



Olga Raquel Baltazar Sanches

Licenciada em Engenharia de Energias Renováveis

Dimensionamento de dois geradores rotativos para conversão elétrica da Energia das Ondas

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia
das Energias Renováveis

Orientador: Professor Doutor Mário Fernando Ventim Neves,
Professor Auxiliar FCT-UNL



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Setembro 2019

Dimensionamento de um Gerador rotativo de baixa velocidade para conversão elétrica da Energia das Ondas

Copyright © Olga Raquel Baltazar Sanches, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a 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 minha Mãe, minha melhor amiga e fonte inesgotável de amor.

Agradecimentos

O apoio que recebi ao longo de todo este trabalho foi fundamental, sendo aqui expressos os meus mais sinceros agradecimentos.

Ao Professor Doutor Mário Ventim Neves, meu orientador/coordenador de mestrado, que se mostrou disponível em diversas ocasiões, desde esclarecer dúvidas sobre as unidades curriculares, ainda antes da minha inscrição no mestrado, até ao acompanhamento assíduo durante a elaboração da presente dissertação.

À minha família mais próxima, pai, mãe e irmão. Em especial à minha Mãe pelo incentivo e gigante apoio incansável que sempre recebi da sua parte. Às minhas avós e avô, pela constante preocupação para comigo e por me continuarem a olhar como a sua “menina pequenina”.

Mafalda, Trixie, Lucky, Goofie e Oddie, os membros da família de quatro patas que estão comigo há muitos anos e me acalmaram em muitos momentos de ansiedade e dúvida ao longo deste projeto.

Ao meu companheiro e padrinho de praxe Miguel Bolacha pelo apoio mútuo que prestamos um ao outro numa fase que foi muito semelhante para ambos. Obrigada por me ouvires, aconselhares e pela edição de algumas imagens. És o máximo!

À Carla Borges pela ajuda prestada em diversas fases desta dissertação, em especial na fase inicial de conhecer e aprender a trabalhar com o programa utilizado e ao Nuno Vilhena pelos esclarecimentos relativos às dúvidas mais complexas que surgiram durante a utilização do mesmo.

Um agradecimento especial ao professor Paulo Branco e ao Francisco, do IST.

Resumo

A sociedade atual tem mostrado um interesse crescente nas fontes de energia renovável. Ainda assim, não basta apenas o recurso às fontes que têm sido até hoje exploradas, é também necessária a procura de diferentes alternativas tendo em conta os recursos disponíveis em todo o globo.

Uma das opções reside no oceano que apresenta uma potencial fonte de energia, recorrendo-se à utilização de geradores de constituição simples e aplicáveis em soluções de baixas velocidades.

No presente trabalho serão caracterizadas duas máquinas de fluxo radial de múltiplos polos passíveis de serem aplicadas no aproveitamento de energia das ondas. A geometria de ambas inclui ímanes no estator, responsáveis pela magnetização, o que suprime a necessária excitação magnética do gerador e, conseqüentemente, reduz o seu custo.

O comportamento das duas máquinas será estudado através de simulações num programa específico para o efeito, a partir das quais será possível tirar conclusões relativamente à viabilidade das mesmas na conversão elétrica.

Palavras-chave: Energia das Ondas, Gerador de fluxo radial, Ímanes permanentes, Conversão elétrica

Abstract

Today's society has shown a growing interest in renewable energy sources. Still, it is not enough to use only the sources that have been explored until now, it is necessary to look for different alternatives considering the wide resources available around the globe.

One of the options lies in the ocean that represents a potential source of energy if we use simple construction generators capable of function in low speed velocities.

In this work are presented two generators with radial flux and multiple poles that can be used in wave energy. Their geometry includes magnets on the stator, responsible for the magnetization, which suppress the necessary magnetic excitation of the generator, reducing its cost.

The machine's behaviour will be studied through simulations using a specific finite element program, from which it will allow taking conclusions related with both generators' viability in electric conversion.

Keywords: Wave Energy, Radial Flux Generator, Permanent Magnet, Electrical conversion

Índice

1	Introdução	1
1.1	Motivação.....	1
1.2	Objectivos.....	1
1.3	Estrutura do documento	1
1.4	Contribuições originais.....	2
2	Enquadramento teórico	3
2.1	O recurso energético.....	3
2.2	Equipamentos de conversão.....	7
2.2.1	Distância à linha de costa.....	7
2.2.2	Equipamentos utilizados na costa.....	7
2.2.3	Equipamentos utilizados junto à costa.....	8
2.2.4	Equipamentos afastados da costa.....	9
2.3	Tipos de turbinas.....	9
2.4	Tipos de geradores eléctricos	11
2.4.1	Máquina Assíncrona	11
2.4.2	Máquina Síncrona.....	11
2.4.3	Máquina Síncrona de Fluxo Axial com ímanes permanentes.....	11
2.4.4	Máquina Síncrona de Fluxo Radial com ímanes permanentes.....	11
2.4.5	Ímanes Permanentes.....	12
3	Estado de Arte.....	13
4	Dimensionamento dos geradores.....	17
5	Simulação e resultados	25
5.1	Gerador de baixa rotação.....	26
5.2	Gerador de elevada rotação.....	28
5.3	Simulações.....	31
6	Conclusão	33
	Bibliografia.....	35
	Anexos	41

Índice de Imagens

Figura 2.1- Dispositivo criado por Yoshio Masuda (a) e vista do dispositivo em corte (b) (adaptado) [1].....	3
Figura 2.2 - Dispositivo Kaimei [2].....	4
Figura 2.3 - Pontos relevantes no desenvolvimento da energia das ondas até início dos anos 90 do séc XX.....	5
Figura 2.4 - Fontes de energia renovável convencionais e emergentes.....	5
Figura 2.5 – Designação do equipamento de conversão em função da distância à linha de costa [18].....	7
Figura 2.6 – Esquema de funcionamento de um Sistema CAO <i>onshore</i> (adaptado) [8].....	8
Figura 2.7- Elementos constituintes de um aproveitamento Tap Chan [10].....	8
Figura 2.8 - Vistas lateral e de topo [12].....	9
Figura 2.9 - Turbina Wells [14].....	10
Figura 3.1 – Exemplo de disposição dos ímanes no estator e no rotor [29].....	13
Figura 3.2 – Máquina com oito polos no rotor e doze no estator [31].....	14
Figura 3.3 – Máquina com quatro polos no rotor e três fases no estator [33].....	15
Figura 3.4 – Máquina original (a) e proposta de máquina (b) de [35].....	16
Figura 4.1 – Pré-dimensionamento do gerador de baixa rotação (a) e tabela de medidas (b).....	18
Figura 4.2 – Pré-dimensionamento do gerador de elevada rotação (a) e tabela de medidas (b).....	18
Figura 4.3 – Representação das linhas de fluxo no gerador de baixa rotação.....	19
Figura 4.4 – Representação das linhas de fluxo no gerador de elevada rotação.....	20
Figura 4.5 – Curva de desmagnetização de vários materiais [40].....	20
Figura 4.6 – Representação das linhas de fluxo.....	21
Figura 4.7 – Posições angulares do rotor e do estator.....	23
Figura 5.1 – Ilustração das linhas de fluxo magnético no gerador de baixa rotação.....	26
Figura 5.2 - Direção das linhas de fluxo no interior dos ímanes do gerador de baixa rotação....	26
Figura 5.3 – Tensão obtida no gerador de baixa rotação.....	27
Figura 5.4 – Fluxo por polo obtido no gerador de baixa rotação.....	28
Figura 5.5 – Ilustração das linhas de fluxo magnético no gerador de elevada rotação.....	28

Figura 5.6 – Direção das linhas de fluxo no interior dos ímanes do gerador de elevada rotação.....	29
Figura 5.7 – Tensão obtida no gerador de elevada rotação.....	30
Figura 5.8 – Fluxo por polo obtido no gerador de baixa rotação.....	30
Figura 5.9 – Tensão obtida aos terminais de uma bobina do gerador de baixa rotação.....	31
Figura 5.10 – Tensão obtida aos terminais de uma bobina do gerador de elevada rotação.....	31

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 – Protótipos de equipamentos testados.....	6
Tabela 4.1 - Valores relativos a parâmetros do gerador de baixa rotação previamente definidos.....	19
Tabela 4.2 - Valores relativos a parâmetros do gerador de elevada rotação previamente definidos.....	20
Tabela 5.1 - Valores teóricos do ferro e do ar.....	25
Tabela 5.2 - Valores teóricos do Neodímio-ferro-boro.....	25
Tabela 5.3 – Valores de entreferro mínimo e máximo e valor de relutância dos ímanes relativos ao gerador de baixa rotação.....	26
Tabela 5.4 – Valores que dependem de t relativos ao gerador de baixa rotação.....	27
Tabela 5.5 - Valores de entreferro mínimo e máximo e valor de relutância dos ímanes relativos ao gerador de elevada rotação	29
Tabela 5.6 – Valores que dependem de t relativos ao gerador de elevada rotação.....	29

Simbologia

	Descrição	Unidades
Φ_P	Linhas de fluxo no polo	Wb
Φ_E	Linhas de fluxo do lado esquerdo	Wb
Φ_D	Linhas de fluxo do lado direito	Wb
μ	Permeabilidade magnética	H/m
ℓ	Comprimento do troço	mm
δ	Espessura do entreferro	mm
μ_0	Permeabilidade magnética do vácuo	N/m ²
H	Intensidade de campo magnético	A·m ⁻¹
B	Densidade de fluxo magnético	T
S	Área de seção atravessada pelo fluxo	mm ²
L_{pol}	Largura dos polos	mm
C	Comprimento da máquina	m
\mathcal{R}	Relutância magnética	A/Wb
$\mu_{íman}$	Inclinação da característica de desmagnetização	H/m ⁻¹
B_r	Indução remanescente	T
e	Espessura do íman	mm
$S_{íman}$	Seção do íman atravessada pelo fluxo	mm ²
Ω	Velocidade angular	rad·s ⁻¹
N_s	Número de polos salientes do estator	Adimensional
N_r	Número de polos salientes do rotor	Adimensional
γ	Ângulo entre polos do rotor e do estator	o

Notações

ABB	Asea Brown Boveri
CAO	Coluna de Água Oscilante
OPERA	Open Sea Operating Experience to Reduce Wave Energy Cost
OWC	Oscillating Wave Column
PTO	Power Take Off

1 Introdução

No primeiro capítulo é descrita a parte que diz respeito ao enquadramento da dissertação, seguido pelos objetivos. De seguida é descrita a estrutura que foi adotada ao longo do documento e respetiva descrição de cada capítulo.

1.1 Motivação

À luz dos mais recentes dados obtidos no que diz respeito ao setor da energia, é visível a contribuição cada vez mais significativa das energias renováveis, nomeadamente a energia eólica, solar, hídrica e biomassa. De referir que a última só se poderá considerar renovável se a taxa de exploração da flora não exceder o consumo.

Ainda assim, existem locais onde o potencial para a utilização destas não será o mais favorável, quando comparado com outro tipo de aproveitamentos, existindo assim um conjunto de outras potenciais fontes de energia renovável, cuja taxa de implementação é menor quando comparada com as anteriormente referidas.

É o caso da região litoral de Portugal onde o recurso ao oceano Atlântico pode representar uma potencial fonte de aproveitamento da energia que é passível de ser aproveitada do movimento das ondas. Deste modo, existem projetos que foram desenvolvidos, não só a nível nacional, mas também internacional, que pretendem explorar a possível utilização deste tipo de aproveitamento.

1.2 Objetivos

O aproveitamento direto da energia do movimento das ondas apresenta uma desvantagem, que é a moderada velocidade do movimento vertical, cerca de 1 m/s. Esta conduz a uma baixa velocidade de rotação dos geradores elétricos que podem ser acionados de forma direta por esse movimento, pelo que existe a necessidade de se utilizar geradores especiais, diferentes dos que são utilizados, por exemplo, em aproveitamentos hídricos.

Esta temática serve de mote para o estudo do presente trabalho, no qual serão estudadas duas tipologias diferentes de geradores, um de fluxo não-controlável cuja geometria está associada à maioria dos geradores utilizados em aproveitamentos de energia das ondas, e outro de fluxo controlável.

Com o estudo dos geradores pretende-se prever se seria possível a utilização dos mesmos para a finalidade pretendida e qual teria uma maior viabilidade na sua aplicação em um equipamento de conversão.

1.3 Estrutura do documento

O capítulo 1 foca-se essencialmente na motivação e objetivos do trabalho desenvolvido, respetiva estrutura e contribuições.

No capítulo 2 é feito um enquadramento no que diz respeito ao tema referido, nomeadamente o recurso renovável em questão e os tipos de extração usados para se obter energia das ondas. No final são referidos tipos de geradores elétricos e ímanes permanentes utilizados.

No Estado da Arte é feita referência a artigos que exploraram máquinas elétricas de diferentes características, dentro das quais é selecionada a geometria que caracteriza o gerador a ser dimensionado.

O Dimensionamento dos Geradores, no capítulo 4, descreve essencialmente os geradores nos quais se vai basear o dimensionamento, respetivas medidas e equações utilizadas para se obter resultados de variáveis relacionadas com os geradores.

O capítulo 5 apresenta resultados referentes ao que foi obtido através dos cálculos do dimensionamento e gráficos obtidos no programa de elementos finitos.

Por último encontra-se uma síntese do trabalho desenvolvido e respetivas conclusões.

1.4 Contribuições originais

Neste trabalho fez-se uma simulação do funcionamento dos geradores anteriormente referidos, tentando ver se seria possível gerar energia elétrica.

Os geradores estudados são variantes de máquinas encontradas na literatura. A implementação dos geradores no programa de simulação de elementos finitos utilizado, e a obtenção de resultados, são realizados no âmbito desta dissertação. Ainda que possam ser encontrados resultados semelhantes na literatura, os presentes neste documento são originais.

2 Enquadramento teórico

Neste segundo capítulo encontram-se algumas considerações relativas à energia das ondas. No seu seguimento são ainda abordados os tipos de geradores existentes bem como os imanes permanentes passíveis de serem aplicados nos mesmos.

2.1 O recurso energético

Existem recursos energéticos provenientes de energias renováveis que têm origem nas mais variadas fontes, estando o tipo de aproveitamento diretamente relacionado com fatores como a geografia, cota ou condições atmosféricas de cada lugar.

A maioria das energias renováveis dependem da ação solar de uma forma indireta, quer seja para fazer crescer a flora, no caso da biomassa, para haver movimentação de massas de ar, no caso da eólica ou no caso da energia das ondas que acontece devido à ação da energia cinética provocada pelos ventos na massa de água.

Em 1991, a Comissão Europeia incluiu a energia das ondas no programa de Pesquisa e Desenvolvimento relacionado com energias renováveis, tendo os primeiros projetos aparecido em 1992 [1]. Ainda assim, foi nos anos 40 que foi desenvolvido o que viria a ser o primeiro dispositivo de aproveitamento de energia das ondas.

Em 1940, Yoshio Masuda desenvolveu uma boia de navegação equipada com turbinas. Este seria o primeiro dispositivo tipo coluna de água oscilante.

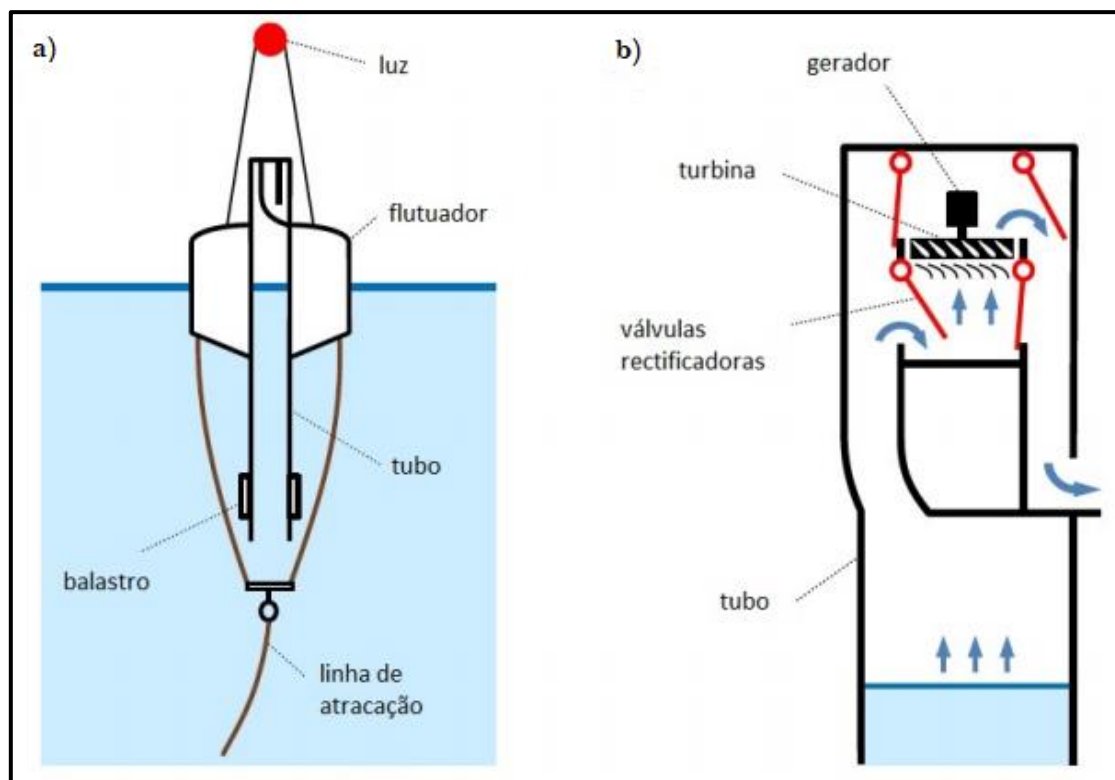


Figura 2.1- Dispositivo criado por Yoshio Masuda (a) e viste do dispositivo em corte (b) (adaptado) [1]

A energia produzida era utilizada para alimentação dos sensores instalados e também do sinalizador luminoso. Este dispositivo tinha como objetivo efetuar estudos oceanográficos.

