeito, dada a complexidade do sistema considerou-se para efeitos de dimensionamento do modelo dinâmico que a retificação seria perfeita.

Os circuitos a) e b) da Figura 3.9 apresentam os esquemas de uma carga trifásica equilibrada alimentada por fonte trifásica e uma carga resistiva alimentada por uma fonte trifásica retificada, respetivamente.

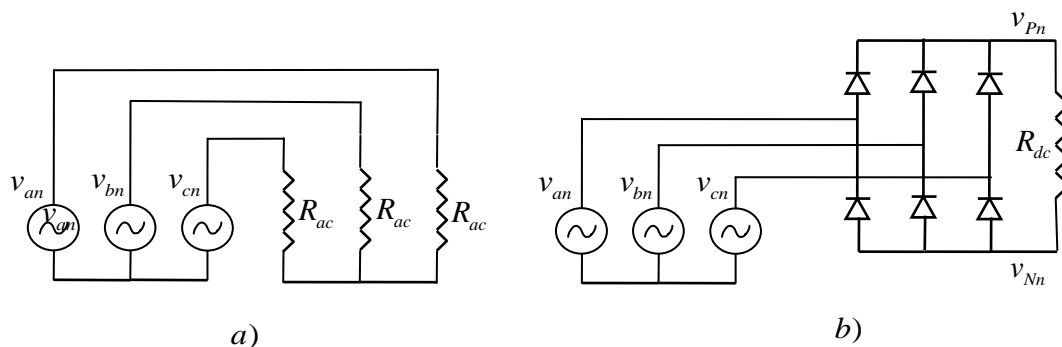


Figura 3.9 – Esquematização da equivalência entre uma carga resistiva trifásica e uma carga resistiva alimentada por ponte retificadora trifásica.

A figura (3.10) esquematiza as formas de onda das tensões de alimentação v_{an} , v_{bn} e v_{cn}

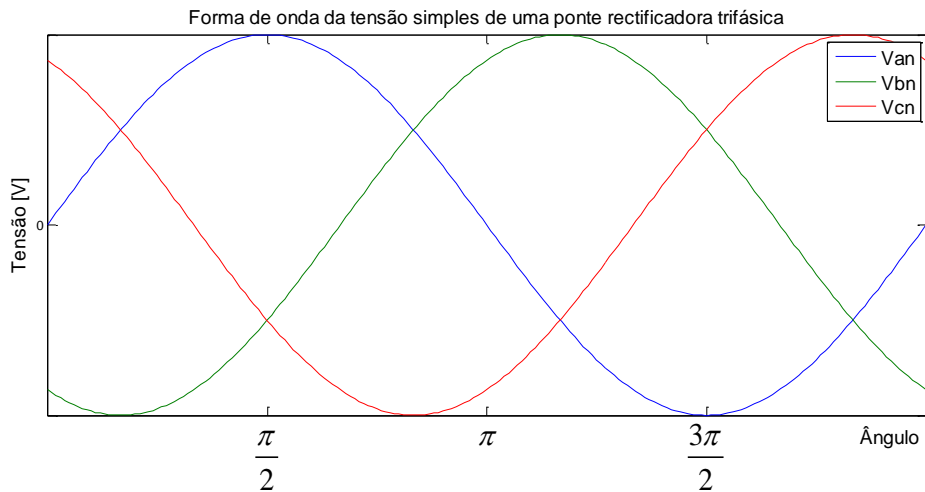


Figura 3.10 – Formas de onda das tensões simples de uma ponte retificadora trifásica.

A forma de onda da tensão retificada é dada pela expressão (3.40), e apresentada na figura 3.11.

$$v_d = v_{Pn} - v_{Nn} \quad (3.40)$$

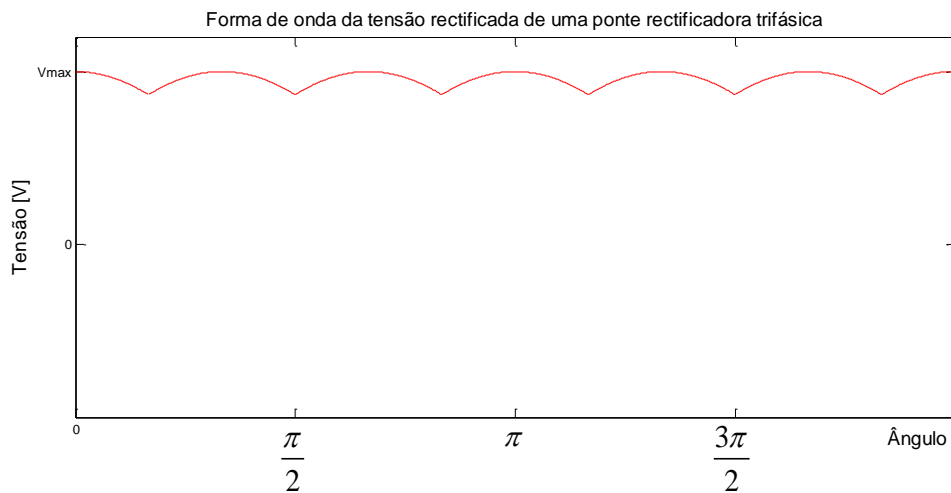


Figura 3.11 – Forma de onda da tensão retificada.

Sabendo que a energia consumida pela carga trifásica será igual à energia consumida pela carga à saída da ponte retificadora num mesmo período elétrico, a potência instantânea dissipada pelas resistências das três fases pode ser dada pela expressão

$$P_{ac}(t) = \frac{v_{an}^2(t)}{R_{ac}} + \frac{v_{bn}^2(t)}{R_{ac}} + \frac{v_{cn}^2(t)}{R_{ac}} \quad (3.41).$$

Rescrevendo a equação (3.41) e substituindo as expressões das tensões simples de alimentação obtém-se a equação (3.42), onde V_p representa a tensão de pico

$$P_{ac}(t) = \frac{1}{R_{ac}} \left[\left(V_p \sin(\omega t) \right)^2 + \left(V_p \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \right)^2 + \left(V_p \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \right)^2 \right] \quad (3.42).$$

A energia das três resistências durante um período elétrico é calculada pela expressão

$$E_{ac} = \int_0^{2\pi} P_{ac}(t) d(\omega t) = \frac{3\pi V_p^2}{R_{ac}} \quad (3.43).$$

Tal como no caso da resistência trifásica a potência instantânea dissipada na resistência da ponte trifásica é dada por

$$P_{dc}(t) = \frac{v_d^2(t)}{R_{dc}} \quad (3.44).$$

Da inspeção da Figura 3.10 verifica-se que a tensão retificada v_d pode ser descrita por uma função do tipo $\cos(\theta)$ para $\theta \in \left[-\frac{\pi}{6}, \frac{\pi}{6} \right]$, e que um período da tensão simples de alimentação corresponde a 6 pulsos de tensão retificada. Logo a energia consumida pela resistência R_{dc} , durante um período elétrico, é dada pela expressão

$$E_{dc} = \int P_{dc}(t) d(\omega t) = \frac{6}{R_{dc}} \int \left(\sqrt{3} V_p \cos(\omega t) \right)^2 d(\omega t) = \frac{3(3\sqrt{3} + 2\pi) V_p^2}{2R_{dc}} \quad (3.45).$$

Sabendo que a equivalência entre a carga trifásica e a carga à saída da ponte retificadora ocorre quando as duas cargas consomem a mesma energia para o mesmo período

elétrico. Iguala-se as expressões (3.43) e (3.45) passando então a ser possível determinar a relação entre R_{dc} e R_{ac} , expressa por

$$R_{dc} = \frac{(3\sqrt{3} + 2\pi)}{2\pi} R_{ac} \quad (3.46).$$

Tal como para as resistências também para as reactâncias indutivas pode ser usado o mesmo método, considerando o esquema da figura 3.9 e sabendo-se que o consumo energético para um mesmo período elétrico deve ser igual, tanto para a indutância trifásica como para a indutância à saída do retificador, a equação (3.46) pode ser rescrita na forma de (3.47).

$$X_{dc} = \frac{(3\sqrt{3} + 2\pi)}{2\pi} X_{ac} \quad (3.47)$$

Uma vez que a frequência do 1º harmónico da queda de tensão retificada v_d é seis vezes superior à frequência da tensão simples (v_{an} , v_{bn} e v_{cn}), pode-se desenvolver a equação (3.47) obtendo-se assim a relação entre L_{dc} e L_{ac} dada pela expressão [3]

$$L_{dc} = \frac{(3\sqrt{3} + 2\pi)}{12\pi} L_{ac} \quad (3.48).$$

Com as equações (3.46) e (3.48) é agora possível determinar a resistência e a indutância equivalente do gerador à saída da ponte retificadora, podendo então determinar-se o valor da constante $K\Phi_{dc}$ de modo a finalizar a determinação dos parâmetros para implementação do modelo. Para tal, é necessário recorrer ao MATLAB conjuntamente com o femm de modo determinar o $K\Phi_{dc}$ do gerador. Para tal, foram realizadas simulações nas posições mais relevantes da boia (topo, base e ponto medio) para uma qualquer corrente i_{dc} , e obtém-se a força eletromagnética desenvolvida pela máquina para cada um desses mesmos pontos. Com a expressão (3.37) determina-se, então, o valor médio de $K\Phi_{dc}$.

Apos se ter determinado todos os parâmetros necessários à modelação e simulação da máquina, pode agora determinar-se o rendimento do gerador assim como de todo o sistema.

Sabe-se que o rendimento do gerador é dado pela expressão

$$\eta_{\text{gerador}} = \frac{P_{emf} - P_j}{P_{emf}} \quad (3.49)$$

onde

P_{emf} - Potencia devida à força eletromotriz da máquina [W]

P_j - Perdas por efeito de joule [W].

Sabe-se, também, que a potência devido a força eletromotriz, assim como as perdas por efeito de joule, são dadas pelas expressões 3.50 e 3.51, respetivamente,

$$P_{emf} = e_{dc} i_{dc} \quad (3.50)$$

$$P_j = r_{dc} i_{dc}^2 \quad (3.51).$$

Considerando o rendimento do sistema, relativamente à potencia transmitida pela boia tem-se

$$\eta_{\text{sistema}} = \frac{P_{emf} - P_j}{P_{boia}} \quad (3.52)$$

Onde

P_{boia} - Potencia mecânica da boia [W].