Em 1974, Stephen Salter publicou um artigo na revista Nature, desenvolvido na Universidade de Edimburgo. Este tornou-se um marco pois focou a atenção da Comunidade Científica Internacional para a temática da energia das ondas. No ano posterior à referida publicação, os países europeus com mais condições de explorar este recurso, começam a considerá-lo como uma energia renovável passível de ser aproveitada. Deste modo, os governos Britânico e Norueguês confirmam o início de um programa de Pesquisa e Desenvolvimento relacionado com a energia das ondas [2].

No ano de 1976, no Japão, Yoshio Masuda concebeu o dispositivo Kaimei, visível na figura seguinte. O objetivo deste foi testar tipos de colunas de água oscilantes distintas entre si e equipadas com diferentes turbinas. Esta tinha 80 metros de comprimento por 12 metros de largura.

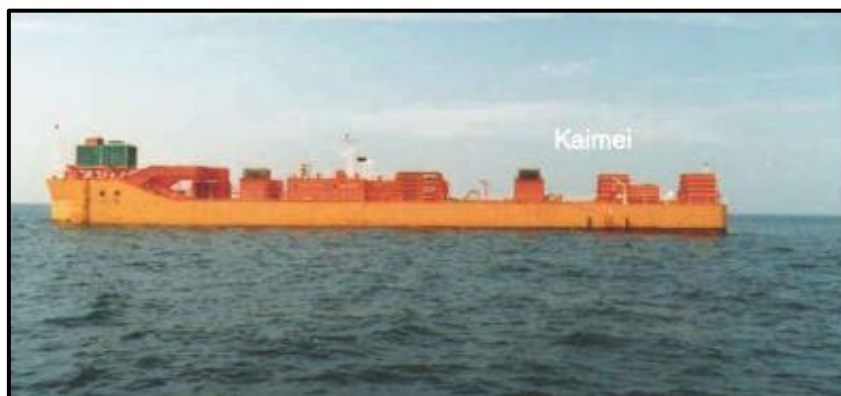


Figura 2.2 - Dispositivo Kaimei [2]

As primeiras conferências dedicadas à energia das ondas tiveram início em 1976, em Canterbury, Inglaterra. Em 1978 realizaram-se em Heathrow e no ano seguinte, em Edimburgo. Três anos depois realizou-se o primeiro Simpósio na Utilização de Energia das Ondas, em Trondheim, Noruega. Esta última ocorreu no mesmo ano em que o governo Britânico reduziu os fundos de investimento para a energia das ondas.

Em 1985, a Noruega passou à fase de conceção de dispositivos, com a construção de dois protótipos na linha de costa junto à cidade de Bergen. Um teria 350 kW de potência nominal e outro 500 kW. Nos anos seguintes e até ao início da década de 90, na Europa, a atividade relacionada restringiu-se apenas ao nível académicos (trabalhos e artigos sobre o tema) até 1991, quando se instalou um protótipo de uma coluna de água oscilante ao largo da ilha de Islay, Escócia, com uma potência nominal de 75 kW [2].

O diagrama temporal seguinte ilustra os marcos mais importantes no desenvolvimento da mesma ao longo dos anos.

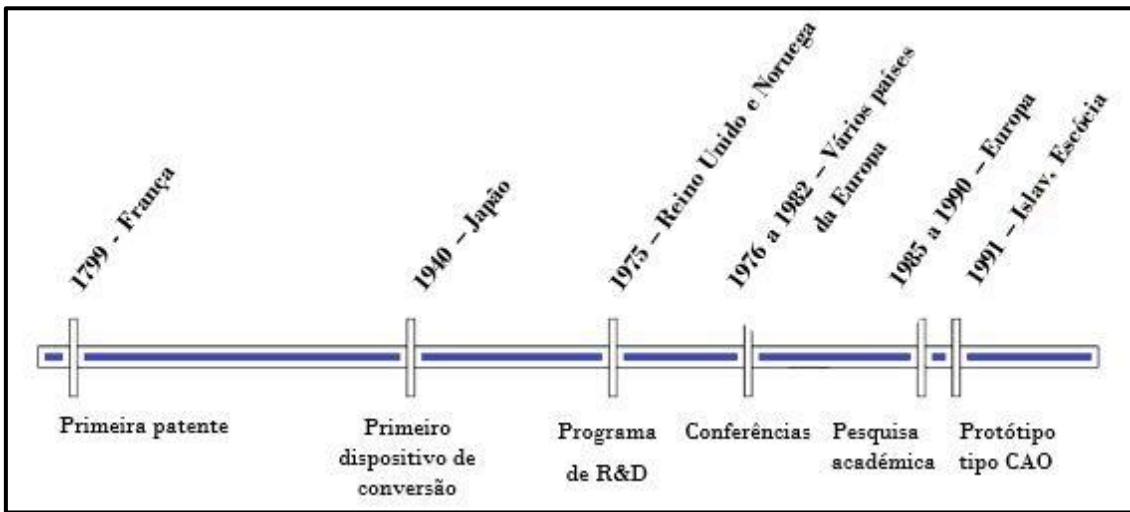


Figura 2.3 - Pontos relevantes no desenvolvimento da energia das ondas até início dos anos 90 do séc XX

Os principais problemas relacionados com este aproveitamento são intemporais até à data, e passam pela capacidade de resistência dos equipamentos às adversidades provocadas pela exposição ao mar, custos de construção e manutenção e também a necessidade de garantir um menor impacte ambiental possível. A geografia associada aos locais onde se deverá apostar neste tipo de aproveitamento é relativa, pois será vantajoso que a instalação esteja exposta a zonas onde a força do vento seja mais significativa [3].

“Apart from the mainstream energy technologies, some new, renewable energy technologies have also emerged in the last decade and have attracted the researcher community. These renewable technologies are still not widely demonstrated or their commercialization level is limited. Many are on the horizon but some have more potential than other renewable energy technologies” [3]

À escala mundial o aproveitamento da energia proveniente das ondas tem pouco impacto na contribuição para o mix energético, sendo que o desenvolvimento de equipamentos que sejam rentáveis em termos de construção e posterior rendimento encontram-se ainda em fase de testes. A energia das ondas faz parte de uma geração de energias renováveis emergente, como representa a figura seguinte.

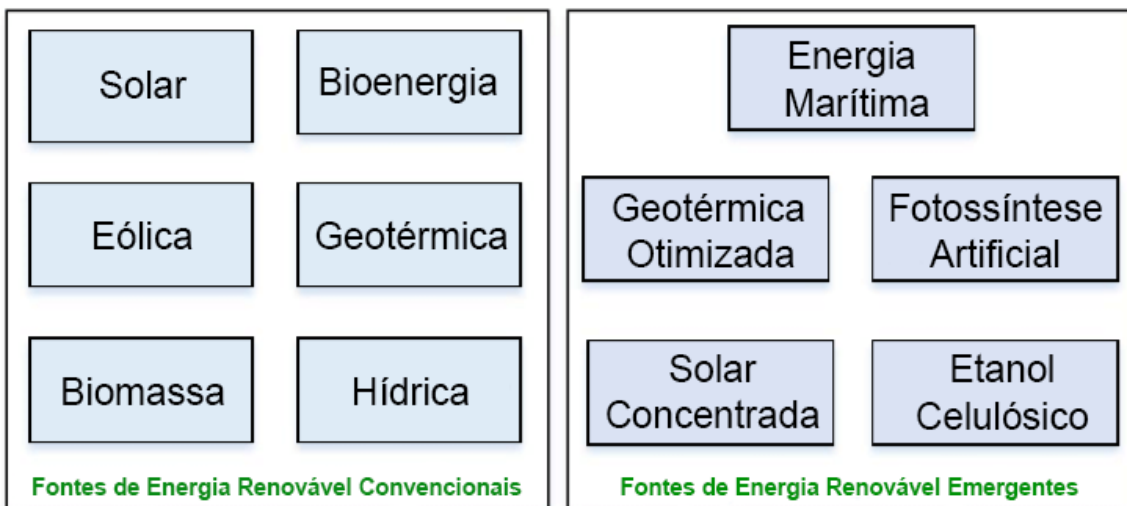


Figura 2.4 - Fontes de energia renovável convencionais e emergentes

A energia passível de ser aproveitada do mar, que compreende não só as ondas, mas também as marés e as correntes, fazem parte do conjunto de recursos renováveis que estão ainda pouco explorados em comparação com a energia renovável convencional, à esquerda da imagem [2]. Ainda assim, tal fator não inviabiliza que os tipos de aproveitamento ainda em desenvolvimento não possuam um potencial semelhante aos mais desenvolvidos.

Estima-se que cerca de 76% da população portuguesa reside no litoral [3], o que constitui um forte motivo para a existência de um esforço no estudo de soluções que possam suprimir as necessidades energéticas com recurso à energia das ondas.

À semelhança de outros países já referidos, também em Portugal foi testado um dispositivo do tipo coluna de água oscilante. Este foi instalado em 1999 na Ilha do Pico, Açores, tendo sido a primeira central experimental, a nível mundial, a estar ligada à rede de energia. Em Abril de 2019 foi salientado em Bruxelas, na conferência *Áreas costeiras, Ilhas, Rios e Mares*, a análise do potencial dos Açores como local para futuros estudos pelo Centro Internacional de Investigação do Atlântico [4].

Para além do exemplo anterior, foram testados outros equipamentos distintos em termos de tecnologia utilizada. O quadro seguinte ilustra a localização, o equipamento de conversão utilizado, a potência instalada e o ano de implementação de alguns dos protótipos que chegaram à fase de instalação no terreno [3].

Tabela 2.1 – Protótipos de equipamentos testados

Localização	Equipamento de conversão	Potência [MW]	Ano de implementação
Ilha do Pico	CAO	0.40	1999
Póvoa de Varzim	Archimedes Wave Swing	2	2004
Peniche	Waveroller	0.10	2007/2008
Aguçadoura	Pelamis	0.75	2008
Orkney Islands, Irlanda	Waveroller	0.30	2009
Port Adelaide, Austrália	CAO	1	2013

Os equipamentos têm vindo a evoluir ao longo dos anos, sendo a coluna de água oscilante o mais utilizado na generalidade da informação recolhida para o preenchimento da tabela. Esta tecnologia, assim como a Pelamis, são abordadas no seguimento do presente capítulo.

Archimedes Wave Swing é um corpo oscilante submerso fixo no fundo do mar. Na parte superior existe uma caixa de ar que se move em simultâneo com o movimento das ondas e na parte inferior está o mecanismo que inclui uma micro-turbina.

O Waveroller é um equipamento que opera junto à costa a uma profundidade de 8 metros a 20 metros. É constituído por um painel articulado com uma parte fixa no fundo do mar e que se desloca para a frente e para trás de acordo com o movimento das ondas. Este pode atingir toda a profundidade, desde o fundo do mar até à superfície.

2.2 Equipamentos de conversão

Existe um determinado conjunto de critérios que permitem classificar o equipamento que é utilizado num aproveitamento de energia das ondas, sendo dos mais significativos a distância à linha de costa [6]. Este subcapítulo descreve um exemplo para cada uma das diferentes distâncias.

2.2.1 Distância à linha de costa

Consoante a distância a que é instalado em relação à linha de costa, assim se designa o equipamento como fixo, próximo ou afastado da costa. A figura seguinte ilustra o critério mencionado.

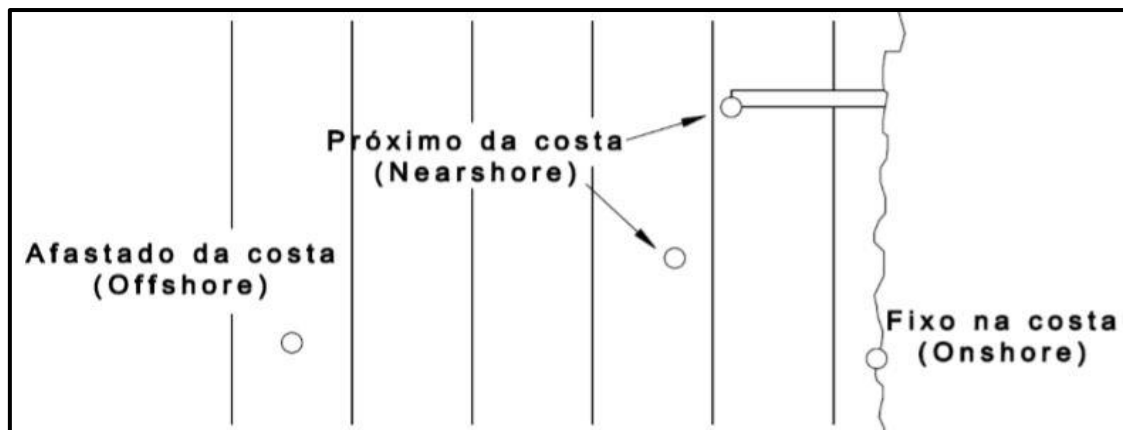


Figura 2.5 – Designação do equipamento de conversão em função da distância à linha de costa [18]

Quando situados na costa ou *onshore*, são geralmente colocados em águas pouco profundas. Devido à sua localização, apresentam relativa facilidade de manutenção mas ainda assim, a instalação nesta localização está dependente da geomorfologia do local onde se pretende implementar [5].

Como mostra a figura anterior são considerados próximos da costa ou *nearshore* quando instalados em zonas cuja profundidade seja superior a 20m. Este não apresenta distância significativa à linha de costa.

Quando se trata de instalações em águas mais profundas, que podem estar a uma distância de quilómetros à linha de costa, são considerados dispositivos *offshore* [5]. A manutenção destes equipamentos é bastante mais dispendiosa, pois ao contrário das anteriores, os trabalhos de instalação são realizados a longa distância, o que exige gastos de transporte, a necessidade de se operar em profundidade, entre outros fatores.

2.2.2 Equipamentos utilizados na costa

Coluna de água oscilante

O Sistema de CAO consiste numa estrutura parcialmente aberta onde existe uma câmara cujo interior é parcialmente submerso.

Quando a onda entra pela câmara a água que já se encontra no interior da mesma ascende. Por ação oscilatória provoca o deslocamento de uma massa de ar, o que vai fazer com que haja movimento das pás da turbina que se encontra no nível mais superior da estrutura [7].

No retorno da onda ao mar, dá-se de novo a passagem de ar pela turbina, sendo que desta vez é no sentido oposto ao inicial. As turbinas utilizadas são por norma do tipo Wells, mantendo assim

o mesmo sentido de rotação independentemente do sentido de escoamento, como é visível no esquema da figura.

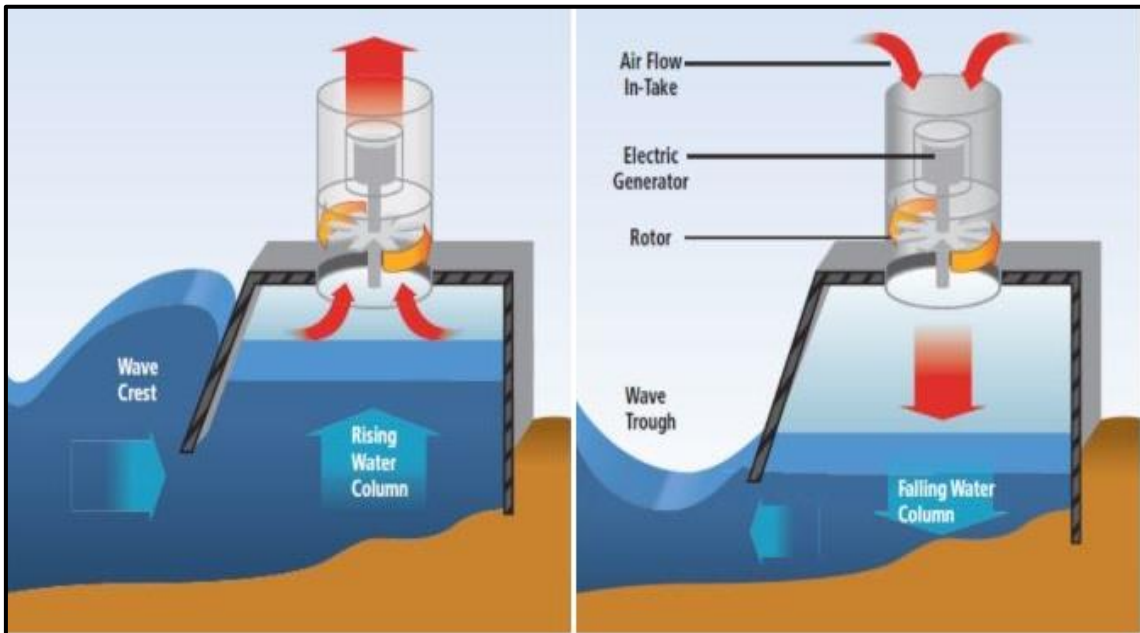


Figura 2.6 – Esquema de funcionamento de um Sistema CAO *onshore* (adaptado) [8]

2.2.3 Equipamentos utilizados junto à costa

Tap Chan

Neste tipo de aproveitamento a água entra para o interior de um reservatório. Este está situado a uma cota superior ao nível médio das águas do mar, armazenado assim energia potencial. A conversão em energia cinética dá-se pelo escoamento da mesma através de turbina adequada para aproveitamento de baixa queda, sendo por norma do tipo Kaplan [9].

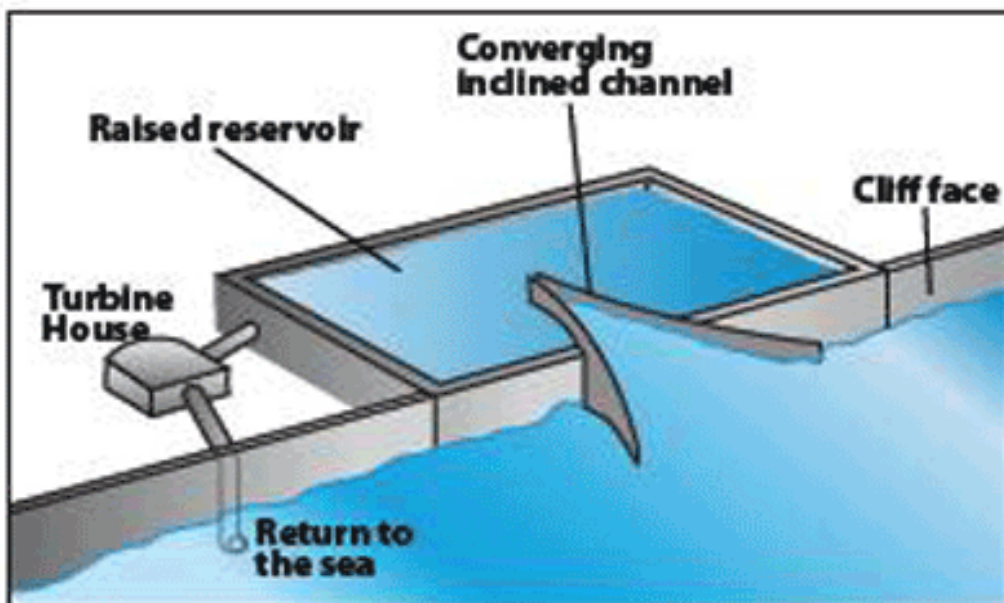


Figura 2.7- Elementos constituintes de um aproveitamento Tap Chan [10]

Ainda que seja um dispositivo que se situa relativamente adjacente à linha de costa, o canal que direciona a água para o reservatório pode ter profundidades superiores a 10m, o que já se considera *nearshore*.

2.2.4 Equipamentos afastados da costa

Pelamis

Estes dispositivos são colocados a flutuar, ficando semi-submersos, e no sentido de propagação das ondas, o que facilita a sua oscilação com o movimento natural. São constituídos por quatro módulos cilíndricos, independentes entre si, que se encontram unidos por uma estrutura articulada e flexível [5]. A ação das ondas provoca um movimento ondulatório mais acentuado nas juntas das quatro estruturas [6], onde estão instaladas máquinas hidráulicas, atuadas pelo movimento angular entre os módulos, e que por sua vez vão atuar como geradores elétricos rotativos. Os módulos medem um total de 50 metros por 3,5 metros de diâmetro [11].

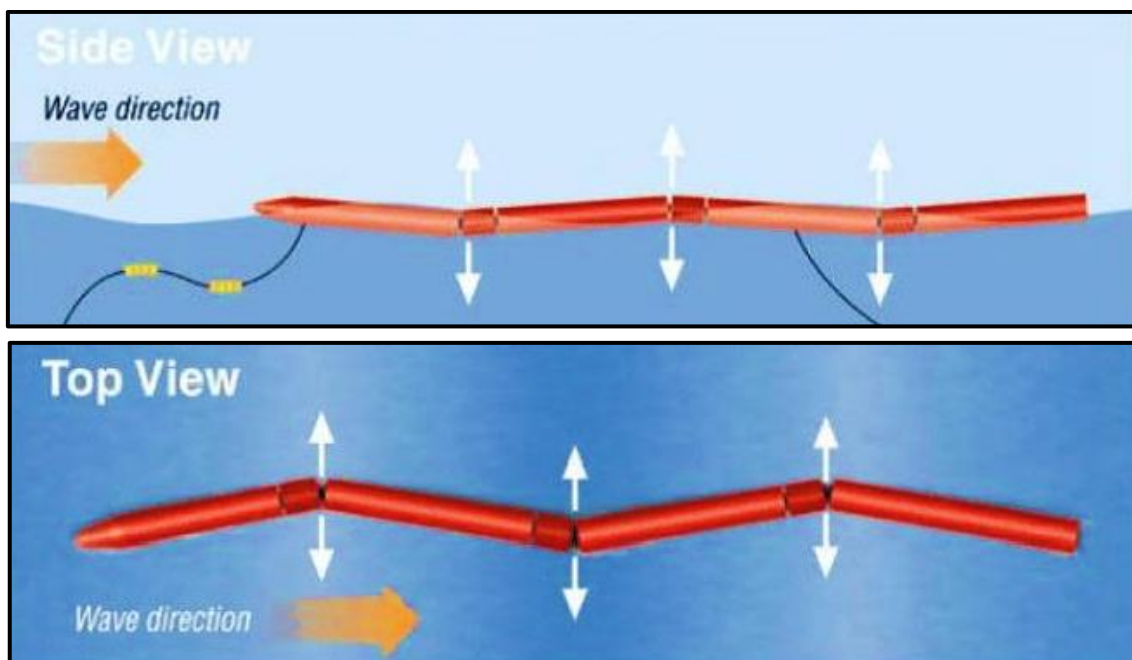


Figura 2.8 - Vistas lateral e de topo [12]

2.3 Tipos de turbinas

A turbina a utilizar num aproveitamento de energia das ondas depende do dispositivo e do modo como o mesmo funciona. Em alguns casos, é importante que a mesma se adapte a mais que um sentido de escoamento do fluxo de ar, o que faz com que o uso das turbinas convencionais não se torne viável.

Um dos dispositivos que carece deste tipo de turbina é a coluna de água oscilante que, como já analisado anteriormente, teve vários protótipos que chegaram a ser testados. Em 1976, Arthur Wells desenvolveu, na Universidade de Belfast, uma turbina que permitia o escoamento de fluidos em ambos os sentidos, representada na figura seguinte [13].

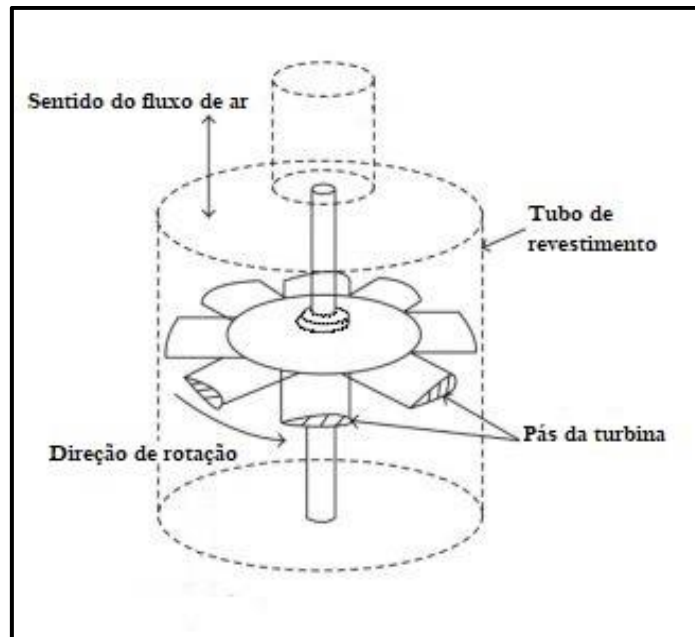


Figura 2.9 - Turbina Wells [14]

O estudo para a sua conceção teve em conta parâmetros como a geometria e o perfil das pás, de modo a maximizar o rendimento do equipamento. As pás apresentam um perfil alar, fazendo com que se mova continuamente na mesma direção, independentemente do sentido do fluxo de ar que as atravesse. No entanto face a desvantagens, como o rendimento depender do caudal que por ela passa e elevados níveis de ruído resultante da elevada velocidade de rotação, foram propostos outros modelos [15].

Consoante a disposição das pás, assim é o trajeto do fluido. No caso da turbina Wells, trata-se de uma turbina radial, visto que o escoamento se dá em plano perpendicular ao eixo de rotação. Para além desta, podem ainda ser axiais, mistas ou tangenciais [13].

Protótipos como o AquaBuOY e o Oyster, funcionaram com recurso à turbina Pelton [14]. Esta caracteriza-se pelo escoamento do fluido ser feito perpendicularmente ao eixo de rotação e predominantemente na direção tangencial [16]. No caso de o escoamento ser paralelo ao eixo, é utilizada uma turbina Francis e Deriaz, para uma direção de escoamento mista.

Para além das turbinas mencionadas tem havido um esforço contínuo em encontrar outras soluções. Em 2016 foi criado o Projeto OPERA, financiado pela União Europeia, cuja turbina utilizada no projeto foi concebida e testada em Portugal. O protótipo, do tipo CAO, foi instalado no litoral de Espanha e inclui duas turbinas radiais. No geral, o objetivo do projeto é de reduzir os custos operacionais relativos ao equipamento em 50% e aumentar a eficiência relativamente à turbina Wells [17,18].

2.4 Tipos de geradores elétricos

Neste subcapítulo são apresentadas algumas máquinas elétricas já existentes, referindo-se também, em alguns casos, as respectivas aplicações. São ainda referenciados os tipos de ímanes que podem ser utilizados em máquinas elétricas.

2.4.1 Máquina Assíncrona

A máquina assíncrona pode também ser designada por máquina de indução, uma vez que as correntes do indutor produzem as correntes do induzido. O rotor pode ser bobinado ou em gaiola de esquilo, tendo este último como condutores um conjunto de barras soldadas nas extremidades. [19]

Ao longo dos anos houve melhorias no que diz respeito aos materiais usados na sua concepção, mas ainda assim o princípio de funcionamento manteve-se inalterado. Esta pode ser utilizada na indústria visto ser robusta, de preço acessível e não necessitar de manutenção frequente.

2.4.2 Máquina Síncrona

A máquina síncrona opera à velocidade de sincronismo, implicando que a velocidade de funcionamento do rotor seja igual à velocidade dos campos magnéticos do rotor e do estator, o que resulta em um binário constante.

As máquinas síncronas podem ter diferentes constituições, conforme a finalidade da sua utilização. O indutor pode ser cilíndrico ou de polos salientes. [19]

2.4.3 Máquina Síncrona de Fluxo Axial com ímanes permanentes

Nestas máquinas o rotor é um disco que gira face ao estator, criando um campo magnético. O aumento da densidade de binário é proporcional ao aumento do número de polos. [20]

O campo magnético criado é paralelo ao eixo de rotação, característica que distingue esta máquina das restantes. Tendo um número de ímanes superior ao habitual, o custo associado à aquisição desta máquina pode ser mais elevado.

2.4.4 Máquina Síncrona de Fluxo Radial com ímanes permanentes

O espaço ocupado quer pelo rotor quer pelo estator é relativamente menor, comparado com a máquina anterior. Assim, existe algum cuidado com o espaço disponível para o entreferro e para os enrolamentos do estator [21].

Esta tem sido bastante utilizada em aplicações industriais, tendo uma concepção menos dispendiosa que a axial. O processo de concepção de uma máquina síncrona de fluxo radial de ímanes permanentes pode ser o mesmo que uma máquina de indução, visto que as partes constituintes de ambas são semelhantes.

Existem diferentes configurações para esta máquina, para além daquela que é utilizada nas típicas máquinas elétricas. Ao invés de ter um rotor interno, pode ter um estator interno ou ainda um estator e dois rotores, sendo que o primeiro fica no meio dos dois últimos.

O binário por si produzido é elevado, assim como os valores de potência. No virar do século, a ABB, empresa multinacional relacionada com tecnologias de energia e automação, introduziu a utilização de máquinas de ímanes permanentes em potências de até 5 MW [22].

As máquinas de fluxo radial têm o seu processo de concepção otimizado e estabelecido em relação às de fluxo axial visto serem utilizadas há mais tempo, exigindo o fabrico das últimas um maior investimento [23].

2.4.5 Ímanes Permanentes

A principal função dos ímanes permanentes é a produção de excitação magnética em alguns exemplos de máquinas rotativas, o que elimina a necessidade do uso de enrolamentos de excitação. Os materiais magnéticos duros têm ciclos largos, o que faz com que a área da curva B-H seja grande. As suas propriedades são descritas nos parágrafos seguintes.

Os alnicos são constituídos por Alumínio, Níquel, Cobalto e Ferro e são de utilização versátil e preço acessível. Alguns têm elevada remanescência B_r e baixa coercividade H_c , outros comportam-se e de forma contrária. Para além das máquinas elétricas, podem também ter outras utilizações, como altifalantes. No entanto, apresentam como desvantagem a fraca resistência.

Existem ímanes cuja constituição inclui os chamados elementos terras-raras. É o caso do Samário-Cobalto. Caracterizam-se pela elevada coercividade e baixa remanescência, apresentando um custo significativamente mais elevado. Ainda assim apresenta uma elevada resistência à corrosão e às elevadas temperaturas, na ordem dos 300 °C [24,25].

Os ímanes de Neodímio Ferro Boro apresentam boa estabilidade quando usados em sistemas elétricos, o que se deve às boas propriedades magnéticas. Têm elevada remanescência e alta coercividade, fator que implica um custo de aquisição mais elevado. Ao contrário dos ímanes de samário-cobalto, apresentam fraca resistência à corrosão [24,25].

3 Estado de Arte

Uma parte significativa dos motores de ímanes permanentes são do tipo de fluxo radial. Estes têm um método de fabrico bem estabelecido e bons rendimentos [26].

A primeira patente de um alternador de fluxo radial foi registada em 1837 por Thomas Davenport, o qual passou a ser a solução mais aceitável para problemas de conversão de energia elétrica da época [27].

As máquinas podem ter os polos lisos no estator e no rotor, ou ter polos salientes numa das partes. Há máquinas com polos salientes em ambas as partes (máquinas de polos duplamente salientes), com as quais se conseguem propriedades que as distinguem das restantes.

A topologia pretendida para o fluxo em máquinas de ímanes permanentes impõe a posição para a colocação dos ímanes. Para fluxo radial, o eixo dos ímanes é radial em relação à máquina, muitas vezes encastrados nas peças polares salientes. Para fluxo azimuthal, os ímanes normalmente são embutidos no estator, com eixo na direção tangencial. Nas máquinas de fluxo axial, normalmente “em panqueca”, os ímanes são encastrados no rotor ou no estator, com os eixos paralelos a eixo da máquina.

As máquinas de polos duplamente salientes resultaram da resolução de problemas associados com os motores de relutância variável. Nos anos 90 foram concebidos motores de baixa e média potência cujo estator ou rotor continha ímanes permanente. Estes beneficiaram do desenvolvimento da microeletrónica e da eletrónica de potência, visto que a comutação dos seus circuitos pôde passar a ser controlada por microprocessadores [28]. A figura seguinte ilustra, em corte, um exemplo da máquina referida, apresentando esta quatro polos no rotor e seis no estator.