A potencia transmitida pela boia pode ser obtido com a expressão

$$P_{boia} = F_{boia} v_{boia} = (F_I + F_b) v_{boia} \quad (3.53)$$

onde

F_{boia} - Força da boia [N]

F_I - Força de impulsão [N]

F_b - Força Hidrodinâmica [N]

v_{boia} - Velocidade da boia [m/s].

As forças de impulsão e hidrodinâmica são obtidas das expressões (3.54) e (3.55), respectivamente,

$$F_I = k\Delta h_{sub} \quad (3.54)$$

$$F_b = b(v_{boia} - v_{onda}) \quad (3.55).$$

3.5 Implementação do modelo dinâmico do sistema

O modelo dinâmico do gerador desenvolvido, foi implementado em ambiente Simulink do MATLAB.

Os dados utilizados no modelo implementado foram obtidos com recurso ao programa MATLAB conjuntamente com o femm, de acordo com o fluxograma da Figura 3.11.

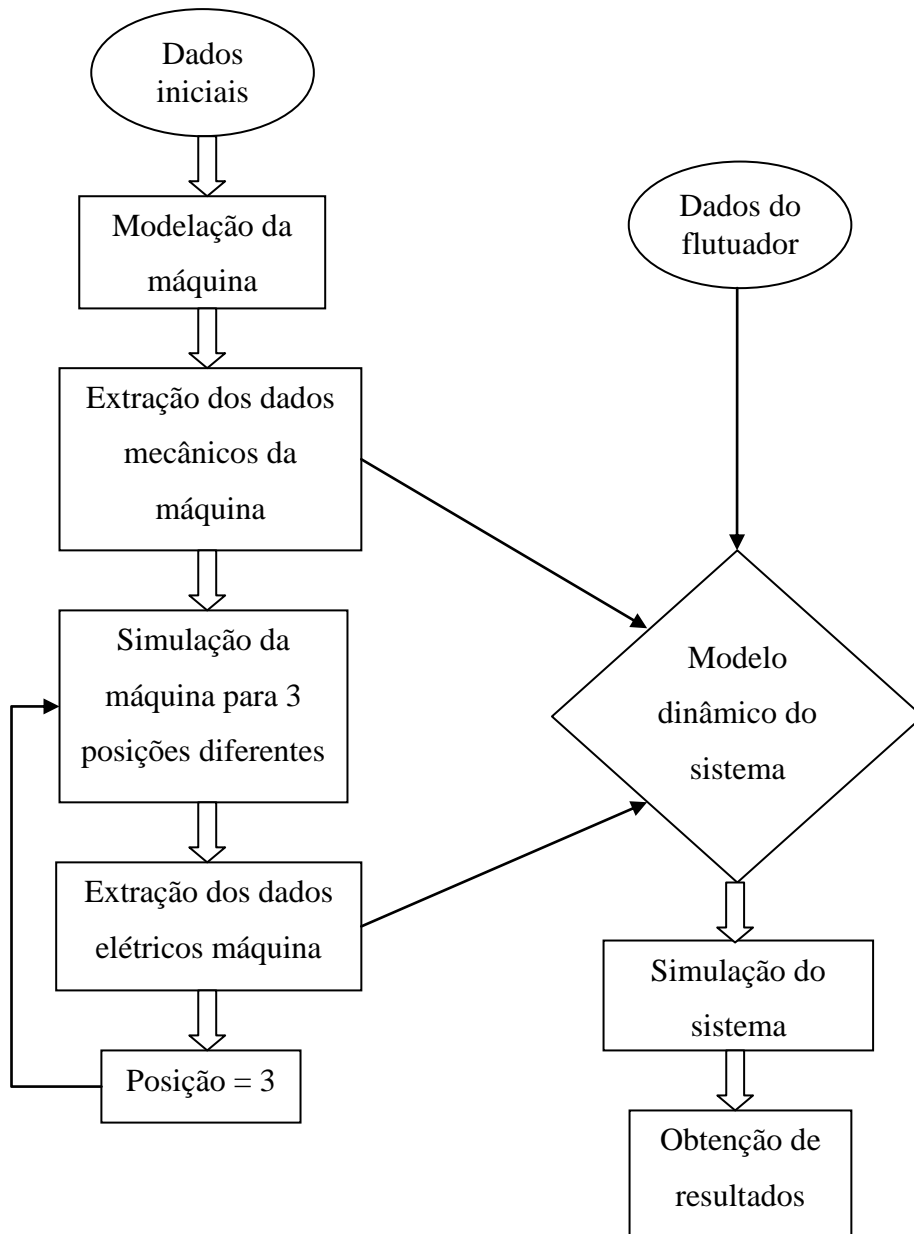


Figura 3.11 – Algoritmo representativo do processo de obtenção de dados e simulação do sistema.

O modelo simplificado em ambiente Simulink no qual serão inseridos todos os elementos dimensionados anteriormente é apresentado na Figura 3.12.

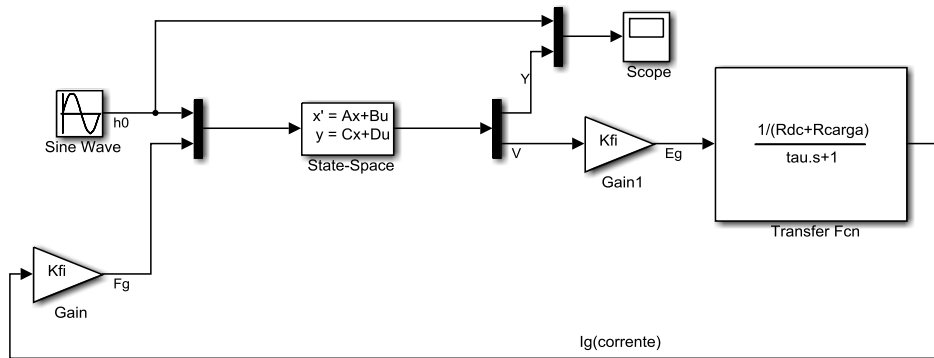


Figura 3.12 – Modelo dinâmico do sistema em ambiente Simulink.

O modelo da Figura 3.12 não apresenta a totalidade dos blocos necessários para efetuar o cálculo de todos os resultados pretendidos, representando o núcleo base para a simulação. O modelo completo é apresentado nas figuras do anexo A1 do presente projeto.

Capítulo 4: Simulação do Sistema de aproveitamento da energia das ondas oceânicas

No presente capítulo são efetuadas simulações do sistema quando o mesmo é submetido a uma onda sinusoidal.

Sabendo-se que a boia reagirá a uma qualquer onda do mar, para as simulações em causa foi considerada a onda 2 mostrada no capítulo 3, dado que é uma onda relativamente comum e com um bom potencial energético. A onda 1, apesar de ser mais comum, tem um potencial energético inferior. A onda 3 é extremamente rara e implica dimensões demasiado grandes para a boia que se prevê que funcionará a maior parte do tempo com ondas de menores dimensões.

A simulação inicial foi feita considerando apenas a dinâmica da boia, sem gerador e com $\bar{A} = 1$, onde \bar{A} é a razão entre o deslocamento vertical da onda versus o deslocamento vertical da boia. \bar{A} foi definida na equação (3.24) na pagina 60 do Capítulo 3. O resultado desta simulação é apresentado na figura 4.1.

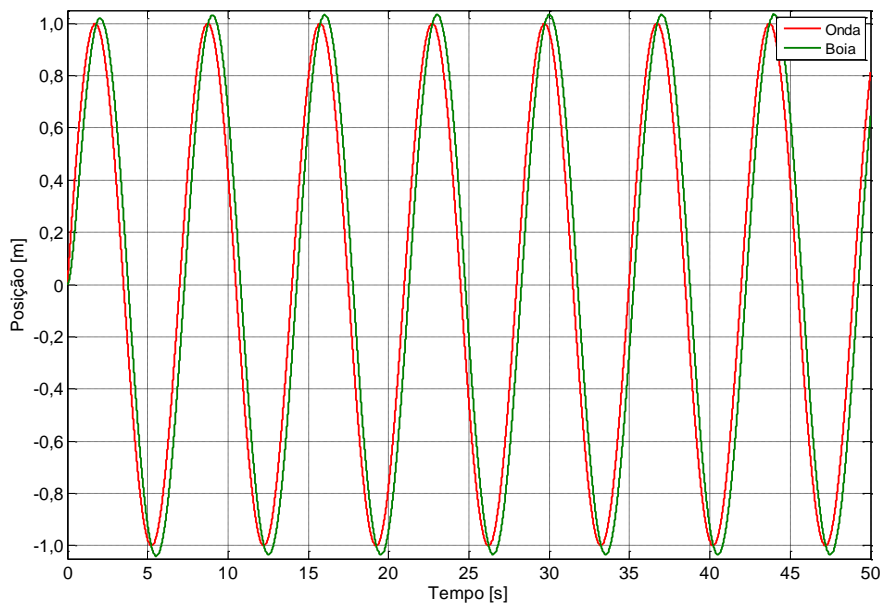


Figura 4.1 – Posição da boia e da onda em função do tempo, quando o sistema se encontra ausente de gerador.

No gráfico da Figura 4.1 verifica-se que existe desfasamento entre o deslocamento da onda e da boia, como seria de esperar, uma vez que a boia reage à onda com atraso. Verifica-se, também, que os valores de pico de ambos os deslocamentos assumem valores muito próximos algo, expectável, dado que se considerou $\bar{A} = 1$.

4.1 Simulação com resistência de carga igual à resistência interna equivalente do gerador.

Após obtidos os dados da simulação apenas da boia, foi simulado todo o conjunto considerando que a resistência de carga será igual à resistência equivalente do gerador de corrente contínua, $R_{carga} = R_{dc}$ e tendo sido obtido o valor da razão entre o deslocamento vertical da onda e o deslocamento vertical da boia de $\bar{A} = 1,4$ através de um processo iterativo manual. Na figura 4.2 observa-se o novo gráfico dos deslocamentos da onda e boia, com a introdução do gerador no sistema verifica-se que o deslocamento da boia decresce bastante em relação ao deslocamento verificado sem gerador, isto deve-se ao facto da força do gerador se encontrar em oposição à força que faz deslocar a boia.