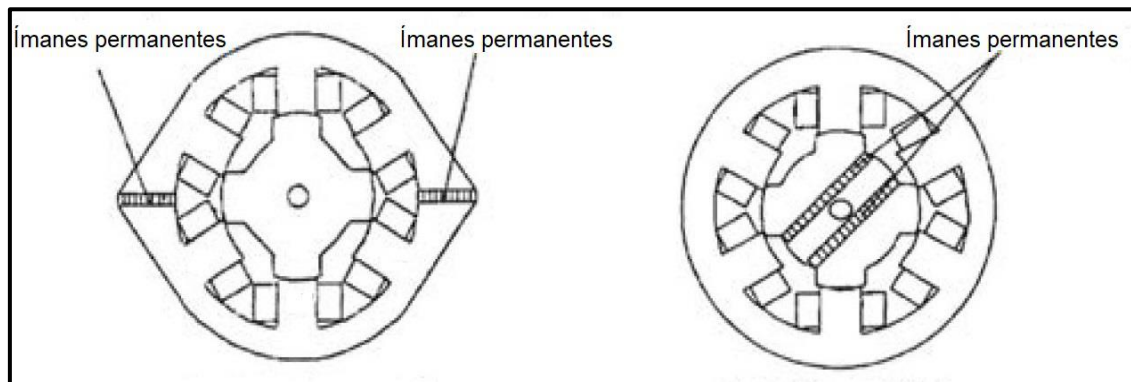


Figura 3.1 - Exemplo de disposição dos ímanes no estator e no rotor [29]

Já em meados do séc. XXI foram efetuados estudos de máquinas que contêm ímanes permanentes com topologia semelhante, variando também o equipamento de conversão de energia renovável em que estão inseridos.

Em [30], publicado em 2001, foi efetuado um estudo que comparou o desempenho de uma máquina de fluxo radial e quatro de fluxo axial, incluindo as cinco ímanes permanentes. A primeira tem uma constituição típica, o estator possui cavas onde estão distribuídos os enrolamentos e o rotor, de forma cilíndrica, inclui os ímanes permanentes. No caso das outras máquinas, diferem entre fluxo axial com um só entreferro e fluxo axial com duplo entreferro, nos quais o estator não possui cavas.

Através de testes ao volume e peso das máquinas, conclui-se que para as máquinas de fluxo axial sem polos é necessária uma maior quantidade de material magnético. Ainda assim, o peso do ferro

que é necessário no caso das máquinas de fluxo axial é menor que no caso das máquinas de fluxo radial, o que faz com que as primeiras tenham um tamanho inferior.

Em [31], publicado em 2004, a viabilidade da utilização de uma máquina de polos duplamente salientes em equipamentos de aproveitamento eólico é confirmada em resultados experimentais e simulações assistidas por computador.

A máquina é constituída por oito polos no rotor e doze no estator, como é visível na figura. No estator estão embutidos quatro ímanes de Neodímio Ferro Boro. O rotor não inclui ímanes nem bobines, o que reduz o seu custo e simplifica a sua conceção.

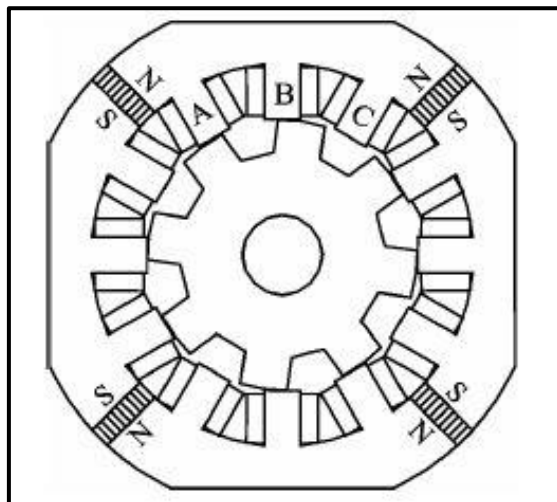


Figura 3.2 – Máquina com oito polos no rotor e doze no estator [31]

De dimensões relativamente reduzidas, o diâmetro interno do rotor é de 75 milímetros e tem um entreferro de 0.45 milímetros em relação ao rotor. Este funciona entre 330 rpm e 700 rpm, podendo assim ser adaptado a um sistema de conversão de energia das ondas.

Num artigo publicado em 2009, [32], encontra-se analisado um gerador de fluxo radial de dois rotores, aplicável a um aerogerador de média potência. A sua configuração e respetivas medidas foram otimizadas com recurso a um programa de elementos finitos.

É afirmado que o recurso a duplo rotor tem algumas vantagens, como a redução de perdas no núcleo o que pode compensar o recurso a uma grande quantidade de ímanes, que faz aumentar o custo da máquina.

É constituída por 2 rotores e 32 pares de polos e um entreferro de 8 milímetros, um valor elevado relativamente a outras referências. A sua potência nominal é de 4.2 kW com funcionamento a 300 rpm.

Foi concluído que a utilização de ímanes mais dispendiosos teve influência para atingir os resultados que eram expetáveis nos ensaios práticos, tendo os mesmos ficado abaixo do custo total que era expetável.

Em 2012, [33], foi testada uma máquina de fluxo radial de ímanes permanentes com recurso a um programa de elementos finitos desenvolvido na Universidade de Berlim. É constituída por quatro polos de Neodímio Ferro Boro no rotor e um estator com três fases, como é percetível na figura seguinte.

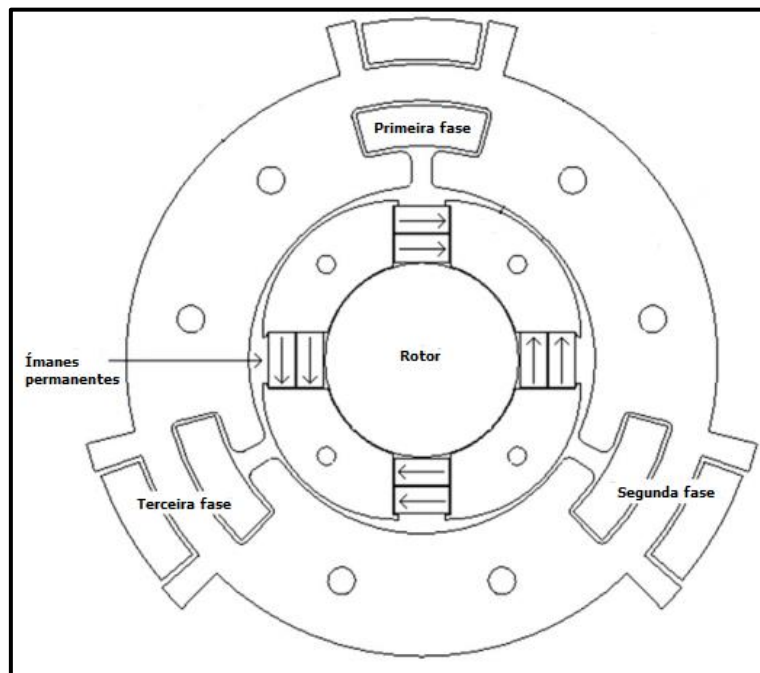


Figura 3.3 – Máquina com quatro polos no rotor e três fases no estator [33]

Cada um dos ímanes tem uma altura de 6 milímetros e o diâmetro da máquina é de 120 milímetros. Com recurso a uma série de equações baseadas no tipo de gerador e materiais constituintes, foi possível determinar que o mesmo forneceria uma potência de 810 W a 2850 rpm.

Em 2014, [34], foi publicado um artigo que analisou um gerador de ímanes permanentes de fluxo radial aplicável a um aerogerador.

Este gerador foi concebido no sentido de ser economicamente viável, possuindo um grande número de cavas quer no rotor quer no estator e 8 ímanes na superfície do rotor, com 5.5 milímetros de espessura. O estator tem 245 milímetros de diâmetro e 1 milímetro de entreferro com o rotor. A sua velocidade de funcionamento é de 400 rpm.

Em [35], de 2016, foi publicado um artigo onde é ensaiada uma máquina híbrida de polos duplamente salientes.

Um dos problemas associados às máquinas de polos duplamente salientes está relacionado com a dificuldade em controlar a densidade de fluxo no entreferro, o que se deve ao facto de a única origem de fluxo serem os ímanes do estator. Consequentemente, existe dificuldade em controlar o mesmo. Por conseguinte, foram propostas alterações que deram origem a uma máquina com características melhoradas, que foi ensaiada e comparado com a original

A figura seguinte compara a disposição de ambas as máquinas. Foi implementado um maior número de ímanes permanentes, com dimensões superiores, o que alterou o aspeto do estator. Estes foram colocados de modo a que cada polo e cava estivessem entre um par de ímanes, o que aumentou em duas vezes o número de ímanes em relação à disposição inicial.

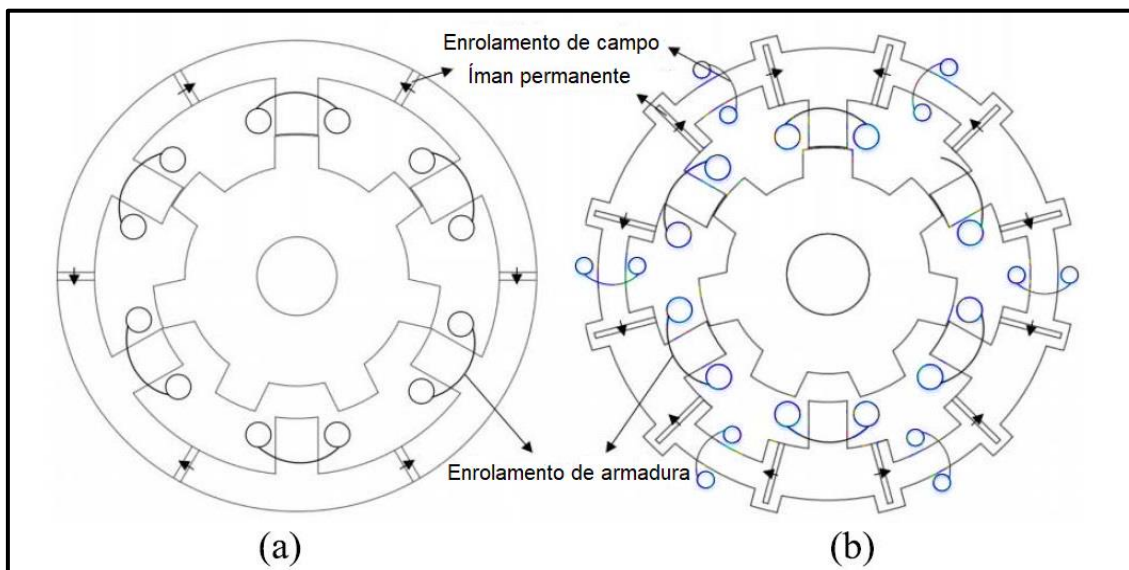


Figura 3.4 – Máquina original (a) e proposta de máquina (b) de [35]

Ainda que a topologia seja semelhante, diferem no fato de em (b) serem introduzidos enrolamentos de excitação de corrente contínua, o que torna possível a regulação da densidade de fluxo no entreferro, problema referido anteriormente, que se verifica em (a).

Este artigo baseia-se numa ideologia semelhante a [36] onde, para além de serem testadas máquinas com diferentes números de polos, são acrescentados ímãs no estator, tendo algumas das mesmas semelhanças com a fig. 3.4 a).

Após ensaios às máquinas, foi concluído que o modelo proposto beneficia de uma maior densidade de fluxo do entreferro, a temperatura em pontos específicos da máquina não varia muito quando comparada com o modelo original e que existe um maior binário de saída por quilograma de ímã permanente.

Já em 2018 foi publicado um artigo sobre um gerador de larga escala utilizado na conversão de energia das ondas [37]. Este continha modificações na parte da engrenagem e cuja utilização previa uma redução no custo e manutenção da máquina e a viabilidade de utilização de geradores de larga escala.

Os autores do presente artigo pensaram ser mais vantajoso, relativamente a artigos anteriores relacionados com o mesmo tema, o estator encontrar-se na parte interna e o rotor na parte externa, o que, de acordo com [38], é usado quando se necessita de um maior binário mas com baixas velocidades, tendo também vantagens em termos de refrigeração.

Com a utilização desta disposição de elementos, a potência fornecida pelo gerador prevê-se nos 10 kW a uma velocidade de rotação relativamente reduzida de 30 rpm.

4 Dimensionamento dos geradores

O processo de escolha do gerador a dimensionar passou pela leitura de artigos, alguns dos mesmos mencionados no capítulo anterior, cujas máquinas reunissem os requisitos pretendidos para posterior dimensionamento.

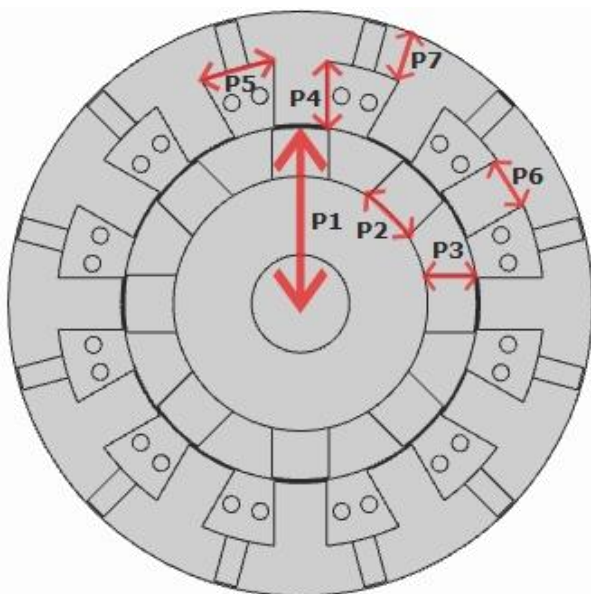
Por norma, existem vantagens em ter um gerador cujo número de pares de polos seja elevado pois o movimento das ondas conduz a uma moderada velocidade de rotação. No entanto, e dependendo do dimensionamento do sistema de aproveitamento de energia (*Power Take Off*, PTO), há a possibilidade de se utilizar geradores com menos polos, desde que a sua velocidade de rotação seja suficiente para haver indução eletromagnética. O PTO é o mecanismo que extrai energia das ondas e varia consoante o dispositivo. Em [39], embora com uma configuração diferente daquele a ser testado neste projeto, o gerador para aproveitamento de energia das ondas testado tem seis polos.

Deste modo, a fig. 3.4 b) serviu de inspiração para a conceção de um dos geradores, no qual é possível haver controlo do fluxo dos ímanes devido à presença de bobinas de excitação no estator. O outro gerador foi construído e pensado de raiz, com base na pesquisa literária e nos conhecimentos adquiridos durante o estudo para a presente dissertação.

Assim, para o sistema elétrico do dispositivo de conversão, foram escolhidas duas máquinas, ambas de polos duplamente salientes de fluxo radial. Estas foram já alvo de ensaios, embora não estejam diretamente relacionados com o seu desempenho enquanto geradores utilizados em aproveitamento de energia das ondas.

Tendo ambos os geradores fluxos radiais o estator pode ser feito de ferro laminado por um empacotamento de discos. O uso de empacotamento de chapas reduz as correntes de Foucault e por isso reduz as perdas e, conseqüentemente, o aquecimento. Relativamente aos ímanes que estão embutidos em ambos os geradores, estes vão suprimir a necessária excitação magnética do gerador.

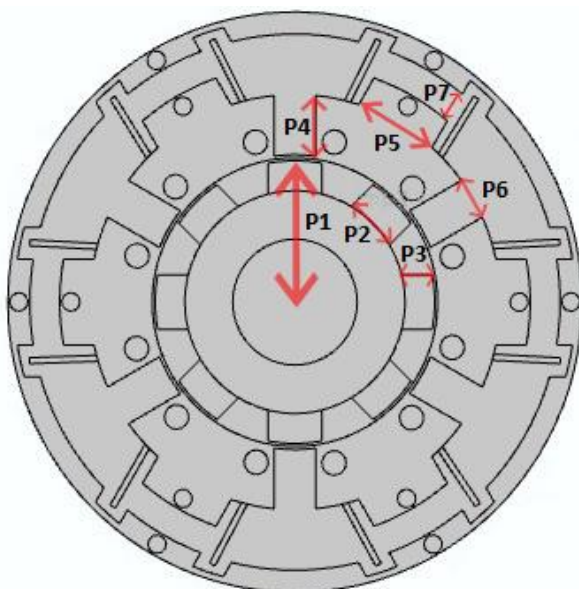
A figura seguinte ilustra o pré-dimensionamento do gerador de baixa rotação e tabela de medidas, em milímetros. Com base em artigos sobre o tema, [30] e [35], foram obtidas as medidas utilizadas e foi decidido que o indutor teria oito polos e o induzido doze, a fim de reduzir a complexidade do dimensionamento no programa de elementos finitos ao mesmo tempo que se obtém um gerador passível de funcionar a baixas velocidades. O estator e o rotor são constituídos por ferro, os ímanes por Neodímio Ferro Boro e a envolvente é ar.



P_1	Raio externo do rotor	54 mm
P_2	Largura dos polos do rotor	15 mm
P_3	Altura dos polos do rotor	16 mm
P_4	Altura dos polos do estator	20 mm
P_5	Largura da cava do estator	23 mm
P_6	Largura dos polos do estator	16 mm
P_7	Altura da ranhura do estator	14 mm

Figura 4.1 – Pré-dimensionamento do gerador de baixa rotação (a) e tabela de medidas (b)

A figura 4.2 ilustra o pré-dimensionamento do gerador de elevada rotação e respetivas medidas. Para além das bobinas, o circuito induzido inclui seis polos, seis enrolamentos de excitação de corrente contínua e seis pares de ímanes permanentes. Por sua vez, o indutor inclui oito polos. Para a obtenção do desenho, recorreu-se a um software de elementos finitos. A disposição adotada para os polos do indutor faz com que este tenha um entreferro radial.