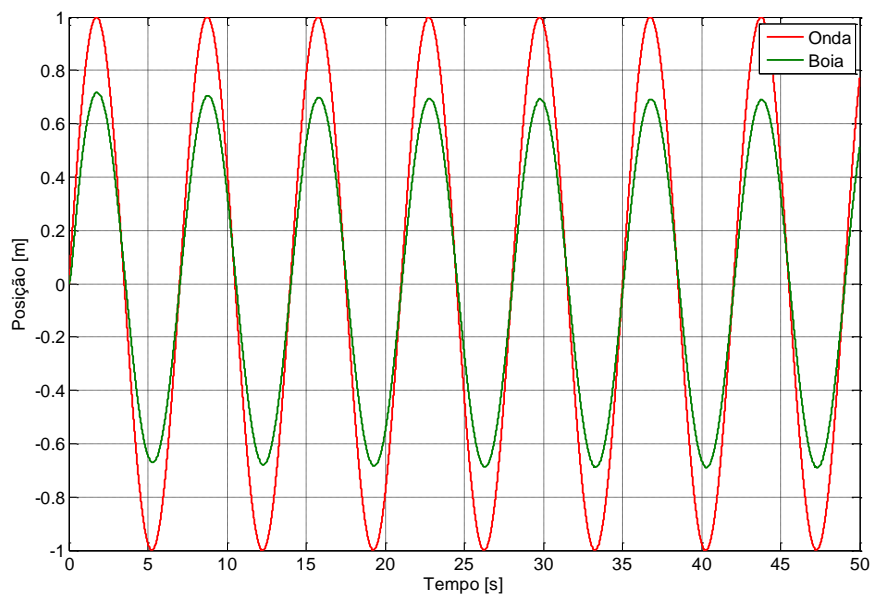


Figura 4.2 – Posição da boia e da onda em função do tempo.

A simulação permite obter, também, o gráfico da velocidade da boia, apresentado na Figura 4.3.

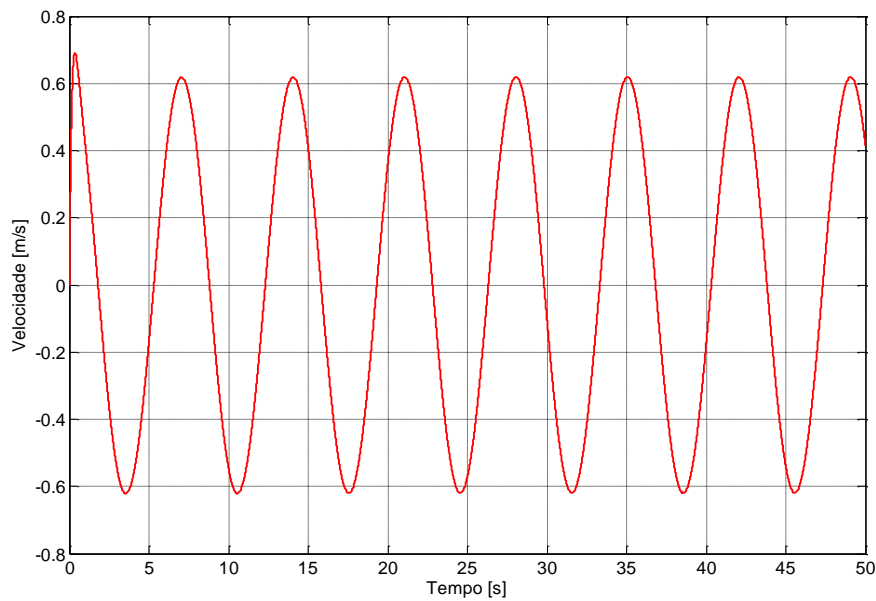


Figura 4.3 – Velocidade da boia em função do tempo.

Na Figura 4.4 é apresentado o gráfico da força eletromotriz do gerador. É notório um regime transitório no início da simulação que faz com que haja um valor de pico inicialmente, mais elevado que em regime permanente, estabilizando depois aproximadamente nos **5000 V** de valor de pico.

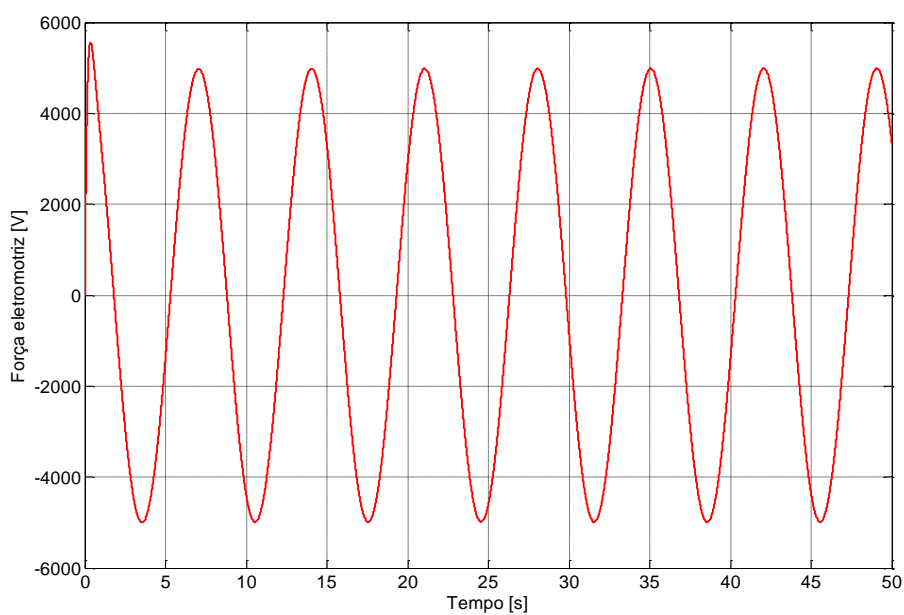


Figura 4.4 – Força eletromotriz do gerador em função do tempo.

No que se refere à corrente do gerador a mesma é mostrada no gráfico da Figura 4.5, sendo o seu valor de pico aproximadamente **70 A**.

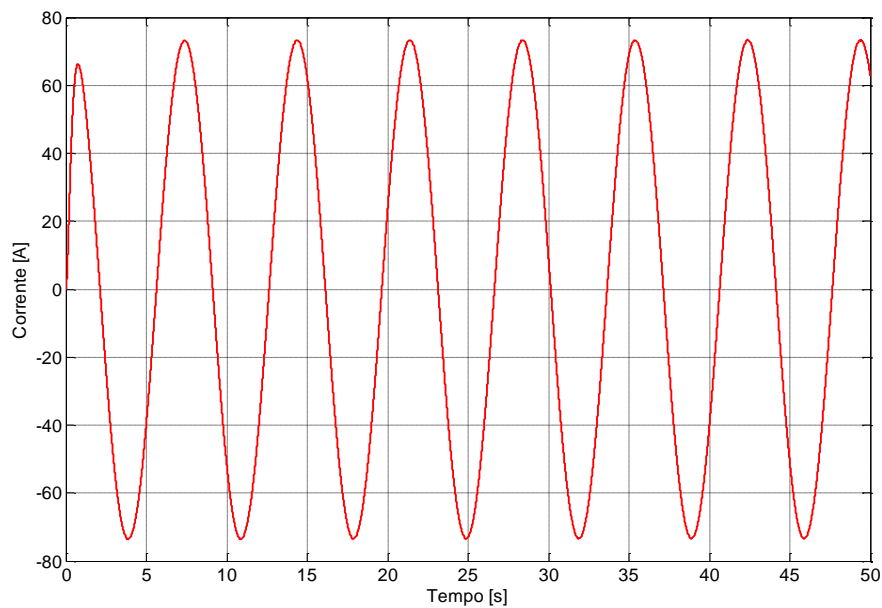


Figura 4.5 – Corrente do gerador em função do tempo.

A potência eficaz do gerador é apresentada no gráfico da Figura 4.6, sendo que a fase inicial do gráfico deve ser ignorada uma vez que corresponde ao momento transitório do gerador, o valor a considerar para a potência eficaz ronda os **220000 W**.

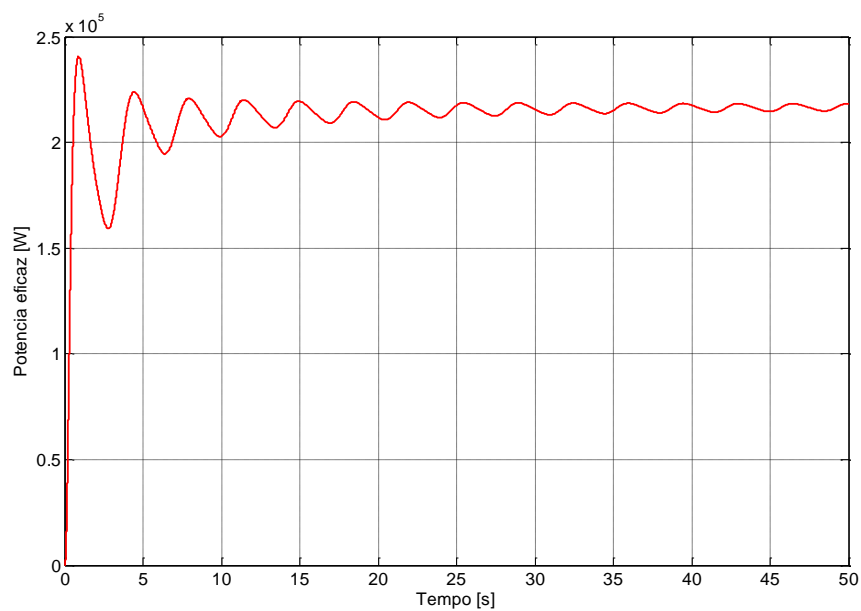


Figura 4.6 – Valor eficaz da potência do gerador.

A tensão aos terminais da ponte retificadora tem a forma de onda apresentada no gráfico da Figura 4.7.