P_1	Raio externo do rotor	47 mm
P_2	Largura dos polos do rotor	18 mm
P_3	Altura dos polos do rotor	10 mm
P_4	Altura dos polos do estator	20 mm
P_5	Largura da cava do estator	28 mm
P_6	Largura dos polos do estator	14 mm
P_7	Altura da ranhura do estator	10 mm

Figura 4.2 – Pré-dimensionamento do gerador de elevada rotação (a) e tabela de medidas (b)

Como descrito no capítulo 2, existem vários materiais que podem ser usados na constituição dos ímanes permanentes. A escolha dos mesmos está, entre outros, diretamente relacionada com a temperatura de funcionamento máxima da máquina, visto que estes perdem propriedades se expostos a sobreaquecimento.

Como tal, o gerador terá os seus ímanes constituídos por Neodímio Ferro Boro, sendo estes os mais estáveis a nível magnético e os mais confiáveis para utilizar em sistemas elétricos [37].

Relativamente ao sistema mecânico, foram apresentadas algumas soluções no capítulo 1. A generalidade funciona a uma baixa velocidade de rotação, o que obriga então à utilização de geradores elétricos especiais. Assim, o aproveitamento ao qual será aplicado o gerador poderá ser num dispositivo flutuante ou submerso.

Dadas as alterações efetuadas à geometria do gerador da fig. 3.4, alguns dos valores teóricos apresentados em [35], como a velocidade nominal, não podem ser tidos em conta. A tabela seguinte ilustra os parâmetros cujos valores não foram afetados pela alteração na geometria do gerador.

Tabela 4.1 - Valores relativos a parâmetros do gerador de baixa rotação

Entreferro	Velocidade nominal	Fator de espaço da bobine
0.45 mm	360 rpm 6 rps	0.5

A figura seguinte ilustra as linhas de fluxo criadas pelos ímanes que estão embutidos no estator, cuja orientação das linhas é definida pelos mesmos. Estas têm direção perpendicular ao posicionamento dos ímanes e criam um circuito fechado cuja direção é representada pelas setas de vermelho.

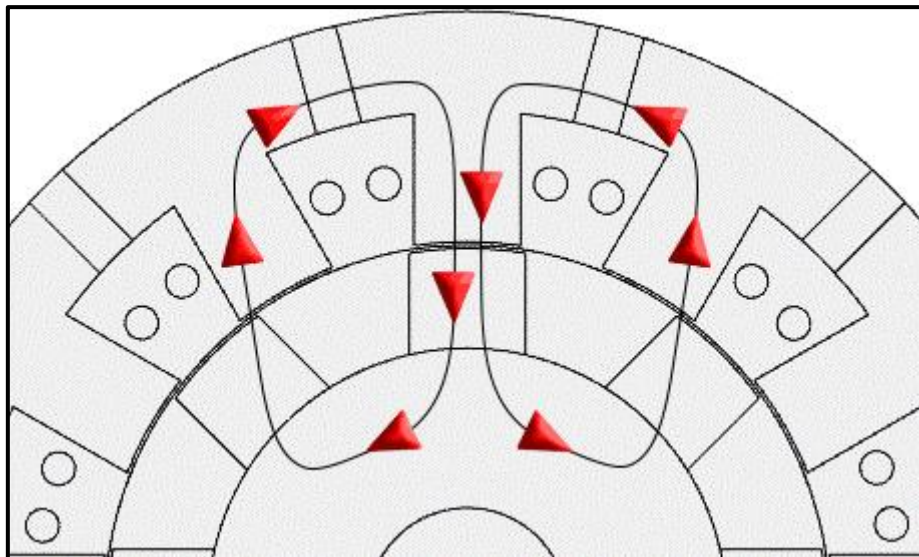


Figure 4.3 – Representação das linhas de fluxo no gerador de baixa rotação

Do mesmo modo, existem já alguns valores teóricos previamente definidos para o gerador de elevada rotação, representados na tabela seguinte.

Tabela 4.2 - Valores relativos a parâmetros do gerador de elevada rotação

Entreferro	Velocidade nominal	Fator de espaço da bobine
0.55 mm	2000 rpm 33.3 rps	0.5

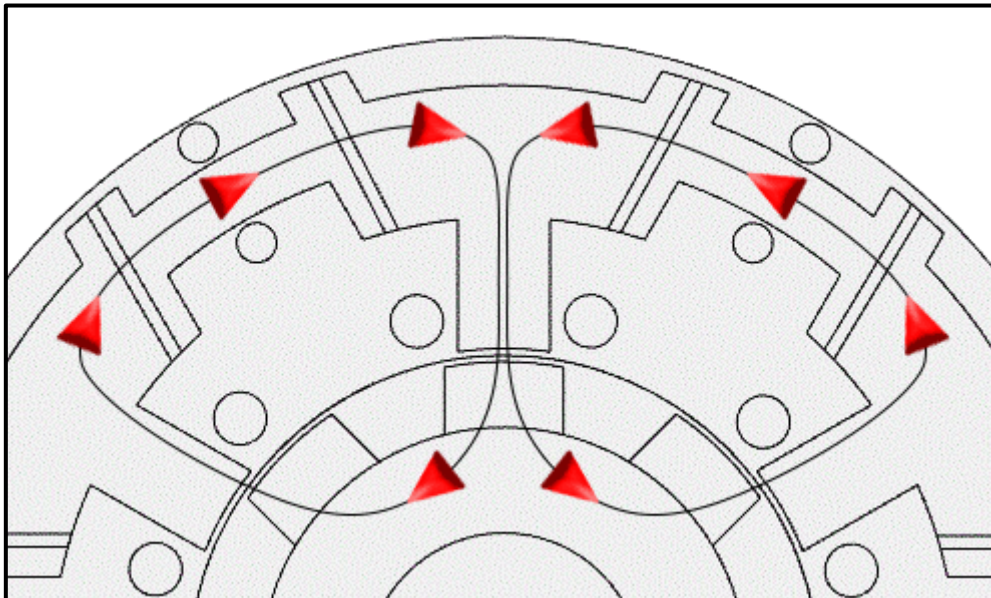


Figura 4.4 – Representação das linhas de fluxo no gerador de elevada rotação

Analisando a curva de desmagnetização do material utilizado em [35], o NdFe 35, obter-se-ia o valor da coercividade, representada na fig. 4.5.

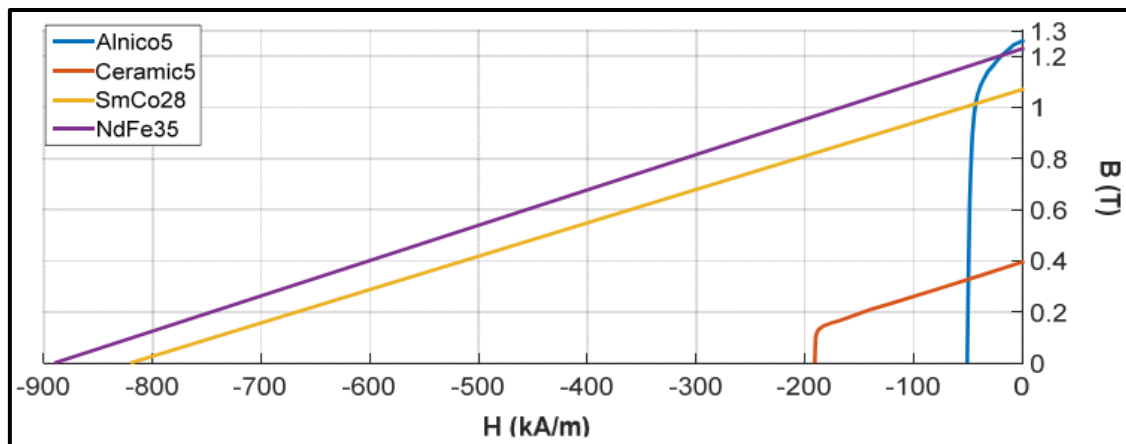


Figura 4.5 - Curva de desmagnetização de vários materiais [40]

Na peça polar do estator passam linhas de força que vêm da esquerda e outras da direita. Estas em geral encontram caminhos não simétricos visto que a posição relativa dos dentes do rotor em relação ao estator não é simétrica de um lado e do outro do polo do estator.

Por outro lado, o fluxo total na peça polar é a soma dos fluxos canalizados pelas linhas da esquerda e da direita. Isto conduz a um conjunto de equações relativamente complicadas e não é simples obter uma relação única que dê os campos nos ímanes, ao contrário do que acontece com máquinas mais simples.

O fluxo que percorre um dente do estator é constituído por linhas de força que se fecham pela direita e por linhas que se fecham pela esquerda. Estas linhas podem ser agrupadas nos fluxos Φ_p , Φ_D e Φ_E , respetivamente, sendo o fluxo no polo dado por

$$\Phi_P = \Phi_D + \Phi_E \quad (4.1)$$

Não havendo correntes presentes ao longo de cada uma destas linhas, aplica-se a Lei de Ampère.

$$\oint \vec{H} \cdot \vec{dl} = 0 \quad (4.2)$$

Desprezando a queda de tensão magnética no ferro, admitido como tendo $\mu = \infty$, a circulação do campo magnético limita-se, para cada linha, à soma dos valores de $\int \vec{H} \cdot \vec{dl}$ através de cada um dos dois entreferros atravessados pela linha e da passagem pelo íman situado no estator. A referir que na máquina que tem dois ímanes, estes são equivalentes a um só com o dobro da espessura.

Admitindo como hipótese simplificativa, ainda que seja uma simplificação excessiva, que os campos são uniformes em cada troço, vem a expressão seguinte, sendo l o comprimento do troço respetivo.

$$\int \vec{H} \cdot \vec{dl} = H \cdot l \quad (4.3)$$

No ar será $l = \delta$, que corresponde à espessura do entreferro. Na figura consideram-se três entreferros de espessuras δ_N , δ_1 e δ_2 .

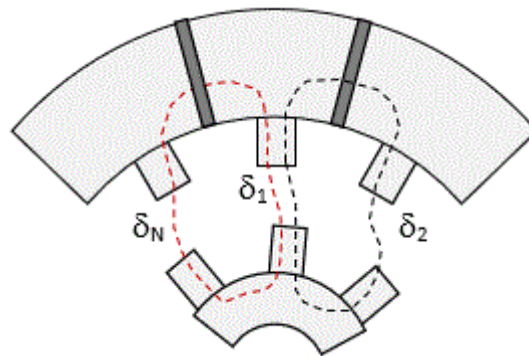


Figura 4.6 – Representação das linhas de fluxo

Considerando ainda que ϕ será Φ_D ou Φ_E , conforme a linha de fluxo considerada, e S será a área da secção atravessada por esse fluxo, ou seja, metade da área da secção do polo se utilizar Φ_D ou Φ_E , vêm as expressões (4.4) e (4.5).

$$H = \frac{B}{\mu_0} \quad (4.4)$$

$$B = \frac{\Phi}{S} \quad (4.5)$$

Sendo L_{pol} a largura do polo, e C o comprimento da máquina, que o programa de simulação automaticamente assume $C=1$ m, vem a expressão seguinte.

$$S = \frac{L_{pol} \cdot C}{2} \quad (4.6)$$

Feitas as substituições, para cada troço de ar vem que $\int \vec{H} \cdot \vec{dl} = \Phi \cdot \mathcal{R}$, em que (4.7) é a relutância de cada entreferro atravessado, e nos quais a distância δ depende da posição do rotor.

$$\mathcal{R} = \frac{\delta}{\mu_0 \cdot \frac{L_{pol} \cdot C}{2}} \quad (4.7)$$

Quanto ao íman, este trabalha na zona de desmagnetização da característica magnética do seu material, e admite-se que aí a relação B-H é linear e dada por $B = \mu_{iman} \cdot H + B_R$, onde μ_{iman} é a inclinação da característica de desmagnetização e B_R o valor da indução remanescente. Ambos estes valores são característicos dos ímanes utilizados, e em geral μ_{iman} é próximo de μ_0 , e B_R é próximo de 1 T.

Aplicando as aproximações anteriores à passagem pelo íman do estator, e sendo e a espessura do íman, S_{iman} a secção do íman atravessada pelo fluxo, ou seja, $S_{iman} = h_{iman} \cdot C$, com h_{iman} igual à altura do íman e C o comprimento da máquina, vem a expressão seguinte onde Φ é Φ_D ou Φ_E , e \mathcal{R}_{iman} é a relutância do íman, representada em (4.9).

$$\int \vec{H} \cdot \vec{dl} = \Phi \cdot \mathcal{R}_{iman} - \frac{B_R \cdot e}{\mu_{iman}} \quad (4.8)$$

$$\mathcal{R}_{iman} = \frac{e}{\mu_{iman} \cdot S_{iman}} \quad (4.9)$$

Assim, a Lei de Ampère aplicada às duas linhas consideradas resulta nas expressões que se seguem, sendo a primeira aplicada à linha da esquerda e a segunda à linha da direita. Os valores de relutância \mathcal{R}_1 e \mathcal{R}_2 são dados por (4.7), onde δ toma o valor de δ_1 e δ_2 , respetivamente, e as restantes grandezas têm o significado mencionado previamente.

$$\Phi_E \cdot \mathcal{R}_N + \Phi_E \cdot \mathcal{R}_1 + \Phi_E \cdot \mathcal{R}_{iman} = \frac{B_R \cdot e}{\mu_{iman}} \quad (4.10)$$

$$\Phi_D \cdot \mathcal{R}_1 + \Phi_D \cdot \mathcal{R}_2 + \Phi_D \cdot \mathcal{R}_{iman} = \frac{B_R \cdot e}{\mu_{iman}} \quad (4.11)$$

Considerando que o rotor roda à velocidade angular Ω , tomando $t=0$ como o instante em que os polos 1 do rotor e do estator passam um pelo outro, e sendo N_S e N_R o número de polos salientes no estator e no rotor, respetivamente, as posições angulares dos polos são representadas na imagem seguinte, considerando o polo 1 com origem do referencial.

Nas equações (4.12) a (4.14), os algarismos 1, 2 e 3 representam o número de polos no estator.

$$1 \times 2\pi/N_s \quad (4.12)$$

$$2 \times 2\pi/N_s \quad (4.13)$$

$$3 \times 2\pi/N_s \quad (4.14)$$

A posição angular, $\Omega \cdot t$, diz respeito à posição inicial do rotor. Os entreferros considerados, δ_N , δ_1 e δ_2 , são distâncias lineares entre polos do estator e do rotor que estão angularmente deslocados entre si e representados na figura seguinte.

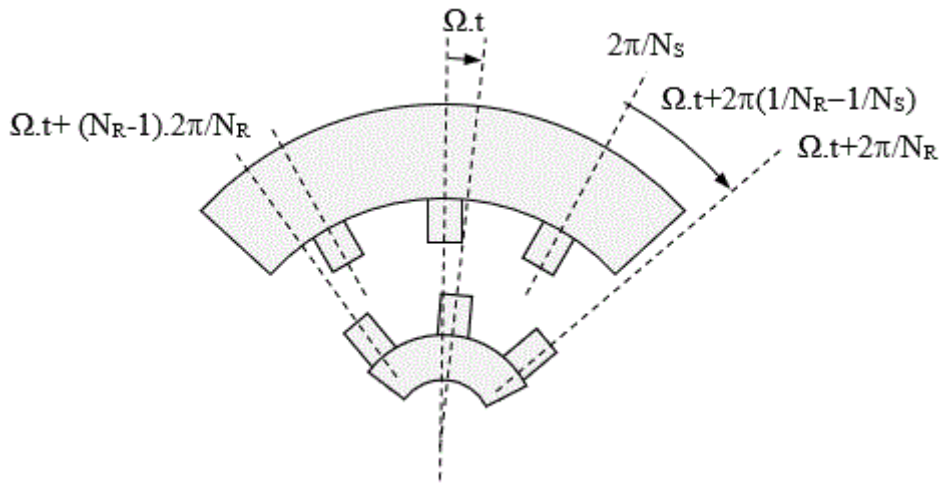


Figura 4.7 – Posições angulares do rotor e do estator

À semelhança das três equações anteriores, os algarismos 0, 1 e 2 representam o número de polos, neste caso, do rotor.

$$\Omega \cdot t \quad (4.15)$$

$$\Omega \cdot t + 2\pi/N_R \quad (4.16)$$

$$\Omega \cdot t + 2 \times 2\pi/N_R \quad (4.17)$$

As equações seguintes representam as distâncias lineares e respetivo ângulo correspondente.

$$\gamma_{N_s-1} = \Omega \cdot t + 2\pi \left(\frac{1}{N_s} - \frac{1}{N_R} \right) \quad (4.18)$$

$$\gamma_{N_1} = \Omega \cdot t \quad (4.19)$$

$$\gamma_{N_2} = \Omega \cdot t - 2\pi \left(\frac{1}{N_s} - \frac{1}{N_R} \right) \quad (4.20)$$

Quando os polos estão alinhados o comprimento de ar a ser atravessado é igual ao entreferro dimensionado, que se traduz pela diferença entre o raio interno do estator e o raio externo do rotor.