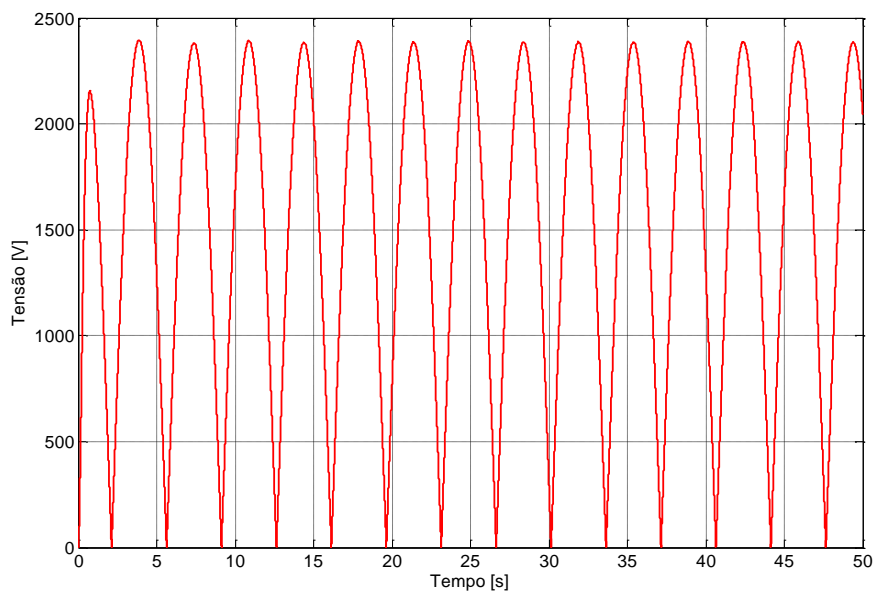


Figura 4.7 – Tensão aos terminais da ponte retificadora.

Da simulação obteve-se, também, a força do gerador, apresentada no gráfico da Figura 4.8. Os valores de pico da força do gerador rondam **600000 N**.

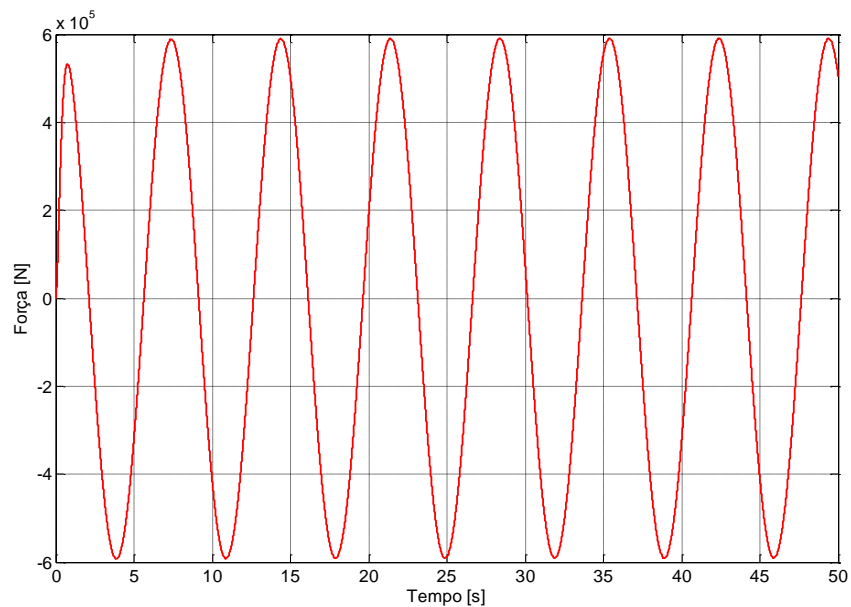


Figura 4.8 – Força eletromagnética do gerador.

Na figura 4.9 apresenta-se o rendimento do gerador e o rendimento de todo o sistema que é de aproximadamente **50%**. Como esperado, o rendimento do gerador é superior ao rendimento total do sistema.

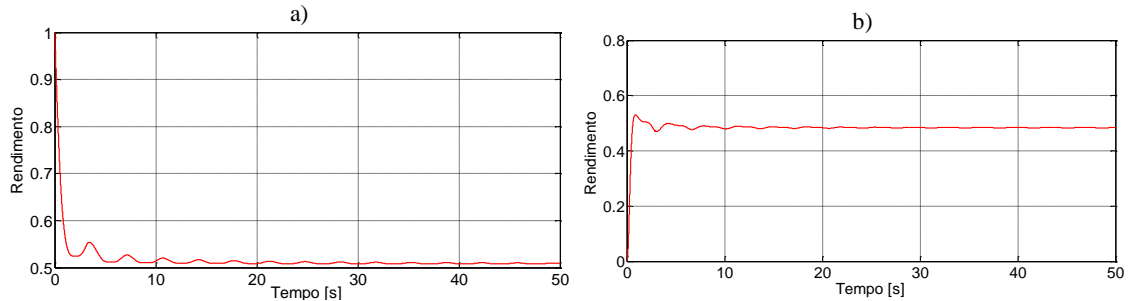


Figura 4.9 - a) Rendimento do gerador. b) Rendimento de todo o sistema.

4.2 Simulação com resistência de carga superior à resistência interna equivalente do gerador

Resistência de carga 10 vezes superior resistência interna equivalente do gerador

De um modo geral, a resistência de carga irá ser sempre maior que a resistência do gerador, não respeitando a situação ideal. Tem interesse simular o funcionamento do sistema para uma nova resistência carga $R_{carga} = 10R_{dc}$ para a qual se verifica através de iterações manuais que a razão entre o deslocamento vertical da onda e o deslocamento vertical da boia assumirá o valor de $\bar{A} = 1,1$. Como se pode verificar através do gráfico da Figura 4.10 o deslocamento da boia praticamente acompanha o deslocamento da onda, mantendo-se o desfasamento entre deslocamento da onda e deslocamento da boia.

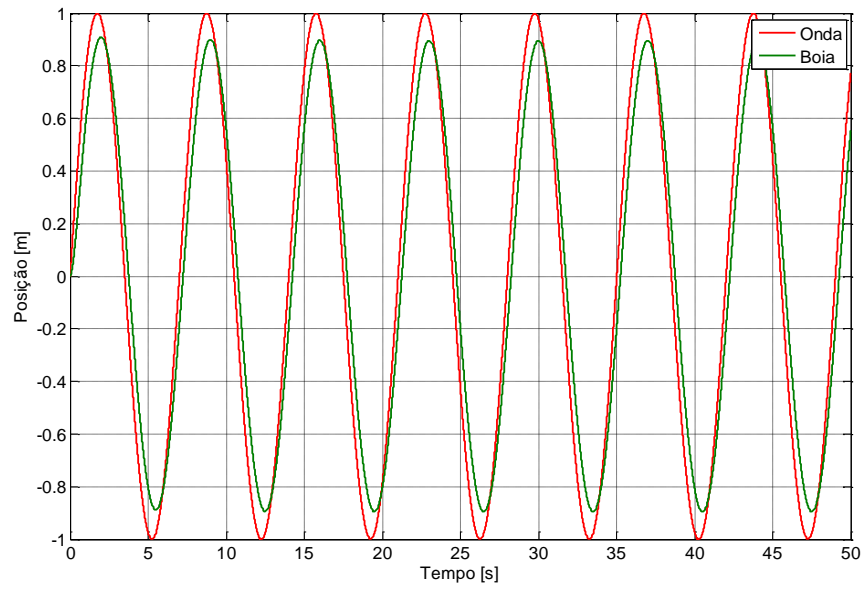


Figura 4.10 – Posição da boia e da onda em função do tempo.

A nova velocidade do flutuador é apresentado no gráfico da figura 4.11.

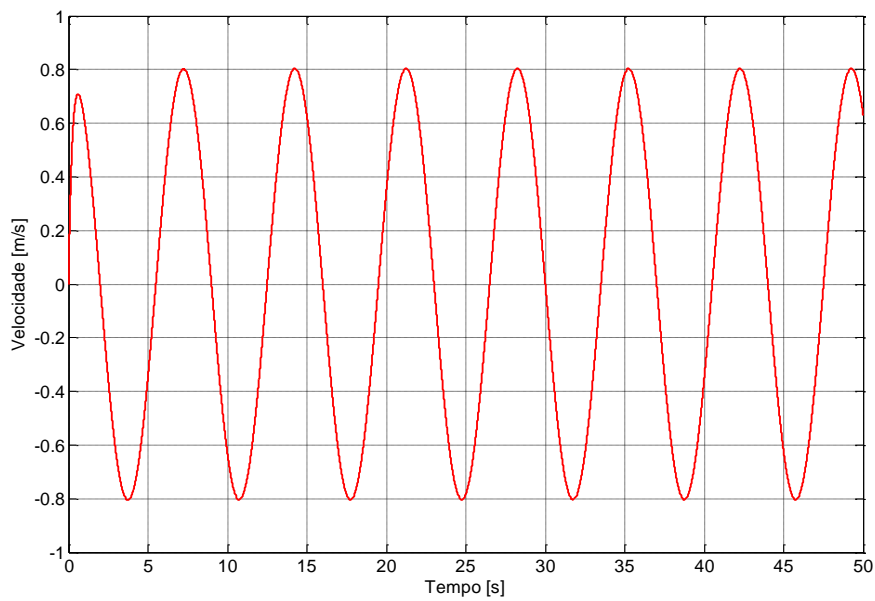


Figura 4.11 – Velocidade da boia em função do tempo.

Na Figura 4.12 apresenta-se o gráfico da força eletromotriz do gerador para a nova resistência e carga que, em comparação com gráfico obtido anteriormente, verifica uma um aumento significativo do seu valor.

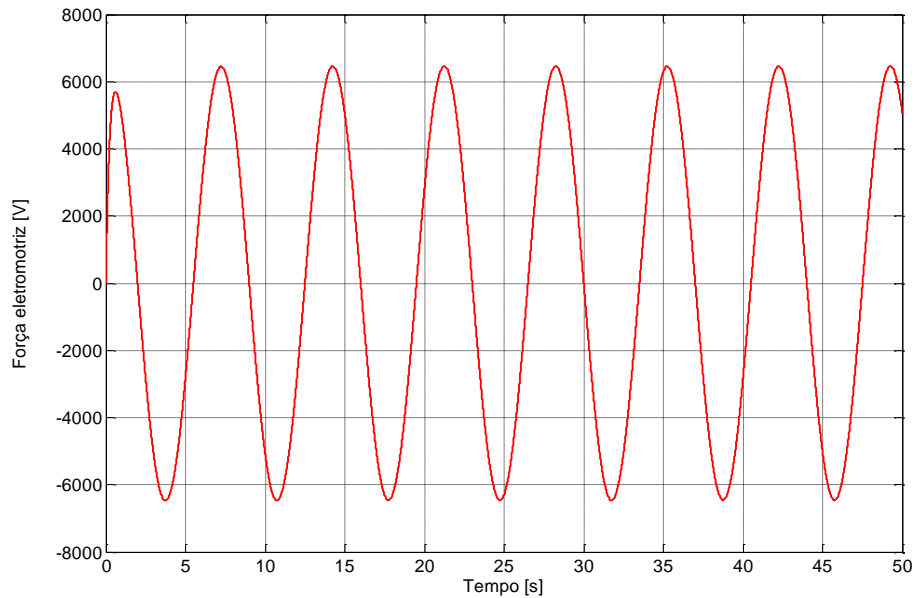


Figura 4.12 – Força eletromotriz do gerador em função do tempo.

A corrente do gerador decresce com o aumento da carga, na figura 4.13 temos o gráfico da corrente do gerador para a nova carga.

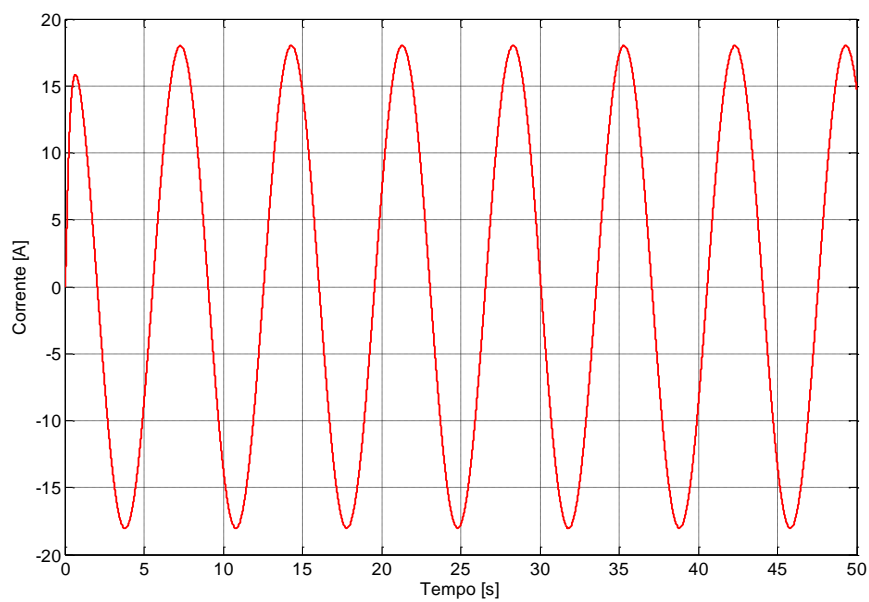


Figura 4.13 – Corrente do gerador em função do tempo.

A potência eficaz do gerador sofre tal como a corrente um decréscimo, como se verifica no gráfico da figura 4.14 quando comparado com o gráfico da potência eficaz da simulação anterior.

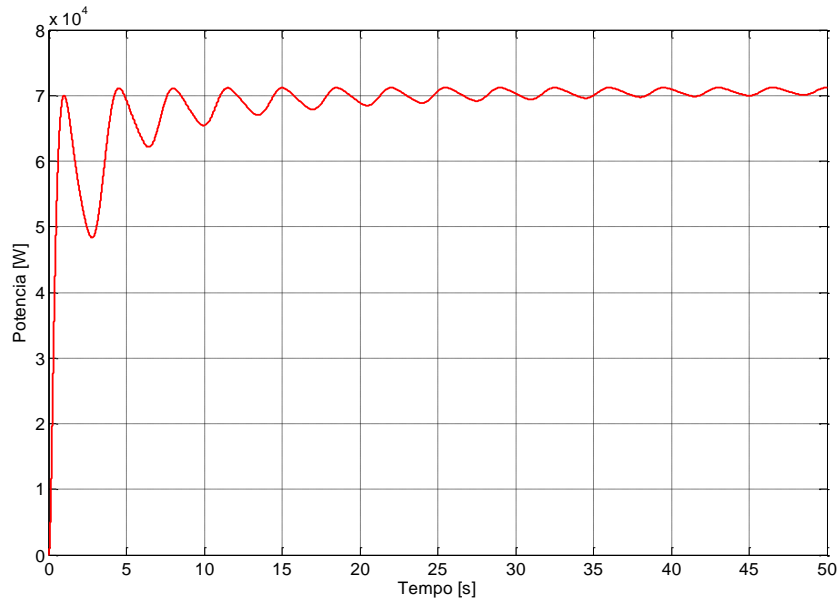


Figura 4.14 – Valor da potência eficaz do gerador.

O valor de pico da tensão retificada (figura 4.15) verifica um aumento quando comparado ao valor da simulação anterior (figura 4.7) situando-se agora próximo dos 5900V.

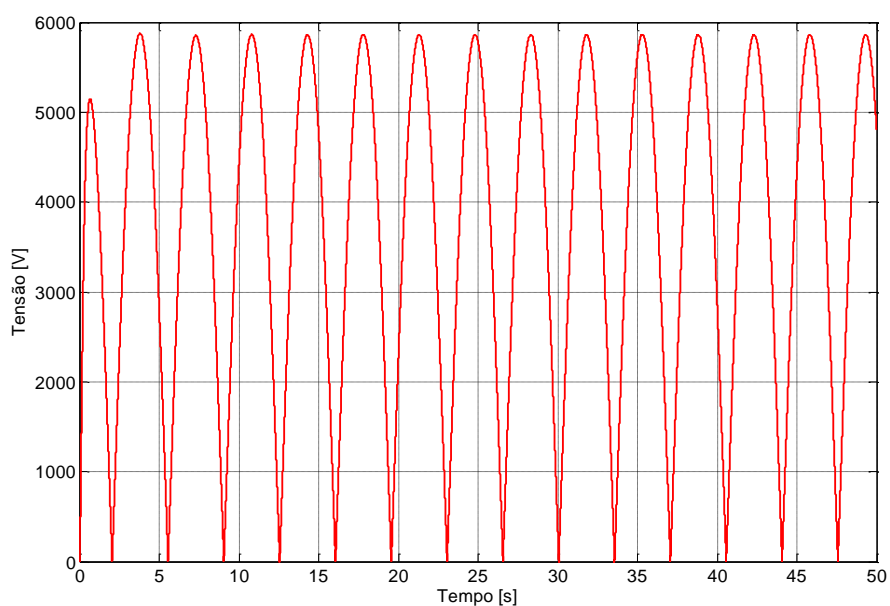


Figura 4.15 - Tensão aos terminais da ponte retificadora.

No gráfico da figura 4.16 apresenta-se a força produzida pelo gerador, como se pode constatar o valor de pico decresceu com o aumento da carga.

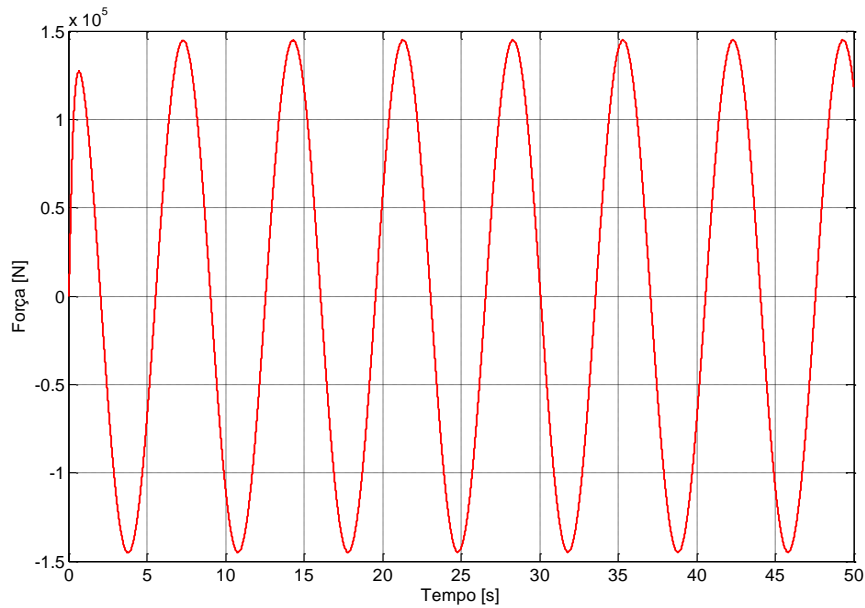


Figura 4.16 - Força eletromagnética em função do tempo.

Nas Figuras 4.17 a) e b) apresentam-se os rendimentos do gerador e de todo o sistema respetivamente, verifica-se que para o novo valor de resistência existe um aumento do rendimento tanto do gerador como do sistema total. Neste caso o rendimento do sistema situa-se abaixo de **60%**.

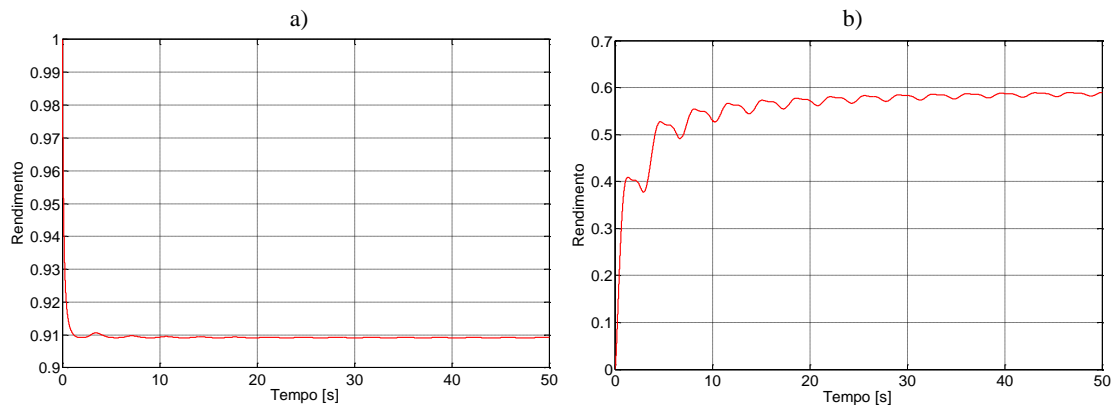


Figura 4.17 - a) Rendimento do gerador. b) Rendimento de todo o sistema.