Quando um polo do rotor se encontra entre dois polos do estator, o percurso de ar será aproximadamente a distância entre dois polos do estator menos a largura de um polo do rotor, que se traduz pela expressão que se segue.

$$\delta_{max} \approx \frac{1}{N_S} \cdot 2 \cdot \pi \cdot R_{ext.rot} - L_{polo-rot} \quad (4.21)$$

Usando $\delta = \delta_{min}$ e $\delta = \delta_{max}$ em (4.7), resulta $\mathcal{R} = \mathcal{R}_{min}$ e $\mathcal{R} = \mathcal{R}_{max}$, respectivamente.

Quando os ângulos γ entre polos forem nulos, ocorre a relutância mínima. Portanto a relutância varia com uma periodicidade de $\frac{2\pi}{N_R}$.

Admitindo por simplicidade que a variação segue um andamento sinusoidal, será

$$\mathcal{R} = \frac{\mathcal{R}_{max} + \mathcal{R}_{min}}{2} + \frac{\mathcal{R}_{max} - \mathcal{R}_{min}}{2} \cdot \cos(\gamma \cdot N_R) \quad (4.22)$$

As equações acima mencionadas foram organizadas numa tabela de Microsoft Excel, onde se obtiveram vários valores em função dos instantes de tempo t . Aos mesmos correspondem os ângulos de rotação $\Omega.t$, cada um os valores respetivos dos ângulos γ e, conseqüentemente, valores de relutâncias do entreferro \mathcal{R} . O fluxo na bobina enrolada no polo é dado por $N_{espiras} \cdot \phi_p$.

A tensão induzida calcula-se com a razão entre a diferença de fluxo e do tempo entre o passo utilizado e o valor anterior.

$$U = \frac{\Delta\phi_p}{\Delta t} \quad (4.23)$$

5 Simulação e resultados

Concluída a fase de dimensionamento dos geradores, procedeu-se aos testes de funcionamento dos mesmos.

Para tal é utilizado um programa de elementos finitos que, consoante os valores introduzidos, permite analisar a interação entre os elementos constituintes, numa fase inicial, e a obtenção de gráficos que representam valores obtidos referentes aos principais parâmetros dos geradores.

Como já referido, foram efetuadas pequenas alterações na geometria de ambos os geradores com objetivo de facilitar a simulação no programa. Como tal, houve a necessidade de se fazer alguns testes preliminares ao funcionamento das mesmas com o objetivo de perceber se as alterações seriam realmente úteis.

Para além disso seguiu-se um plano de testes que consistiu em, primeiramente, simular os geradores sem ter em atenção os valores introduzidos. Deste modo, se algo não ocorresse conforme o esperado durante os testes seguintes, a probabilidade de ser um erro de geometria seria reduzida.

Antes de se iniciarem os testes foi necessário definir o material constituinte de cada elemento dos geradores, o que exigiu a introdução dos parâmetros da tabela seguinte. Para cada parte foi apenas necessário selecionar se seriam constituídos por ar ou por ferro.

Tabela 5.1 - Valores teóricos do ferro e do ar

Permeabilidade do ar	Condutividade elétrica do ferro	Permeabilidade relativa do ferro
1	10E+7 S/m	5000

No caso do Neodímio Ferro Boro, foram apurados os valores a utilizar de condutividade elétrica e de permeabilidade relativa, indicados na tabela seguinte.

Tabela 5.2 - Valores teóricos do Neodímio-ferro-boro

Condutividade elétrica do Neodímio-ferro-boro	Permeabilidade relativa do Neodímio-ferro-boro
0.667 S/m	1.04

5.1 Gerador de baixa rotação

A figura seguinte ilustra as linhas de fluxo do gerador. Para a obtenção das mesmas foi necessário atribuir determinadas características distintas ao material constituinte do estator, o ferro e os ímanes, e ao rotor.

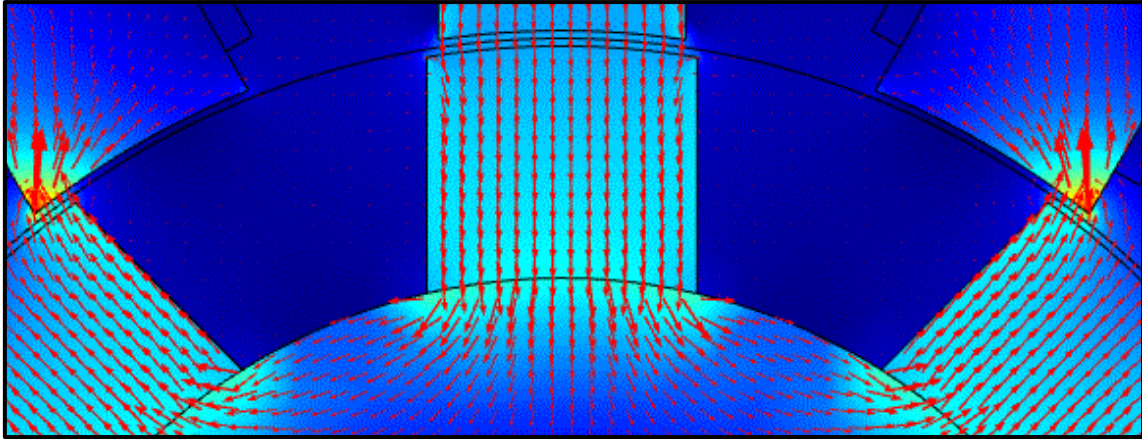


Figura 5.1 – Ilustração das linhas de fluxo magnético do gerador de baixa rotação

No caso dos ímanes, a direção de fluxo que passa pelos mesmos é radial. A figura seguinte ilustra, em cada margem da imagem, dois dos ímanes que estão no estator, cuja disposição foi pensada de modo a haver um entre cada par de polos do estator.

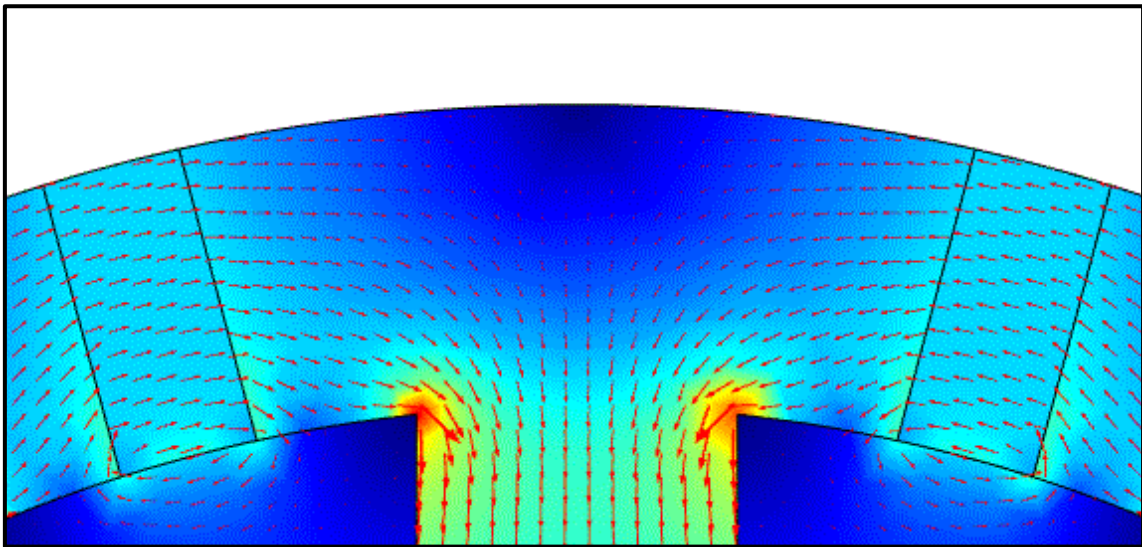


Figura 5.2 - Direção das linhas de fluxo no interior dos ímanes do gerador de baixa rotação

Com recurso às expressões utilizadas no dimensionamento do capítulo anterior, foi possível obter valores de diferentes variáveis para o gerador de baixa rotação. A tabela seguinte resume as expressões cujas variáveis não são dependentes de t .

Tabela 5.3 – Valores de entreferro mínimo e máximo e valor de relutância em relação aos ímanes relativos ao gerador de baixa rotação

δ_{min}	δ_{max}	\mathcal{R}_{iman}
0.48 mm	13.27 mm	331573 A/Wb

No que diz respeito às variáveis que dependem de t , foram feitos cálculos num intervalo de tempo de $0s < t < 0.5s$ com recurso ao Microsoft Excel. A tabela seguinte mostra uma síntese das expressões em que as variáveis dependem do tempo para $t=0.2$ s e para $t=0.5$ s.

Tabela 5.4 – Valores que dependem de t relativos ao gerador de baixa rotação

	$t=0.2$	$t=0.5$
Φ_p	4×10^{-3} Wb	5.9×10^{-3} Wb
B	27×10^{-5} T	37×10^{-5} T
H	213.76 A·m ⁻¹	294.91 A·m ⁻¹
γ_{NS}	7.27°	18.59°
γ_{N1}	7.54°	18.85°
γ_{N2}	7.80°	19.11°
U	7.75 V	0.3529 V

O gráfico seguinte representa a variação de tensão durante $t=0.5$ s. O time step utilizado foi de $5E-4$ e representa um ensaio feito em vazio. A velocidade de rotação, referida na tabela 4.1, é de 360 rpm.

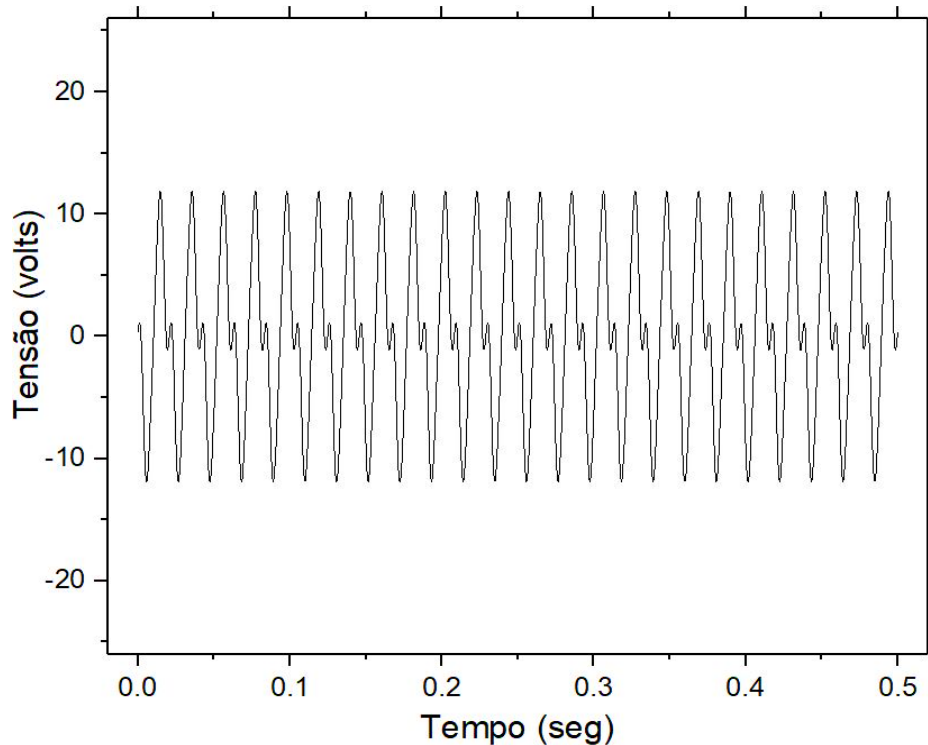


Figura 5.3 – Tensão obtida no gerador de baixa rotação

De um modo semelhante, foi obtida a variação do fluxo num polo do estator.

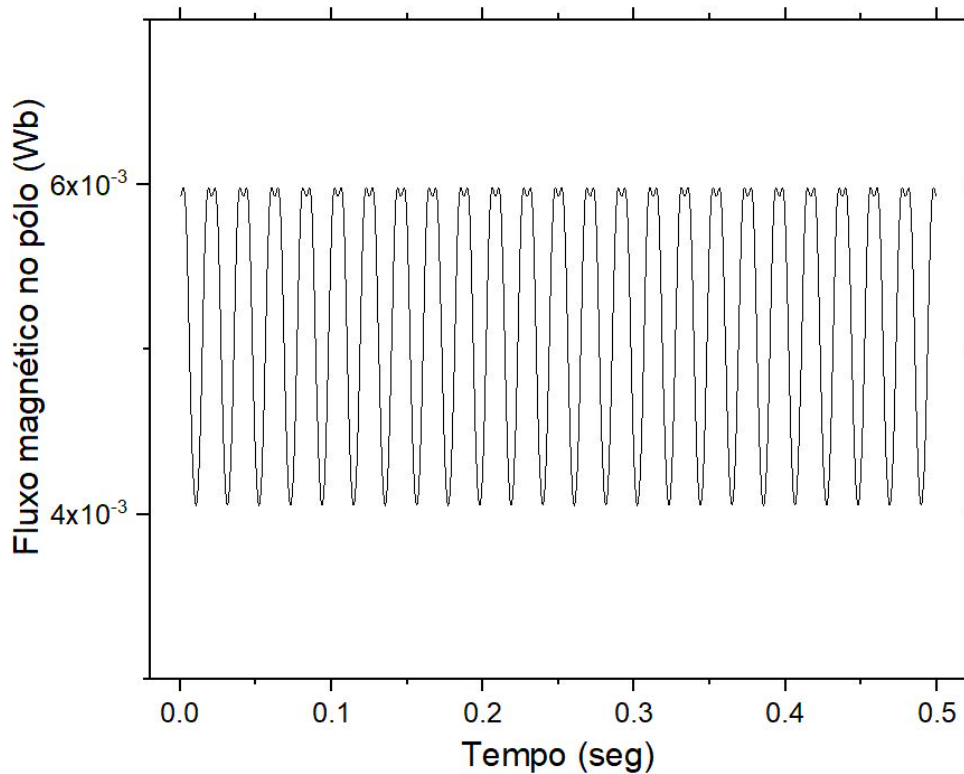


Figura 5.4 – Fluxo por polo obtido no gerador de baixa rotação

5.2 Gerador de elevada rotação

A figura seguinte ilustra as linhas de fluxo do gerador. Os passos seguidos para a obtenção das mesmas foram semelhantes aos que foram seguidos no caso do gerador de baixa rotação. A imagem consegue ser mais abrangente pois as medidas deste gerador são menores quando comparadas com o anterior.

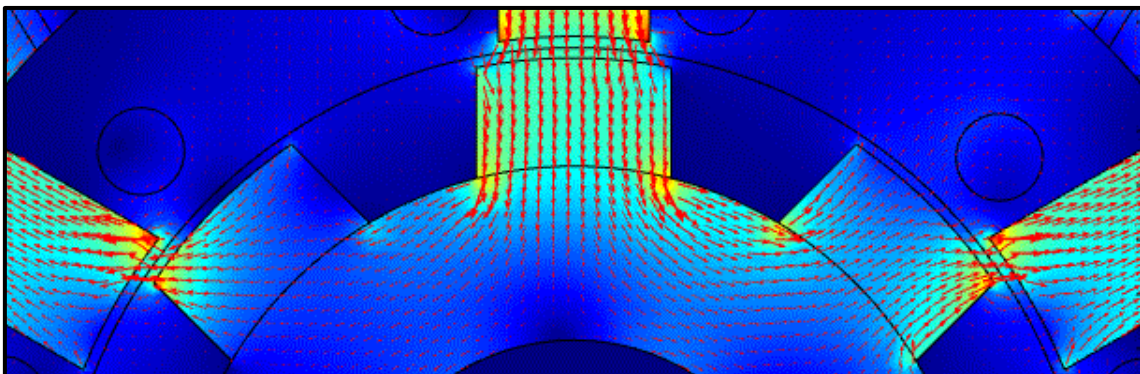


Figura 5.5 – Ilustração das linhas de fluxo magnético do gerador de elevada rotação

No caso do gerador de elevada rotação, o fluxo é igualmente radial aos ímanes. A figura seguinte ilustra dois dos ímanes que estão no estator. Estes são colocados aos pares entre cada dois polos do estator.