Resistência de carga 50 vezes superior à resistência interna equivalente do gerador

Uma vez que se verificou o aumento do rendimento do sistema com o aumento de resistência de carga imposto na situação anterior efetuou-se nova simulação com $R_{carga} = 50R_{dc}$. Na qual se obteve novo gráfico do deslocamento da boia e da onda, Figura 4.18. Após um processo iterativo manual verificou-se que para o presente caso o valor da razão entre o deslocamento vertical da onda e o deslocamento vertical da boia \bar{A} será igual ao valor unitário uma vez que a boia acompanha na totalidade o deslocamento da onda.

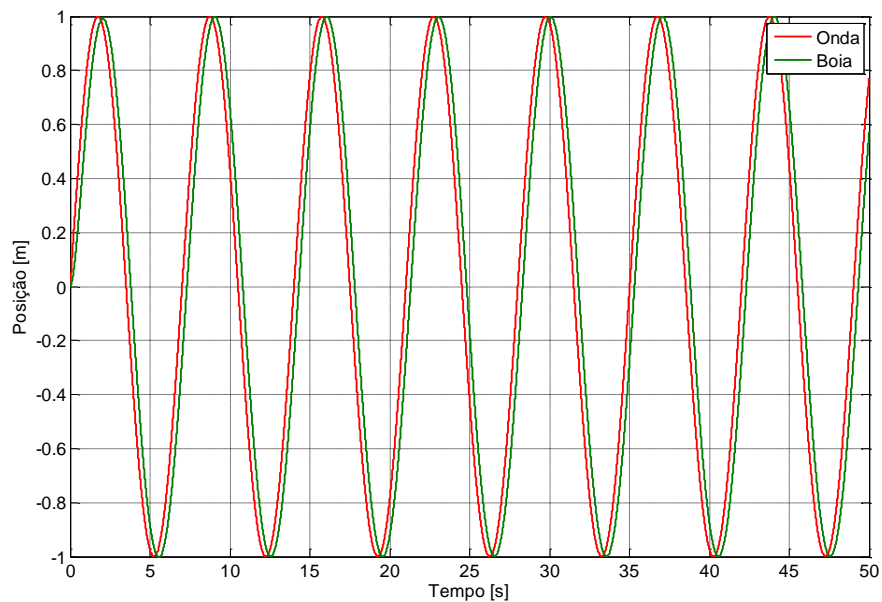


Figura 4.18 – Posição da boia e da onda em função do tempo.

Com o aumento do deslocamento da boia ter-se-á uma maior oscilação nos valores de velocidade, tal como apresentado na Figura 4.19.

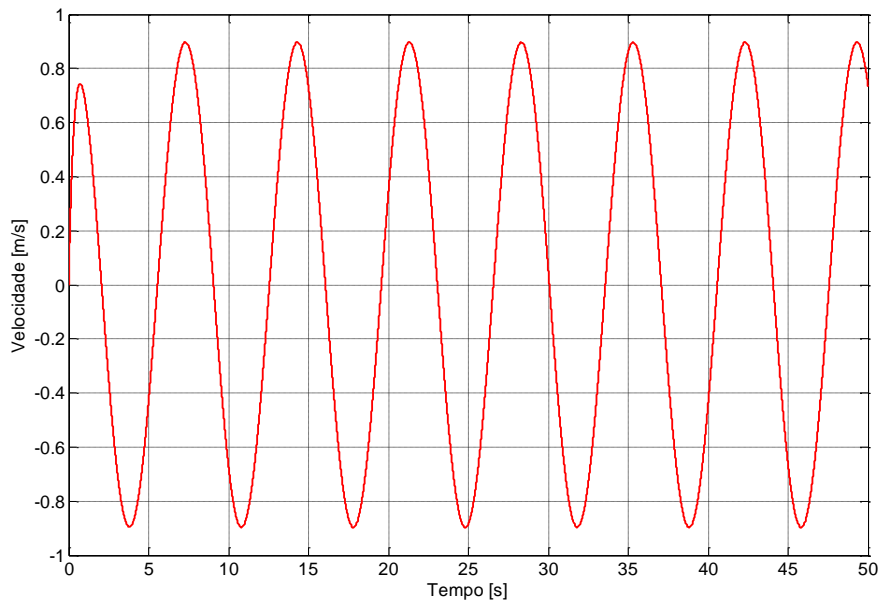


Figura 4.19 – Velocidade da boia em função do tempo.

O gráfico da força eletromotriz para as novas condições é apresentado na Figura 4.20.

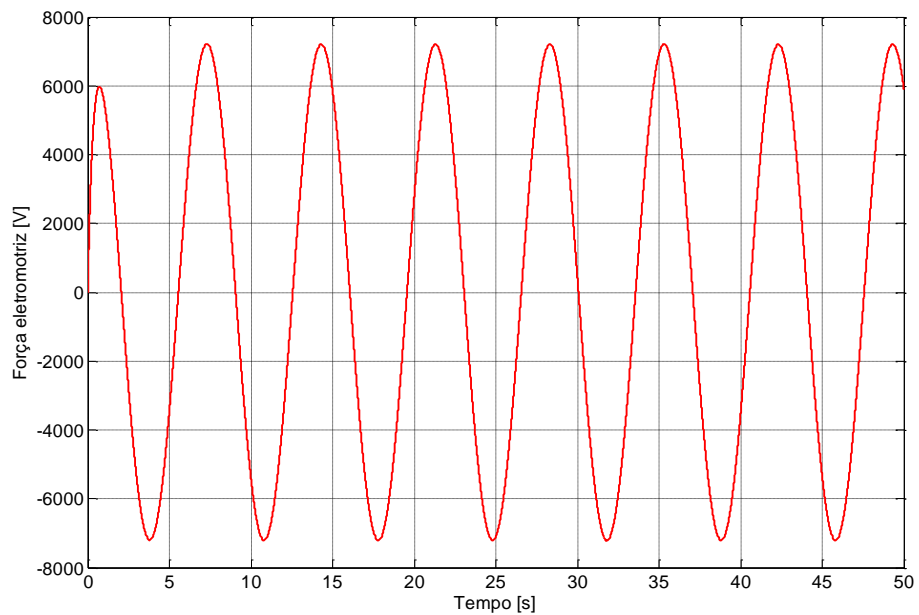


Figura 4.20 – Força eletromotriz do gerador em função do tempo.

Na Figura 4.21 é apresentado o gráfico da corrente do gerador.

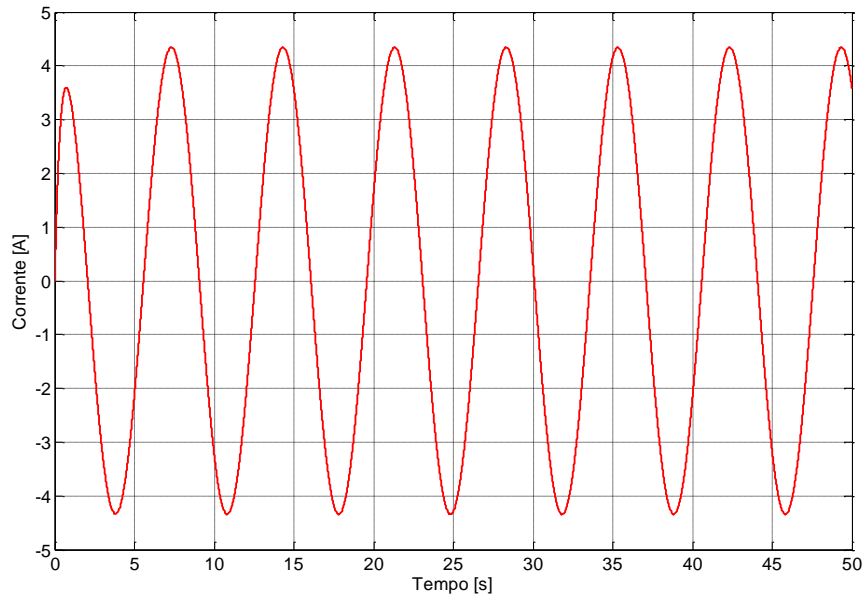


Figura 4.21 – Corrente do gerador em função do tempo.

No que respeita ao valor eficaz da potencia e uma vez que a diminuição da corrente é consideravelmente superior ao aumento da força eletromotriz é expectável que o seu valor diminua relativamente às simulações anteriores, como se pode confirmar pelo gráfico apresentado na Figura 4.22.

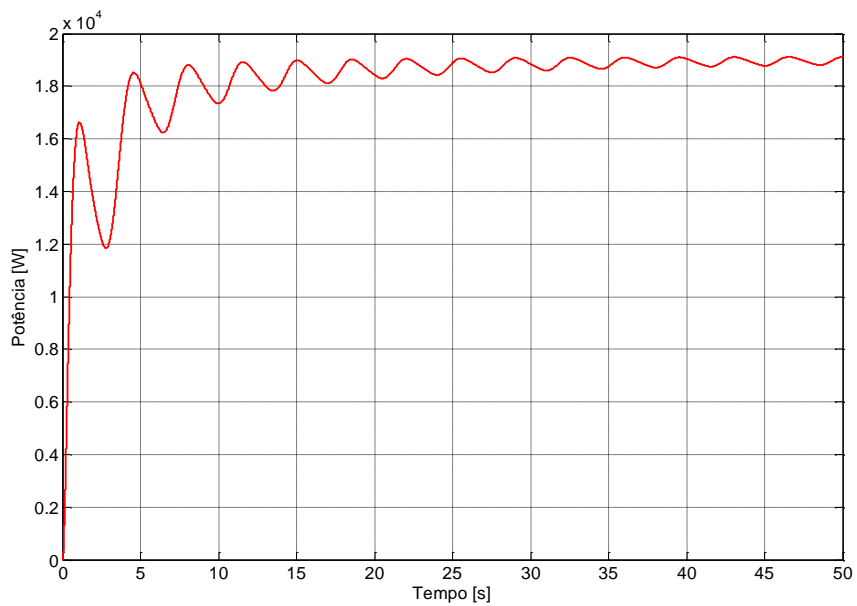


Figura 4.22 – Valor eficaz da potência do gerador.

A tensão retificada aos terminais da máquina é apresentada no gráfico da Figura 4.23 no qual se verifica, relativamente as duas situações anteriores, um acentuado acréscimo do seu valor de pico.