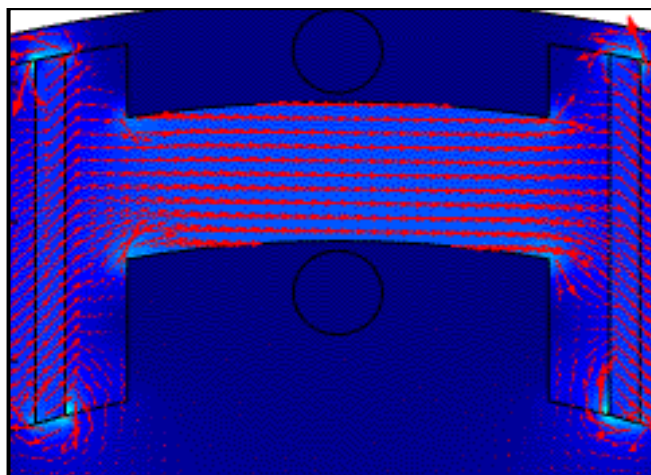


Figura 5.6 – Direção das linhas de fluxo no interior dos ímanes do gerador de elevada rotação

De um modo semelhante à tabela 5.3, foram obtidos valores de diferentes variáveis para o gerador de elevada rotação, representados na tabela seguinte.

Tabela 5.5 - Valores de entreferro mínimo e máximo e valor de relutância dos ímanes relativos ao gerador de elevada rotação

δ_{min}	δ_{max}	$\mathcal{R}_{íman}$
0.48 mm	31.01 mm	57664.8 A/Wb

A tabela seguinte apresenta uma síntese das expressões em que as variáveis dependem do tempo, para $t=0.2$ s e para $t=0.5$ s, no caso do gerador de elevada rotação.

Tabela 5.6 – Valores que dependem de t relativos ao gerador de elevada rotação

	$t=0.2$	$t=0.5$
Φ_P	5.2×10^{-3} Wb	6×10^{-4} Wb
B	1×10^{-3} T	1×10^{-4} T
H	79.62 A·m ⁻¹	92.62 A·m ⁻¹
γ_{NS}	41.73 °	103.93 °
γ_{N1}	41.47 °	103.67 °
γ_{N2}	41.20 °	103.41 °
U	-21.20 V	3.65 V

À semelhança do anterior, foi também obtido um gráfico que representa a variação de tensão no intervalo de tempo $0\text{ s} < t < 0.5\text{ s}$. A velocidade de rotação é de 2000 rpm e está apontada na tabela 4.2.

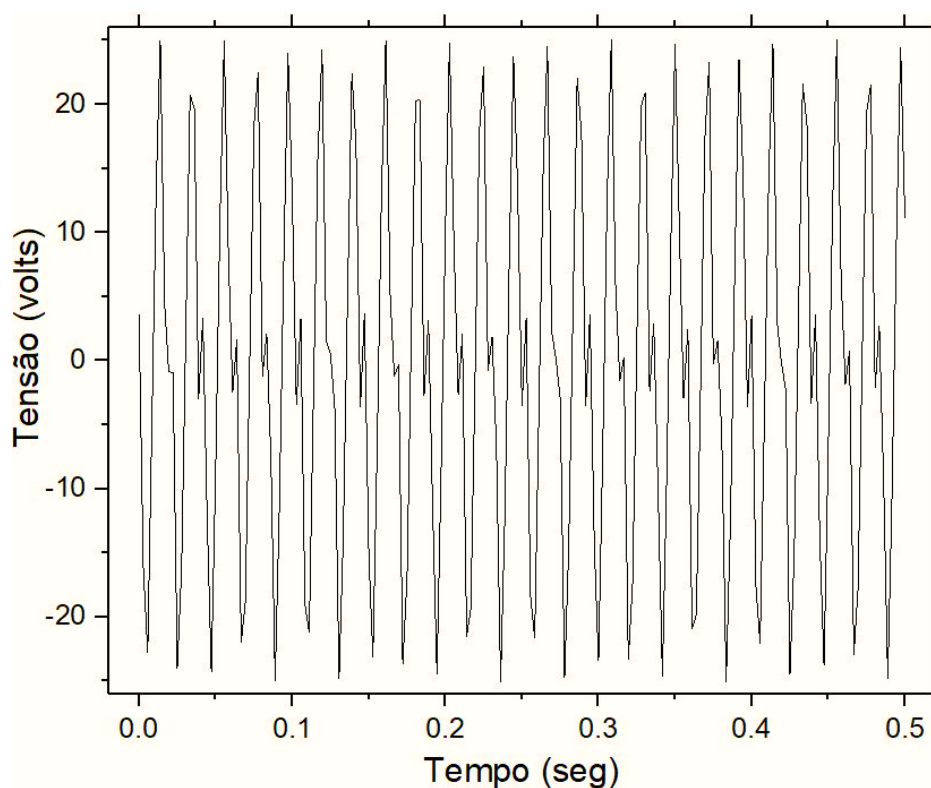


Figura 5.7 – Tensão obtida no gerador de elevada rotação

A variação do fluxo num pólo do estator obtida é mostrada no gráfico seguinte.

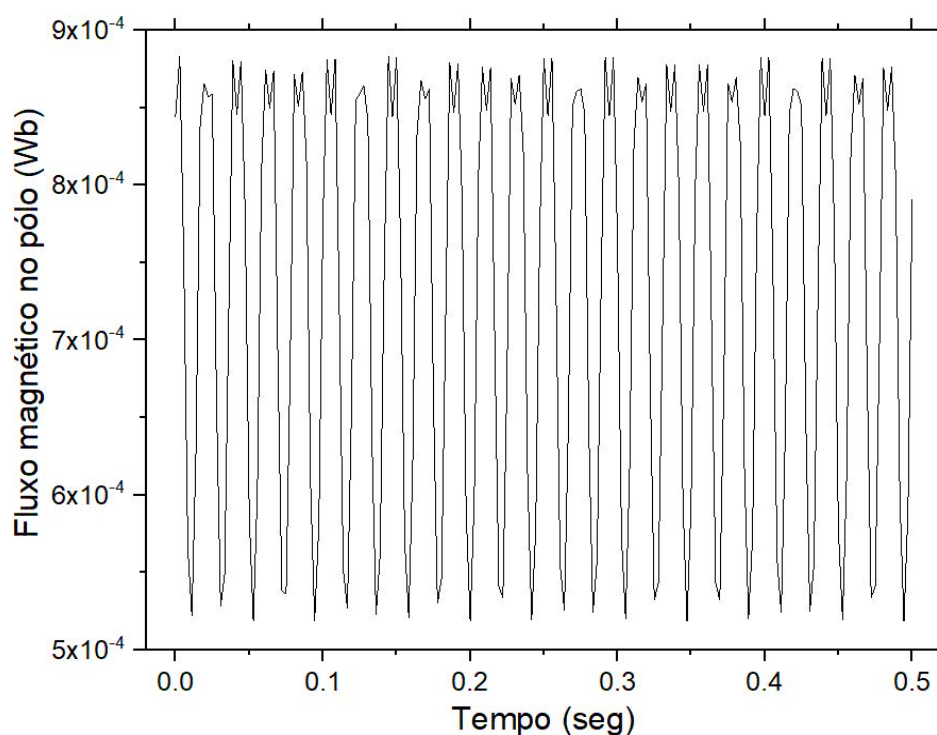


Figura 5.8 – Fluxo por pólo obtido no gerador de elevada rotação

5.3 Simulações

Após o dimensionamento, e com recurso ao mesmo programa de elementos finitos, como previamente referenciado, procedeu-se à simulação dos geradores.

A figura seguinte ilustra a tensão aos terminais de uma bobina sujeita apenas à ação dos ímanes, no gerador de baixa rotação. Ainda que o gerador seja de baixa rotação, foi possível obter uma tensão de aproximadamente 50 Hz.

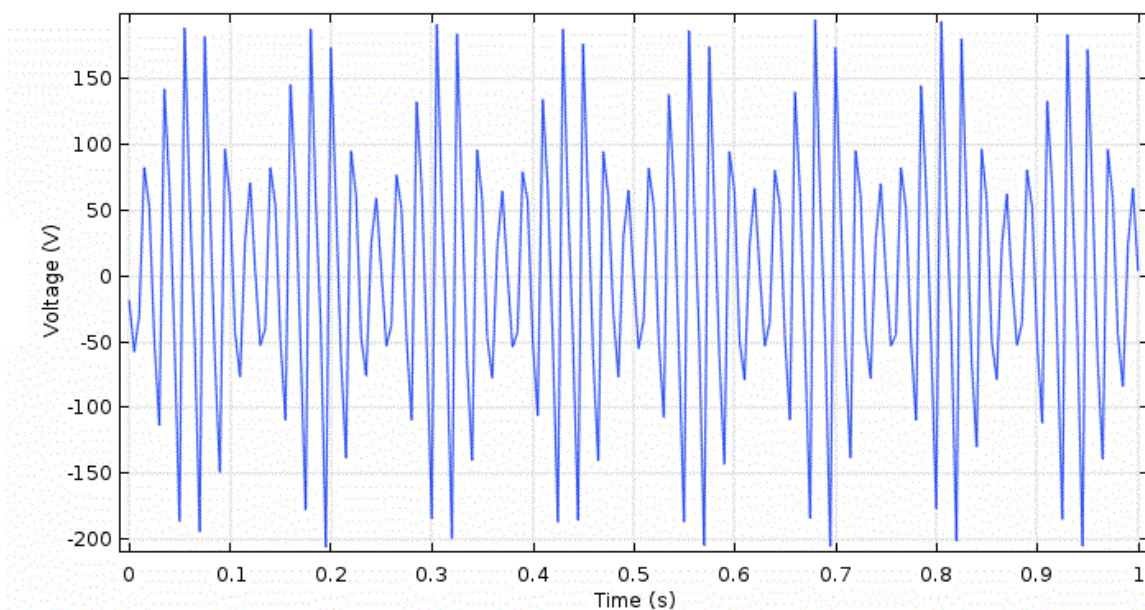


Figura 5.9 – Tensão obtida aos terminais de uma bobina do gerador de baixa rotação

De um modo semelhante, no gerador de elevada rotação continua a ser verificada uma tensão de valor razoável, no entanto, não possibilitou a explicação para a envolvente de 8 Hz.

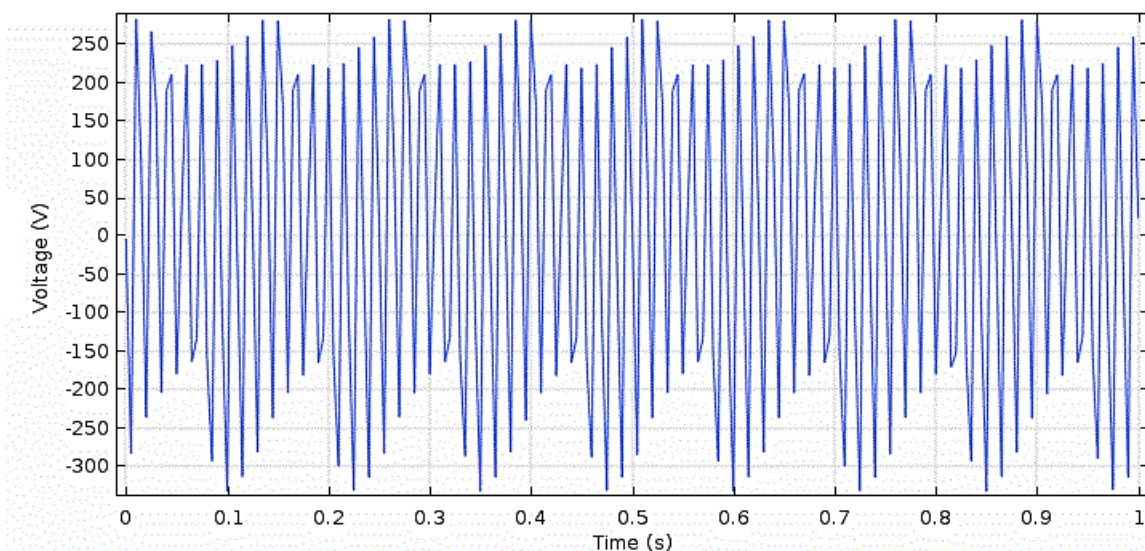


Figura 5.10 – Tensão obtida aos terminais de uma bobina do gerador de elevada rotação

As tensões foram obtidas com recurso ao programa de elementos finitos e ao Microsoft Excel. No primeiro caso trata-se da tensão aos terminais de uma bobina com os geradores a funcionar em vazio, cujo resultado depende dos diferentes valores de input requeridos pelo programa para obtenção do resultado final.

Com o Microsoft Excel o objetivo foi o de conseguir resultados de forma mais rápida, o que foi possível com a introdução das equações de dimensionamento e a visualização de valores de forma instantânea. Em anexo encontra-se uma amostra da tabela utilizada onde é possível, entre outros, a visualização do time step utilizado.

6 Conclusão

Foram dimensionados dois geradores de diferentes características. Um foi inspirado no gerador descrito em [35] e o outro foi idealizado com base na bibliografia consultada ao longo da escrita do capítulo 3, *Estado de Arte*. O primeiro é considerado de elevada rotação (2000 rpm) e o outro de baixa rotação (360 rpm).

No capítulo 4 foram apresentadas as medidas dos geradores e foi feito um dimensionamento teórico cujos resultados, conseguidos com recurso ao Microsoft Excel, permitiram a obtenção de gráficos relacionados com a tensão e com o fluxo que passa por polo. Os valores teóricos e os gráficos obtidos com o programa referido e com o programa de elementos finitos foram colocados no capítulo 5.

Os gráficos resultantes do programa de elementos finitos mostraram coerência para ambos os geradores, embora exista uma inesperada envolvente de 8 Hz, que não foi possível justificar.

Deste modo, verifica-se que é possível obter conversão elétrica com um gerador cujas rotações por minuto são baixas.

Relativamente ao gerador de baixa rotação, os gráficos obtidos através do Microsoft Excel revelam consistência nos resultados, uma vez que as formas de onda apresentadas mostram seguir um padrão certo ao longo do tempo quer no gráfico de tensão quer no gráfico do fluxo.

Uma vez que existe maior instabilidade nos resultados do gerador de elevada rotação, verificada pela falta de simetria nos gráficos obtidos e, verificando-se a sua viabilidade na obtenção de conversão elétrica, seria mais provável a aplicação do gerador de baixa rotação num aproveitamento de energia das ondas.

Ainda assim, tal não seria possível sem a obtenção de mais resultados relacionados com outros parâmetros que não foram analisados no presente trabalho.

Bibliografia

- [1] Falcão, A. “*Modelling of Wave Energy Conversion*”. Instituto Superior Técnico, 2014.
- [2] A. Hussain, S. M. Arif, and M. Aslam. “*Emerging renewable and sustainable energy technologies: State of the art,*” Elsevier Ltd. República da Coreia, Maio 2017. doi:10.1016/j.rser.2016.12.033
- [3] Rusu, E., & Onea, F. “*Study on the influence of the distance to shore for a wave energy farm operating in the central part of the Portuguese nearshore. Energy Conversion and Management*” (Vol. 114). Roménia, Fevereiro 2016. doi: 10.1016/j.enconman.2016.02.020
- [4] “*Diretora Regional destaca potencial marítimo dos Açores para estudo e teste de tecnologias para abastecimento de energia.*” [Online]
Disponível em:
http://www.azores.gov.pt/NR/exeres/50938A20-A07F-45C5-9D1BF81BD7BBCC47,frameless.htm?wbc_purpose=basic&WBCMODE=presentationunpublished.
- [5] Moura Paredes, G. “*Estudo experimental de um sistema offshore para produção de energia das ondas.*” Dissertação de Mestrado, FEUP, Julho 2008.
https://www.researchgate.net/publication/230737216_Estudo_experimental_de_um_sistema_offshore_para_producao_de_energia_das_ondas
- [6] Rodrigues, J. T. “*Energia das Ondas: dispositivo de conversão oscilante axial.*” Dissertação de Mestrado, Instituto Politécnico de Bragança, Março 2017.
<https://bibliotecadigital.ipb.pt/bitstream/10198/14642/1/Jean-Luc%20Teixeira%20Rodrigues.pdf>
- [7] Portal das Energias Renováveis, “*Tecnologias: energia das ondas: sistemas na costa*” [Online]
Disponível em:
http://energiasrenovaveis.com/DetailheConceitos.asp?ID_conteudo=55&ID_area=7&ID_sub_area=22
- [8] Mehmet Ugur Guçel, A. S. “*Towards Calculating and Analysing Energy Potential from Waves and Currents within the Continental Shelf of Turkey in the Eastern Mediterranean Sea*”. Kayseri, Turquia 2017. doi: 10.13140/RG.2.2.28804.01922
- [9] Cruz, J. & Sarmiento, A. “*Energia Das Ondas: Introdução aos Aspectos Tecnológicos, Económicos e Ambientais*”. Instituto do Ambiente, Alfragide, Outubro 2004.
http://www.energiasrenovaveis.com/images/upload/Energias_ondas_Cruz_1.pdf