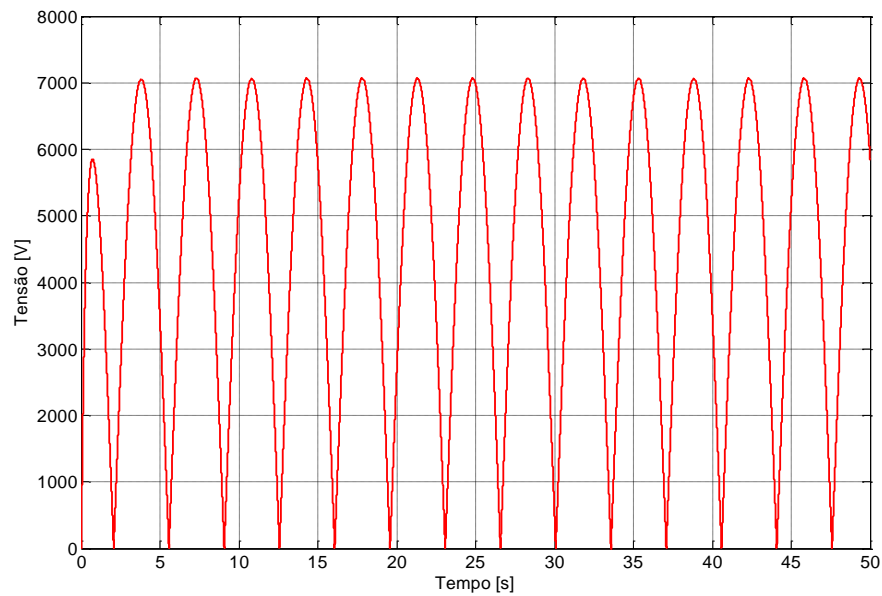


Figura 4.23 – Tensão aos terminais da ponte retificadora.

O gráfico da força do gerador é apresentado na figura 4.24 no qual é notória a diminuição da força do gerador relativamente as simulações anteriores.

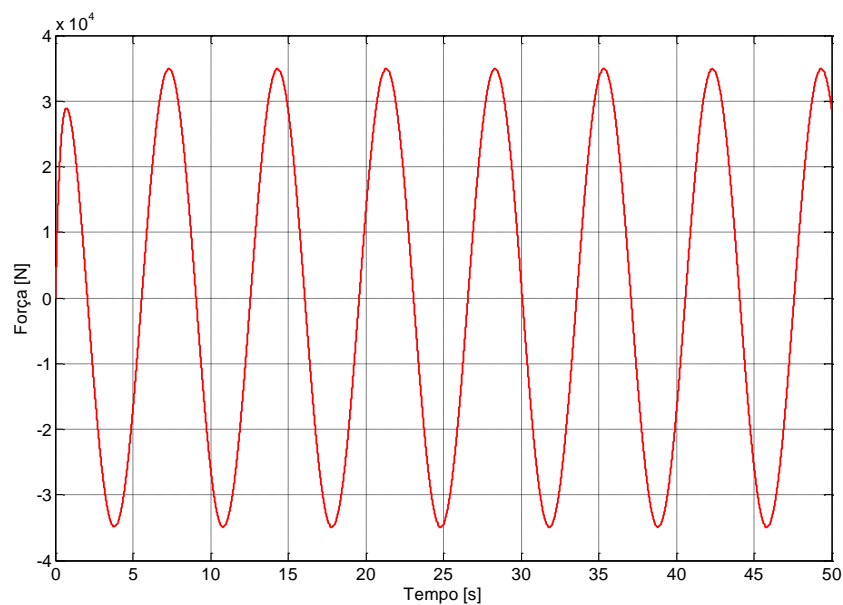


Figura 4.23 – Força eletromagnética do gerador.

Na Figura 4.25 apresentam-se os gráficos dos rendimentos do gerador e do sistema total nos quais é possível verificar novamente um aumento do rendimento do gerador. No entanto, verifica-se uma diminuição drástica do rendimento do sistema, passando a ser aproximadamente **16%**.

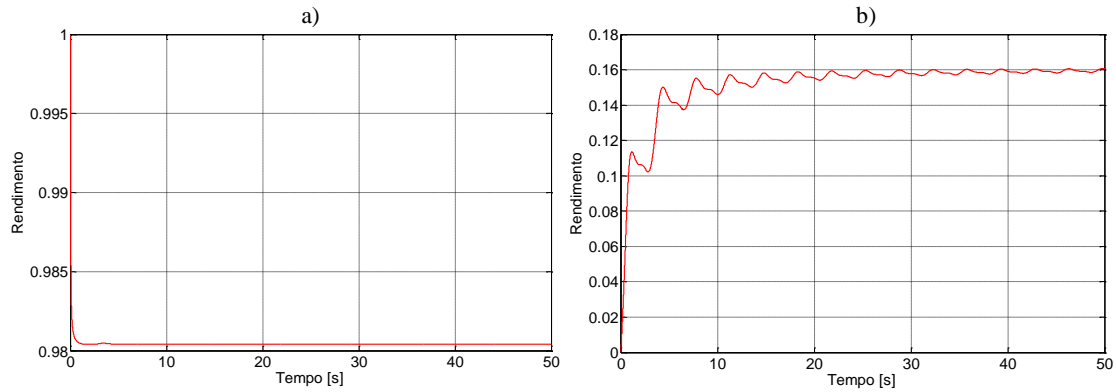


Figura 4.25 - a) Rendimento do gerador. b) Rendimento de todo o sistema.

4.3. Análise e comparação dos resultados das simulações

Comparando pormenorizadamente as três situações anteriores, $R_{carga} = R_{dc}$, $R_{carga} = 10R_{dc}$ e $R_{carga} = 50R_{dc}$, verifica-se que com o aumento da resistência de carga se diminui a corrente dos enrolamentos o que leva por sua vez um decréscimo da força eletromagnética do gerador. Uma vez que o gerador pode também ser visto do ponto de vista do modelo mecânico como um amortecedor cujo coeficiente de amortecimento é tanto maior quanto a corrente que passa pelos enrolamentos, aumentando a resistência de carga diminui-se a corrente dos enrolamentos o que por sua vez irá provocar um aumento na amplitude do deslocamento vertical do flutuador.

Apesar de se diminuir a corrente dos enrolamentos com o aumento da resistência de carga, a máquina sofre um aumento na força eletromotriz, o que permite concluir que existe um aumento no rendimento do gerador com o aumento da carga uma vez que existe uma diminuição nas perdas de joule quadraticamente proporcional à diminuição da corrente do gerador.

No entanto, e apesar de aumentarmos o rendimento do gerador com o aumento da resistência de carga, isto não implica que suceda também um aumento do rendimento total do sistema. O aumento do rendimento do sistema para o seu valor ideal estará

dependente dum valor de ideal de corrente do gerador. Isto pode ser conseguido com um dispositivo de eletrónica de potência que imponha a corrente ideal para uma dada frequência de onda.

Capitulo 5: Conclusões

5.1 Conclusões Finais

O presente projeto propõem um conjunto de passos a dar para efetuar o dimensionamento de um sistema de aproveitamento da energia das ondas. Durante o dimensionamento foram encontrados obstáculos principalmente de cariz mecânico que provocaram limitação no dimensionamento da máquina, no entanto foi possível todo o seu desenvolvimento bem como o de um modelo equivalente que permitiu simular a máquina sob ação de qualquer onda do mar bem como quando submetido a qualquer carga elétrica puramente resistiva.

A criação do modelo dinâmico do sistema não teria sido possível sem recurso às ferramentas MATLAB e femm, através das quais foi desenvolvido todo o algoritmo de obtenção de dados da máquina e posteriormente criado o seu modelo em ambiente Simulink.

Os resultados obtidos da simulação ocorreram dentro das expectativas e permitem tirar boas prospetivas sobre a viabilidade deste tipo de sistemas. Assim sendo, verificou-se que apesar de certo que a construção de um dispositivo à semelhança do proposto possa vir a ser extremamente caro, existe um grande potencial energético disponível para ser produzido por este mesmo dispositivo.

As elevadas tensões e baixas correntes fornecidas pelo dispositivo projetado propiciam a energia para o transporte com um nível de perdas reduzido.

5.2 Perspetivas para trabalho futuro

Dada a impossibilidade de abordar pormenorizadamente todos os temas estudados para realizar o presente projeto sugere-se como continuação ao presente trabalho os seguintes tópicos de investigação:

- Estudo pormenorizado do dispositivo de eletrónica de potência por forma a maximizar a rentabilidade da máquina.
- Melhorar o modelo dinâmico do gerador de modo a diminuir erros de simulação inerentes às escolhas efetuadas para a modelação do elemento flutuador e do dispositivo de eletrónica de potência.
- Efetuar comparações entre a boia proposta e outros tipos de boia, numa tentativa de adquirir melhores resultados.
- Desenvolver um algoritmo que proporcione a simulação do sistema com ondas não lineares.

Bibliografia

- [1] D. B. Domingues, J. M. Ribeiro e L. M. Passos, "*Sistemas de Gestão de Energia*", Faro, Portugal: Universidade do Algarve, 2007.
- [2] Directorate-General for Energy and Transport, "*EU energy and transport in figures - Statistical Pocketbook 2010*", Luxemburg: Publications Office of the European Union, 2010.
- [3] J. M. E. Ribeiro, "*Desenvolvimento de Gerador Linear de Baixa Velocidade para aplicação em conversor de energia renovável*", Faro, Portugal: Universidade do Algarve, 2009.
- [4] Centre for Renewable Energy Sources, "*Ocean Energy Conversion in Europe - Recent advancements and prospects*", Pikermi, Greece: CRES, 2006.
- [5] Wave Energy Center, "*Potencial e estratégia de desenvolvimento da energia das ondas em Portugal*", Portugal: WEC, 2004.
- [6] L. M. Coelho, "*Conversores de acção directa no aproveitamento de energia das ondas*", Lisboa, Portugal: Instituto Superior Técnico, 2007.
- [7] [Online]. Available: www.hidrografico.pt.
- [8] A. Sarmiento e J. Cruz, "*Energia das Ondas: Introdução aos Aspectos Tecnológicos, Económicos e Ambientais*", Instituto do Ambiente, 2004.
- [9] G. F. Beirão, "*Protótipo de um Gerador Linear para Aproveitamento de Energia das Ondas num Sistema AWS*", Lisboa, Portugal: Instituto Superior Técnico, 2010.
- [10] S. D. Santos, "*Potencial Energético dos Oceanos*", Lisboa, Portugal: ISEL, 2007.
- [11] fevereiro 2013. [Online].
Available: <http://zaryad.com/wp-content/uploads/2012/03/111.jpg>.
- [12] Fevereiro 2013. [Online].
Available: <http://fc3arch.files.wordpress.com/2011/08/pelamis.jpg>.
- [13] Fevereiro 2013. [Online].
Available: [<http://www.dgeg.pt/upload/membro.id/imagens/i006303.gif>].
- [14] Fevereiro 2013. [Online].
Available: <http://energy.nstl.gov.cn/MirrorResources/4684/mytup.gif>.

- [15] M. E. McCormick, "*Ocean engineering Mechanics with applications*", Cambridge: Cambridge University Press, 2009.
- [16] S. N. Carmo, "*Gerador Linear para Aproveitamento da Energia das Ondas*", Lisboa, Portugal: Universidade Nova Lisboa, 2009.
- [17] I. Martins, J. Esteves, G. Marques e F. Silva, "Permanent-Magnets Linear Actuators Applicability in Automobile ActiveSuspensions, IEEE Transactions on Vehicular Technology, Volume 55, Number 1", 2006.
- [18] E. Furlani, "*Permanent Magnet and Electromechanical Devices*", New York, USA: Elsevier, 2001.
- [19] I. L. Martins, "*Desenvolvimento de Accionamentos Electromagnéticos para a Suspensão de Veículos Automóveis*", Tese de Doutoramento, Instituto Superior Técnico, 2001.
- [20] M. E. McCormick, "*Ocean Wave Energy Conversion*", New York: Dover Publications, Inc, 2007.
- [21] K. Rhinefrank, E.B. Agamloh, A. von Jouanne, A.K. Wallace, J. Prudell, K. Kimble, J. Aills, E. Schmidt, P. Chan, B. Sweeny, A. Schacher, "Novel ocean energy permanent magnet linear generator buoy," *Renewable Energy* 31, pp. 1279-1298, 2006.
- [22] M. Rashid, "*Power Electronics, circuits, devices and applications*", 1988.

Anexos

A1 – Modelo dinâmico do sistema de aproveitamento da energia das ondas oceânicas

Dada impossibilidade de apresentar a totalidade do diagrama de blocos implementado para efetuar a totalidade dos cálculos previstos numa única figura de forma legível, o mesmo foi dividido em várias figuras.

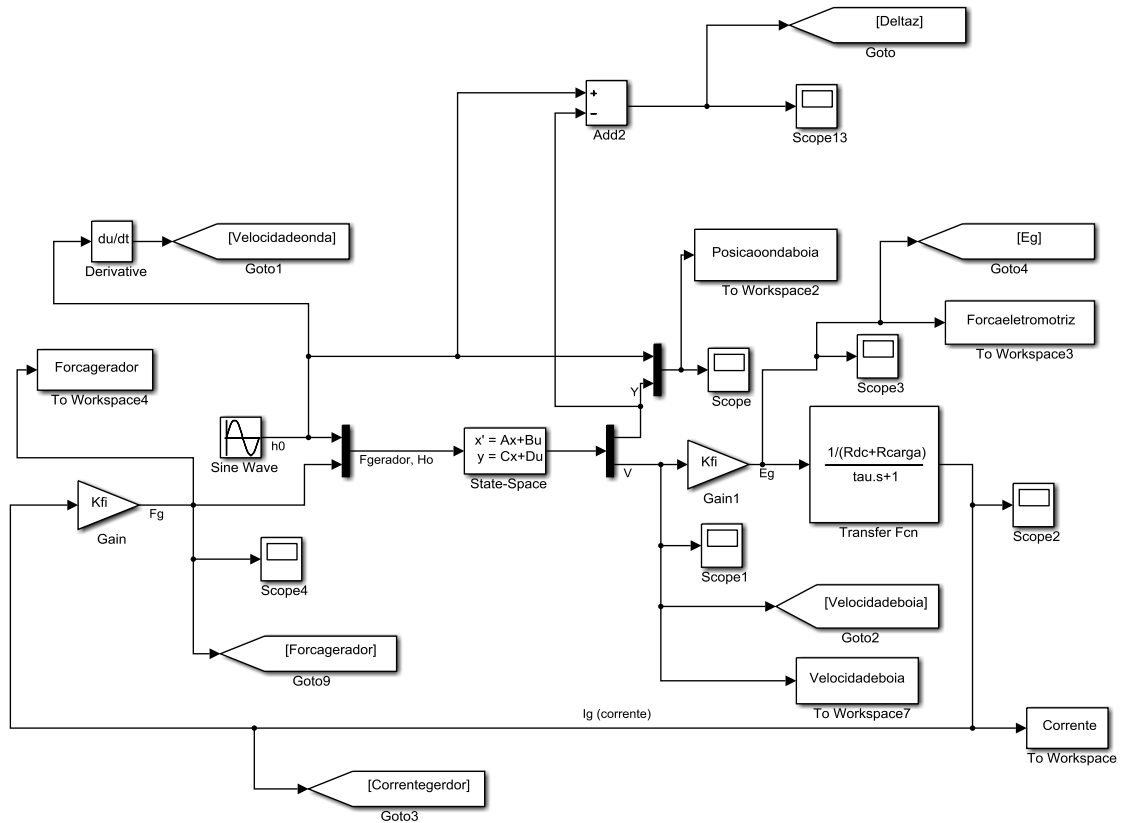


Figura A.1 – Diagrama de blocos do modelo dinâmico do sistema.

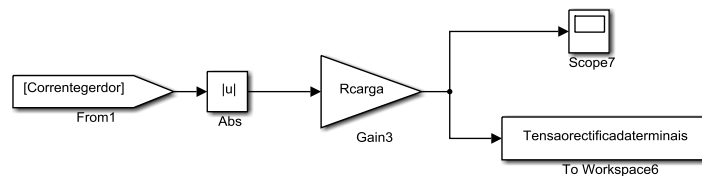


Figura A.2 – Diagrama de blocos do sistema de retificação da tensão do gerador.

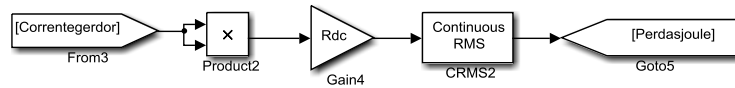


Figura A.3 – Diagrama de blocos das perdas por efeito de joule.

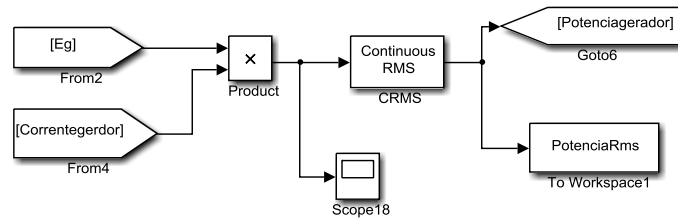


Figura A.4 – Diagrama de blocos da potência eficaz do gerador.

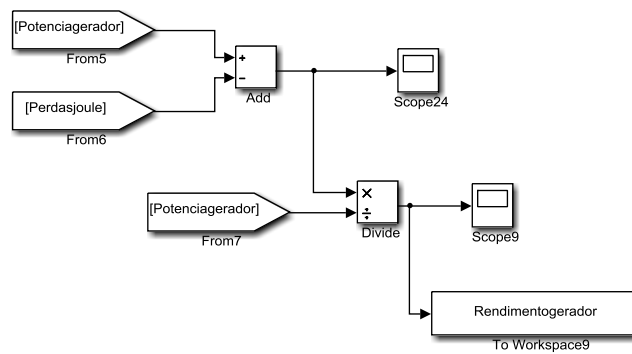


Figura A.5 – Diagrama de blocos do rendimento do gerador.

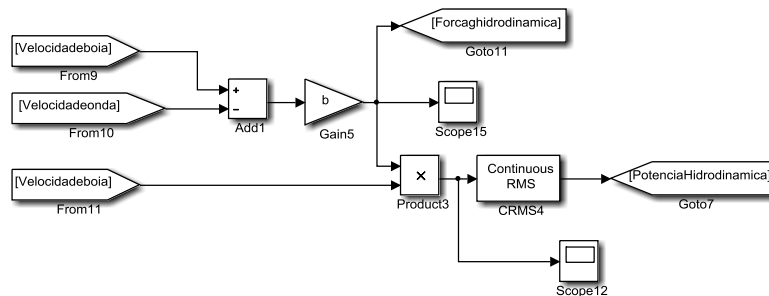


Figura A.6 – Diagrama de blocos da potência devida ao coeficiente hidrodinâmico da boia.

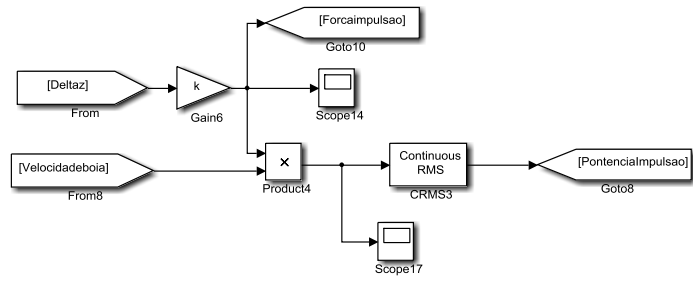


Figura A.7 – Diagrama de blocos da potência devida à força de impulsão.

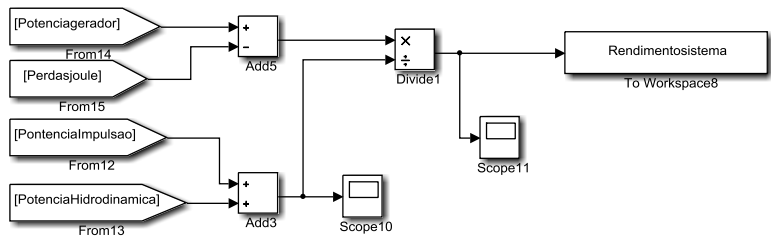


Figura A.8 – Diagrama de blocos do rendimento total do sistema.