- [10] “*Kaedah Penjanaan Tenaga Ombak*” [Online]
Disponível em:
<http://ibnukhalduncrew.blogspot.com/2016/06/kaedah-penjanaan-tenaga-ombak.html>
- [11] Carneiro, J. “*Fundamentos sobre Energia Das Ondas.*” Material de Apoio à UC de Energias Renováveis II, Universidade do Minho, 2017.
- [12] “*Pelamis Wave Energy Converter.*” [Online]
Disponível em:
<https://alchetron.com/Pelamis-Wave-Energy-Converter#>
- [13] Luís C. Neto, *Material de apoio à unidade curricular Turbomáquinas.* Escola Superior de Tecnologia – IPCB, 2014-2015.
<https://drive.google.com/file/d/1YIEq89LoAwbrTTLNJRaxtO2jmg5yZGST/view?usp=sharing>
- [14] Christof, O. “*Estudo de métodos para a conversão da energia das ondas oceânicas.*” Dissertação de Mestrado, FCUL, 2018.
https://repositorio.ul.pt/bitstream/10451/34634/1/ulfc124677_tm_Christof_Omar.pdf
- [15] Corvelo, E. “*Análise e comparação do desempenho de uma central de energia das ondas do tipo coluna de água oscilante equipada com turbinas de acção e turbinas Wells.*” Dissertação de Mestrado, IST, 2011.
<https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/395142732839/dissertacao%20eugenio%20corvelo.pdf>
- [16] Nunes, C., Pires, R., & Pinto, D. “*Estudo aprofundado das diferentes turbomáquinas, Turbinas de acção*”. Escola Superior de Tecnologia – IPCB, 2014-2015.
<https://drive.google.com/file/d/1wqb85peG2X6GKfa7fzJCZVpLiXQ051P-/view?usp=sharing>
- [17] “*Espanha: Turbina inovadora gera energia barata com ondas do mar.*” [Online]
Disponível em:
<https://pplware.sapo.pt/high-tech/espanha-turbina-inovadora-gera-energia-barata-ondas-do-mar/#comments>
- [18] “*Parque de ondas da Aguçadoura*” [Online]
Disponível em:
<http://www.energiasrenovaveiscom/etiqueta/pelamis/>
- [19] Mubeen, M. “*Brushless DC Motor Primer.*” Radford, VA, Julho 2008.
<https://www.pulseroller.com/files/NA/Sales%20Literature/Motorized%20Roller%20Primer.pdf>
- [20] Lima, J. “*Gerador de baixa rotação para aproveitamento de energia das ondas.*” Dissertação de Mestrado, FCT-UNL, 2010.
https://run.unl.pt/bitstream/10362/4117/1/Lima_2010.pdf

- [21] Silva Ferreira, Â. P. B. “*Projecto de uma Máquina de Ímanes Permanentes de Fluxo Axial Orientado para os Sistemas de Conversão de Energia Eólica.*” Dissertação de Doutoramento, Instituto Politécnico de Bragança, Setembro 2011. <http://hdl.handle.net/10198/6834>
- [22] Lima J., Pronto A., Neves M.V. “*Transverse Flux Permanent Magnet Generator for Ocean Wave Energy Conversion. In: Camarinha-Matos L.M. (eds) Technological Innovation for Sustainability*”. DoCEIS 2011. IFIP Advances in Information and Communication Technology, vol 349. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-19170-1_59
- [23] Parviainen, A. “*Design of Axial-Flux Permanent-Magnet Low-Speed Machines and performance comparison between Radial-Flux and Axial-Flux Machines.*” Dissertação de Doutoramento, Lappeenranta University of Technology, Finlândia, Abril 2005. <https://drive.google.com/file/d/1YjCpBzCoq5ukQ1AyJpeHNTJ2Kjo0HMCt/view?usp=sharing>
- [24] Neves Martins, F. J. “*Máquina Síncrona Virtual.*” Dissertação de Mestrado, IST, Outubro 2013. <https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/395145919069/Dissertacao.pdf>
- [25] Pronto, A. *Material de apoio à unidade curricular Tecnologia dos Materiais para a Energia.* FCT-UNL 2018. https://drive.google.com/file/d/1fLvmLz_6iXia7jcAHFiaYlZ_X4-Ds2SZ/view?usp=sharing
- [26] Heikkilä, T. “*Permanent Magnet Synchronous Motor for Industrial Inverter Applications - Analysis and Design.*” Lappeenranta University of Technology, Finlândia, 2002. <https://drive.google.com/file/d/1HGn4ebsf1RmcvCtQVIXNuaIC2OsuOQcR/view?usp=sharing>
- [27] Dorrell, D. G., Hsieh, M. F., Popescu, M., Evans, L., Staton, D. A., & Grout, V. “*A review of the design issues and techniques for radial-flux brushless surface and internal rare-earth permanent-magnet motors.*” IEEE Transactions on Industrial Electronics, 3741–3757, 2011. <https://doi.org/10.1109/TIE.2010.2089940>
- [28] J. F. Gieras, R.-J. Wang e M. J. Kamper, “*Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machines*” 2ª Edição 2008 in Minderico Maçaneiro, C.” *Projeto de um alternador síncrono em disco para um gerador com energia das ondas.*” FCT-UNL, Maio 2014.
- [29] Yi, L., & Zhao, M. “*Doubly salient permanent magnet motor development review Proceedings*” - 3rd International Conference on Instrumentation and Measurement, Computer, Communication and Control, 1513–1516, 2013. doi: 10.1109/IMCCC.2013.337

- [30] Sitapati, K., & Krishnan, R. “*Performance Comparisons of Radial and Axial Field, Permanent Magnet, Brushless Machine.*”, IEEE Transactions on Industry Applications, 1219–1226, Outubro 2001.
<https://drive.google.com/file/d/1J4xD4UPYfPltb2N110KjB12ZqNa6GF3y/view?usp=sharing>
- [31] Chau, K. T., Ying Fan, & Ming Cheng. “*A novel three-phase doubly salient permanent magnet machine for wind power generation.*” 366–372, China 2004.
 doi: 10.1109/IAS.2004.1348434
- [32] Stegmann, J. A., Kamper, M. J., & Member, S. “*Design Aspects of Medium Power Double Rotor Radial Flux Air-cored PM Wind Generators.*” Department of Electrical and Electronic Engineering University of Stellenbosch, 3634–3640, África do Sul, 2009.
 doi: 10.1109/ECCE.2009.5316257
- [33] Widyan, M. S., & Hanitsch, R. E. “*High-power density radial-flux permanent-magnet sinusoidal three-phase three-slot four-pole electrical generator.*” International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 1221–1227, 2012.
 doi: 10.1016/j.ijepes.2012.05.069
- [34] Kumar, R. R., Singh, S. K., & Srivastava, R. K. “*Design Analysis of Radial Flux Dual Stator Five Phase Permanent Magnet Synchronous Generator.*” IEEE International Conference on Power Electronics, Indian Institute of Technology, Índia 2014.
 doi: 10.1109/PEDES.2014.7042100
- [35] Xu, W., & He, M. “*Novel 6/7 Stator/Rotor Hybrid Excitation Doubly Salient Permanent Magnet Machine.*” School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, China 2016.
 doi: 10.1109/TMAG.2016.2526623
- [36] Wu, D., Shi, J. T., Zhu, Z. Q., & Liu, X. “*Electromagnetic Performance of Novel Synchronous Machines with Permanent Magnets in Stator Yoke*” Department of Electronic and Electrical Engineering, University of Sheffield, Reino Unido 2014.
 doi: 10.1109/TMAG.2014.2317794
- [37] Johnson, M., Englebretson, S., Gardner, M. C., Toliyat, H. A., & Tschida, C. “*Design, Construction and Analysis of a Large Scale Inner Stator Radial Flux Magnetically Geared Generator for Wave Energy Conversion.*” IEEE Transactions on Industry Applications, 54(4), 3305 – 3314, Abril 2018.
 doi: 10.1109/TIA.2018.2828383
- [38] Matias, J. “*Máquinas Eléctricas de Corrente Contínua com e sem escovas, motores de passo e servomotores.*” 1ª Edição. Plátano Editora, Lisboa 2015.
- [39] Sullivan, D. L. O., & Lewis, A. W. “*Generator Selection and Comparative Performance in Offshore Oscillating Water Column Ocean Wave Energy Converters*” IEEE Transactions on Energy Conversion, 26(2), 603 – 614, Janeiro 2011.
 doi: 10.1109/TEC.2010.2093527

[40] Yildirim, M., & Corovic, S. “*Influence of Material and Geometrical Properties of Permanent Magnets on Cogging Torque of BLDC.*” *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 8(2), 2656–2662, 2018.
<https://www.etasr.com/index.php/ETASR/article/view/1725/pdf>

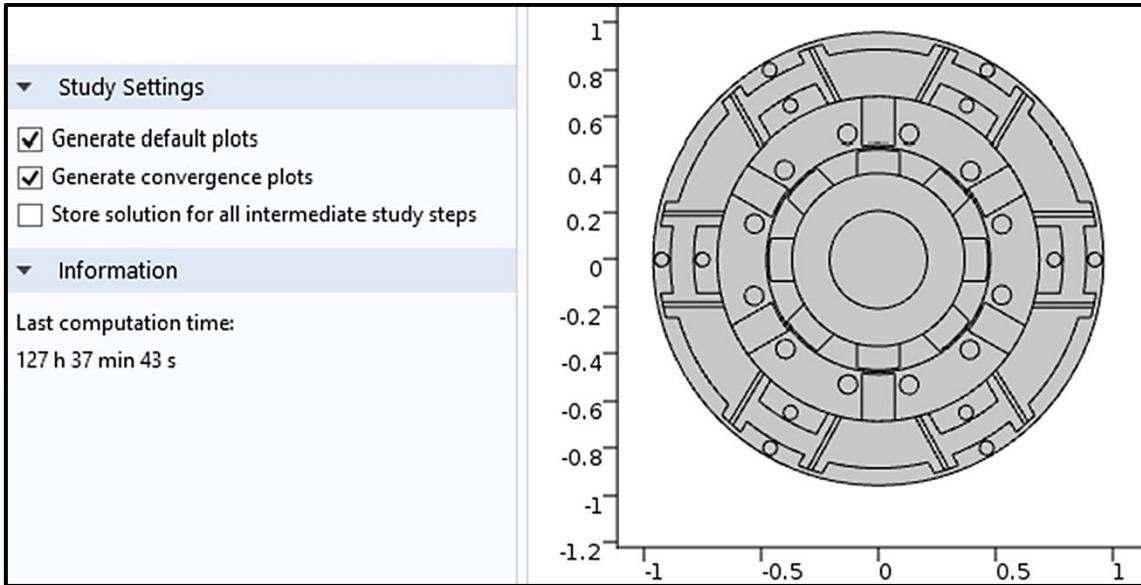
Anexos

Shaft rotation speed - n - (rev/min, rpm)						
Frequency - f - (Hz)	Number of poles - p -					
	2	4	6	8	10	12
10	600	300	200	150	120	100
20	1200	600	400	300	240	200
30	1800	900	600	450	360	300
40	2400	1200	800	600	480	400
50 ¹⁾	3000	1500	1000	750	600	500
60 ²⁾	3600	1800	1200	900	720	600
70	4200	2100	1400	1050	840	700
80	4800	2400	1600	1200	960	800
90	5400	2700	1800	1350	1080	900
100	6000	3000	2000	1500	1200	1000

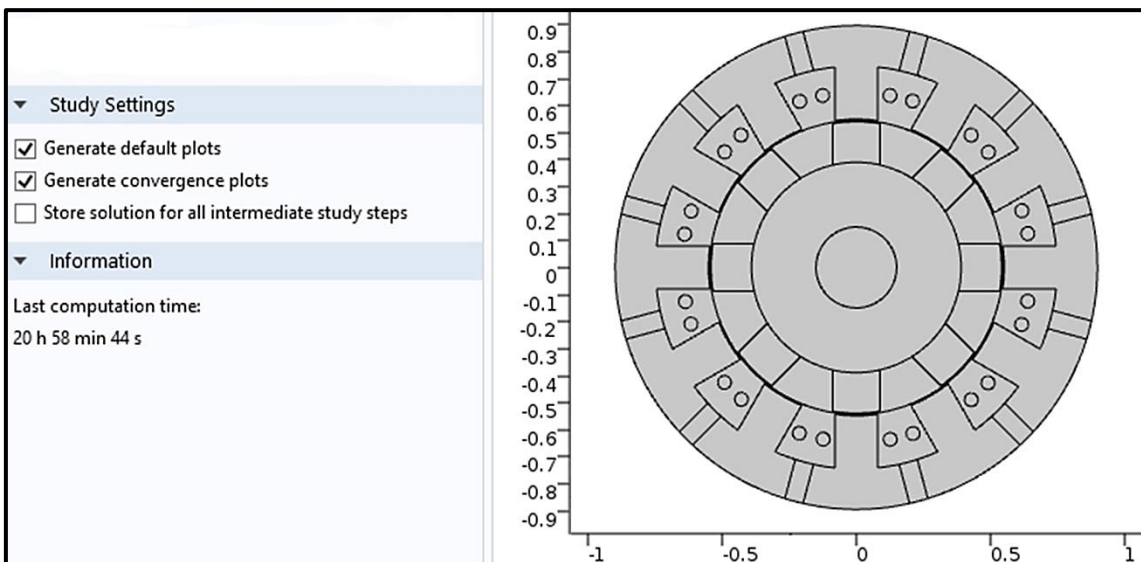
A 1 - Tabela demonstrativa da relação entre número de polos do estator e respectiva frequência associada, com os valores de rpm relacionados

t	γ_{NR}	γ_{1R}	γ_{2R}	\mathcal{E}_{NR}	\mathcal{E}_{1R}	\mathcal{E}_{2R}	Φ_E	Φ_D	Φ_{tot}	u	B	H
0	-0,2617994	0	0,2618	1001507	44762,3	1001507	0,00296	0,00296	0,00593	0,3529	0,00037	294,910456
0,0005	-0,2429498	0,01885	0,28065	914907	52000,6	1080869	0,00279	0,00315	0,00594	0,92797	0,00037	295,202983
0,001	-0,2241003	0,0377	0,2995	823034	73551,1	1151192	0,00262	0,00333	0,00595	1,12846	0,00037	295,972206
0,0015	-0,2052507	0,05655	0,31835	727974	108925	1210879	0,00247	0,0035	0,00597	0,76531	0,00037	296,907627
0,002	-0,1864012	0,0754	0,3372	631883	157319	1258576	0,00234	0,00364	0,00598	-0,25638	0,00037	297,542016
0,0025	-0,1675516	0,09425	0,35605	536943	217634	1293200	0,00222	0,00376	0,00598	-1,90472	0,00037	297,329494
0,003	-0,1487021	0,1131	0,3749	445309	288503	1313965	0,00211	0,00383	0,00595	-4,01213	0,00037	295,750611
0,0035	-0,1298525	0,13195	0,39375	359061	368316	1320400	0,00202	0,00386	0,00588	-6,30439	0,00037	292,424827
0,004	-0,1110029	0,1508	0,4126	280156	455262	1312359	0,00195	0,00383	0,00577	-8,4656	0,00036	287,198918
0,0045	-0,0921534	0,16965	0,43145	210384	547368	1290025	0,00188	0,00375	0,00563	-10,2165	0,00035	280,18151
0,005	-0,0733038	0,1885	0,45029	151330	642543	1253904	0,00183	0,00363	0,00546	-11,3742	0,00034	271,712751
0,0055	-0,0544543	0,20735	0,46914	104334	738627	1204817	0,0018	0,00348	0,00527	-11,8736	0,00033	262,284321
0,006	-0,0356047	0,22619	0,48799	70462,2	833439	1143876	0,00177	0,00331	0,00508	-11,7506	0,00032	252,441917
0,0065	-0,0167552	0,24504	0,50684	50483,7	924827	1072466	0,00175	0,00313	0,00488	-11,105	0,0003	242,701434
0,007	0,0020944	0,26389	0,52569	44851,9	1010717	992208	0,00175	0,00294	0,00469	-10,061	0,00029	233,496128
0,0075	0,02094395	0,28274	0,54454	53694,5	1089161	904922	0,00176	0,00277	0,00453	-8,73835	0,00028	225,156237
0,008	0,03979351	0,30159	0,56339	76810,9	1158376	812590	0,00177	0,00261	0,00438	-7,23624	0,00027	217,91274
0,0085	0,05864306	0,32044	0,58224	113676	1216793	717308	0,0018	0,00246	0,00426	-5,62812	0,00027	211,914386
0,009	0,07749262	0,33929	0,60109	163454	1263085	621237	0,00184	0,00232	0,00417	-3,96319	0,00026	207,249055

A 2 – Amostra do documento Excel utilizado para a obtenção de resultados das expressões utilizadas no dimensionamento e dos gráficos 5.3, 5.4, 5.7 e 5.8.



A 3 – Exemplo demonstrativo do tempo de simulação do programa utilizando o gerador de elevada rotação



A 4 – Exemplo demonstrativo do tempo de simulação do programa utilizando o gerador de elevada rotação